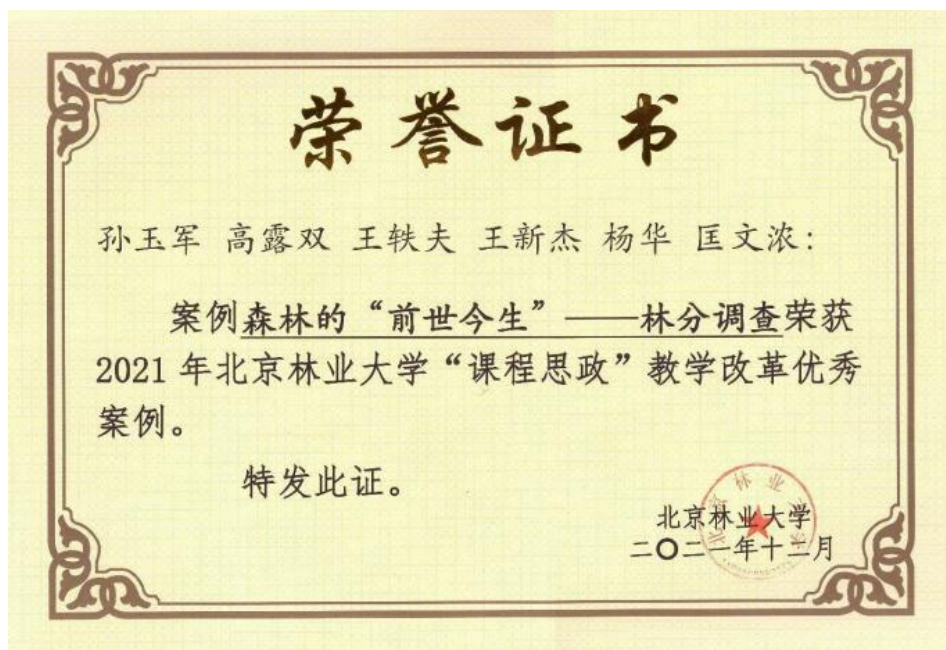


目录

一、教学团队建设成效	1
1、全国高校黄大年式教师团队	1
2、课程思政实施效果	2
二、教师荣誉	3
三、教学课程建设	15
1、国家级一流本科课程《森林经理学》	15
2、“在线开放课程/MOOC 教学”优秀案例	16
3、第三届全国农林课程思政优秀案例	16
4、教学案例建设	17
四、教材建设情况	83
五、教改项目及论文	84
1、教改论文发表情况	84
2、承担教学改革项目情况	84
六、代表性专业实践基地	85
七、育人成效	86
1、获奖情况	86
2、国家级大学生创新创业训练计划项目立项	90
八、应用成果证明	91



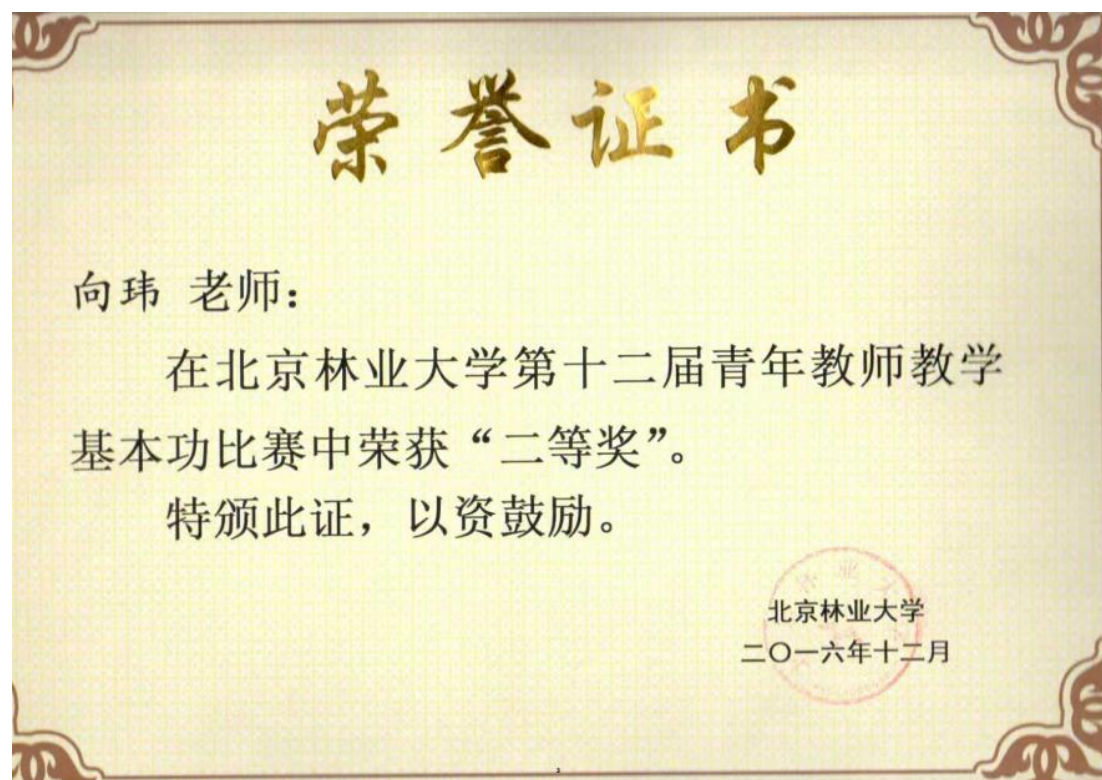
二、教师荣誉

奖励和荣誉名称	姓名	年份
第十批干部人才援疆	向玮	2020
北京林业大学第十二届青年教师教学基本功 比赛二等奖	向玮	2016
北京林业大学第十一届青年教师教学基本功 比赛二等奖	向玮	2015
2020 届本科毕业论文优秀指导教师	向玮	2020
教育教学研究论文二等奖	向玮	2018
科学实验展演大赛一等奖	向玮	2023
全国林草科学实验展演汇演三等奖	向玮	2023
梁希林业科学技术奖科技进步奖二等奖	沈亲	2021
北京市科学技术奖自然科学奖二等奖	王轶夫	2024
梁希林业科学技术奖科学技术进步奖二等奖	王轶夫	2021
教育教学研究论文优秀奖	姜俊	2020
教育教学研究论文优秀奖	耿燕	2018
梁希林业科学技术奖自然科学奖二等奖	耿燕	2024
高等学校科学研究优秀成果奖（科学技术）二 等奖	姜俊	2019
梁希林业科学技术奖一等奖	孙玉军	2016

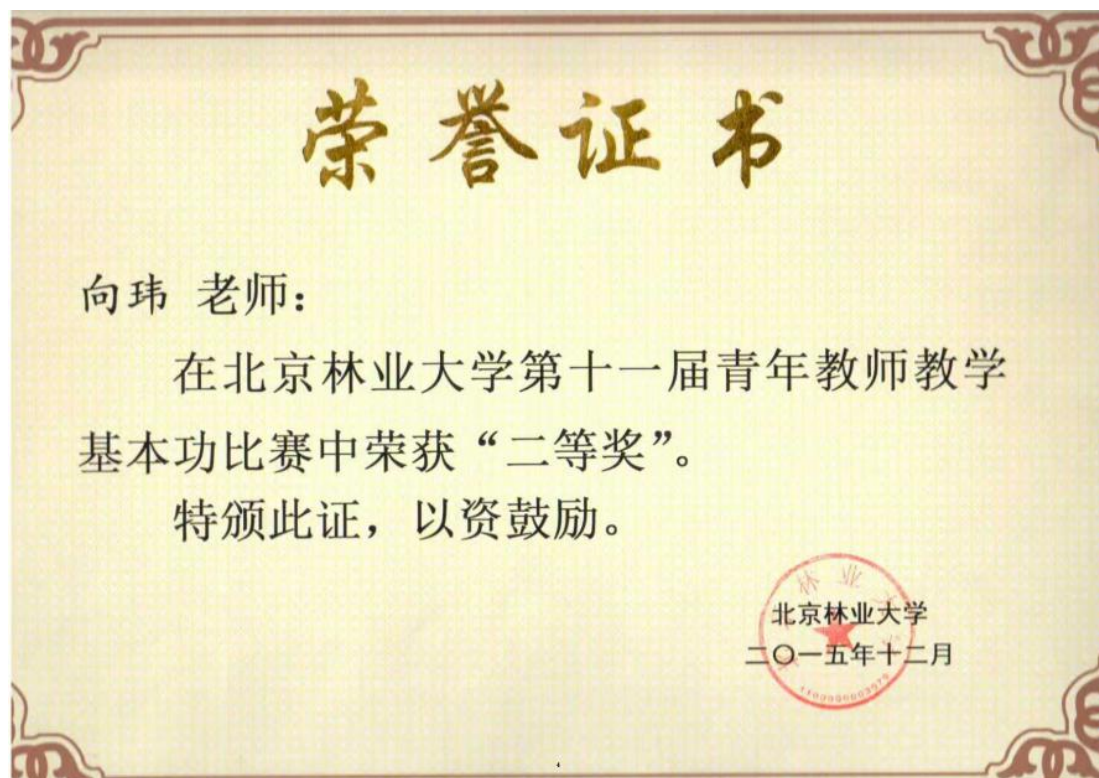
1、第十批干部人才援疆（2020 年）



2、北京林业大学第十二届青年教师教学基本功比赛二等奖（2016 年）



3、北京林业大学第十一届青年教师教学基本功比赛二等奖(2015 年)



4、2020 届本科毕业论文优秀指导教师



5、教育教学研究论文二等奖（2018 年）



6、科学实验展演大赛一等奖（2023 年）



7、全国林草科学实验展演汇演三等奖（2023 年）



8、梁希林业科学技术奖科技进步奖二等奖（2021 年）



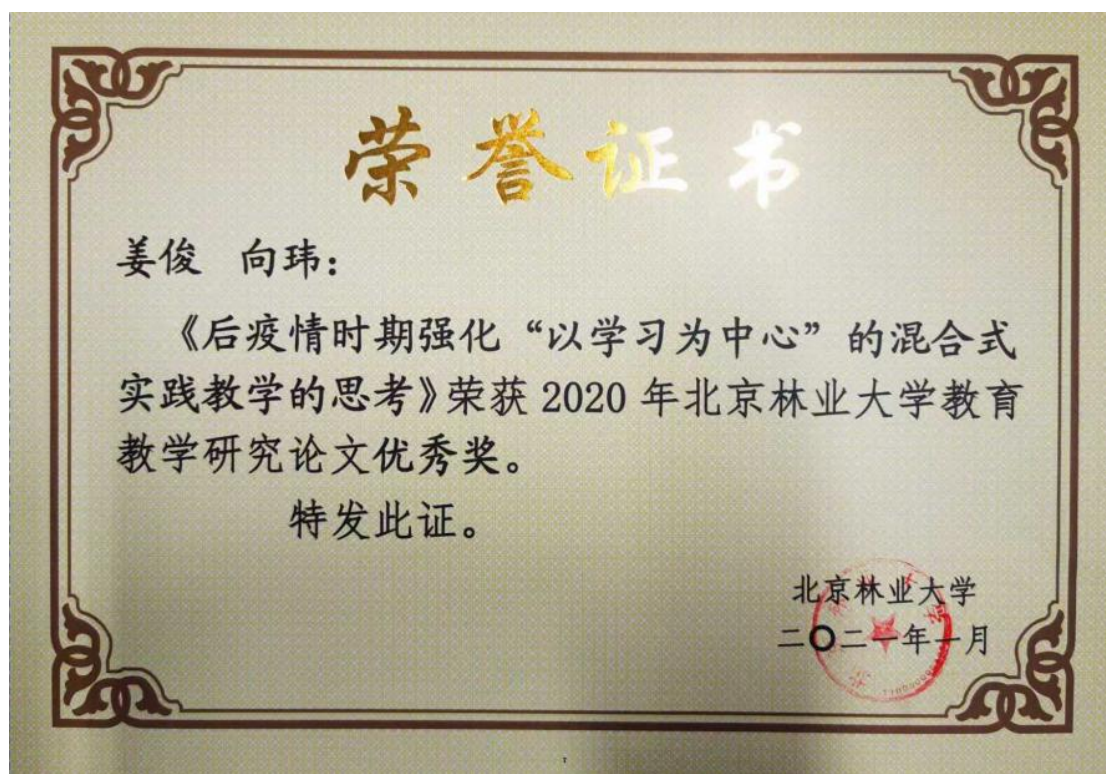
9、北京市科学技术奖自然科学奖二等奖（2024 年）



10、梁希林业科学技术奖科学技术进步奖二等奖（2021 年）



11、教育教学研究论文优秀奖（2020 年）



12、教育教学研究论文优秀奖（2018 年）



13、梁希林业科学技术奖自然科学奖二等奖（2024 年）



14、梁希林业科学技术奖自然科学奖二等奖（2021 年）



15、梁希林业科学技术奖一等奖（2016 年）



三、教学课程建设

序号	获奖类别	获奖等级	获奖成果名称	主要完成人	获奖年度
1	一流本科课程（线下）	国家级	森林经理学	刘琪璟 孟京辉 向 玮	2023
2	在线开放课程/MOOC 教学	国家级	优秀案例	向 玮	2024
3	第三届全国农林课程思政优秀案例	省部级	优秀案例	高露双 匡文浓 李林源 陈贝贝 王轶夫	2023
4	教学案例库建设	不分等级	优秀案例	向 玮 王轶夫	2025

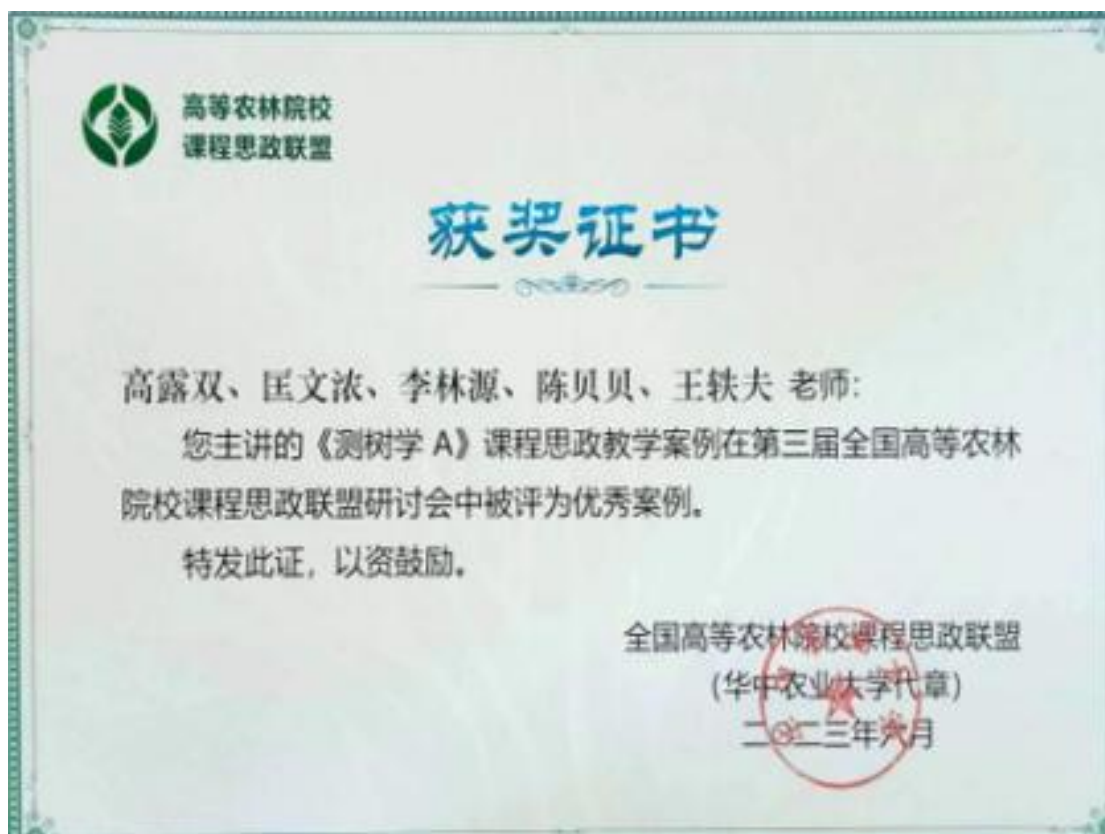
1、国家级一流本科课程《森林经理学》



2、“在线开放课程/MOOC 教学”优秀案例



3、第三届全国农林课程思政优秀案例



4、教学案例库建设

四个教学案例库（激光雷达单木分割、林分发育阶段划分、立地质量评价、生态系统服务多功能性量化）

封面

融合激光雷达的森林全周期多目标经营教学案例库建设方案

主题方向： 林学

专业领域/方向： 森林经理学

适用课程： 森林经理学

作者姓名： 向玮、王轶夫、刘畅、徐德鹏、
陶然、陈梦淇、陶薇、梁传林

工作单位： 北京林业大学林学院

2025 年 9 月 11 日

案例一

激光雷达点云单木分割及参数提取—方法与实例

向玮 刘畅 陶薇

摘要：激光雷达（LiDAR）点云数据为森林资源精准监测提供了高效手段，其中单木分割与参数提取是实现林木个体精细化分析的关键环节。针对复杂森林场景中自动分割算法易受点云密度、树木形态及冠层遮挡影响的问题，本案例库将地基激光雷达与机载激光雷达相融合，弥补了机载激光雷达无法扫描到林冠下层的缺陷；开发树高动态监测、单木参数提取等场景化案例，建立点云数据处理与经营决策联动机制，为天然林可持续经营提供一定科学依据。

Abstract： Light Detection and Ranging (LiDAR) point cloud data provide an efficient means for precise forest resource monitoring, where individual tree segmentation and parameter extraction are crucial links for achieving refined analysis of individual trees. Addressing the issue of automatic segmentation algorithms in complex forest scenes being susceptible to point cloud density, tree morphology, and canopy occlusion, this case library integrates terrestrial LiDAR with airborne LiDAR to compensate for the inability of airborne LiDAR to scan beneath the forest canopy. It develops scenario-based cases such as dynamic tree height monitoring and individual tree parameter extraction, establishing a linkage mechanism between point cloud data processing and forest management decision-making.

关键词：机载激光雷达；地基激光雷达；单木分割；单木参数提取

Keywords： Airborne Laser Scanning ; Terrestrial laser scanning; Individual Tree Segmentation; Individual Tree Parameter Extraction

作者信息：向玮，北京林业大学林学院教授，副院长；刘畅，北京林业大学林学院讲师；陶薇，北京林业大学林学院 2024 级硕士研究生。

1. 案例背景

森林作为陆地生态系统的核心，其结构与动态对全球生态平衡至关重要。传统的森林调查方法在时效性、成本和精度上存在局限，常规遥感技术亦难以全面捕捉森林三维结构。激光雷达（LiDAR）技术具有直接获取高精度三维坐标的能力，丰富了森林资源调查手段，能精确描述森林垂直结构并提取单木参数。然而，在树种多样、冠层复杂、林下干扰多的森林环境中，单一 LiDAR 平台数据（如机载 LiDAR 难以穿透林冠下层）在单木精准分割与参数提取方面仍面临挑战。因此，有效融合无人机、地基 LiDAR 数据，克服单一数据源的不足，提升复杂场景下单木分析的精度，并将高精度数据应用于森林三维结构可视化、动态监测，为科学经营决策服务，是当前林业研究与实践的关键方向。

2. 案例内容

2.1 单木分割

单木分割的核心目的，是从激光雷达点云数据中精准分离出每一棵独立树木的点云数据，为后续森林资源分析、树木参数提取及林业研究提供基础数据支撑。

2.2 单木参数提取

利用分割后的单木点云数据，可以提取树高、冠幅、树冠体积、枝干分布等结构参数，为树木生长模型构建、生物量估算提供数据基础。

2.3 试验区概况

研究区位于吉林省延吉市金沟岭林场，地处 $43^{\circ} 17' \sim 43^{\circ} 25' \text{ N}$ ， $130^{\circ} 05' \sim 130^{\circ} 20' \text{ E}$ 。研究区整体表现为低山丘陵地貌，海拔介于 600~780 m，平均坡度介于 $10^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 。气候属于温带大陆性季风气候，年平均降水量在 600~700 mm 左右，且主要集中在 7 月，年平均气温约为 3.9°C ，该区主要的土壤类型为暗棕壤。研究区内主要树种有鱼鳞云杉（*Picea jezoensis* var. *komarovii*）、臭冷杉（*Abies nephrolepis*）、红松（*Pinus koraiensis*）、五角槭（*Acer momo*）、春榆（*Ulmus japonica*）、紫椴（*Tilia amurensis*）、蒙古栎（*Quercus mongolica*）、白桦（*Betula platyphylla*）、硕桦（*Betula costata*）等。

2.4 多期点云数据获取

2023 年 4 月底，使用大疆 M300 RTK 无人机搭载数字绿土 LiAir VH Pro 机载激光雷达扫描系统对金沟岭林场检查法 I、II 大区的所有样地进行机载点云数据采集，扫描的林分面积约 4 km^2 ，无人机飞行高度为 100 m 仿地飞行，飞行速度 6 m/s，激光旁向重叠率 50%，航向重叠率 70%，回波次数 3，开启真彩上色。

采集的点云数据密度约 700 点/m²，包含坐标信息。随后，5 月初使用 LiBackpack DG50 背负式双激光器雷达扫描系统对所有相同样地进行扫描，回波次数 1。采集的点云数据密度约 5000 点/m²，无 RGB 及坐标信息。

