

引用格式:李旭华,刘涛,蔡蕾,徐峥静茹,刘兴良,冯秋红. 川西云杉人工林立地类型划分与质量评价——以岷江上游杂谷脑流域为例[J]. 山地学报, 2024, 42(6): 751-764.

LI Xuhua, LIU Tao, CAI Lei, XU Zhengjingru, LIU Xingliang, FENG QiuHong. Classification of site type and quality evaluation for artificial forest of *Picea asperata* in western Sichuan: A case study of the Zagunao basin in the upper reach of the Minjiang River, China [J]. Mountain Research, 2024, 42(6): 751-764.

## 川西云杉人工林立地类型划分与质量评价 ——以岷江上游杂谷脑流域为例

李旭华,刘涛,蔡蕾,徐峥静茹,刘兴良,冯秋红\*

(四川省林业科学研究院 a. 森林和湿地生态恢复与保育四川省重点实验室,成都 610081;

b. 四川大熊猫国家公园定位观测研究站,四川 阿坝藏族羌族自治州 623006;

c. 卧龙森林生态四川省野外科学观测研究站,四川 阿坝藏族羌族自治州 623006)

**摘要:**森林立地类型的合理划分和立地质量的精准评价是实现森林质量精准提升的重要前提,也是促进森林管理精细化的基础。然而当前研究在立地类型划分与质量评价研究方面存在区域性标准不一、评价体系不完善等问题,亟需结合区域特征开展进一步探索。本文以云杉人工林为研究对象,应用主成分分析、数量化理论 I 等方法开展云杉人工林立地类型划分与质量评价。研究结果表明:(1)土层厚度、海拔和坡向为影响云杉人工林生长的主导因子;不同立地因子的组合将云杉人工林生长环境划分为 2 个立地类型组、18 个立地类型。其中,岷江上游杂谷脑流域内现有云杉人工林的立地类型共有 13 类,主要分布于阳坡半阳坡的中土层(41~80 cm)高海拔(3200~4200 m)地区。(2)杂谷脑流域云杉人工林的立地质量以“良”和“中”两个等级为主,二者占比达 93%。优质立地主要位于阳坡或半阳坡的薄土层( $\leq 40$  cm)中海拔(2400~3200 m)区域。(3)总体而言,云杉人工林立地质量普遍处于中等及以上水平,林地生产力仍具有提升潜力。对于 II 级林地,应以培育水源涵养林为主,兼顾森林碳汇功能;对于 III 级林地则应以培育水土保持林为主。本研究可为川西山地云杉人工林的健康经营与质量提升提供依据和技术支持。

**关键词:**云杉人工林;立地类型划分;立地质量评价;数量化理论 I

**中图分类号:** S718.5

**文献标志码:** A

森林立地(即立地,forest site)是指一定空间范围内对林木生长意义重大的环境条件的总体<sup>[1]</sup>。根据各立地环境因子的特性,将生态学特征和生长条件相似的区域划分为不同的立地类型。森林立地质量评价,是通过调查不同立地森林生长表现,运用数理统计方法预测森林生产潜力,对某一立地单元

的宜林性或最大自然生产潜力进行评估<sup>[2]</sup>,旨在揭示立地因子与森林植被生长之间的关系。立地类型划分是立地质量评价的基础,立地类型的科学划分和立地质量的准确评价是指导林业实践、优化资源配置的基础,也是实现科学、合理、高效利用林地的重要前提<sup>[3]</sup>。开展立地类型划分和立地质量评价

收稿日期(Received date): 2024-08-13; 改回日期(Accepted date): 2024-12-17

基金项目(Foundation item): 四川省省财政专项项目(2021CZZX04);四川省林草科技创新团队项目(2023LCTD0108,2024LCTD0103)。

[Special Financial Project of Sichuan Province (2021CZZX04); Sichuan Provincial Forestry and Grassland Sciences Technological Innovation Team Project (2023LCTD0108, 2024LCTD0103)]

作者简介(Biography): 李旭华(1988-),女,山西晋城人,博士,副研究员,主要研究方向:亚高山森林生态。[LI Xuhua (1988-), female, born in Jincheng, Shanxi Province, Ph. D., associate professor of engineer, research on subalpine forest ecology] E-mail: xhli2011@126.com

\* 通讯作者(Corresponding author): 冯秋红(1982-),女,博士,研究员,主要研究方向:亚高山森林生态。[FENG QiuHong (1982-), female, Ph. D., professor of engineer, research on subalpine forest ecology] E-mail: fqiuHong@163.com

研究,有助于实现适地适树、科学造林和森林质量精准提升的目标,对推动中国林业的现代化进程,实现森林资源的可持续利用具有重要意义。

森林立地条件本身的复杂性与多样性,以及研究者所依据的理论框架、研究目的、认知深度及所处自然环境的特异性,导致当前森林立地类型划分呈现出多元化的分类方法<sup>[4]</sup>。早期研究侧重基于形态学特征的立地分类,如根据土壤类型、地形地貌等因素进行简单划分。随着遥感技术、地理信息系统及数量生态学方法的发展,立地分类逐渐转向多因子综合分析。研究者们主要围绕物理环境因子、植被特征因子以及综合多因子等维度展开广泛研究<sup>[5]</sup>。然而,当前立地分类的精度不足,难以全面准确地反映立地类型的差异性和复杂性。此外,不同分类方法以及立地因子指标选取缺乏统一标准,导致分类结果的适用性和普适性受到限制,不同地区、不同树种间的分类结果往往难以直接比较和共享。因此,为了更精确地指导森林资源经营管理,有必要根据区域特征和树种特性开展更为细致的立地类型划分。

在森林立地质量评价领域,国内外学者已积累了大量研究成果。一方面,围绕建立一套立地质量评价的标准而展开大量研究,并形成了分别以“林分材积量”“指示植物”和“树高生长量”为主流的立地质量评价标准<sup>[6]</sup>,也有学者采用平均优势木胸径<sup>[7]</sup>和林分潜在生长量<sup>[8]</sup>来替代。然而,在当前的研究实践中,最为常用的立地质量评价指标依然是树高生长量或林分平均树高。另一方面,研究主要聚焦于立地质量评价方法的创新<sup>[9]</sup>,立地质量评价方法从传统的地位级法和立地指数法,逐步发展到通过数量化理论模型或多元回归分析方法<sup>[10]</sup>,但立地指数法和地位级法需要长期观测数据的支持,且易受经营措施的影响,多元地位指数的间接评价方法则能更全面地考虑多种立地因子,在科学性、准确性和适用性等方面表现出明显的优势,更加适应现代森林资源管理和可持续经营的需求。此外,随着林业科学技术的不断发展和森林资源管理精细化需求的日益增长,当前森林立地质量评估体系的局限性逐渐显现,需要进一步量化到二级林种甚至优势树种<sup>[11]</sup>,而传统的森林立地分类系统和立地质量评价体系较为笼统,难以精准分类和施策。通过细化到二级林种或主要优势树种的立地质量评价,可以

更加科学、精准地制定管理措施,实现森林资源的精细化管理。

在研究对象的选择上,国内学者对油松(*Pinus tabulaeformis*)<sup>[12-13]</sup>、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)<sup>[9]</sup>、西南桦(*Betula alnoides*)<sup>[14]</sup>、泡桐(*