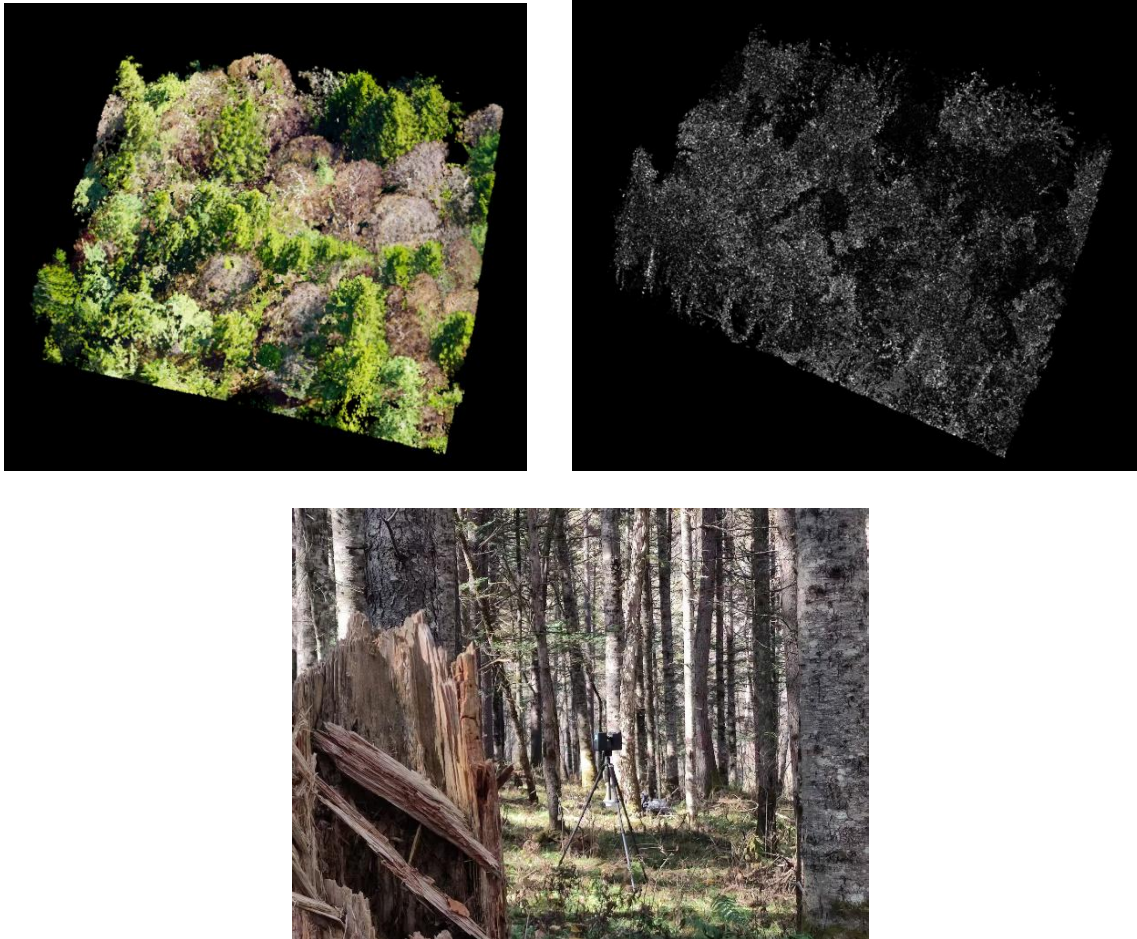


图 1 点云数据采集

2024 年 4 月底，使用大疆 M350 RTK 无人机搭载禅思 L2 机载激光雷达对金沟岭林场相同区域进行了扫描，无人机飞行高度为 100 m 仿地飞行，飞行速度 6 m/s，激光旁向重叠率 50%，航向重叠率 70%，回波次数 5，开启真彩上色。采集的点云数据密度约 1100 点/m²，包含坐标信息。随后，5 月初开始使用中海达 D8 RTK 对所有样地的单木进行定位，获取每木坐标，同时记录样地内的异常树木信息（如枯死木、风折木、风倒木、采伐木等）。

2024 年 10 月初，使用大疆 M350 RTK 无人机搭载禅思 L2 机载激光雷达对金沟岭林场相同区域进行了扫描，参数设置与 24 年 4 月保持一致。同时使用数字绿土 LiPod P1 地基激光雷达对部分样地（60 块）进行了扫描（使用 RTK 及标靶球设置控制点），采集的点云数据密度约 60000 点/m²，无 RGB 信息，包含坐

标信息。

2.5 主要技术方法

2.5.1 手动单木分割

手动单木分割的核心目标是从激光雷达点云数据中精确地将每一棵树作为独立的对象分割出来。能够应对一些自动化算法难以处理的复杂情况，尤其本案例地所属林分为天然混交林，林分树冠重叠、树木倾斜等问题严重，通过手动分割方法分离单木，通过人为干预确保在这些复杂情况下的分割精度。

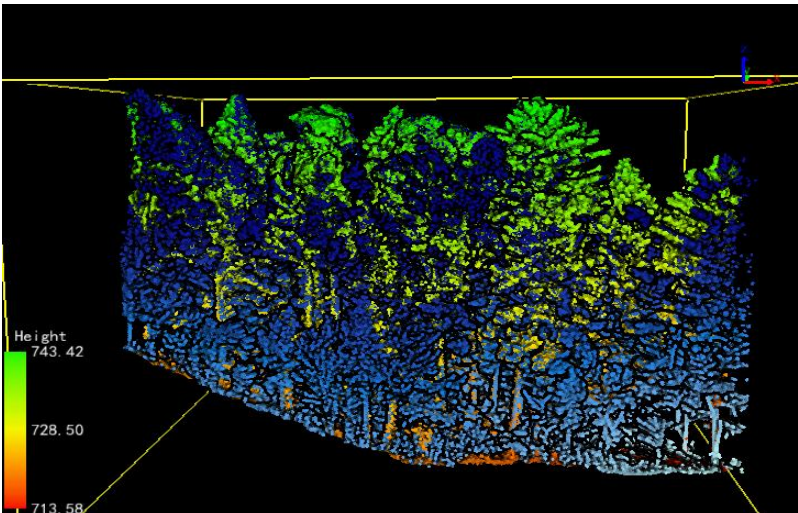
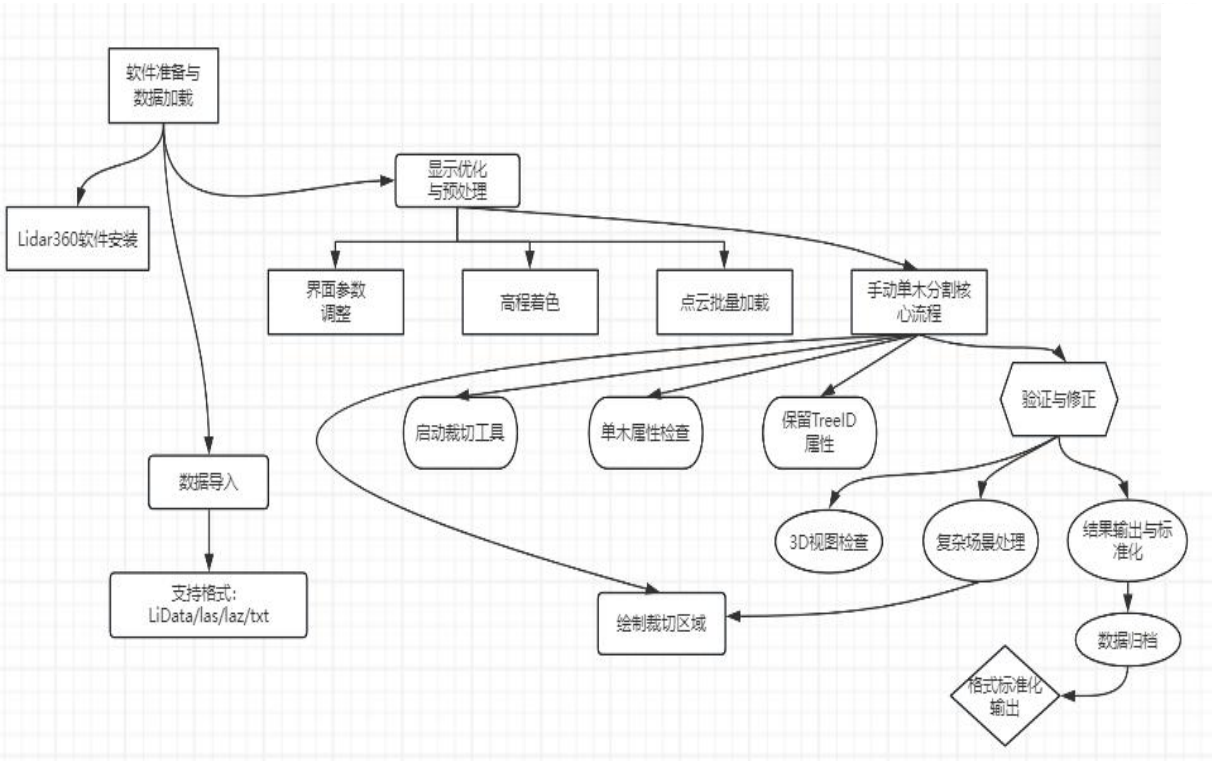
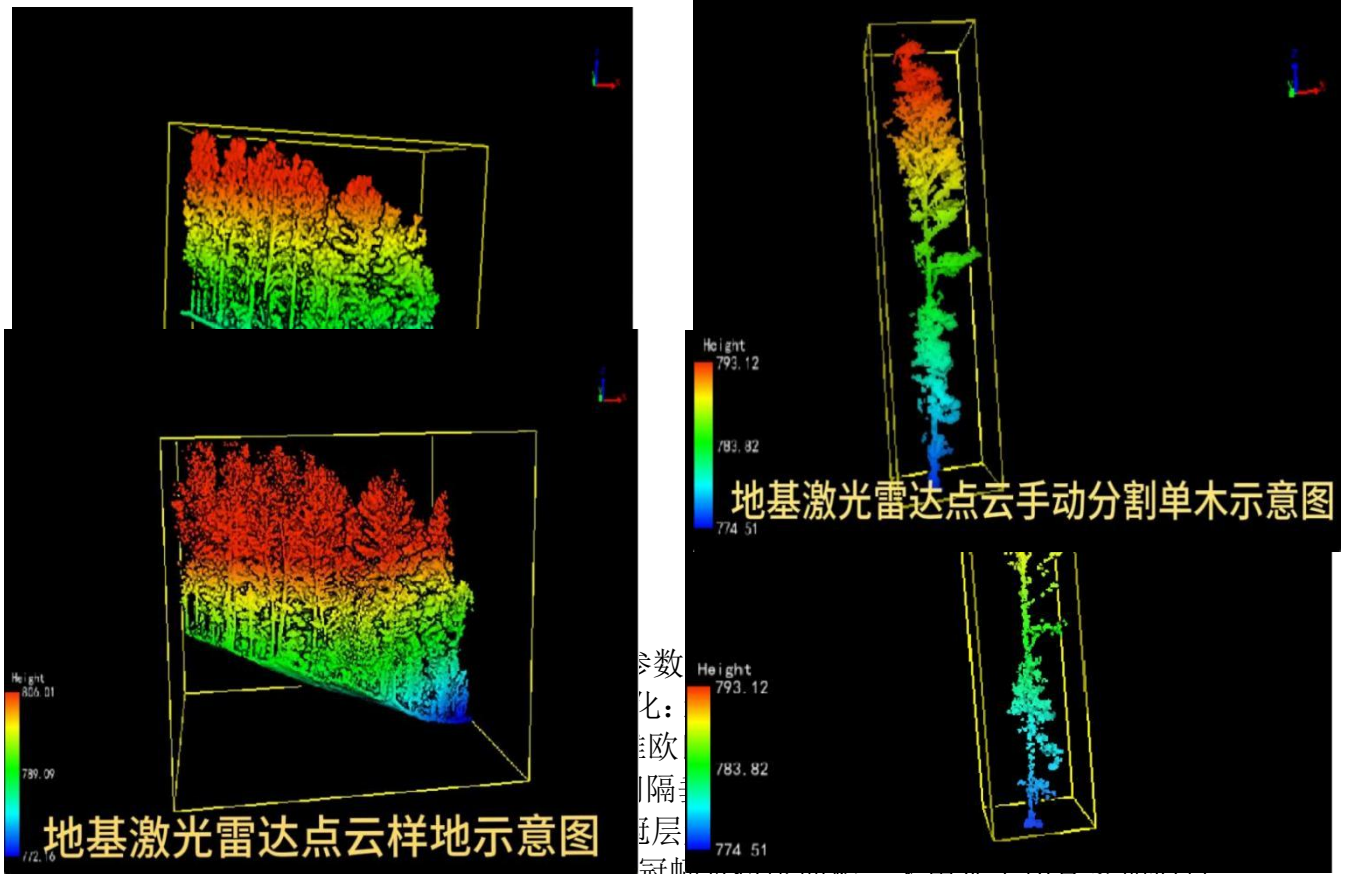


图 3 融合地基数据与机载数据的点云图像

2.5.2 手动单木分割成果展示



法间接推算（0.5m 栅格）双速法计算冠幅及投影面积，采用水平切片累加估算树冠体积与表面积；算法集成异常重试机制（枝下高阈值迭代优化）和批量处理功能，涵盖空间坐标、高度指标及三维形态特征，为单木建模提供多维度量化支持。

2.5.4 部分单木参数提取示例

单木参数	01_2305	01_2405	01_2410
H—树高	21.7684	22.2717	22.5745
HCB—枝下高	5.3888	4.8295	4.7414
CL—冠长	16.3796	17.4422	17.8332
CW_mean 冠幅平均值	6.9929	6.8182	6.9049
CW_diameter 冠幅直径	6.4972	6.4159	6.4913
CPA_chm 树冠垂直投影面积	40.0000	39.5000	39.5000
CPA_hull	33.1549	32.3300	33.0943

树冠垂直投影面积			
CV 树冠体积	111. 0453	112. 3773	114. 9093
CSA 树冠表面积	202. 1518	210. 4643	210. 6731

2.5.5 单木参数适用场景

参数	方法	特点	适用场景
CA_chm	栅格化(CHM)	快速、计算简单，可能忽略细节	大范围森林覆盖估算
CA_hull	凹包（点云轮廓）	精度高，捕捉实际形状	单木精细分析
CV	切片体积累加	反映三维体积分布	生物量模型、碳储量估算
CSA	切片表面积累加	表征树冠表面复杂性	生态过程模拟(如光合作用)

2.6 问题思考

- （1）单木参数提取的精度（如树高、冠幅、枝下高等）受哪些因素影响？
- （2）对比 2023 年与 2024 年的点云数据，分析重复扫描在监测林木生长动态（如树高年增长率、冠幅扩张速率）中的技术优势。并思考如何利用多时相数据构建森林生长结构模型？
- （3）在未来研究中，如何将手动分割形成的“标准单木样本库”用于训练自动化分割模型（如深度学习网络）？

教学指导手册

激光雷达单木分割及单木参数提取案例库建设方案

1. 教学目标

(1) 理解激光雷达技术的基本原理

使学生了解激光雷达（LiDAR）技术在森林资源监测中的基本工作原理、数据特点（如点云数据）及其优势。

(2) 掌握单木分割的核心概念与意义

使学生理解单木分割的定义、重要性，以及为何它是实现林木个体精细化分析的关键环节。

(3) 了解单木参数的提取方法

使学生知晓可以从单木点云中提取的关键参数（如树高、冠幅、树冠体积、枝下高等），并初步了解其提取方法和计算原理。

(4) 培养点云数据处理的基本技能

使学生初步掌握激光雷达点云数据的处理流程，包括数据导入、手动或自动分割单木、以及参数提取等操作。

(5) 提升复杂林分条件下的问题分析与解决能力

通过案例学习，使学生能够分析在复杂森林场景（如点云密度变化、树木形态多样、冠层遮挡等）中进行单木分割时可能遇到的问题，并探讨解决方案。

1.1 教学用途

本案例库可作为“森林经理学”等课程的实践教学资源，辅助课堂教学与实验环节。通过学习，能够引导学生掌握从激光雷达点云数据采集、处理到单木参数提取的核心流程，并初步体验如何将这些高精度数据应用于森林资源清查、生长动态监测及经营决策支持中，为学生开展相关科研或参与林业实践项目打下坚实基础。

1.2 授课对象

本案例主要授课对象为林学、森林经理学及遥感与地理信息科学相关专业的学生。要求学生具备一定的《森林调查规划》、《测树学》、和 R 语言编程等基础知识。

1.3 适用课程

森林经理学、林学

2. 启发思考题

- (1) 单木参数提取的精度（如树高、冠幅、枝下高等）受哪些因素影响？
- (2) 对比 2023 年与 2024 年的点云数据，分析重复扫描在监测林木生长动态（如树高年增长量、冠幅扩张速率）中的技术优势。并思考如何利用多时相数据构建森林生长结构模型？
- (3) 在未来研究中，如何将手动分割形成的“标准单木样本库”用于训练自动化分割模型（如深度学习网络）？

3. 分析思路

本案例的分析思路旨在引导学生从理解激光雷达技术的基本原理出发，逐步深入到单木分割与参数提取的核心技术环节，并最终能够探讨这些技术在森林资源动态监测和科学经营决策中的实际应用及未来发展方向。整体分析逻辑强调理论与实践的结合，鼓励学生基于案例提供的具体情境和数据进行思考。

4 案例分析

4.1 理论与方法

案例中融合了机载与地面 LiDAR 数据，不同设备提供了从几百到数万点/m²不等的点云密度和不同回波次数，这直接影响对树木细节的捕捉。RTK 保证了坐标精度。研究区为天然混交林，树冠重叠、树木倾斜等问题对分割和参数提取构成挑战。采用手动分割以应对复杂情况确保精度。参数提取基于 R 语言，采用如垂直高差法、凹包投影等方法进行提取。并且多时相 LiDAR 数据能精确量化树木三维结构随时间的变化，为森林生长动态监测和模型构建提供基础。

4.2 案例剖析

对比 2023 年与 2024 年的点云数据，可直接计算树高、冠幅等参数的年生长量，实现对单木生长的三维精细追踪。利用多期提取的单木参数（树高、冠幅等），结合林场概况（海拔、坡度、气候、土壤、树种），可构建经验或过程相关的森林生长模型，预测未来生长状况。

案例中通过 Lidar360 进行的手动单木分割成果,是构建训练样本库的基础。这些样本需进行标注和预处理, 可用于训练如 PointNet 等深度学习网络, 以实现复杂森林环境下高效、自动的单木分割, 从而提高森林资源调查效率。

5 课堂设计

5.1 课时分配

本案例的课堂教学建议总时长约为 120 分钟，可根据实际学时灵活调整。第

一部分将安排约 30 分钟进行理论导入与案例总览，内容包括激光雷达技术基础、单木分割与参数提取的核心概念，以及本案例的背景和研究概况。第二部分计划用时约 50 分钟进行案例的深度剖析与方法探讨，重点分析案例中的数据获取方法、手动单木分割流程、参数提取方法，并围绕影响参数提取精度的因素（启发思考题 1）展开讨论。最后一部分预留约 40 分钟用于动态监测、自动化展望与总结，将引导学生分析多时相数据在林木生长监测中的应用及构建生长模型（启发思考题 2），探讨手动分割样本库在训练自动化模型中的作用（启发思考题 3），并对案例进行总结与展望。

5.2 教学形式

本案例的教学将综合运用多种教学形式以增强学习效果。课堂将以教师讲授核心概念、理论知识和技术流程为基础，辅以案例分析法，引导学生深入理解案例的具体内容、数据特点和分析方法。同时，开展讨论，围绕关键的启发思考题组织学生进行小组研讨或课堂问答，以激发学生主动思考和参与。并且注重实操，展示 Lidar360 专业软件在点云数据处理和单木分割中的基本操作或效果，使学生对技术应用有更直观的认识。

5.3 教学资源

- (1)本案例库全文。
- (2)相关的 LiDAR 点云数据可视化图片、短视频。
- (3)Lidar360 等专业软件的教学版。
- (4)PPT 课件。

6 要点汇总

本案例的核心在于展示激光雷达技术（尤其是机载与地基融合）在森林资源精准监测中的应用，重点传授单木分割与关键参数（如树高、冠幅、枝下高等）提取的方法、流程及其面临的挑战与应对策略，特别是针对天然混交林复杂场景下的手动分割与数据处理（如使用 Lidar360 和 R 语言工具）。同时，案例强调了多时相 LiDAR 数据在动态监测林木生长、构建生长模型方面的技术优势，并启示了通过手动分割形成的高质量“标准单木样本库”在未来训练和验证自动化、智能化（如深度学习）分割模型中的重要价值，最终旨在推动森林经营向更精准、高效和科学化的方向发展。

7.其他说明

无

参考文献:

- [1] 黄华国.林业定量遥感研究进展和展望[J].北京林业大学学报,2019,41(12):1-14.
- [2] 庞勇,李增元,陈尔学,等.激光雷达技术及其在林业上的应用[J].林业科学,2005,(03):129-136.
- [3] 李增元,陈尔学.中国林业遥感发展历程[J].遥感学报,2021,25(01):292-301.
- [4] 曹荣贞.基于地面激光雷达点云数据的单木三维建模及生物量估算研究[D].东北林业大学,2024.
- [5] 梁广计.基于机载 LiDAR 点云单木分割方法的研究[D].沈阳建筑大学,2024.
- [6] 刘鲁霞.机载和地基激光雷达森林垂直结构参数提取研究[D].中国林业科学研究院,2014.
- [7] 黄华国.激光雷达技术在林业科学研究中的进展分析[J].北京林业大学学报,2013,35(04):134-143.
- [8] Maltamo M ,Eerikäinen K ,Pitkänen J , *et al.* Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions[J].Remote Sensing of Environment,2004,90(3):319-330.
- [9] Liang X ,Kankare V ,Hyypä J , *et al.* Terrestrial laser scanning in forest inventories[J].ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2016,115:63-77.
- [10] 庄永健,冯仲科,李亚藏,等.激光雷达技术测树方法原理与应用[J].林业资源管理,2016,(06):116-119.
- [11] Dassot M ,Constant T ,Fournier M .The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges[J].Annals of Forest Science,2011,68(5):959-974.
- [12] 晏颖杰,范少辉,官凤英.地基激光雷达技术在森林调查中的应用研究进展[J].世界林业研究,2018,31(04):42-47.
- [13] Liu H ,Mou C ,Yuan J , *et al.* Estimating Urban Forests Biomass with LiDAR by Using Deep Learning Foundation Models[J].Remote Sensing,2024,16(9):1643-.
- [14] Zou W ,Zeng W ,Sun X .Simultaneous Models for the Estimation of Main Forest Parameters Based on Airborne LiDAR Data[J].Forests,2024,15(5):
- [15] Wang J ,Lin Q ,Meng S , *et al.* Individual Tree-Level Monitoring of Pest Infestation Combining Airborne Thermal Imagery and Light Detection and Ranging[J].Forests,2024,15(1):
- [16] 庞勇,赵峰,李增元,等.机载激光雷达平均树高提取研究[J].遥感学报,2008,(01):152-158.
- [17] 刘清旺,李增元,陈尔学,等.利用机载激光雷达数据提取单株木树高和树冠[J].北京林业大学学报,2008,(06):83-89.

- [18]李平昊,申鑫,代劲松,等.机载激光雷达人工林单木分割方法比较和精度分析[J].林业科学,2018,54(12):127-136.
- [19]庞勇,李增元,谭炳香,等.点云密度对机载激光雷达林分高度反演的影响[J].林业科学研究,2008,(S1):14-19.
- [20]朱俊峰,刘清旺,崔希民,等.地基与无人机激光雷达结合提取单木参数[J].农业工程学报,2022,38(14):51-58.
- [21]周相贝,李春干,代华兵,等.点云密度对机载激光雷达大区域亚热带森林参数估测精度的影响[J].林业科学,2023,59(09):23-33.
- [22]刘鹤,顾玲嘉,任瑞治.基于无人机遥感技术的森林参数获取研究进展[J].遥感技术与应用,2021,36(03):489-501.
- [23]LiDAR360 用户手册/用户指南 (User Guide/Manual).

案例二

天然云冷杉针叶混交林林分发育阶段划分

向玮 陈梦淇 徐德鹏

摘要：以长白山云冷杉针叶混交林为例，比较林分不同发育阶段划分的方法，确定最适宜长白山云冷杉针叶混交林发育阶段划分的方法，以便有针对性地制定不同发育阶段的森林经营策略，为天然林发育阶段的科学划分提供方法依据。本案例提出一种新的林分发育阶段的划分方法—基于 TWINSpan 的判别分析法，对云冷杉针叶混交林发育阶段进行划分。通过树种组成和林分特征（包括样地的平均胸径、平均树高、公顷蓄积量、公顷株数、公顷生物量、公顷断面积、针阔比、物种多样性和径级大小多样性 9 个指标）方面，对此方法的划分结果进行比较分析，并最终确定出天然云冷杉针叶混交林发育周期的各个阶段。本案例认为，基于 TWINSpan 的判别分析法能更好地划分林分的发育阶段，并将长白山云冷杉针叶混交林的发育过程划分为快速生长阶段—竞争选择阶段—近自然林阶段，为森林的科学经营提供了重要理论依据。

Abstract: Taking the mixed conifer forest in Changbai Mountain as an example, we compared the methods of different developmental stages of the forest stand, and determined the most suitable method for the developmental stages of the mixed conifer forest in Changbai Mountain, so as to formulate the forest management strategy for different developmental stages, and to provide a methodological basis for the scientific division of developmental stages of natural forests. In this case, we propose a new method to classify the developmental stages of forest stands, which is based on TWINSpan discriminant analysis, to classify the developmental stages of mixed conifer forests in Changbai Mountain. The results of this method were compared and analyzed in terms of species composition and stand characteristics (including 9 indicators: average diameter at breast height (DBH), average tree height (AGH), volume per hectare (ha), number of plants per hectare (ha), biomass per hectare (BH), area per hectare (AH), needle-to-broadness ratio (CBR), species diversity, and size diversity of the diameter classes in the sample plots), and the developmental stages of the natural mixed coniferous forests of *Picea abies* were finally determined. In this case, the discriminant analysis method based on TWINSpan can better classify the developmental stages of forest stands, and classify the developmental process of Changbaishan mixed spruce coniferous forests into the rapid growth stage, the competitive selection stage, and the near-natural forest stage, which provides an important theoretical basis for the scientific management of forests.

关键词：发育阶段划分；云冷杉针叶混交林；最优分割法；判别分析；
TWINSpan；MRT

Keywords : developmental stage division; spruce-fir-coniferous mixed forest;
optimal segmentation; discriminant analysis; TWINSpan; MRT

作者信息：向玮，北京林业大学林学院教授，副院长；陈梦淇，北京林业大学林学院 2023 级硕士研究生；徐德鹏，北京林业大学林学院 2022 级硕士研究生。

1. 案例背景

森林是一种地表生物群落，主要由树木为主体所组成，随着自然历史的长期发展而形成^[1]，作为陆地生态系统核心组成部分，森林系统维系着包括人类在内的众多生命形式，其独特的生物多样性、层次化结构和复合生态功能，使之成为研究自然生态规律的重要载体。尤其是天然林生态系统，因其复杂的种间关系、庞大的生态网络和丰富的物种储备，在全球及区域生态平衡中发挥着不可替代的作用^[2]。

从动态演替视角分析，林分发育会伴随显著的阶段性特征变化：包括立木生长态势、优势树种更替和空间结构演变等生物学过程^[3]，林分从开始形成直到达到经营目标状态的整个过程，可以分为若干个经营阶段，若将一个森林群落的发育过程合理、客观地量化划分为多个阶段，分阶段地对林分的生长过程进行研究将会更加精准且有针对性，这对科学的森林经营至关重要。

2. 案例内容

2.1 林分发育阶段划分

前人对林分发育阶段划分的研究对象多为人工林，天然林则常采用定性的方法划分，如温远光将大明山森林的发育过程分为先锋树种阶段、耐阴树种阶段和顶级树种三个阶段^[4]。而合理、定量地划分天然林林分发育阶段的研究还较少^[5]，最直接的方法是以林分年龄划分^[6-7]，但是不同年龄的林分可能有相似的林分结构，相同年龄林分的结构也可能不同^[8]，并且异龄林年龄指标较难获取，所以按龄组划分天然林的发育阶段就失去了意义；其次定义林分结构指标的方法和专家评定法也是比较常用的方法^[9-12]，这种方法的缺点是过于主观，在不同的林分中可能需要不同的定义标准。

除此之外，张家来^[13]提出种间联结-最优分割法并应用于林分发育阶段的划分中，根据种间联结将树种分为衰退、过渡、进展三个树种组，后用树种组的优势程度并结合最优分割法划分森林的发育阶段^[14-15]，此方法能够较好地反应林分发育过程的变化趋势，克服主观判断的缺陷，不足的是最优分割法在应用时需要将样本视作连续变量，组成有序样本进行分割^[16]；之后，Lu、李婷婷等学者^[17-18]采用林相特征判别法，对生物量、蓄积量、林龄等林分因子使用判别分析，将森林发育过程划分为多个阶段，但该方法的不足也较为明显，即需要用年龄对林分进行初步的分类；近年来，双向指示种分析法（TWINSpan）逐渐在林分发育阶段划分中使用^[19-20]，如周梦丽等使用此方法将吉林省云冷杉阔叶混交林划分为三个阶段，TWINSpan 根据林分的树种组成，能够实现同时对样方和物种的分类，而不依靠林分的年龄结构，但是可能需要对错误的类进行主观的人为调整^[19]。而目前尚没有明确的适用于云冷杉针叶混交林发育阶段的划分方法。

TWINSPAN 双向指示物种分析法常被应用于生态系统群落或林分类型的分类中，因此只是从物种组成的方面对样方进行聚类，而在划分林分的发育阶段时，不应只从林分的树种组成方面考虑，林分的特征指标也是非常重要的划分依据；并且 TWINSPAN 在分类时，可能会出现对样地错分的现象，需要对分类结果中出错的类进行人为调整 [20-21]。因此，基于对上述两个原因的考虑，本案例提出一种以 TWINSPAN 分类结果为基础，选取多个林分指标建立 Fisher 判别函数进行判别分析的方法，能够客观地对 TWINSPAN 的分类结果进一步调整，避开人为调整的主观缺陷，并且能从树种组成和林分特征两方面综合考虑对森林的发育阶段进行划分；同时此方法也克服了林相特征判别法在划分林分发育阶段时天然林年龄指标不易获取的缺点。

2.2 试验区概况

研究区位于吉林省延吉市金沟岭林场，地处 $43^{\circ} 17' \sim 43^{\circ} 25' \text{ N}$ ， $130^{\circ} 05' \sim 130^{\circ} 20' \text{ E}$ 。研究区整体表现为低山丘陵地貌，海拔介于 600~780 m，平均坡度介于 $10^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 。气候属于温带大陆性季风气候，年平均降水量在 600~700 mm 左右，且主要集中在 7 月，年平均气温约为 3.9°C ，该区主要的土壤类型为暗棕壤。研究区内主要树种有鱼鳞云杉 (*Picea jezoensis* var. *komarovii*)、臭冷杉 (*Abies nephrolepis*)、红松 (*Pinus koraiensis*)、五角槭 (*Acer momo*)、春榆 (*Ulmus japonica*)、紫椴 (*Tilia amurensis*)、蒙古栎 (*Quercus mongolica*)、白桦 (*Betula platyphylla*)、硕桦 (*Betula costata*) 等。

2.3 数据获取

本案例所使用的样地数据来自吉林省汪清林业局金沟岭林场 2000-2022 年检查法固定样地，从中选取云冷杉为主要树种的林分类型为云冷杉针叶混交林的样本共 2589 个，其中 348 个样地面积为 0.09hm^2 ，其余样地面积均为 0.04hm^2 。记录样地中胸径不小于 5cm 林木的树种名称、胸径、株数等因子，样地具体统计信息如表 2-1 所示。

土壤数据由中国科学院生态环境研究中心 (<https://www.scidb.cn/>) 获取，气象数据来自亚太地区气候数据软件 ClimateAP。

表 1 样地因子统计量

Tab. 1 Sample plot factor statistics

因子 Factor	平均值 Mean	最大值 Maximum	最小值 Minimum
平均胸径 Mean DBH/(cm)	18.8	33.3	9.6
公顷蓄积量/(m^3/hm^2)Hectares of stock/(m^3/ha)	226.44	580.46	27.79
公顷株数/(株/ hm^2)Number of hectares/(株/ha)	682	2 050	175
平均树高 Average tree height/(m)	13.7	19.7	8.6
公顷生物量/(t/hm^2)hectares of biomass/(t/ha)	65.32	175.30	9.07
针叶树种占比 Proportion of conifer species/(%)	80.14	100.00	40.73

云冷杉占比 Proportion of Spruce and fir/(%)	63.49	100.00	23.20
--	-------	--------	-------

2.4 总体技术方法与关键步骤

2.4.1 林分指标计算

研究林分的发育阶段主要选用以下指标来描述：样地的平均胸径、平均树高、公顷蓄积量、公顷株数、公顷生物量、公顷断面积、针阔比、树种组成、物种多样性和径级大小多样性。

平均树高通过当地树种的胸径树高曲线来确定；公顷蓄积量和公顷生物量通过单木材积和单木生物量求和，然后除以单位面积计算；单木材积和单木生物量根据金沟岭地区一元材积公式和一元生物量公式得出；针阔比采用针叶树种的蓄积量占比表示；树种组成使用传统的十分法表示。

林分的物种多样性和径级大小多样性采用 Shannon-Weiner 指数（H）表示。

$$H = - \sum_{i=1}^m P_i \times \ln P_i$$

式中， P_i 为各树种（径级）的断面积之和占林分断面积的比例， m 为林分内树种（径级）的数量。

2.4.2 基于 TWINSpan 的判别分析法

TWINSpan 是一种分类算法，其分类首先通过对应分析（CA）或去趋势对应分析（DCA）对原始数据进行排序，得到坐标轴的结果。接着使用等级划分法逐级细化，对样方和物种进行分类。在分类过程中，TWINSpan 引入了“假种”的概念。假种指的是在不同多度情况下，同一物种可能表现出不同的指示意义，被视为不同的“种”来处理。这种方法可以更准确地反映物种多度变化对分类结果的影响。总体而言，TWINSpan 通过排序和等级划分的方式对样方和物种进行分类，同时考虑了物种的多度变化，以获得更准确的分类结果^[22-23]。

该算法本身非常复杂，需要依次通过下列过程来进行划分^[24]：

①首先需要以排序轴为基础进行预分类，对样方-物种组成矩阵执行 CA 或 DCA，并根据第一排序主轴中的得分值（坐标）将对象分为两组（并不一定从 0 点进行划分），称为初级分类（primary ordination）。

②其次选择指示种，指示种（indicator species）代表了对分类有重要意义的物种，这种重要性通过指示值（indicator value）衡量，公式为：

$$I_j = \frac{n_j^+}{n^+} - \frac{n_j^-}{n^-}$$

式中， n^+ 和 n^- 分别为划分点两侧（正方向和负方向，即两组）的样方数量， n_j^+ 和 n_j^- 分别为两组样方中含有物种 j 的样方数量， I_j 为指示值，可知 I_j 取值范围[-1,1]。

指示值实际上描述了划分点两侧分组对物种的偏好。通常选择 I_j 绝对值最大的一些代表性物种作为指示种，它们也通常为分布于排序轴两端的种。

③然后还需要计算样方的指示得分（indicator score），在②中，将物种的丰度值转化为指示值，对于一个样方，如果含某正指示种（ $I_j > 0$ ），计+1分；含某负指示种（ $I_j < 0$ ），计-1分；该样方中所有指示种的得分相加后，即为该样方的指示得分。

④重新根据指示得分对样方分类，选择合理的指示得分阈值作为划分点，使两侧的分组与①中分组的吻合程度最高，降低分类错误。若二者完全吻合，则继续进行⑤；若不完全一致，则需要对预分组进行调整。以最初排序轴上的划分点为中心向两侧扩展得到一个较窄的中性带（indifference zone），对邻近划分点样方的模糊分类进行调整，调整的示意图如图 1 所示，调整后“1”、“2”、“3”区归为一组，“4”、“5”、“6”区归为一组^[25]。

⑤重复①-④各个过程，在得到的每个分类中进一步细化分类，最终得到整个数据集的层次分类结构。存在两种停止划分的终止原则：组内样方数降到一个规定数值（如包含 5 个或更少样方的组不进行进一步划分），或者达到规定的划分层级（如只允许划分 3 级）。

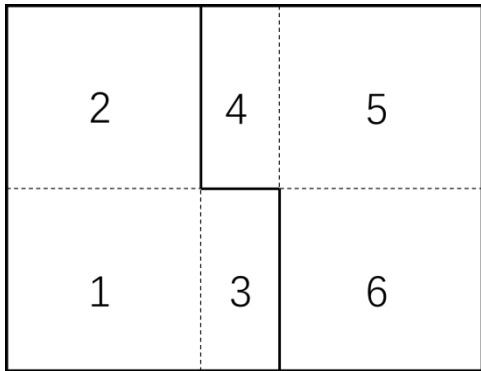


图 1 调整预分组的示意图

Fig. 1 Adjust the schematic diagram of the pregrouping

本案例在具体应用 TWINSpan 双向指示物种分析法时，先将色木槭和杂木（青楷槭 *Acertegmentosum* 和花楷槭 *A.ukurunduense*）、水曲柳和黄檗（*Incarvillealutea*）、大青杨（*Populusussuriensis*）和蒙古栎（*Quercusmongolica*）、臭冷杉和红豆杉（*Taxuswallichianavar.chinensis*）、红皮云杉和鱼鳞云杉合并为树种组，一共形成 10 个指示树种（组）：白桦、椴树、硕桦、红松、榆树（*Ulmuspumila*）、色杂组、水黄组、杨柞组、冷红组、云杉组。以样地中各树种（组）的公顷蓄积量为指标，形成原始的数据矩阵：

$$X = \begin{pmatrix} A_{1 \times m} \\ B_{n \times m} \end{pmatrix}$$

式中，矩阵 A 表示由树种名称构成的行向量，矩阵 B 表示各样地中对应树种（组）的公顷蓄积量构成的矩阵， n 、 m 分别表示样地个数和树种（组）数。

使用 R4.2.1 软件中的 twinspanR 软件包^[26]对样地样本进行分类，经过初步尝试后

设置以下参数：分类数 $\text{clusters}=3$ （将样本分为 3 类）、伪树种组切割级别 $\text{cut.levels} = c(0,40,80,120,150,180,200)$ （将样地中各公顷蓄积量大于 40、80、120、150、180、200 的树种视为不同“假种”来处理）等。再对分类的结果从林分特征和树种组成方面分析，得出每一类林分发育的先后顺序，最终确定出林分的发育阶段。

而后将 TWINSpan 划分出的三个阶段作为因变量，选择林分平均胸径、公顷蓄积量、公顷生物量、平均树高、公顷断面积、公顷株数和针阔比七个林分指标作为自变量，建立 Fisher 判别函数。判别分析可以识别错误分类的样地，并为这些错分的样地重新提供预测的类别，通过重复使用判别函数对原始的分类进行调整，直到判别分析的准确率接近 100%，此时的分类则认为是林分发育过程的不同阶段。

Fisher 判别分析的原理如下：

设两类总体 π_i 的均值和协方差矩阵为 $(\mu^{(i)}, \Sigma_i)$ 。即 Fisher 线性判别函数为

$$y = l'x = (\mu^{(1)} - \mu^{(2)})' \Sigma^{-1}x$$

式中： $\mu^{(1)}$ 和 $\mu^{(2)}$ 分别表示两类总体的均值， Σ 表示各类总体的协方差矩阵， $l'x$ 表示 x 的线性函数。

取 m 为两个总体均值在投影方向上的中点，即

$$m = \frac{l'\mu^{(1)} + l'\mu^{(2)}}{2} = \frac{1}{2}(\mu^{(1)} - \mu^{(2)})' \Sigma^{-1}(\mu^{(1)} + \mu^{(2)})$$

其判别规则为

$$\begin{cases} y \geq m, x \in \pi_1 \\ y < m, x \in \pi_2 \end{cases}$$

当 $\mu^{(1)}$ 、 $\mu^{(2)}$ 、 Σ 未知时，可由总体中分别抽出样品并计算出相应的样本均值和协方差阵来作为 $\mu^{(1)}$ 、 $\mu^{(2)}$ 、 Σ 的估计。Fisher 判别随着总体数的增加，建立的判别式也会相应地增加。

2.5 结果分析

2.5.1 林分发育阶段划分结果

本文采用基于 TWINSpan 的判别分析法对长白山天然云冷杉针叶混交林的发育阶段进行划分，分类的结果中各阶段的主要林分特征及树种组成见表 2 和表 3。

表 2 五种方法分类结果中各阶段的主要林分指标

Tab.2 Main stand indicators for each stage in the classification results of the five methods

方法 Method	阶段	指标 Indicator								
	Stage/	平均胸径	公顷蓄积量	公顷株数/(株	针阔比	平均树高	公顷断面积	公顷生物量	物种多	径级大小
	类	Mean	/(m3/hm2)Hectares	/hm2)Number	Needle-to-width	Average	/(m2/hm2)Hectares	/(t/hm2)hectares	样性指	多样性指
	Class	DBH/(cm)	of stock/(m3/ha)	of	ratio/(%)	tree	of broken	of	数	数 Radial
				hectares/(株		height/(m)	area/(m2/ha)	biomass/(t/ha)	Species	size
				/ha)					diversity	diversity
									index	index
基于 TWINSpan 的判别分析法 Discriminant analysis method based on TWINSpan	1	17.9	164.97	575	72.93	13.5	17.63	56.20	1.46	2.12

表 3 五种方法分类结果中各阶段的树种组成

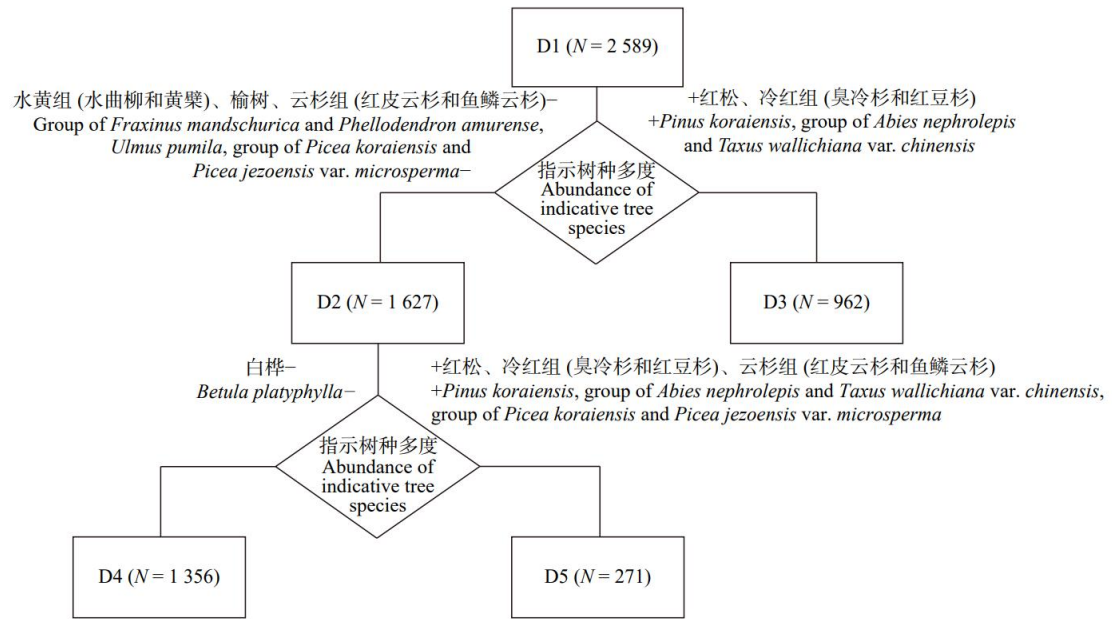
Tab.3 Composition of tree species at each stage in the classification results of the five methods

方法 Method	阶段 Stage/ 类 Class	树种组成 Tree species composition
基于 TWINSpan 的判别分析法 Discriminant analysis method based on TWINSpan	1	3 云杉 3 冷杉 1 红松 1 枫桦 1 椴树+白桦+色木-水曲柳-榆树
	2	4 冷杉 3 云杉 2 红松+椴树+枫桦-色木-白桦
	3	4 云杉 3 冷杉 2 红松+椴树+枫桦

TWINSpan 双向指示物种分析法经过两次划分，将样本分为 3 类，其中第 1 类 1356 个样本，第 2 类 271 个，第 3 类 962 个，具体划分过程和结果见图 2。此方法的分类结果还需要从林分特征和树种组成方面分析，得出各类在林分发育过程中的先后顺序，从而确定林分的发育阶段。

从林分特征看，林分平均胸径、公顷蓄积量、针阔比、平均树高、公顷断面面积和公顷生物量均为类 2>类 3>类 1，但类 3 与类 2 针阔比的差异不大，公顷株数则是类 3>类 2>类 1；在多样性方面，物种多样性类 1 最大、类 2 最小，径级大小多样性类 3 最大、类 1 最小。所以类 2 应处于林分发育后期；而类 1 的树种组成复杂且阔叶树种较多，应处于林分发育前期。

因此，结合树种组成和林分状态分析，在此方法分类结果中云冷杉针叶混交林各发育阶段依次为类 1、类 3、类 2。



注：“D”为样本分组，“N”为样本数量；“-”表示负指示种，“+”表示正指示种，意为负（正）指示树种的多度达到一定程度时将此样本分到左（右）侧。

Note: "D" is a group, and "N" is the sample size; "-" indicates a negative indicator, "+" indicates a positive indicator, Meaning negative (positive) indicates that the number of tree species reaches a certain level, and this sample is divided into left (right) sides.

图 2 TWINSpan 分类过程和结果

Fig. 2 TWINSpan classification process and results

之后在上文 TWINSpan 分类结果的基础上,选取林分平均胸径、公顷蓄积量、公顷生物量、平均树高、公顷断面积、公顷株数和针阔比 7 个林分指标作为自变量建立 Fisher 判别函数,反复进行判别分析后,进一步将分类结果调整为第 1 阶段样本 1416 个、第 2 阶段 967 个,第 3 阶段 206 个,正判率为 0.97。

2.5.1 发育阶段的确定

林分特征方面,各项指标总体基本均随林分发育逐渐增大。整体来看,随着林分从初期发育到后期,树木逐渐长大,林分的公顷蓄积量、生物量等指标均越来越大。而第二阶段的公顷株数最大,随着云冷杉针叶混交林逐渐发育,林分内树木逐渐变大的同时,林木株数先增多后减少。生物多样性方面,第三阶段物种多样性最小,第一阶段最大,说明森林逐渐发育,林分内的生物多样性一直呈下降趋势;而径级大小多样性的变化与林分公顷株数的变化一致,结果中林木的大小差异先变大后减小。树种组成方面,第 3 阶段最简单,第 1 阶段最复杂,与生物多样性的变化趋势相符;并且随着林分发育到后期,针叶树种占比逐渐增大,林分内阔叶树种被顶级树种替代。

综合来看,本案例提出的基于 TWINSpan 的判别分析法的划分结果符合林分生长发育的生物学规律,随着云冷杉针叶混交林逐渐发育,林分内树木逐渐变大的同时,林分蓄积量等指标也随之变大,但林木株数先增多后减少,树木间的大小分化差异也先增大后减小,并且阔叶树种逐渐被针叶树种替代,林分的树种组成也趋于简单。结果中第一阶段为快速生长阶段,此时云冷杉针叶混交林刚刚形成不久,林木生长迅速,林分中先锋树种还相对较多;第二阶段为竞争选择阶段,林木个体间的关系从互助变为竞争,个体显著分化,先锋树种逐渐被顶级树种替代;第三阶段表现为近自然林阶段,此时林分内林木相对较大,并且基本只存在顶级树种,受干扰程度较小,较为接近原始状态。因此,认为此方法能够更合理、客观地划分长白山云冷杉针叶混交林的发育阶段。

3. 总结

科学地划分林分发育阶段,对处于不同发育阶段的林分制定相应的经营措施,在森林的科学经营中至关重要。长白山云冷杉林区作为我国北方的重要生态屏障,目前关于云冷杉针叶混交林发育阶段的研究还相对缺乏。因此,本案例旨在比较不同的林分发育阶段划分方法,以期能够合理、客观地划分长白山云冷杉针叶混

交林的发育阶段。

本案例基于吉林省汪清林业局金沟岭林场检查法部分固定样地和临时样地数据，使用本案例提出的 TWINSpan 双向指示物种分析法的优化方法——基于 TWINSpan 的判别分析法。通过从林分特征、多样性、树种组成等林分指标以及各发育阶段的区分度和样本量的均匀程度考虑，结合林分的生长发育规律综合分析，本案例最终认为基于 TWINSpan 的判别分析法能够更为合理、客观地划分林分的发育阶段，并明确出了长白山云冷杉针叶混交林发育的 3 个阶段：建群阶段—竞争阶段—近自然林阶段。此方法也能应用于其他天然林的发育阶段划分中。

4. 问题思考

- （1）目前我国常用的林分发育阶段的划分方法有哪些？针对人工林和天然林，哪些方法应用在人工林或天然林中更适宜？
- （2）对本案例中提出的林分发育阶段的划分方法进行分析探讨，寻找不足之处，试提出再改进方法。
- （3）你认为当前的林分发育阶段的划分还有哪些其他方法，或在划分的过程中还需考虑什么指标？

教学指导手册

天然云冷杉针叶混交林林分发育阶段划分教学案例库建设方案

1. 教学目标

1.1 教学用途

本案例可作为相关课程实验或野外实习的补充材料，指导学生进行数据分析、模型构建和结果解释的练习。

1.2 授课对象

本案例主要授课对象为为林学、森林经理学的学生。要求学生具备一定的《测树学》、《概率论与数理统计》基础知识。

1.3 适用课程

森林经理学、林学、森林生态学

1.4 教学目的

使学生理解林分发育阶段划分的定义、重要性，以及为何它是对天然林进行科学经营与精准研究的关键前提；使学生了解并比较林分发育阶段划分的多种方法（如年龄法、专家评定法、最优分割法等），并认识到它们在天然异龄林中应用的局限性；培养学生将林分发育阶段的科学划分与森林经营实践相结合的能力，能够为不同发育阶段的林分提出针对性的经营策略。

2. 启发思考题

（1）目前我国常用的林分发育阶段的划分方法有哪些？针对人工林和天然林，哪些方法应用在人工林或天然林中更适宜？

（2）对本案例中提出的林分发育阶段的划分方法进行分析探讨，寻找不足之处，试提出再改进方法。

（3）你认为当前的林分发育阶段的划分还有哪些其他方法，或在划分的过程中还需考虑什么指标？

3. 分析思路

本案例的分析思路旨在引导学生从“为何要划分天然林发育阶段”这一实际问题出发，通过对比传统方法的不足，引出本案例核心技术“基于 TWINSpan 的判别分析法”的必要性与优越性。整体逻辑如下：

1. 问题提出：阐明天然林（尤其是异龄林）发育阶段难以用年龄等传统指标划分的困境。

2.方法介绍：系统介绍 TWINSpan 双向指示种分析如何基于物种组成对样方进行初步分类，并解释为何引入 Fisher 判别分析（基于林分结构指标）能对分类结果进行客观修正与检验，从而克服 TWINSpan 可能存在的错分和人为调整的主观性。

3.案例实证：以长白山云冷杉针叶混交林为例，展示数据准备、指标计算（如多样性指数）、模型应用（R 软件 twinspanR 包）及结果判读的全过程。

4.结果验证与解释：将划分出的三个阶段的林分特征（蓄积量、株数、多样性等）与森林演替的普遍生物学规律进行对比，验证划分的合理性。

5.结论与应用：总结该方法的有效性，并探讨其如何指导不同发育阶段的森林经营实践。

4. 课堂设计

1.课时分配（总计 90 分钟）

1.1 理论导入与问题聚焦（20 分钟）：

教师介绍林分发育阶段划分的意义，对比不同方法的优劣，引出本案例的研究背景与核心问题。

1.2 方法精讲与案例剖析（40 分钟）：

重点讲解“基于 TWINSpan 的判别分析法”的技术原理和步骤。结合案例图表（图 2、表 2、表 3），剖析数据处理、分类过程和结果判读。

1.3 讨论与总结（30 分钟）：

围绕“启发思考题”组织学生进行小组讨论和课堂问答。教师引导学生思考该方法的改进空间和应用前景，并对案例进行总结。

2.教学形式

2.1 讲授法：讲解核心理论与方法。

2.2 案例分析法：引导学生深入解读案例的数据和图表。

2.3 讨论法：通过启发式问题激发学生主动思考与交流。

2.4 演示法：简要演示 R 软件中相关程序包的运行结果，增强学生对技术的直观认识。

5. 要点汇总

本案例的核心在于展示一种客观、定量的天然林发育阶段划分方法——基于 TWINSpan 的判别分析法。通过结合物种组成（TWINSpan 分类基础）与林分结构特征（判别分析修正依据），有效解决了天然异龄林因年龄难以获取、结构复杂而导致传统划分方法失效的难题。案例以长白山云冷杉针叶混交林为例，成功将其划分为三个符合生态学规律的阶段，为该特定森林类型的全周期、分阶段精准经营提供了科学依据。

参考文献

- [1] 龚直文. 长白山退化云冷杉林演替动态及恢复研究[D]. 北京:北京林业大学, 2009.
- [2] 周梦丽.天然云冷杉阔叶混交林发育阶段、优势高和竞争关系研究[D].中国林业科学研究院,2020.
- [3] 沈国舫. 森林培育学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [4] 温远光,元昌安,李信贤等.大明山中山植被恢复过程植物物种多样性的变化[J].植物生态学报,1998(01):34-41.
- [5] National Research Council. People and pixels: Linking remote sensing and social science[M]. National Academies Press, 1998.
- [6] Saldarriaga J G, West D C, Tharp M L, et al. Long-term chronosequence of forest succession in the upper Rio Negro of Colombia and Venezuela[J]. The Journal of Ecology, 1988: 938-958.
- [7] Uhl C, Buschbacher R, Serrao E A S. Abandoned pastures in eastern Amazonia. I. Patterns of plant succession[J]. The Journal of Ecology, 1988: 663-681.
- [8] Moran E F, Brondizio E S, Tucker J M, et al. Effects of soil fertility and land-use on forest succession in Amazonia[J]. Forest Ecology and Management, 2000, 139(1-3): 93-108.
- [9] Goodell L, Faber-Langendoen D. Development of stand structural stage indices to characterize forest condition in Upstate New York[J]. Forest ecology and management, 2007, 249(3): 158-170.
- [10] Podlaski R. Suitability of the selected statistical distributions for fitting diameter data in distinguished development stages and phases of near-natural mixed forests in the Świętokrzyski National Park (Poland)[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 236(2-3): 393-402.
- [11] Feldmann E, Glatthorn J, Hauck M, et al. A novel empirical approach for determining the extension of forest development stages in temperate old-growth forests[J]. European Journal of Forest Research, 2018, 137(3): 321-335.
- [12] Zeller L, Pretzsch H. Effect of forest structure on stand productivity in Central European forests depends on developmental stage and tree species diversity[J]. Forest Ecology and Management, 2019, 434: 193-204.
- [13] 张家来.应用最优分割法划分森林群落演替阶段的研究[J].植物生态学与地植物学学报,1993(03):34-41, 100-101.
- [14] 马姜明,刘世荣,史作民等.川西亚高山暗针叶林恢复过程中不同恢复阶段的定量分析[J].应用生态学报,2007(08):1695-1701.

- [15] 余树全.浙江淳安天然次生林演替的定量研究[J].林业科学,2003(01):17-22.
- [16] 唐守正.多元统计分析方法[M].北京:中国林业出版社,1984:238-249.
- [17] Lu D, Mausel P, Brondizio E, et al. Classification of successional forest stages in the Brazilian Amazon basin[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 181(3): 301-312.
- [18] 李婷婷,陆元昌,张显强等.经营的马尾松森林类型发育演替阶段量化指标研究[J].北京林业大学学报,2014,36(03):9-17.DOI:10.13332/j.cnki.jbfu.2014.03.002.
- [19] 周梦丽,雷相东,国红等. 基于 TWINSpan 分类的天然云冷杉—阔叶混交林发育阶段划分[J].林业科学研究,2019,32(03):49-55.
- [20] 张会儒,汤孟平.金沟岭林场混交林 TWINSpan 分类及演替序列分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2009,33(01):37-42.
- [21] 张金屯.植被数量生态学方法[M].北京:科学出版社,1995.
- [22] Hill M O. A FORTRAN program for arranging multivariate data in an ordered two-way table by classification of the individuals and attributes[J]. Twinspan, 1979.
- [23] Species Assemblages and Indicator Species: The Need for a Flexible Asymmetrical Approach[J]. Ecological Monographs,1997,67(3).
- [24] Kent M, Coker P. 1992. Vegetation description and analysis - A practical approach. JohnWiley & Sons, New York. X+363 p.
- [25] Hill M O, Bunce R G H, Shaw M W. 1975. Indicator species analysis, divisive polythetic method of classification, and its application to a survey of native pinewoods in Scotland. Journal of Ecology. 63:597-613.
- [26] Roleček J, Tichý L, Zelený D, et al. Modified TWINSpan classification in which the hierarchy respects cluster heterogeneity[J]. Journal of Vegetation science, 2009, 20(4): 596-602.

案例三

长白山天然云冷杉针叶混交林立地质量评价方法研究

向玮 陶然

摘要：在生态文明建设全面推进的战略背景下，森林质量精准提升已成为林业可持续发展的核心议题，而森林质量提升的首要目标就是明确既定立地上的最大潜在生产力，即对森林立地质量进行评价。优势高作为反映立地生产力的关键指标，受林分密度和经营措施的干扰较少，是立地质量评价的重要参考因素。然而，当前立地质量评价研究大多集中在人工林，且忽略土壤、地形等环境异质性。本案例通过比较不同优势高计算方法，筛选适用于天然混交林的最优优势高计算方法；结合立地因子（坡度、坡向、海拔、土壤质地），构建多维立地质量评价体系。案例设计涵盖数据采集、模型构建、立地等级划分及综合评估全流程，旨在培养学生通过多源数据融合解决复杂立地评价问题的能力，为天然林可持续经营提供科学依据。

Abstract : In the strategic context of comprehensively promoting the construction of ecological civilization, precise improvement of forest quality has become the core issue of sustainable forestry development, and the primary goal of forest quality improvement is to clarify the maximum potential productivity of a given stand, i.e., evaluating the quality of forest stands. As a key indicator of stand productivity, dominant height is less disturbed by stand density and management measures, and is an important reference factor for stand quality evaluation. However, most of the current research on stand quality assessment focuses on plantation forests and ignores environmental heterogeneity such as soil and topography. In this case, the optimal dominant height calculation method for natural mixed forests was selected by comparing different dominant height calculation methods, and a multidimensional stand quality evaluation system was constructed by combining soil physicochemical properties (organic matter, quick-acting nitrogen, phosphorus, and potassium) and microtopographic factors (slope, slope direction, and terrain humidity index). The case design covers the whole process of data collection, model construction, stand classification and comprehensive assessment, aiming at cultivating students' ability to solve complex stand evaluation problems through the fusion of multi-source data, and providing scientific basis for the sustainable management of natural forests.

关键词：立地质量评价；优势高；立地形法；立地因子；天然混交林

Keywords: Evaluation of stand quality; dominant heights; topographic method;

stand factors; natural mixed forests

作者信息：向玮，北京林业大学林学院教授，副院长；陶然，北京林业大学林学院 2023 级硕士研究生。

5. 案例背景

森林立地质量评价是森林生态系统经营的核心基础,针对不同气候区、不同地形、不同微环境以及树种特征的森林立地质量精准评价是实现科学森林经营的一项基础工作。在《全国森林经营规划(2016-2050年)》中,立地质量评价被列为天然林保护与精准提升的关键技术,尤其在长白山等生物多样性热点区域,科学评价立地质量可为多目标经营提供决策依据,平衡生态保护与资源利用。

林分优势高是评估立地质量和树木生长状况的重要参考因素,由于林分优势木高度受林分密度影响较少,因此是目前立地质量评价采用最广泛的指标。此外,立地因子,主要包括地形因子和土壤因子,是影响林地立地质量的主要因素,对树木的生长过程有显著影响,并且是评估立地质量的关键要素。

6. 案例内容

2.1 林分优势高

林分优势高不仅是衡量森林立地生产力的关键指标,还是评定立地质量和林木生长情况的重要参考,对森林的经营和管理起着至关重要的引导作用^[1]。目前,优势高的定义有多种,测量方法也不尽相同^[2-5],主要有以下几类:(1)林分中优势木和亚优势木的平均高度;(2)林分中单位面积样地上最高树的高度;(3)每公顷 100 棵最粗树或最高树的平均高度;(4)林分中 20% 最粗树木的平均高度。由于优势高的定义方法不同,因此,对于同一林分类型的优势高进行估计得到的估计值会存在较大差异。有研究表明,林分样地的大小和林分密度往往会影 响优势高的估测,这可能会导致优势高的估测存在一定程度的误差^[4,6,7]。现今,一些学者已经针对如何计算林分优势高,以及林分密度和样地大小对优势高估算影响的问题进行了研究^[4,6-10],其结果表明不同优势高估算方法、样地面积和林分密度均会影响林分优势高估算值的准确性。此外,就哪种优势高计算方法最佳,不同的学者给出了不同的结论。例如,Rennolls 对 1951 年种植的云杉林进行了观测,认为在 0.01 ha 的非空小样地(样地上必须有林木生长)中的最粗树是用于林分优势高计算的最佳优势木^[2],但这需要调查样地中的所有林木位置信息。在实际调查中,树木的坐标有时较难获取,在这种情况下,可以选择使用 U 估计方法(U-estimator, UE)和调整最大树(Adjusted largest trees, ALT)方法,作为对优势高几乎无偏差的估计方法^[6,7,9,11]。Ochal 等利用各种优势高计算方法对挪威云杉林的优势高进行了估算,研究结果显示,U 估计方法在计算优势高时可靠性最高。在估测混交林优势树高时,各种树种的构成也会对优势高估测的准确性产生影响^[12],这一影响是相对明确的。目前,这些优势高计算方法多在纯林中进行研究,而在混交林中的研究相对较少。因而,本案例库以长白山天然云冷杉

针叶混交林为研究对象,评估林分密度对优势高估计值的影响以及对优势高计算方法的不确定性,并检验优势高计算方法和林分主要变量因子之间的相关性,进而比较不同优势高计算方法的差异,最终选出较为适合天然云冷杉针叶混交林的优势高计算方法。

2.2 立地质量评价

地位指数法是用基准年龄时的优势木平均高来表示立地质量,该方法在评价森林立地质量的过程中是最有效、最客观的一种方法且多用于人工林^[13]。在编制地位级指数表时,通常选用 Richards 方程、Logistic 方程、Korf 方程、Schumacher 方程、Hossfeld 方程、Gompertz、幂指数等理论生长方程进行拟合。

立地质量评价研究大多集中在人工林,许多在人工林中应用效果良好的评价方法却并不适用于天然林,原因在于天然林的林分结构具有的一些不同特点,天然林多树种混交,林分年龄不统一成为制约其立地质量重要因素^[14]。

针对年龄不统一,难以确定林分准确的年龄,可以考虑用其他指标替代年龄。马建路等发现天然林中优势木胸径与优势木树高的关系比年龄与树高更密切,因此使用胸径代替年龄的方法表达立地指数^[15]。也可以使用不依赖年龄的评价指标,例如孟宪宇和葛宏立利用建立的直径生长方程的渐近线参数作为立地质量评价标准,引入了与年龄无关的去皮直径极值^[16];利用与已知立地指数的其他树种通过方程进行转化^[17];直接利用土壤和地形等立地因子^[18]。

关于天然林立地质量评价,目前有诸多探索与研究。陈丽霞^[19]等以天然常绿阔叶林为研究对象,选取坡位、海拔、坡度等立地因子,采用主成分分析和数理化理论 I 对立地质量进行评价。宋长江^[20]分别采用基于立地因子的间接评价方法和直接评价法(地位级指数和立地形)对硬阔叶混交林、软阔叶混交林的立地质量进行评价。沈剑波^[21]以广东省的针阔混交异龄林为对象,引入机器学习中的神经网络算法,开展了基于地位指数和立地形的立地质量评价方法的研究及比较研究。

本案例库以选出的优势高计算方法计算林分优势高,选取常用的理论生长方程(Richards 方程、Logistic 方程、Korf 方程、Schumacher 方程、Hossfeld 方程、Gompertz 等)并拟合林分优势高-林分胸径导向曲线,采用立地形法对天然云冷杉针叶混交林进行立地质量评价。

2.3 试验区概况

研究区位于吉林省延吉市金沟岭林场,地处 $43^{\circ} 17' \sim 43^{\circ} 25' \text{ N}$, $130^{\circ} 05' \sim 130^{\circ} 20' \text{ E}$ 。研究区整体表现为低山丘陵地貌,海拔介于 600~780 m,平均坡度介于 $10^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 。气候属于温带大陆性季风气候,年平均降水量在 600~700 mm 左右,且主要集中在 7 月,年平均气温约为 3.9°C ,该区主要的土壤类型为暗棕

壤。研究区内主要树种有鱼鳞云杉（*Picea jezoensis* var. *komarovii*）、臭冷杉（*Abies nephrolepis*）、红松（*Pinus koraiensis*）、五角槭（*Acer momo*）、春榆（*Ulmus japonica*）、紫椴（*Tilia amurensis*）、蒙古栎（*Quercus mongolica*）、白桦（*Betula platyphylla*）、硕桦（*Betula costata*）等。

2.4 数据获取及预处理

样地数据采自吉林省汪清林业局金沟岭林场的 46 块 0.04 hm² (20 m×20 m) 的天然云冷杉针叶混交林检查法固定监测样地。样地于 1987 年设置，总面积为 95.2 hm²，采用机械抽样方法等距布设，样地内乔木树种包括臭冷杉、鱼鳞云杉、红松、椴树、五角槭等。2022 年 7 月，对检查法样地中 46 块样地进行实地调查，主要测量样地内胸径≥5 cm 的树木的胸高直径、树高等因子。根据不同树种的一元材积方程和异速生长量方程，对样地内各树种的单木材积和生物量进行计算，并以此计算出林分总的蓄积量（所有单木材积之和）和生物量（所有单木的生物量之和）。此外，本案例使用 2017 年和 2022 年的固定样地的胸径数据，用于计算胸高断面定期平均生长量△BA。本案例中样地的林分特征见表 1。

表 1 样地林分特征因子统计

Table 1 Statistics of forest stand characterization factors in the sample site

变量 Variable	林分平均胸径 Average stand DBH/cm	林分平均高 Average stand height /m	林分密度 Stand density/ (tree·hm ⁻²)	海拔 Altitude/ m	坡度 Slope /(°)	坡向 Aspec t/(°)	林分胸高断 面积 Stand basal area/ (m ² ·hm ⁻²)	林分蓄积量 Stand volume/ (m ³ ·hm ⁻²)	林分生物量 Stand biomass/ (t·hm ⁻²)
最小值 Min	13.10	8.59	500	647	8	0	15.26	90.89	49.46
最大值 Max	25.60	17.15	2000	759	31	315	50.68	491.41	268.41
平均值 Mean	18.50	11.64	793	702	11	235	28.59	245.79	140.18

2.5 总体技术方法与关键步骤

2.5.1 优势高计算方法

所使用的优势高估算的基础方法为：

（1）传统方法（Conventional estimation，CE）。该方法是从样地中选出 ACE 株的最粗或者最高的树作为优势木，并计算出这些树的树高的平均值，以此作为该样地的优势高（DH_{CE}）。

（2）调整最大树法（ALT）。此方法是从样地中挑选得到 A_{ALT} 株最粗树或最高树，并计算出这些树的树高的平均值作为优势高（DH_{ALT}）。若计算得到的 A_{ALT} 值为非整数，那么该值将被近似为最接近的两个整数值，并利用线性内插法计算

得到 DH_{ALT} 。

(3) U 估计 (UE)。该方法是从样地所有林木中抽取 k 株林木形成组合，然后统计每个组合中最高树的树高，计算其均值，以此作为优势高 (DH_{UE})。 k 值计算方法见表 1，若 k 为非整数，则按照四舍五入法则进行取整。

在对混交林进行优势高计算时，不同的优势木选择策略可能会使计算结果产生差异。关于优势木的选择，本案例考虑了以下几种选择标准：C1:仅选择最粗树；C2:仅选择最高树；C3:结合最粗树和不同树种差异；C4:结合最高树和不同树种差异。结合上述优势高的三种基础估算方法，共有 10 种计算方法，汇总如下：

表 2 各优势高计算方法

基础优势高计算方法	优势木选择策略	优势高计算方法	公式
方法	Dominant tree selection strategy	Dominant height calculation methods	Formula
CE	C1	DH1	$DH1 = \sum_{m=1}^a (h_{DBH})_m / a, a = S \times 100$
	C2	DH2	$DH2 = \sum_{m=1}^a (h)_m / a, a = S \times 100$
	C3	DH3	$DH3 = \sum_{n=1}^i \sum_{m=1}^{a_n} (h_{DBH})_m / \sum_{n=1}^i (a)_n,$ $a_n = (g_n/G) \times S \times 100$
	C4	DH4	$DH4 = \sum_{n=1}^i \sum_{m=1}^{a_n} (h)_m / \sum_{n=1}^i (a)_n,$ $a_n = (g_n/G) \times S \times 100$
ALT	C1	DH5	$DH5 = \frac{\sum_{m=1}^a (h_{DBH})_m}{a}, a = 1.6 \times S \times 100 - 0.6$
	C2	DH6	$DH6 = \sum_{m=1}^a (h)_m / a, a = 1.6 \times S \times 100 - 0.6$
	C3	DH7	$DH7 = \sum_{n=1}^i \sum_{m=1}^{a_n} (h_{DBH})_m / \sum_{n=1}^i (a)_n,$ $a_n = (g_n/G) \times 1.6 \times S \times 100 - 0.6$
	C4	DH8	$DH8 = \sum_{n=1}^i \sum_{m=1}^{a_n} (h)_m / \sum_{n=1}^i (a)_n,$ $a_n = (g_n/G) \times 1.6 \times S \times 100 - 0.6$
UE	C1	DH9	$DH9 = \sum_{m=1}^f h_m / f, f = C_A^k, k = \text{round}(\frac{A}{100 \times S})$
	C4	DH10	$DH10 = \sum_{n=1}^i \sum_{m=1}^{f_n} h_m / \sum_{n=1}^i f_n, f_n = C_{A_n}^{k_n}, k_n = \text{round}(\frac{A_n}{100 \times S})$

注：DH1-DH10 是各类优势高计算方法； S 为样地面积； a 、 a_n 是在某样地所有树种和第 n 个树种中选择出的林木株数； h_{DBH} 、 h 是根据胸径和树高所选出的林木的树高； i 是某样地中所有树种的数量； G 、 g_n 是某样地中所有树种和第 n 个树种的胸高断面积； f 、 f_n 是样地中所有树种和第 n 个树种的树高组成的组合个数； k 、

k_n 是样地中所有树种和第 n 个树种树高组合中的林木株数； A 、 A_n 是样地中所有树种和第 n 个树种的林木株数； m 为样地中挑选出的某株林木。

2.5.1 构建林分优势高-年龄生长模型

(1) 导向曲线

在林分优势木平均高生长曲线簇中，有一条代表在中等立地条件下，林分优势木平均高随年龄或者平均胸径变化的平均生长曲线，称为导向曲线。导向曲线的选择对立地质量评价结果的准确性有着直接的影响，一般来说，导向曲线不仅需要对数据进行最优化的拟合，又要符合生物学规律，良好的导向曲线应该呈平滑的‘S’形，并且具有上限渐进线。拟合导向曲线的候选模型主要有：理查德方程、考尔夫方程、舒马克方程、单分子方程、坎派兹方程、逻辑斯蒂方程、幂指数方程等。本案例候选的理论生长方程如下：

表 3 优势高-优势胸径备选理论生长方程

序号	理论生长方程	表达式
1	理查德 Richards	$H=1.3+a*(1-exp(-b*DBH))^c$
2	逻辑斯蒂 Logistic	$H =1.3+a/(1+b*exp(-c*DBH))$
3	考尔夫 Korf	$H=1.3+a(exp(-b/DBH^c))$
4	舒马克 Schumacher	$H=1.3+a*exp(-b/DBH)$
5	坎派兹 Gompertz	$H=a*exp(-b*exp(-c*DBH))$
6	单分子式 Mitscherlich	$H=a+b*exp(-c*DBH)$
7	抛物线 Parabolic	$H=a+b*DBH+c*DBH^2$
8	修正韦伯 Modified weibull	$H=1.3+a(1-exp(-b*DBH^c))$
9	幂函数 Power function	$H =a*DBH^b$
10	霍斯菲尔德 Hossfeld	$H=a/(1+b*DBH^c)$

将决定系数 R^2 、均方根误差 RMSE、平均绝对误差 MAE 作为模型的主要评价指标，最终筛选出预测精度较高的模型为天然云冷杉针叶混交林导向曲线的拟合方程。相关计算公式如下：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \hat{h}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h}_i)^2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \hat{h}_i)^2}{n-1}}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |h_i - \hat{h}_i|}{n}$$

式中， h_i 为第 i 个样本的实测值， $\bar{h}_i$ 为样本的平均值， $\hat{h}_i$ 为第 i 个样本的预估值， n 为所有样本数。

(2) 立地分级

基于最优模型，绘制林分优势高生长曲线，即将散点图画到地位指数曲线簇之中，并根据优势高不同生长趋势，划分出若干立地等级。

2.6 结果分析

2.6.1 优势高计算方法结果

本案例库研究发现，各种优势高计算方法间具有显著性差异，其中，CE 法和 ALT 法的各个优势高计算方法之间的相关关系更为显著（图 1）；林分优势高和林分密度指数之间有不同的变化趋势，林分密度对优势高估计影响较小或存在线性关系（图 2）；林分优势高与不同林分主要变量因子之间的相关性各异，各类优势高与加权平均高相关性较强，与林分蓄积量、生物量以及断面积定期生长量之间呈现中度相关（表 4）。

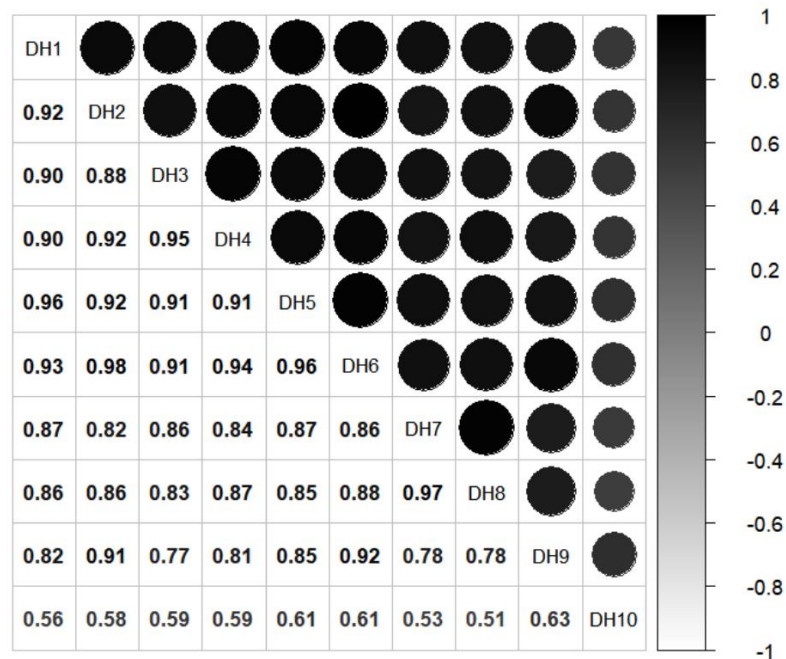
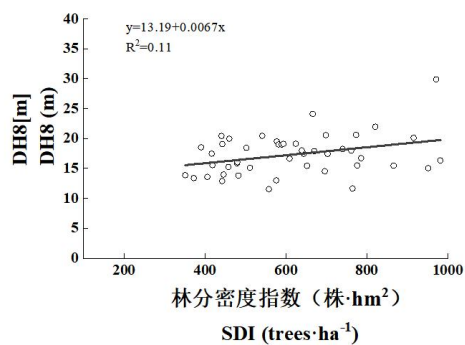
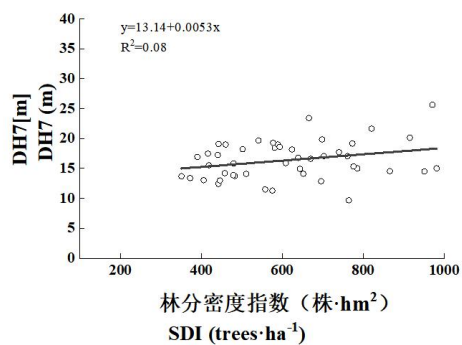
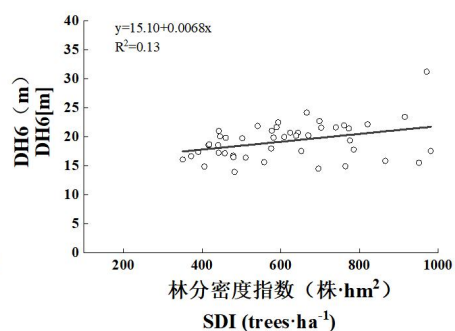
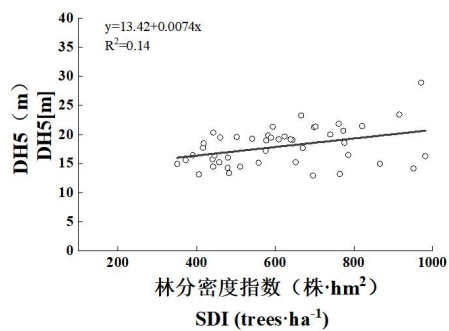
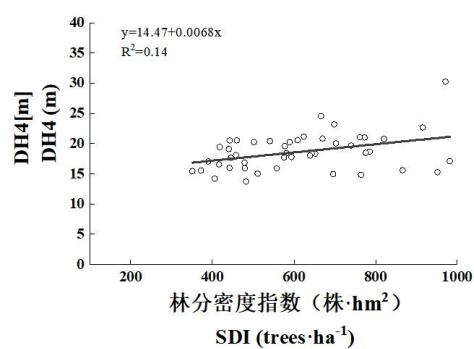
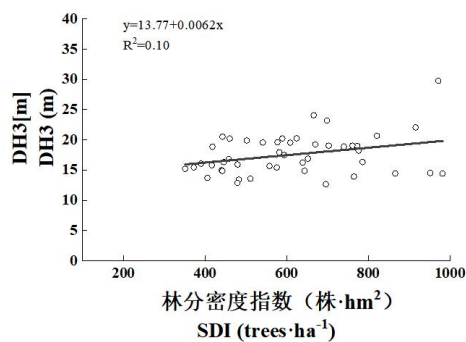
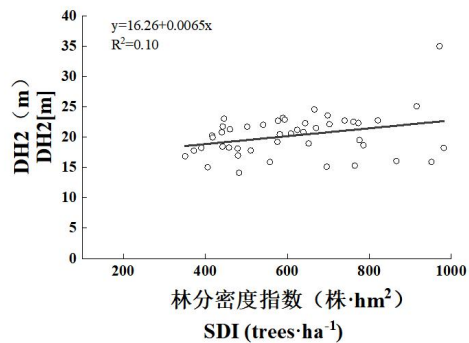
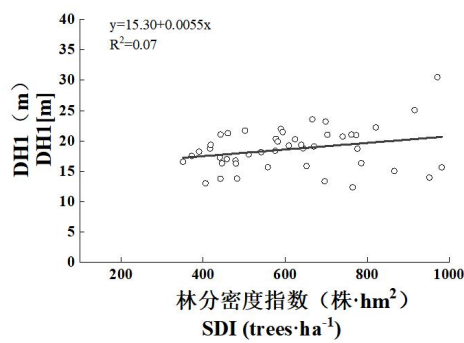


图 1 各优势高估计值间的相关性

Fig.1 The correlation between different estimates of dominance height



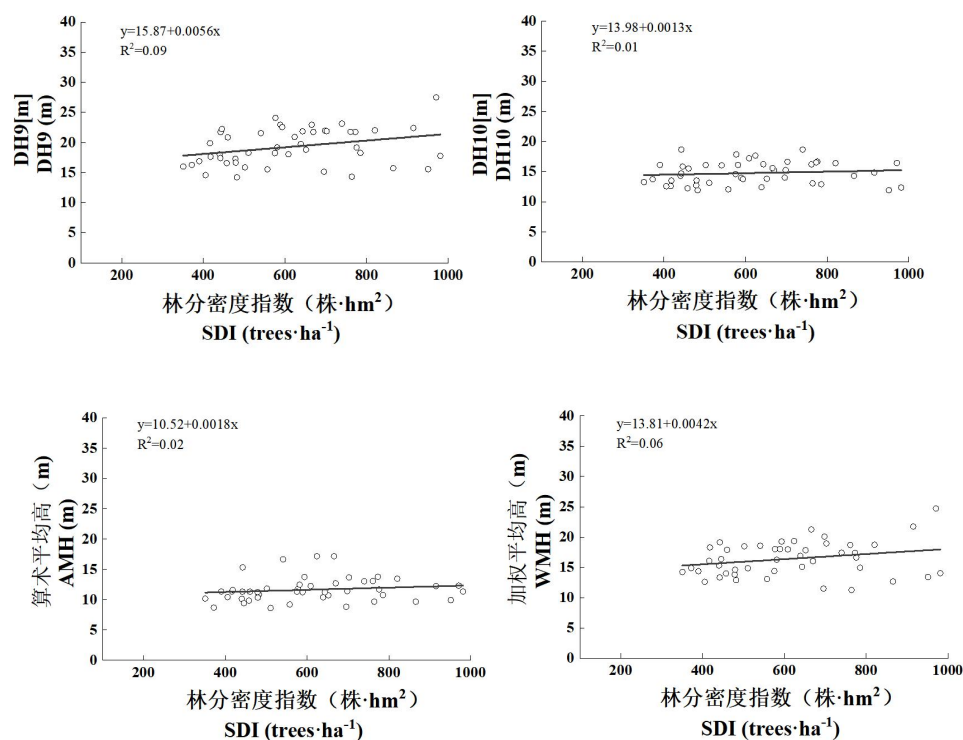


图 2 林分密度对优势高估计的影响

Fig.2 Effects of stand density on top height estimates

表 4 DH1-DH10 与林分主要变量因子的相关性

Table 4 The correlation between DH1-DH10 and the main variable factors of forest stands

优势高计算方法 Dominant height calculation methods	林分主要变量因子 Main variable factors of forest stands				
	算术平均高 AMH	加权平均高 WMH	蓄积量 V	生物量 Bio	断面积定期平 均生长量 △BA
DH1	0.54	0.92	0.44	0.33	0.47
DH2	0.51	0.90	0.44	0.36	0.48
DH3	0.61	0.92	0.45	0.36	0.44
DH4	0.61	0.90	0.50	0.40	0.45
DH5	0.64	0.93	0.52	0.43	0.50
DH6	0.62	0.92	0.48	0.40	0.49

DH7	0.66	0.86	0.41	0.29	0.46
DH8	0.60	0.82	0.43	0.32	0.45
DH9	0.58	0.83	0.40	0.34	0.48
DH10	0.62	0.58	0.13	0.11	0.35

从林分密度、立地生产力以及不确定性 3 个层面综合分析后发现，在估算天然云冷杉针叶混交林优势高时，DH6 计算方法表现较好，可作为该地区天然云冷杉针叶混交林优势高的计算方法。

2.6.1 立地分级

本案例库综合各类模型结果，认为舒马克方程的拟合效果最好，优势高生长曲线如下图所示。

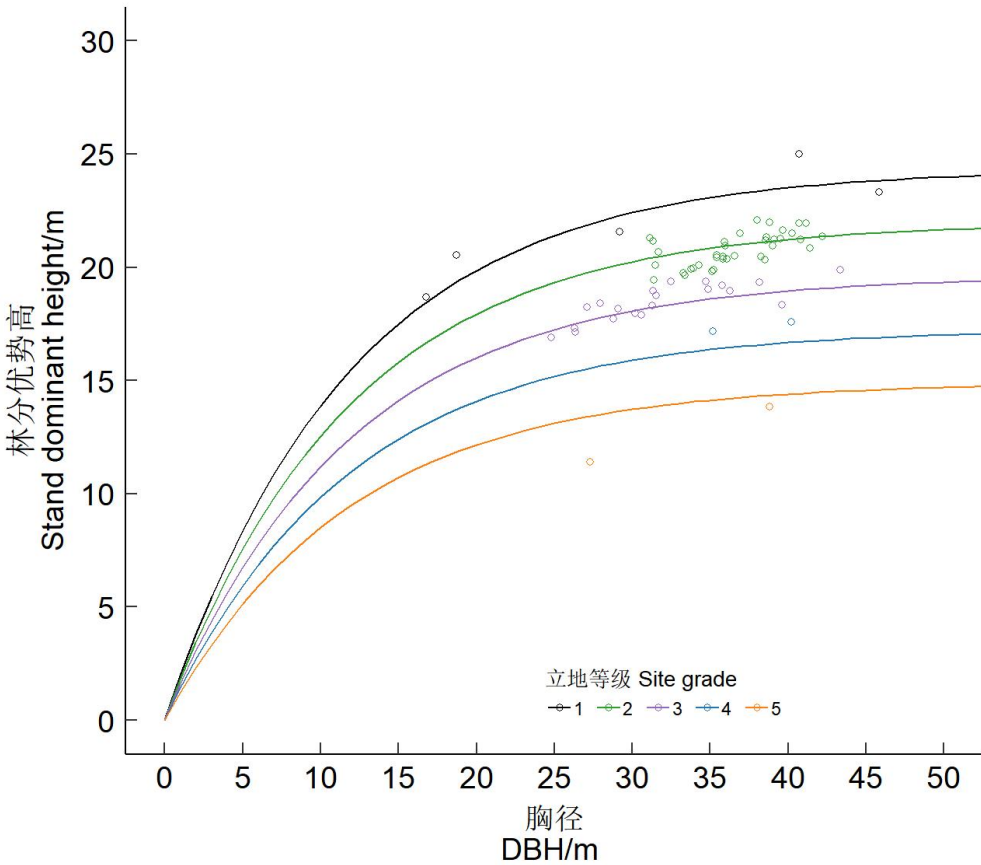


图 3 优势高生长曲线图

由图 3 可知，基于选定的最优优势高计算方法（DH6）和拟合效果最佳的舒马克生长方程，绘制了林分优势高随年龄变化的生长曲线簇。图中的散点代表了不同样地，五条不同颜色的曲线则分别代表了划分出的五个立地等级。其中，立地等级 1（黑色曲线）代表最高的生长潜力，表明在相同年龄下具有最大的优势高；立地等级 5（橙色曲线）代表最低的生长潜力，曲线位置最低。各样地根据

其在图中的位置被划分到相应的立地等级，直观展示了研究区内天然云冷杉针叶混交林立地质量的差异。

7. 总结

本案例研究聚焦于长白山地区天然云冷杉针叶混交林的立地质量评价，旨在克服现有评价体系多偏重人工林且忽视环境异质性的局限性。研究系统比较了十种基于不同优势木选择标准与估算方法的林分优势高（DH）计算方法。统计分析表明，不同优势高计算方法间存在显著差异，其中 CE 法与 ALT 法内部各方法间相关性较高。林分密度对多数优势高估测值的影响较小或呈线性关系。相关性分析显示，各优势高估测值与加权平均高（WMH）呈强相关，与林分蓄积量（V）、生物量（Bio）及断面积定期平均生长量（ ΔBA ）呈中等程度相关。综合考量林分密度影响、立地生产力表征能力及不确定性，研究最终确定 DH6 为该区域天然云冷杉混交林优势高的最优计算方法。

在立地质量评价阶段，通过对多种理论生长方程的拟合优度检验，确定 Richards 方程能最佳描述林分优势高随优势胸径的生长轨迹，并以此构建导向曲线。基于选定的导向曲线，成功将研究区内的天然云冷杉针叶混交林划分为五个立地质量等级。该评价体系为该地区天然林的精准经营和可持续管理提供了依据。

8. 问题思考

（1）目前我国常用的优势高计算方法有哪些？针对人工林和天然林，目前都有哪些关于优势高计算方法和立地质量评价的研究？

（2）对本案例中提出的优势高计算方法进行分析探讨，寻找不足之处，试提出再改进方法。

（3）你认为当前的立地分级还有哪些其他方法？

教学指导手册

天然云冷杉针叶混交林立地质量评价教学案例库建设方案

2. 教学目标

2.1 教学用途

本案例可作为相关课程实验或野外实习的补充材料, 指导学生进行数据分析、模型构建和结果解释的练习。有效引导学生解决在复杂林况(天然混交异龄林)下进行立地质量评价的实际问题。学生通过学习, 可完整体验“确定关键指标—优化计量方法—构建评价模型—划分立地等级”的研究全过程, 从而提升其解决复杂林业问题的综合能力。

2.2 授课对象

本案例主要授课对象为为林学、森林经理学的学生。要求学生具备一定的《测树学》、和《概率论与数理统计》基础知识。

2.3 适用课程

森林经理学、林学、测树学

2.4 教学目的

使学生理解森林立地质量评价的定义和重要性, 并明确其作为森林经营规划与生产力预测的基础作用; 使学生了解立地质量评价的多种方法(如地位指数法、立地形法), 并重点理解为何在天然异龄林中需采用不依赖于年龄的指标(如优势木胸径); 使学生掌握比较和筛选最优林分优势高计算方法的流程与标准, 同时, 掌握利用理论生长方程(如 Richards 方程)构建优势高-优势胸径导向曲线, 并进行立地分级的方法。

2.启发思考题

(1) 目前我国常用的优势高计算方法有哪些? 针对人工林和天然林, 目前都有哪些关于优势高计算方法和立地质量评价的研究?

(2) 对本案例中提出的优势高计算方法进行分析探讨, 寻找不足之处, 试提出再改进方法。

(3) 你认为当前的立地分级还有哪些其他方法?

3.分析思路

本案例的分析思路紧密围绕“如何在天然异龄林中进行可靠的立地质量评价”这一核心挑战展开，其逻辑链条清晰，层层递进：

1.确定评价指标：首先论证了在天然异龄林中，相较于年龄，林分优势高是更稳定、受密度干扰更小的立地质量评价指标。

2.优化指标计算：认识到“优势高”的计算方法本身存在不确定性，案例并未直接使用某一传统方法，而是系统比较了 10 种不同的计算方法（CE、ALT、UE 等结合不同优势木选择策略）。通过分析，最终筛选出最适用于本研究区林分的优势高计算方法（DH6）。

3.构建评价模型：针对天然林年龄难获取的问题，采用林分优势木平均胸径（DBH）替代年龄作为自变量，拟合优势高生长曲线。通过比较 10 种常用理论生长方程的拟合精度，选定舒马克方程为最优模型。

4.划分立地等级：基于拟合出的最优导向曲线模型，构建优势高生长曲线簇，并将研究区内的样地划分为五个不同的立地质量等级，直观地展示了立地生产力的空间差异。

5.指导经营实践：最终的评价结果可为该地区天然林的可持续经营，如确定适生树种、制定合理的采伐和抚育强度等，提供决策依据。

4. 课堂设计

1.课时分配（总计 120 分钟）

1.1 理论导入与案例总览（30 分钟）：

介绍立地质量评价的背景、传统方法的局限性，并概述本案例的研究目标与技术路线。

1.2 方法剖析与研讨（50 分钟）：

重点讲解 10 种优势高计算方法的原理与差异，并引导学生根据案例中的图表（图 1、图 2、表 4）讨论筛选最优方法（DH6）的依据。同时，讲解如何选择和评价生长模型。

1.3 结果应用与展望（40 分钟）：

展示最终的立地分级图，并围绕启发思考题（特别是第 2、3 题）组织讨论，探讨方法的改进和其他立地分级技术，最后进行总结。

2.教学形式

2.1 讲授与讨论结合：教师讲解核心方法论，学生围绕关键步骤和结果进行研讨。

2.2 数据驱动教学：充分利用案例中的图表和数据，培养学生基于证据进行

科学判断的能力。

2.3 任务驱动：可将“如何选出最佳优势高方法”和“如何构建评价模型”作为两个连续的任务，引导学生逐步解决。

5. 要点汇总

本案例的核心贡献在于为天然混交异龄林这一复杂林况提供了一套系统、科学的立地质量评价方案。其关键特色体现在两个层面：一是指标计算的严谨性，通过对 10 种优势高计算方法的系统比较，解决了评价指标自身的不确定性问题，最终确定 DH6 为最优方法；二是评价模型的适应性，运用优势木平均胸径替代年龄，构建了适用于天然林的舒马克生长模型，并据此成功划分了五个立地等级，为长白山地区云冷杉林的精准经营提供了技术支撑。

参考文献/资料

- [1] 沈剑波, 雷相东, 王虎威, 等. 针阔混交异龄林林分优势高的确定方法[J]. 林业与环境科学, 2019, 35(1): 43-48.
- [2] SHARMA M, AMATEIS R L, BURKHART H E. Top height definition and its effect on site index determination in thinned and unthinned loblolly pine plantations[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 168(1-3): 163-175.
- [3] RENNOLLS K. "Top Height"; Its definition and estimation[J]. The Commonwealth Forestry Review, 1978, 57(3): 215-219.
- [4] RITCHIE M, ZHANG J, HAMILTON T. Effects of Stand Density on Top Height Estimation for Ponderosa Pine[J]. Western Journal of Applied Forestry, 2012, 27(1): 18-24.
- [5] NAKAI T, SUMIDA A, KODAMA Y, *et al.* A comparison between various definitions of forest stand height and aerodynamic canopy height[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(9): 1225-1233.
- [6] GARCÍA O. Estimating top height with variable plot sizes[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1998, 28(10): 1509-1517.
- [7] GARCÍA O, BATHO A. Top Height Estimation in Lodgepole Pine Sample Plots[J]. Western Journal of Applied Forestry, 2005, 20(1): 64-68..
- [8] MAGNUSSEN S. Effect of Plot Size on Estimates of Top Height in Douglas-Fir[J]. Western Journal of Applied Forestry, 1999, 14(1): 17-27.
- [9] OCHAL W, SOCHA J, PIERZCHALSKI M. The effect of the calculation method, plot size, and stand density on the accuracy of top height estimation in Norway spruce stands[J]. iForest - Biogeosciences and Forestry, 2017, 10(2): 498-505.
- [10] ZHOU M L, LEI X D, DUAN G S, *et al.* The effect of the calculation method, plot size, and stand density on the top height estimation in natural spruce-fir-broadleaf mixed forests[J]. Forest Ecology and Management, 2019, 453: 117574.
- [11] MASON E G. Influences of mean top height definition and sampling method on errors of estimates in New Zealand's forest plantations[J]. New Zealand Journal of Forestry Science, 2019, 49.
- [12] MIREN D R, PRETZSCH H, ALBERDI I, *et al.* Characterization of the structure, dynamics, and productivity of mixed-species stands: review and perspectives[J]. European Journal of Forest Research, 2016, 135(1): 23-49.
- [13] Fonweban J N, Tchanou Z, Defo M. Site index equations for *Pinus kesiya* in Cameroon[J]. Forest Science, 1995, 8: 24-32.
- [14] 刘鑫. 长白山天然云冷杉针阔混交林立地质量评价研究[D]. 北京林业大

学,2017.

[15] 马建路, 宣立峰, 刘德君.用优势树全高和胸径的关系评价红松林的立地质量[J].东北林业大学学报,1995,(02):20-27.

[16] 孟宪宇, 葛宏立.云杉异龄林立地质量评价的数量指标探讨[J].北京林业大学学报,1995,(01):1-9.

[17] 周琪. 南方主要造林树种的对等转换初探—浙江省开化县杉木、马尾松的对等转换[J]. 华东森林经理, 1987(1): 23-29.

[18] 王璐, 王海燕, 何丽鸿, 等. 天然云冷杉针阔混交林立地质量评价[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(3): 1-7.

[19] 陈丽霞. 天然常绿阔叶林生长潜力的研究[D]. 福建农林大学, 2008.

[20] 宋长江. 帽儿山实验林场天然次生林立地质量综合评价[D]. 东北林业大学, 2023.

[21] 沈剑波. 基于广东省针阔混交异龄林的立地质量评价方法研究[D]. 中国林业科学研究院, 2018.

案例四

云冷杉针叶混交林全周期生态系统服务多功能量化及权衡-协同关系研究

向玮 王轶夫 梁传林 徐德鹏

摘要：云冷杉针叶混交林是我国北方的重要生态屏障，能够同时提供多种生态系统服务，而在林分的发育过程中，森林生态系统提供多种服务的能力也会发生变化，这种变化需要量化才能直观地体现出来。因此，本案例旨在探讨森林生态系统服务多功能性进行指标的量化，并探究其随着林分的发育会如何变化，同时对不同服务之间的权衡-协同关系进行研究，比较不同周期下其权衡-协同关系的转变，以便在森林发育周期的不同阶段制定更有针对性的经营措施，为森林的全周期经营提供理论依据。本案例对生产力，水源涵养等 11 种生态系统服务进行量化和权衡-协同关系的研究，案例设计涵盖各生态系统服务的数据获取，生态系统服务的量化，生态系统服务多功能性指数的计算，两两服务之间的权衡-协同关系分析，能够让学生了解生态系统服务的量化方式与权衡-协同关系的分析，从生态系统服务的多功能性方面为天然林林可持续经营提供科学依据。

Abstract: Abies-Picea coniferous mixed forests, as critical ecological barriers in northern China, are capable of concurrently delivering multiple ecosystem services. The capacity of forest ecosystems to provide these services evolves dynamically during stand development, necessitating quantitative characterization to elucidate such variations. This study aims to (1) establish quantifiable indicators for assessing the multifunctionality of forest ecosystem services, (2) investigate their temporal dynamics across stand developmental stages, and (3) analyze the trade-offs and synergies among individual services while evaluating shifts in these relationships under varying developmental cycles. The findings are intended to inform stage-specific management strategies and provide a theoretical foundation for full-cycle forest management. This case study quantifies 11 ecosystem services—including productivity, water conservation, and others—and systematically examines their trade-offs and synergies. The methodological framework encompasses data acquisition, ecosystem service quantification, multifunctionality index calculation, and pairwise trade-off/synergy analysis. Through this approach, students gain insights into the quantification methodologies and analytical techniques for ecosystem service interactions. The research underscores the multifunctional value of natural forests and offers scientific guidance for sustainable management practices, emphasizing the integration of ecosystem service dynamics into long-term forest stewardship.

关键词：生态系统服务；多功能性；权衡-协同关系；云冷杉针叶混交林

Keywords : Ecosystem services; Versatility; trade-offs-synergies; Spruce fir coniferous mixed forest

作者信息：向玮，北京林业大学林学院教授，副院长；王轶夫，北京林业大学林学院副教授；梁传林，北京林业大学林学院 2024 级硕士研究生；徐德鹏，北京林业大学林学院 2022 级硕士研究生。

1. 案例背景

森林经营目标从早期的木材生产，林下产品等经济效益，逐渐发展成经济效益，文化效益和社会效益三大方面。而森林的多种生态系统服务也逐渐被人们所重视，联合国千年生态系统评估将人类从生态系统获得的所有惠益称为服务，生态系统服务被分为四大类：供给、调节、文化和支持。而不同的生态系统服务之间具有权衡-协同关系，通过量化林分碳汇、水源涵养、生物多样性保育等服务的综合能力，能够指导管理者识别关键生态阈值（如冠层郁闭度、凋落物分解速率），权衡木材生产与调节服务间的资源分配，给森林可持续经营提供科学依据。

2. 案例内容

2.1 生态系统服务指标的量化及生态系统服务多功能性指数计算

生态系统多功能性（ecosystem multifunctionality, EMF）是指生态系统同时提供多种生态系统功能或服务的能力^[1]。森林生态系统能够同时提供多种服务功能，主要表现为调节、支持、供给、文化四个方面的服务功能^[2]，以往森林的经营管理主要以其提供木材生产的供给服务为主，而随着经济和社会的逐渐发展，关注森林的碳汇、生物多样性等服务变得至关重要，生态系统服务多功能性的量化也越来越受到人们的重视。Hector 等^[2]提出功能物种替代法，用来量化生态系统服务多功能性，标志着生态系统多功能量化研究的开始；此后，Gamfeldt 等^[3]提出阈值法用来研究植物、细菌和捕食者对生态系统服务多功能性的影响；该方法的主要弊端是统一阈值选择的标准，导致用不同的标准处理生态系统服务功能可能会得到不同的结果^[4]。Hooper 等^[5]在研究植物组成和多样性对养分循环的影响时提出平均值法，此方法其简单、直观成为了量化生态系统服务多功能性最为常用的方法^[6]，因此目前多数研究都采用此方法来量化生态系统的各项服务功能和多功能性^[7, 8]。

而森林生态系统的各项服务在森林的不同发育阶段是不同的，如刘佩伶等^[9]对鼎湖山保护区森林研究结果显示森林从发育初期阶段到顶级群落森林的土壤蓄水量逐渐提高、水土保持服务逐渐增强；王振鹏等^[10]在湘中丘陵区森林采用空间代替时间的方法研究了森林不同恢复阶段的碳储量变化，结果表明随着植被恢复，森林植被生物量和碳储量都逐渐增加；He L 等^[11]在美国森林生产力的研究中得出森林在发育初期到后期生产力逐渐增加后缓慢降低。但目前关于多功能性随森林发育变化的研究较少，如 Jönsson M 等^[12]在研究中发现，随着林龄的增加森林的多功能性呈逐渐增强的趋势。

2.2 生态系统服务间的权衡-协同关系研究

生态系统服务之间存在权衡与协同关系，权衡是指某种生态系统服务的收益

是以减少另一种生态系统服务为代价的情况,协同是指 2 种或者多种生态系统服务同增或者同减的情况^[13]。各服务之间的权衡-协同关系受驱动因子的影响,探究生态系统服务之间的权衡-协同关系,能够反映出生态系统的潜在问题与人为活动对生态系统环境的影响。对生态系统服务的权衡-协同关系进行量化的方法有多种,王玉香等^[14]采用 Pearson 相关系数评估了研究区自然资本与包容性财富之间的整体协同或权衡水平;李娜等^[15]则用生态系统服务权衡/协同度(ecosystem serices trade-off degree, ESTD)模型对黄土丘陵区生态系统服务响应权衡-协同关系进行量化分析;黄学煜等^[13]用均方根偏差来计算陇东黄土高原的生态系统服务间的权衡度。均方根偏差(RMSD)可用于量化 2 个或多个生态系统服务间的权衡度,本案例采用均方根偏差法来进行生态系统服务间的权衡-协同关系研究。

2.3 试验区概况

样地数据来自吉林省汪清林业局金沟岭林场 2000-2022 年检查法固定样地,从中选取云冷杉为主要树种的林分类型为云冷杉针叶混交林的样本共 2589 个,其中 348 个样地面积为 0.09hm²,其余样地面积均为 0.04 hm²。土壤数据由中国科学院生态环境研究中心(<https://www.scidb.cn/>)获取^[16],气象数据来自亚太地区气候数据软件 ClimateAP^[17]。

2.4 总体技术方法与关键步骤

2.4.1 各生态系统服务的量化方法

本文从供给、调节、支持三类服务中共选取 13 个长白山林区常用的指标来量化森林生态系统服务多功能及多功能性^[18],生态系统服务和量化指标的选择情况见表 1。

表 1 生态系统服务量化指标
Tab. 1 Quantitative indicators of ecosystem services

生态系统服务类别	生态系统服务	量化指标	单位
供给服务	生产力	林分生产力	$t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$
	木材生产	林分公顷蓄积量	$m^3 \cdot hm^{-2}$
	林产品	红松种子产量	$个 \cdot hm^{-2}$
	碳汇	林分碳储量	$t \cdot hm^{-2}$
调节服务	净化空气	林分提供负离子量	$10^{18} 个 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$
	气候调节	年热:湿指数 (AHM)	/
	土壤保持	土壤保持量	$t/hm^2 \cdot a$
	水源涵养	蓄水量	$t/hm^2 \cdot a$
支持服务	生物多样性	香农多样性指数	/
	栖息地	栖息地指数	/
	野生动物生境	觅食地、水源地	/
	觅食地、水源地	觅食地指数	/
	隐蔽地	隐蔽地指数	/

2.4.1.1 生产力

采用固定样地的地上部分五年生物量增量的平均值表示样地的林分生产力。公式如下：

$$\Delta AGB = \frac{AGB_t - AGB_{(t-5)}}{5 \times S}$$

式中， ΔAGB 表示林分生产力，单位为 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ ； AGB_t 表示样地当年的生物量， AGB_{t-5} 表示样地 5 年前的生物量，单位为 t ； S 表示样地面积，单位为 hm^2 。

2.4.1.2 木材生产

采用林分公顷蓄积量来量化森林的木材生产服务，基于固定样地数据，通过一元材积方程得到单木材积，累加后除以样地面积得林分公顷蓄积量。

2.4.1.3 林产品

使用红松胸径和第一活枝下高数据估算红松的单木种子产量，累加后除以样地面积得林分的公顷红松种子产量。红松的单木种子产量计算公式如下^[19]：

$$HS = 0.2283 \times (D^2 \times BH)^{0.5306}$$

式中， HS 表示单木红松种子产量，单位：个； D 表示胸径，单位：cm， BH 表示第一活枝下高，单位：m。

2.4.1.4 碳汇

林分碳储量能够直接反映森林碳汇服务，因此选取林分碳储量作为碳汇功能的量化指标。林木地上部分碳储量通过当地的一元生物量公式计算，将单木生物量乘以含碳系数（取 0.5）得到单木碳储量^[20]。累加后除以样地面积得林分碳储量。

2.4.1.5 净化空气

林分提供负离子量依据行业标准《森林生态系统服务功能评估规范》（GB/T 38582-2020）中以下公式进行计算^[21]：

$$G = 5.256 \times 10^{15} \frac{Q}{A} \times \frac{H}{L}$$

式中， G 为林分提供负离子量，单位：个/ $hm^2 \cdot a$ ； Q 为林分内负离子浓度，林地取 3000，单位：个/ cm^3 ； A 为林分面积，单位： hm^2 ； H 为林分高度，单位：m； L 为负离子寿命，林地取 20，单位：min。

2.4.1.6 气候调节

森林有对周边环境温度和水分条件的调控作用。本案例采用年热：湿指数

(AHM)作为量化气候调节的指标。AHM 越小，意味着环境越湿润，否则越干燥。数据来自软件 ClimateAP 生成的各样地气候数据^[17]。AHM 的计算公式如下：

$$AHM = \frac{(MAT + 10)}{(MAP/1000)}$$

式中， MAT 为年均温，单位为℃； MAP 为年降水量，单位为 mm。

2.4.1.7 土壤保持

采用土壤保持量来量化森林生态系统的土壤保持服务，计算方法来自目前最为成熟且应用最为广泛的修正通用土壤流失方程（revised universal soil loss equation, RUSLE）^[22]：

$$SC = SC_{\text{潜在}} - SC_{\text{实际}}$$

$$SC_{\text{潜在}} = R \times K \times L \times S$$

$$SC_{\text{实际}} = R \times K \times L \times S \times C$$

式中， SC 为单位面积年土壤保持量，单位为： $t/hm^2 \cdot a$ ； $SC_{\text{潜在}}$ 为单位面积潜在土壤保持量，单位为： $t/hm^2 \cdot a$ ； $SC_{\text{实际}}$ 为单位面积实际土壤保持量，单位为： $t/hm^2 \cdot a$ ； R 为降雨侵蚀力因子； K 为土壤可蚀性因子； L 为坡长因子； S 为坡度因子； C 为植被覆盖因子。

（1）降雨侵蚀力因子 R 采用月尺度计算方法^[23]：

$$R = \sum_{j=1}^{12} \left[1.735 \times 10^{(1.5 \log \frac{Y_j^2}{Y} - 0.8188)} \right]$$

式中， Y_j 为月降水量，mm； Y 为年降水量，mm； $j(1, 2, \dots, 12)$ 为月份。由于公式中 R 的单位是英制单位， $1000ft \cdot t \cdot in / (ac \cdot h \cdot a)$ ，该单位需乘以系数 17.02 转换成国际单位， $MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$ 。

（2）土壤可蚀性因子 K 采用土壤有机碳和土壤颗粒组成进行计算^[24]：

$$K = \{0.2 + 0.3e^{-0.0256m_s(1-m_{\text{silt}}/100)}\} \times [m_{\text{silt}} / (m_c + m_{\text{silt}})]^{0.3} \\ \times \{1 - 0.25orgC / [orgC + e^{3.72-2.95orgC}]\} \\ \times \{1 - 0.7(1 - m_s/100) / \{(1 - m_s/100) + e^{-5.51+22.9(1-m_s/100)}\}\}$$

式中， K 为土壤可蚀性因子， $t \cdot hm^2 \cdot h \cdot hm^{-2} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$ 。 m_c 、 m_{silt} 、 m_s 和 $orgC$ 分别为粘粒（ $<0.002mm$ ）、粉粒（ $0.002-0.05mm$ ）、砂粒（ $0.05-2mm$ ）和有机碳含量（%）。

（3）坡长坡度因子 LS 反映坡长和坡度对坡面土壤侵蚀的影响，计算方法如下^[25]：

$$LS = \left(\frac{\lambda}{20}\right)^m \left(\frac{\theta}{10}\right)^n$$

式中， λ 为坡长 (m)； θ 为坡度 (°)； m 为坡长指数； n 为坡度指数。

其中，通过国内相关研究成果分析^[26]，坡长指数 m 随坡度变化的取值范围

为:

$$\begin{cases} m = 0.15 & \theta \leq 5^\circ \\ m = 0.2 & 5^\circ < \theta \leq 12^\circ \\ m = 0.35 & 12^\circ < \theta \leq 22^\circ \\ m = 0.45 & 22^\circ < \theta \leq 35^\circ \end{cases}$$

全国坡度指数 n 值主要集中于 1.3—1.4 之间, 本案例取 1.35。

(4) 植被因子 C 计算方法如下:

$$C = e^{a_i(sc)}$$

式中, sc 为植被覆盖度 (%), 以 $NDVI$ 值代替; a_i 为不同植被类型的系数, 林地取值为 -0.1535^[32]。

本案例中以上数据来自中国科学院生态环境研究中心 (<https://www.scidb.cn/>)^[16]。

2.4.1.8 水源涵养

森林生态系统的水源涵养服务使用蓄水量来量化。蓄水量通过水量平衡方程 (the water balance equation) 计算, 水量平衡原理是指在一定的时空内, 水分的运动保持着质量守恒, 输入的水量和输出的水量之间的差额等于生态系统内的蓄水量, 公式如下:

$$\Delta WC = (P_i - R_i - ET_i) \cdot A_i \cdot 10^{-3}$$

式中, ΔWC 为年蓄水量 ($m^3 \cdot a^{-1}$); P_i 为第 i 块样地的年降雨量 (mm); R_i 为年暴雨径流量 (mm), 由公式 $R_i = 0.0053 \times P_i + 0.256$ 推导可得^[33]; A_i 为样地面积 (m^2); ET_i 为年蒸散发量 (mm)。

再用 ΔWC 除以样地面积得到样地的公顷蓄水量 WC , 单位为 $m^3 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 。以上数据来自气候数据软件 ClimateAP^[17]。

2.4.1.9 生物多样性

采用香农威纳多样性指数计算样地林分的生物多样性。

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i$$

式中, H 为树种多样性的香农维纳指数; n 为样地中树种个数; P_i 为第 i 个树种的比例。

2.4.1.10 野生动物生境

在量化森林生态系统的野生动物生境服务时, 将生境按照“四地”分为栖息地、觅食地、水源地、隐蔽地进行研究, 由于研究区水源地较少, 将觅食地和水源地合并在一起。在每一类中选择一些评价指标, 其中部分指标需要赋值, 之后对每个指标进行数据标准化, 取各个指标的平均值作为样地的栖息地、觅食地和水源地、隐蔽地指数, 指标的选择情况见表 2。

数据标准化的方法采用最大值转化法，将每个指标排名前 5%的观测值取平均值后作为该项指标的最大值，然后计算每个测定值与最大值的比值^[6]。

表 2 生境因子指标选取

Tab. 2 Selection of habitat factor indicators

生境	评价指标
栖息地	原始森林程度
	坡度
	坡向
	林分平均树高
	林分平均胸径
	林分蓄积量
	大型树数量
	距居民点距离
	距道路距离
	红松、蒙古栎数量
觅食地、水源地	距河流距离
	距森林边缘距离
隐蔽地	林分密度

原始森林生境更适于野生动物的生存和栖息地选择，并且对生物多样性等生态系统功能的贡献更大^[27]。利用样地林分的发育阶段表示森林的原始程度，林分的发育越到后期越接近原始森林状态。

野生动物对以下 9 个生境因子的适宜程度以及赋值标准如表 3 所示^[28-32]。

表 3 生境因子的适宜程度及赋值标准

Tab. 3 Suitability and assignment criteria of habitat factors

因子	最适宜	适宜	次适宜	不适宜
	4	3	2	1
坡度	0-10	10-30	-	30-
坡向	东	东北、东南	平、北、南、西南	西、西北
林分平均树高 m	10-15	0-5	5-10	15-20
林分平均胸径 cm	10-20	0-10	20-30	30-
林分公顷蓄积量 m ³ ·hm ⁻²	100-200	200-300	0-100	300-
距居民点距离 m	3000-	2000-3000	1000-2000	0-1000
距离主要道路距离 m	3000-	2000-3000	1000-2000	0-1000
距河流距离 m	3000-	2000-3000	1000-2000	0-1000
距离森林边缘 m	0-100	100-500	500-1000	1000-

大型树木对林分内地面生物量和动植物多样性的贡献很大,并且能提供鸟类、动物的栖息地^[33, 34]。将林分内胸径前 1%的树木作为林分中的大型树,用样地中大型树的数量作为林分生境的评价指标,大型树越多,林分越适宜。

红松、蒙古栎的种子能够为一些小型动物、鸟类、昆虫等提供食物。因此用样地林分内的红松和蒙古栎的断面积之和作为该因子的评价指标,红松、蒙古栎的数量越多越适宜野生动物的生存。

密度较大的林分更利于野生动物的隐蔽,林分密度越大,对野生动物的隐蔽地越适宜。因此选用林分密度作为隐蔽地因子的评价指标。

2.4.1.11 物种资源保育

森林生态系统能养育许多珍稀树种,使用研究区中单位面积存在的珍稀树种(红豆杉、水曲柳、黄檗)的数量来量化生态系统的物种资源保育服务。

2.4.2 生态系统服务多功能性的计算

采用平均值法计算生态系统服务多功能性指数。平均值法就是将不同功能的测定值进行转化、平均,最后得到一个可以代表所测功能平均水平的指数,即多功能性指数。其计算方便,并且结果易于解读,是目前最为常用的方法^[6]。

在求平均值之前,所有的服务功能值要先标准化,以消除各项生态系统服务之间的单位差异,这里采用常用的 min-max 标准化法进行转化^[35],公式如下:

$$ES_{std} = \frac{ES_{obs} - ES_{min}}{ES_{max} - ES_{min}}$$

式中, ES_{std} 为每项生态系统服务的标准化值 (0~1); ES_{obs} 为样地的某项生态系统服务观测值; ES_{max} 和 ES_{min} 分别为样地某项生态系统服务的最大和最小观测值。

因此,多功能性指数计算方法为:

$$EMF = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^F g(ES_i)$$

式中, EMF 为多功能性指数; F 为测定的服务功能个数,本案例中为 13; ES_i 为某项服务 i 的测定值; g 为标准化函数,本案例中为 min-max 标准化法。

2.4.3 生态系统服务间的权衡-协同关系研究

两种生态系统服务间的权衡-协同关系可直接反映它们之间的内在联系^[36]。本文使用均方根偏差(RMSD)量化两个生态系统服务间的权衡-协同关系, RMSD 是一种常用的统计参数,可用于衡量生态系统服务之间的权衡程度,计算方法为^[36]。

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (ES_{stdi} - ES_{exp})^2}$$

式中，RMSD 为均方根偏差；ES_{stdi} 为第 i 项生态系统服务的标准化值；ES_{exp} 为第 i 项生态系统服务标准化值后的平均值。

两项生态系统服务之间的 RMSD 值越大，此服务对的权衡关系越强；反之，若 RMSD 值接近于 0，则表明此服务对之间为协同关系。结合前人的研究，本文将配对的生态系统服务间的 RMSD>0.2 时定义为高度权衡关系，RMSD<0.15 时为低或协同关系，RMSD 在 0.15~0.2 之间为中等权衡关系^[37, 38]。

2.5 结果分析

2.5.1 全周期森林生态系统服务及多功能性量化

本案例在长白山天然云冷杉针叶混交林发育周期的三个阶段分别对林分的生态系统服务及多功能性进行量化，每个阶段生态系统服务的量化指标计算结果以及生态系统各项服务和多功能性的量化结果见表 4、表 5。

表 4 各项生态系统服务的量化指标计算

Tab. 4 Calculation results of quantitative indicators of ecosystem services

服务类别	量化指标	发育阶段		
		1	2	3
供给服务	林分生产力 (t/hm ² · a)	1.06	2.16	1.36
	林分蓄积量 (m3/hm ²)	164.97	288.20	359.05
	公顷红松种子产量 (个/a)	1013.63	2301.96	2549.66
调节服务	林分碳储量 (t/hm ²)	28.10	37.41	41.74
	提供负离子量(1018 个/hm ² · a)	247.43	242.16	298.68
	年热：湿指数 AHM	20.60	20.39	20.30
	土壤保持量 SC (t/hm ² · a)	174.19	177.84	143.08
支持服务	蓄水量 WC (t/hm ² · a)	4557.15	4637.39	4725.64
	香农多样性指数	1.46	1.32	1.16
	栖息地指数	0.75	0.80	0.83
	觅食地、水源地指数	0.55	0.68	0.73
	隐蔽地指数	0.41	0.62	0.42
	珍稀树种数量(株/hm ²)	17.37	5.58	6.55

表 5 生态系统各项服务及多功能性的量化

Tab. 5 Quantitative results of ecosystem services and multifunctionality

服务类别	生态系统服务	发育阶段		
		1	2	3
供给服务	生产力	0.38	0.39	0.39
	木材生产	0.25	0.47	0.60
	林产品	0.13	0.30	0.34

调节服务	碳汇	0.28	0.40	0.45
	净化空气	0.60	0.58	0.74
	气候调节	0.44	0.43	0.42
	土壤保持	0.20	0.21	0.17
	水源涵养	0.50	0.51	0.53
支持服务	生物多样性	0.71	0.63	0.54
	栖息地	0.09	0.11	0.12
	觅食地、水源地	0.33	0.48	0.54
	隐蔽地	0.21	0.37	0.22
	物种资源保育	0.10	0.03	0.04
生态系统服务多功能性	多功能性指数	0.33	0.38	0.39

整体来看,长白山天然云冷杉针叶混交林提供的生态系统服务的相对效益在 0.03-0.74 之间。结合前人的研究,本案例将生态系统服务标准化后的平均值>0.4 定义为“高效益”,将介于 0.3-0.4 之间的值定义为“中等效益”,将<0.3 定义为“低效益”^[38]。其中,在林分发育的各个阶段,表现为“高收益”、“中等收益”和“低收益”的生态系统服务分别在供给、调节、支持三大类中的分布情况如表 6 所示。可以看出,随着林分逐渐发育到后期,森林可以提供的高收益生态系统服务也逐渐增加,这意味着发育后期的森林较发育前期在提供各项生态系统服务时通常能发挥出更高的水平。

表 6 各项生态系统服务的收益情况

Tab. 6 Revenues from ecosystem services

		高收益	中等收益	低收益
发育第一阶段	供给服务		1	2
	调节服务	3		2
	支持服务	1	1	3
发育第二阶段	供给服务	1	2	1
	调节服务	3	1	
	支持服务	2	1	2
发育第三阶段	供给服务	1	2	
	调节服务	4		1
	支持服务	2		3

可以看出,随着长白山天然云冷杉针叶混交林林分的逐渐发育,森林的生态系统多功能性指数呈逐渐增大的趋势,说明林分在生长发育的后期阶段相较于前期能够同时提供更多的生态系统服务;并且大多数生态系统服务随着林分的发育也表现出同样的趋势,说明发育后期的森林在提供单项服务时也会发挥出更高的水平。此外,各项生态系统服务在每个发育阶段对森林生态系统多功能性的贡献也不同,因此每项服务在林分发育不同阶段下的地位也有差异,比如物种资源保

育服务在第一发育阶段的林分中较为重要，但在第二、三阶段的林分中的地位却大大降低；生物多样性在第一阶段的林分中对生态系统多功能性的贡献极大，但在第二、三阶段林分中却相对较小。

2.5.2 全周期云冷杉针叶混交林生态系统服务间的权衡-协同关系研究

本案例共选取 13 种生态系统服务，研究其两两之间的权衡-协同关系，13 种生态系统服务间共有 78 组生态系统服务对，由于服务对数量较多，仅展示部分内容。部分服务对间的均方根偏差（RMSD）值如表 7 所示。

表 7 林分各发育阶段成对生态系统服务间均方根偏差（RMSD）值（部分）

Tab. 7 Root mean square deviation (RMSD) value of paired ecosystem services at different developmental stages of forest stand (partial)

服务对	服务类别	发育阶段		
		第一阶段	第二阶段	第三阶段
碳汇-林产品	调节-供给	0.17	0.19	0.26
碳汇-生物多样性	调节-支持	0.19	0.16	0.19
碳汇-生产力	调节-供给	0.13	0.11	0.14
碳汇-净化空气	调节-调节	0.19	0.18	0.18
碳汇-物种资源保育	调节-支持	0.2	0.12	0.16
碳汇-栖息地	调节-支持	0.13	0.1	0.14
碳汇-觅食地.水源地	调节-支持	0.19	0.18	0.24
碳汇-隐蔽地	调节-支持	0.18	0.17	0.17
碳汇-气候调节	调节-调节	0.29	0.26	0.27
碳汇-土壤保持	调节-调节	0.19	0.18	0.19
碳汇-水源涵养	调节-调节	0.28	0.25	0.26
生物多样性-生产力	支持-供给	0.13	0.12	0.13
生物多样性-净化空气	支持-调节	0.19	0.19	0.18
生物多样性-物种资源保育	支持-支持	0.2	0.13	0.14
生物多样性-栖息地	支持-支持	0.13	0.12	0.13
生物多样性-觅食地.水源地	支持-支持	0.19	0.2	0.23
生物多样性-隐蔽地	支持-支持	0.17	0.18	0.16
生物多样性-气候调节	支持-调节	0.29	0.27	0.26
生物多样性-土壤保持	支持-调节	0.19	0.19	0.17
生物多样性-水源涵养	支持-调节	0.28	0.26	0.25
生产力-净化空气	供给-调节	0.12	0.13	0.1
生产力-物种资源保育	供给-支持	0.13	0.06	0.06
生产力-栖息地	供给-支持	0.03	0.04	0.04
生产力-觅食地.水源地	供给-支持	0.13	0.14	0.16
生产力-隐蔽地	供给-支持	0.11	0.13	0.1
生产力-气候调节	供给-调节	0.24	0.23	0.21
生产力-土壤保持	供给-调节	0.13	0.14	0.11
生产力-水源涵养	供给-调节	0.23	0.22	0.19
栖息地-觅食地.水源地	支持-支持	0.12	0.14	0.17
栖息地-隐蔽地	支持-支持	0.11	0.13	0.11

栖息地-气候调节	支持-调节	0.24	0.23	0.22
栖息地-土壤保持	支持-调节	0.13	0.14	0.11
栖息地-水源涵养	支持-调节	0.23	0.22	0.2
隐蔽地-气候调节	支持-调节	0.28	0.28	0.25
隐蔽地-土壤保持	支持-调节	0.18	0.2	0.15
隐蔽地-水源涵养	支持-调节	0.27	0.27	0.23
气候调节-水源涵养	调节-调节	0.33	0.31	0.29

其中，在长白山云冷杉针叶混交林发育第一阶段中，服务对的平均 RMSD 范围为 0.03-0.33，表现为高度权衡 ($\text{RMSD} > 0.2$) 关系的有 23 对，中等权衡 ($0.15 \leq \text{RMSD} \leq 0.2$) 关系的有 35 对，协同关系 ($\text{RMSD} < 0.15$) 的有 20 对；而在林分发育第二阶段中，服务对的平均 RMSD 范围为 0.04-0.31，高度权衡关系的服务对有 33 个，中等权衡关系的服务对有 21，协同关系的服务对有 24 个；当林分发育到第三阶段时，服务对的平均 RMSD 范围也是 0.04-0.31，高度权衡关系的服务对有 37 个，中等权衡关系的服务对有 21，协同关系的服务对有 20 个。从中可以看出，长白山云冷杉针叶混交林发育到中期时，森林生态系统提供的各项服务之间互为权衡关系的最少，而林分处于发育前期和发育后期时，生态系统服务之间为协同关系的则相对较少；并且随着林分逐渐发育到后期，高度权衡的生态系统服务对随之逐渐增多，说明林分越发育到后期，森林生态系统更倾向于损失其中一部分服务而去增强对另一部分服务的提供。

3. 总结

本案例在林分发育的不同阶段分别量化了长白山云冷杉针叶混交林的生态系统各项服务以及多功能性，并且分阶段地研究了森林生态系统服务间的权衡-协同关系。结果表明处于发育后期的林分同时提供多种较高收益的生态系统服务的能力更强；此外，生态系统服务之间的权衡协同关系也随着林分的发育而改变，并且林分发育越到后期，总体来说服务间的权衡关系越强，生态系统服务在权衡中的受益者也会随之发生变化。因此，在云冷杉针叶混交林的全周期经营中，森林经营措施在林分不同的发育阶段中应该有不同的重心，经营过程中要更加侧重最有潜力的生态系统服务，制定出更有针对性的经营措施，使森林在发育全周期的各个阶段都能够发挥出更高的提供生态系统服务的水平。

4. 问题思考

(1) 除了案例中的平均值法，还有哪些方法可以用来计算生态系统服务多功能性指数？这些方法有何不同点？

（2）本案例中未加入生态系统的文化服务进行研究，文化服务会有哪些方面的内容？

教学指导手册

云冷杉针叶混交林全周期多功能经营教学案例库建设方案

1. 教学目标

1.1 教学用途

本案例可作为相关课程实验或野外实习的补充材料，指导学生进行数据分析、模型构建和结果解释的练习。

1.2 授课对象

本案例主要授课对象为生态学、林学、森林经理学的学生。要求学生具备一定的生态学和林学基础知识。

1.3 适用课程

森林经理学、林学

2. 启发思考题

（1）除了案例中的平均值法，还有哪些方法可以用来计算生态系统服务多功能性指数？这些方法有何不同点？

（2）本案例中未加入生态系统的文化服务进行研究，文化服务会有哪些方面的内容？

（3）从生态系统多功能性方向考虑，能够给森林经营提供哪些生产上的建议？

3. 分析思路

本研究聚焦“如何量化森林生态系统服务多功能性及其随林分发育的动态变化”这一核心问题（案例问题），基于生态系统服务分类（供给、调节、支持）和多功能性理论（知识点），通过平均值法构建多功能性指数，结合均方根偏差（RMSD）量化服务间权衡-协同关系（理论方法）。实证发现，林分发育后期多功能性显著提升，但服务间高度权衡关系加剧（如碳汇与气候调节 RMSD 达 0.29），揭示了服务动态与发育阶段的逻辑关联（结果与理论衔接），最终提出分阶段优化经营策略（如后期侧重碳汇与水源涵养协同），实现从数据量化到管理决策的闭环逻辑（实际应用）。

4. 案例分析

4.1 需要学生认识的关键问题

了解四大生态系统服务分别有哪些具体的内容，不同地区量化服务的内容和

方法不同，不同的服务之间具有权衡-协同关系，这些关系随着时间会发生变化。

4.2 案例中关键问题的分析

引导学生对案例中的现象，提炼出关键问题，结合学生已经提前了解森林生态系统服务相关研究，引导学生提出各种可能的解决方案。

4.3 推荐解决问题的方案

（1）除了本次采用的平均值法，还有阈值法，单功能法等。常用的为阈值法与平均值法。各种方法各有优缺，可引导学生在课后查阅文献进行深入了解。

（2）本次研究内容为天然林，其文化服务内容较少，故未将其作为研究对象。文化服务包括娱乐，美学景观，教育等方面。从生态系统多功能性方向考虑，能够发挥生态系统的多种效益，在森林经营的过程中考虑多种效益，能够让经营收益最大化，不仅获得经济效益，同时也发挥生态系统的生态效益，为天然林林可持续经营提供科学依据。

5.课堂设计

5.1 案例下发

将案例提前一周下发给学生，同时将学生的课前准备工作列出清单下发给学生，其中提出明确要求：学生课前应对生态系统的四大服务进行了解并查阅相关文献，了解各服务的一些量化方法，以及生态系统多功能性指数的计算方法。

5.2 课时分配

按照一个案例 90 分钟左右计算：课上利用 10 分钟时间进行研究背景介绍并根据课堂人数确定讨论小组；小组讨论时间确定为 30 分钟；小组发言时间共计 30 分钟，提出本小组的问题及拟解决方案；利用剩余 20 分钟时间，集体讨论各小组成果，并进行最后的总结。

5.3 讨论方式

采用小组讨论，由老师引导各小组对课堂思考题进行答案的陈述。同时学生可提出自己的问题，师生共同讨论。可要求学生准备 PPT 发言材料。

5.4 课堂总结

由教师根据预期的教学目的和知识点，结合学生课堂讨论情况，对本次案例教学进行总结，引导学生通过案例学习，最后引导学生进一步思考提出的方案中尚有哪些难点及问题。

6.要点汇总

本案例以长白山云冷杉针叶混交林为对象，围绕“生态系统服务多功能性量

化及其动态变化”核心问题，系统整合生态系统服务分类（供给、调节、支持）、多功能性指数（平均值法构建）及权衡-协同关系（均方根偏差分析）等知识点，揭示林分发育后期多功能性显著提升，但服务间高度权衡关系加剧（如碳汇-气候调节 RMSD 达 0.29）的规律；其启示在于：森林经营需分阶段动态调整（如后期侧重碳汇与水源涵养协同），并需结合量化工具（如主成分分析优化指数）与文化服务拓展，推动从数据驱动到政策落地的科学管理闭环，为森林全周期可持续经营提供理论支撑与实践范式。

7.其他说明

无。

参考文献

- [1] 井新, 贺金生. 生物多样性与生态系统多功能性和多服务性的关系:回顾与展望[J]. 植物生态学报, 2021,45(10):1094-1111.
- [2] Hector A, Bagchi R. Biodiversity and ecosystem multifunctionality[J]. NATURE, 2007,448(7150):186-188.
- [3] Gamfeldt L, Hillebrand H, Jonsson P R. Multiple functions increase the importance of biodiversity for overall ecosystem functioning[J]. ECOLOGY, 2008,89(5):1223-1231.
- [4] Gamfeldt L, Roger F. Revisiting the biodiversity-ecosystem multifunctionality relationship[J]. NATURE ECOLOGY & EVOLUTION, 2017,1(7).
- [5] Hooper D, Vitousek P. Effects of Plant Composition and Diversity on Nutrient Cycling[J]. Ecological Monographs, 1998,68(1):121-149.
- [6] 徐炜, 井新, 马志远, 等. 生态系统多功能性的测度方法[J]. 生物多样性, 2016,24(01):72-84.
- [7] Maestre F T, Quero J L, Gotelli N J, et al. Plant Species Richness and Ecosystem Multifunctionality in Global Drylands[J]. SCIENCE, 2012,335(6065):214-218.
- [8] Enrique V, T M F, Le Bagousse-Pinguet Yoann, et al. Functional diversity enhances the resistance of ecosystem multifunctionality to aridity in Mediterranean drylands.[J]. The New phytologist, 2015,206(2):660-671.
- [9] 刘佩伶, 陈乐, 刘效东, 等. 鼎湖山不同演替阶段森林土壤水分时空变异研究[J]. 生态学报, 2021,41(05):1798-1807.
- [10] 王振鹏, 陈金磊, 李尚益, 等. 湘中丘陵区不同恢复阶段森林生态系统的碳储量特征[J]. 林业科学, 2020,56(05):19-28.
- [11] He L, Chen J M, Pan Y, et al. Relationships between net primary productivity and forest stand age in U.S. forests[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2012,26(3).
- [12] Sweden T S S I, Sweden T S S I. Ecosystem service multifunctionality of low-productivity forests and implications for conservation and management[J]. Journal of Applied Ecology, 2020,57(4):695-706.
- [13] 黄学煜, 修丽娜, 陆志翔. 陇东黄土高原生态系统服务权衡效应及其驱动因素[J]. 干旱区地理, 2025,48(03):480-493.
- [14] 王玉香, 张丽君, 秦耀辰, 等. 生态环境分区分管下自然资本与包容性财富的权衡与协同分析[J]. 生态学报:1-14.
- [15] 李娜, 李聪慧, 马彩虹, 等. 黄土丘陵区土地利用变化情景模拟及生态系统服务响应权衡/协同分析[J]. 环境科学:1-19.
- [16] Li J, He H, Zeng Q, et al. A Chinese soil conservation dataset preventing soil water erosion from 1992 to 2019[J]. Scientific Data, 2023,10.
- [17] ClimateWNA—High-Resolution Spatial Climate Data for Western North America[J]. Journal of

Applied Meteorology and Climatology, 2012,51(1):16-29.

[18] 兰洁, 雷相东, 何潇, 等. 吉林省天然阔叶混交林生态系统多功能性及驱动因素[J]. 生态学报, 2021,41(13):5128-5141.

[19] 王君, 于海洋, 徐宝福, 等. 天然红松林结实量预测模型的初步构建[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2018,19(05):588-594.

[20] 李海奎, 雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估[M]. 中国森林植被生物量和碳储量评估, 2010.

[21] 森林生态系统服务功能评估规范[S]. 国家林业和草原局.

[22] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains[J]. Agricultural Handbook, 1965,282.

[23] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1958,39(2):285-291.

[24] Williams J R, Arnold J G. A system of erosion—sediment yield models[J]. Soil Technology, 1997,11(1):43-55.

[25] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses —A Guide To Conservation Planning[J]. United States. Dept. of Agriculture. Agriculture handbook (USA), 1978.

[26] 江忠善, 郑粉莉, 武敏. 中国坡面水蚀预报模型研究[J]. 泥沙研究, 2005(4):6.

[27] G B M, Zhiqiang Y, S H A, *et al.* Forest degradation drives widespread avian habitat and population declines.[J]. Nature ecology & evolution, 2022,6(6):709-719.

[28] 刘芳. 吉林珲春野生东北虎栖息地生境评价与潜在廊道分析[D]. 北京林业大学, 2016.

[29] 周绍春. 东北虎及其猎物的种群大小、生境选择与评价研究[D]. 东北林业大学, 2011.

[30] 王静, 周志强, 刘辉, 等. 林分等环境因子对中俄东北虎分布影响的比较研究[J]. 野生动物学报, 2014,35(03):245-251.

[31] 杜婧. 黑龙江省野生东北虎生境适宜度评价[D]. 北京林业大学, 2014.

[32] Grid. S O B N, Grid. I C L S, Grid. I C L S, *et al.* Creation of forest edges has a global impact on forest vertebrates.[J]. Nature, 2017,551(7679):187-191.

[33] Zuoqiang Y, Arshad A, Anvar S, *et al.* Few large trees, rather than plant diversity and composition, drive the above-ground biomass stock and dynamics of temperate forests in northeast China[J]. Forest Ecology and Management, 2021,481:118698.

[34] Mazurek M J, Zielinski W J. Individual legacy trees influence vertebrate wildlife diversity in commercial forests[J]. Forest Ecology and Management, 2004,193(3):321-334.

[35] YaHuang L, W C M, Jie L, *et al.* Multitrophic diversity and biotic associations influence subalpine forest ecosystem multifunctionality.[J]. Ecology, 2022,103(9):e3745.

[36] Lu N, Fu B, Jin T, *et al.* Trade-off analyses of multiple ecosystem services by plantations along a precipitation gradient across Loess Plateau landscapes[J]. Landscape Ecology, 2014,29(10):1697-1708.

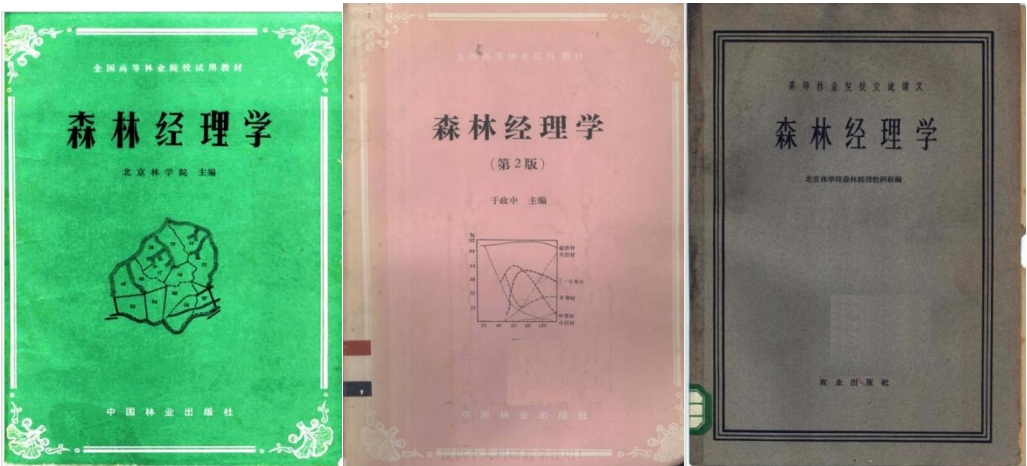
[37] Jie L, Xiangdong L, Xiao H, *et al.* Stand density, climate and biodiversity jointly regulate the multifunctionality of natural forest ecosystems in northeast China[J]. European Journal of Forest Research, 2023,142(3):493-507.

[38] Zeng Y, Gou M, Ouyang S, *et al.* The impact of secondary forest restoration on multiple ecosystem services and their trade-offs[J]. ECOLOGICAL INDICATORS, 2019,104:248-258.

四、教材建设情况

《森林经理学》（第五版）（国家级规划教材）

序号	教材名称	主编	出版社	出版年份
1	森林经理学（第五版）	孙玉军	中国林业出版社	2023
2	森林经理学（第四版）	亢新刚	中国林业出版社	2011
3	森林经理学（第三版）	于政中	中国林业出版社	1991
4	森林经理学（第二版）	北京林学院	农业出版社	1982
5	森林经理学（第一版）	北京林学院森林经理教研组	农业出版社	1961



五、教改项目及论文

1、教改论文发表情况

序号	第一作者	论文题目	发表刊物	发表时间
1	向玮	分层教学在“森林经理学课程设计”的实践与思考	北京林业大学教学改革研究文集	2016
2	向玮	“概念图”教学法在“森林经理学”课程教学中的应用——以北京林业大学为例	《中国林业教育》	2020
3	姜俊	后疫情时代强化“以学习为中心”的混合式实践教学的思考	北京林业大学教学改革研究论文集	2020
4	耿燕	研究型“森林经理学”野外实习模式的探索	北京林业大学教学改革研究论文集	2019
5	陈琳	课堂展示环节的实践与思考——以林业遥感类高级课程案例式教学为例	北京林业大学教学改革研究论文集	2018
6	孟京辉	“现代林业经营理论与技术”课程教学改革与实践——以北京林业大学为例	中国林业教育	2020

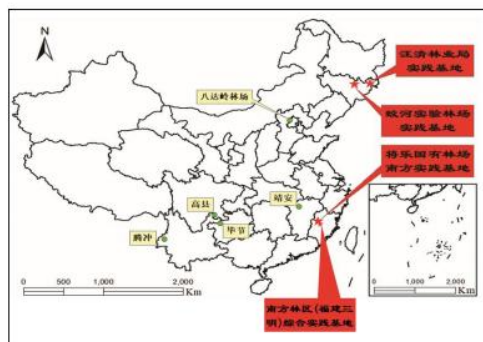
2、承担教学改革项目情况

项目名称	项目来源	立项日期
通用大模型驱动下林学核心课程智能化教学过程创新与实践——以森林经理学课程为例	校级	2025
新农科背景下林学一流专业人才培养体系研究	校级	2022
信息技术在森林经理综合实习教学中的应用	校级	2020
学生主观能动性提升模式在测树学教学中的实践	校级	2019
“概念图”在森林经理学教学中的应用	校级	2018
提高学生科研能力为导向的森林经理野外实习新模式探索	校级	2018

六、代表性专业实践基地

代表性专业实践基地

聚焦东北针阔混交林、南方杉木人工林等典型森林生态系统，在吉林汪清、吉林蛟河和福建三明三地分别建立了野外科研基地，为相关研究提供了支撑条件。



七、育人成效

1、获奖情况

奖项名称	获奖等级	授予单位	获奖时间
2020 届本科毕业论文获优秀指导教师奖	优秀指导老师	北京林业大学	2020
北京邮电大学创新创业实践成果	二等奖	北京邮电大学	2021
第四届教学创新教学	三等奖	北京林业大学	2024
首届全国林业创新创业大赛	入围奖	国家林业和草原局	2018

1.1、2020 届本科毕业论文获优秀指导教师奖



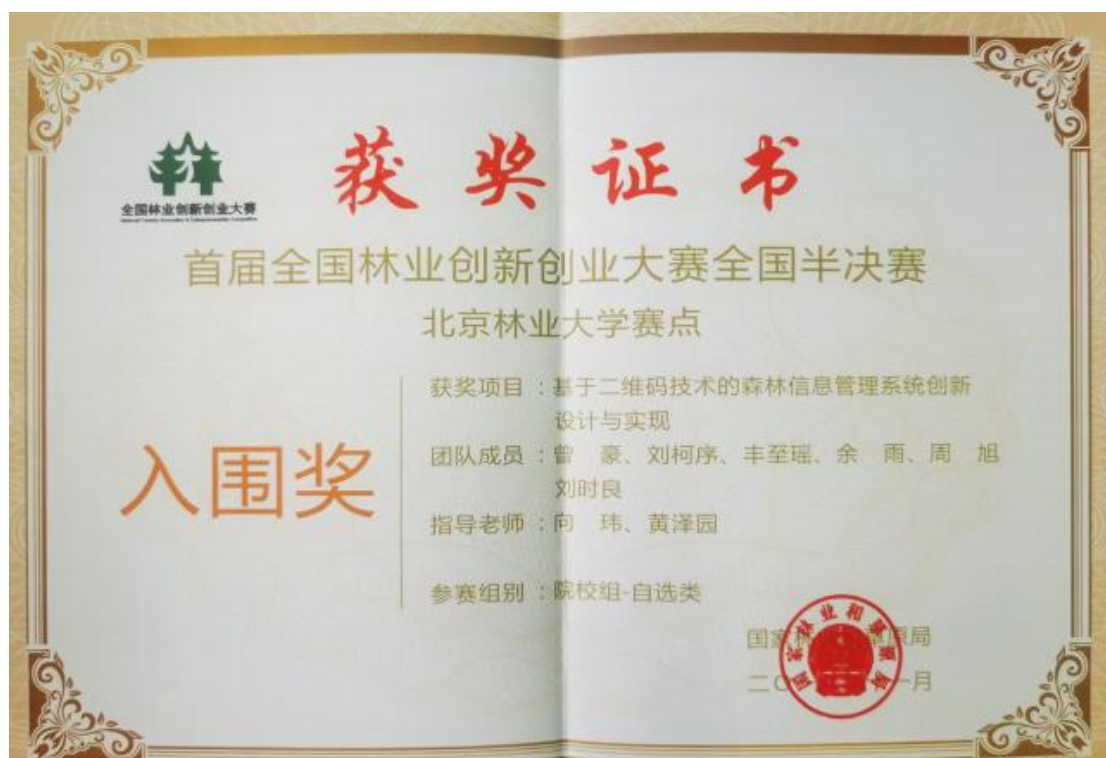
1.2、大学生创新创业训练计划项目结题证明材料（国家级）

北京邮电大学 大学生创新创业训练计划项目 结题证书 推荐学院：叶培大创新创业学院 项目级别：国家级 项目编号：201800068 项目名称：基于二维码技术的树木信息管理系统创新设计与实现 项目负责人：王馨仪 项目组成员：吴桐,刘威,李春鹏,王煜辉 项目指导教师：黄泽园,向玮 在2019年北京邮电大学大学生创新创业训练计划项目验收评审中，成绩良好，顺利结题。 特发此证，以资鼓励。 编号：201910013106	北京邮电大学 教务部 二〇一九年七月
---	---

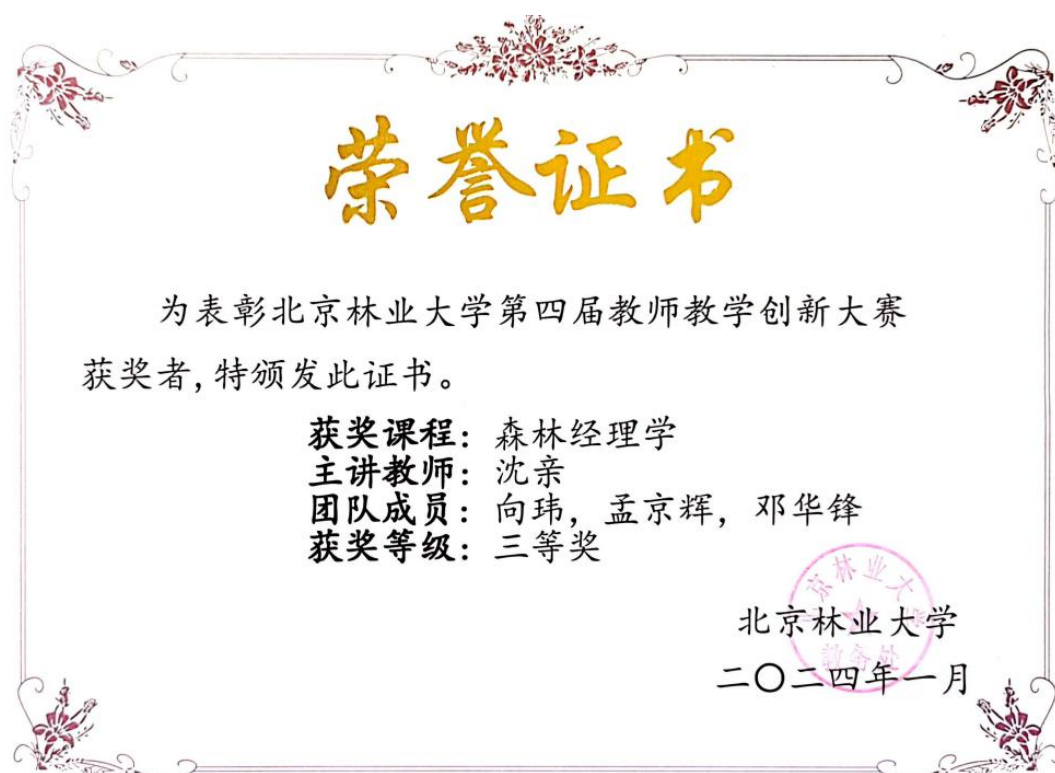
1.3、大学生创新创业训练计划项目结题证明材料（市级）

北京邮电大学 大学生创新创业训练计划项目 结题证书 项目级别：市级 项目编号：1700015 项目名称：基于二维码技术的树木信息管理系统创新设计与实现 项目负责人：曾豪 项目组成员：丰至瑶、余雨、周旭、刘柯序 项目指导教师：黄泽园、向玮 在2018年北京邮电大学大学生创新创业训练计划项目验收评审中，成绩良好，顺利结题。 特发此证，以资鼓励。 证书编号：S-201810013014	北京邮电大学 教务部 二〇一八年七月
---	---

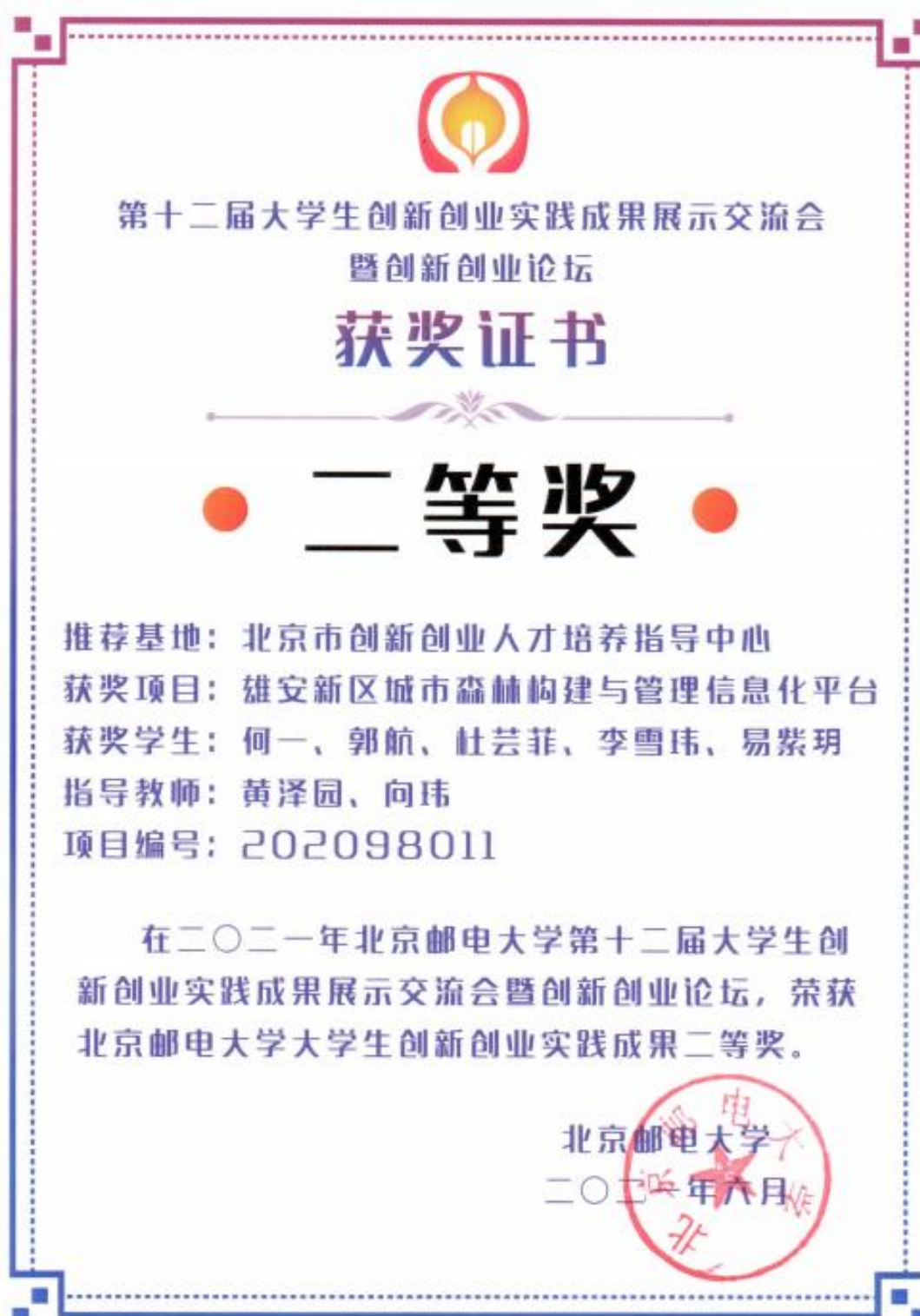
1.4、首届全国林业创新创业大赛入围奖



1.5、第四届教学创新教学三等奖（2024年）



1.6、北京邮电大学创新创业实践成果二等奖（2021 年）



2、国家级大学生创新创业训练计划项目立项

国家级大学生创新创业训练计划平台

National Students' platform for innovation and entrepreneurship training program

2020年7月
8
星期三

年会证书查询

xx) t.aspx) px)

欢迎您！您是第
0005957081
位访客

您当前的位置是：首页 > 2019年项目查询 > 教师查询 > 基于二维码技术的树木信息管理系统创新设计与实现

项目编号：	201910013113
项目名称：	基于二维码技术的树木信息管理系统创新设计与实现
项目关键词：	
项目类型：	创新训练项目
所属学校：	北京邮电大学
项目实施时间：	至
所属学科门类：	农学
所属专业大类：	林学类
立项时间：	2019-09-10

项目成员

姓名	年级	学号	所在院系	专业	联系电话	E-mail	是否主持人
王馨仪	*	2016213176	*	*	*	*	第一主持人
吴桐	*	2017210872	*	*	*	*	否
刘威	*	2017210990	*	*	*	*	否
李春鹏	*	2018110688	*	*	*	*	否
王煜辉	*	2018140542	*	*	*	*	否

指导教师

[第一指导教师]	姓名：黄泽园;单位：;专业技术职务：工程师
[第二指导教师]	姓名：向玮;单位：;专业技术职务：教授

项目信息[展开]

服务电话：025-83215097 400-050-8066 备案号：BJTUICP备 14070101

八、应用成果证明

1、北京林业大学继续教育学院应用证明材料

应用证明

北京林业大学继续教育学院深度应用我校林学院《“目标经营、数智协同、知行合一”森林经理学教学体系构建与实践》，该体系有效推动了林学专业继续教育人才培养模式的创新与实践。成果能够紧密结合继续教育实践性强、数字化程度高的特点，充分发挥该体系中慕课、虚拟仿真实验等数字化教学资源与创新实践教学模式优势，取得了显著成效。通过系统应用该成果，“数智导学”系统智能推送学习包，有效破解学员工学矛盾；创新采用理论-设计-实践三阶递进路径，强化了实践教学环节，显著提升了学生的专业技能和岗位适应能力。

该成果已在我院学历教育与非学历培训教学中广泛应用，慕课等相关数字化资源累计使用逾 7000 人次。其中，学历继续教育林学专业专升本学生已有 1858 人次选用；非学历教育为内蒙古森工集团等企业提供专业技术培训，课程学习达 5159 人次。实践表明，该体系有效提升了教学质量，学生解决实际问题的能力明显增强，获得了合作单位与学生的广泛好评。

特此证明！

应用单位：北京林业大学继续教育学院

2025 年 9 月 11 日

2、新疆农业大学林学与风景园林学院应用证明材料

应用证明

北京林业大学林学院《“目标经营、数智协同、知行合一”森林经理学教学体系构建与实践》为我院林学专业人才培养提供了系统性指导，有力推动了思政教育与专业教学的深度融合。该体系以“差异化定制”教学模块为载体，将“扎根边疆”等特色思政元素有机融入，使学生专业认同感与学习内驱力显著提升。同时，依托体系的数字化、智能化资源（如慕课平台、森林智慧经营平台），为我校“慕课西部行计划”提供了优质教学支撑，拓宽了我院林学专业学生的知识边界，助力教师创新“数字化+智能化”教学模式，实现“价值引领—知识传授—能力培养”的完整教育闭环。

体系应用以来，我院思政育人成效显著：学生课堂思政参与度大幅提升，对林学专业的认同度显著提高，主动服务边疆林业基层的意愿大幅增强。依托“知行合一”培养路径，毕业生扎根边疆林业基层的比例提升 25%，涌现出一批“下得去、留得住、用得上”的优秀人才，教学改革成效得到师生及用人单位的一致认可。

特此证明！

应用单位：新疆农业大学林学与风景园林学院

2025年9月11日

3、东北林业大学林学院应用证明材料

应用证明

北京林业大学林学院的教学体系《“目标经营、数智协同、知行合一”森林经理学教学体系构建与实践》为我院林学本科人才培养提供了重要的参考，有效推进了林学专业教学理念与模式的深层变革。该体系分层分类精准施策的教学模型，提升了学生的专业认同；线上“数”导、线下“智”学的教学模式推动了教学中新技术应用与行业前沿同步；同时，依托“知理论—行设计—强实践”三阶递进实践体系，推动学生在森林经营全流程中锤炼创新能力与复杂问题解决能力。

目前，我院林学本科专业的教学与实践环节已全面融入该体系的相关成果，《森林经理学》慕课、知识图谱等数字化教学资源得到广泛应用，为课程改革深化与实践教学优化提供了坚实支撑。实践反馈显示，该体系的推广应用对我院人才培养质量提升效果显著：学生在复杂森林经营问题解决能力测评中的优秀表现占比大幅提高，毕业投身林草行业的人数比例显著上升，教学改革的成效获得师生与行业领域的一致认可。

特此证明！

应用单位：东北林业大学林学院

2025年9月11日



4、中南林业科技大学林学院应用证明材料

中南林业科技大学林学院

应用证明

我院深度应用北京林业大学林学院《“目标经营、数智协同、知行合一”森林经理学教学体系构建与实践》，该体系为我院林学本科教学提供了重要的理论支撑和实践范式，有效促进了教学理念和模式的转型升级。通过引入“目标导向-数字融合-知行并举”的教学范式，我院重点围绕森林经理学等核心课程开展教学改革，实现了优质慕课资源与线下教学的深度融合。在教学过程中，通过该体系多层次、立体化的教学资源 and 教学范式，提升了学生的创新思维和科研能力、实践能力和专业素养。

该成果已在我院林学本科专业教学中得到全面应用，累计使用《森林经理学》慕课及其相关智能化数字化教学资源1200余人次。实践表明，该体系有效推动了我院教学质量的提升，学生在全国大学生创新创业大赛等赛事中表现突出，毕业生深受用人单位好评，教学改革成效显著。

特此证明！

应用单位：中南林业科技大学林学院

2025年9月11日



5、北京农学院园林学院应用证明材料

应用证明

我院深度应用了北京林业大学林学院《“目标经营、数智协同、知行合一”森林经理学教学体系构建与实践》教学成果。该成果的“线上‘数’导、线下‘智’学——新技术协同赋能双擎教学链”，对学生进行个性化智能诊断，推送定制知识盲区学习包，大大提高了教师课前导学、学生课前预习的效率，知识图谱、“AI+”专业实训模块等新业态教学资源和新技术应用，显著提升了学生的学习热情和内驱力。我院还组织教师对该成果中的教材、优质慕课资源、课程思政素材和教学模式，进行了系统学习和迁移，探索林学专业课程体系、AI课程和实践教学体系建设。

自该成果在我院应用以来，深受教师和学生好评，学生对AI技术、虚拟仿真实验、LiDAR激光雷达技术等新技术新手段的体现感持续上升，学生对林学专业的认同感、自豪感以及对投身国家生态文明建设的使命感不断提升，毕业生的能力和素质得到用人单位认可。

特此证明！

应用单位：北京农学院园林学院

2025年9月11日



6、浙江农林大学环境与资源学院应用证明材料

应用证明

北京林业大学林学院的教学体系《“目标经营、数智协同、知行合一”森林经理学教学体系构建与实践》在我院得到成功推广应用。该体系开发的“知识图谱”“专业能力矩阵图”等智慧工具，显著地激发了学生对森林经理学系列课程的兴趣，我院在教学实践中，结合学生画像实现个性化学习，应用该体系的AI赋能新教学模式，大大提高了教师备课效率、激发了学生学习内驱力、提升了教学效果。在该体系的推动下，我院多次参与由北京林业大学林学院组织的新形态教材编制、AI课程建设、虚拟教研室建设等方面的全国教学研讨会，跨校交流显著提升了本院教师教学队伍的教学改革研究水平和教学实践效果。

通过该教学体系的应用，我院人才培养质量显著提升，学生利用新技术解决复杂森林经营问题的能力平均提升了30%；本院教师教学团队开展教学改革研究的水平得到显著提升，教学成果数量提高20%。

特此证明！

应用单位：浙江农林大学环境与资源学院



7、沈阳农业大学林学院应用证明材料

应用证明

我院深度应用北京林业大学林学院创新构建的教学体系《“目标经营、数智协同、知行合一”森林经理学教学体系构建与实践》，该体系针对不同专业、不同层次、不同基础的学生构建的个性化思政教案，既能够激发林学学生投身生态文明建设事业的热情，提升学生的专业自豪感，还能够提升非林学专业学生对森林经营和生态保护事业的认知认同感。同时，我院依托该教学体系中的慕课平台、森林智慧经营平台、前修课程知识图谱、概念图和课程思政素材库等数字化资源，大力推进了我院线上线下混合式教学模式的构建和实践。

体系应用以来，我院教学成效显著提升，毕业生受到林业规划设计、国土资源管理、生态环境保护等相关行业管理部门、事业单位和企业青睐，成为森林资源精准管理、可持续经营等领域的重要力量，用人单位满意度达 90%以上。此外，通过该教学体系的应用，林学专业本科生学术能力与实践素养得到显著提升。

特此证明！

应用单位：沈阳农业大学林学院

2025年9月11日



8、三明学院资源与化工学院应用证明材料

应用证明

我院在“森林资源监测评价”等课程中开展了北京林业大学林学院教学体系《“目标经营、数智协同、知行合一”森林经理学教学体系构建与实践》的推广应用，深度融入了“森林调查虚拟仿真实验”“基于 LiDAR 点云的森林资源监测”“基于 AI 生成工具的林分发育阶段划分”等理论、实践教学内容。借鉴该成果的“知理论—行设计—强实践”课程群链模式，开展了以“资源调查—数据分析—方案设计—效益评估”为主线的国土资源监测与管理课程体系建设，探索“项目贯穿、实操驱动”的人才培养体系。

该成果在我院推广应用以来，显著提升了“森林资源监测评价”及相关课程学生的学习内驱力，学生的能力和素质水平得到社会高度认可。同时，该成果的应用，也激发了我院教师开展教学改革研究的兴趣和信心，资源监测与管理、AI 课程建设、虚拟仿真实验等相关的教学改革研究课题数量显著增长，对我院教学改革创新和教学质量提升发挥了重要作用。

特此证明！

应用单位：三明学院资源与化工学院

2025年9月11日



9、内蒙古农业大学林学院应证明材料

应用证明

我院对北京林业大学林学院的教学体系《“目标经营、数智协同、知行合一”森林经理学教学体系构建与实践》中的教学理念、教材、优质慕课资源、课程思政素材和教学模式，进行了全面推广应用。运用该体系的新形态教材《森林经理学》（第5版），更新了课程教学内容，将基于自然的解决方案等理念融入经典可持续经营体系教学中，借鉴该体系提供的虚拟仿真实验室、LiDAR 点云数据库以及林分发育阶段 AI 生成工具，开展“智能工具+虚拟仿真”课堂教学，实现采伐、全周期经营的虚拟仿真，让学生身临其境地完成智慧化调查与经营决策训练，推动了我院实践教学从“静态讲授”向“动态交互”的转型。

自该成果在我院应用以来，受到教师和学生好评，教学效果和教学改革研究成效显著提升，学生对森林经理学系列课程的教学效果满意度提升 30%，学生在毕业设计选题和考研方向选择中，对森林经理学相关方向的选择率提高了 30%，毕业生的能力和素质得到用人单位认可。

特此证明！

应用单位：内蒙古农业大学林学院

2025 年 9 月 11 日



10、西南林业大学林学院应用证明材料

应用证明

北京林业大学林学院的教学体系《“目标经营、数智协同、知行合一”森林经理学教学体系构建与实践》在我院得到成功应用，为我院林学本科教学提供了新时代教学理念、权威教材、优质慕课资源、课程思政素材和创新教学模式。自开设“森林经理学”课程以来，一直以该体系的《森林经理学》系列教材作为指定教科书及研究生考试参考书，近年来又运用该体系的慕课和教学资源库，开展课前导学和课后研讨，探索了适应新时代教师教学习惯和学生学习方式的线上线下混合式教学模式。我院还深度应用了该体系的“知理论—行设计—强实践”课程群链，整合了系列课程的理论、实验和实习教学环节，探索出理论内化、能力转化和效果固化的理论、设计、实践课程体系和教学模式。

该成果已在我院林学本科教学中得到全面应用，累计使用该体系的《森林经理学》教材 1200 余人次，使用慕课及其相关智能化数字化教学资源 400 余人次。实践表明，该体系有效推动了我院教学质量的提升，毕业生的能力和素质得到用人单位认可，教学改革成效显著。

特此证明！

应用单位：西南林业大学林学院

2025年9月1日

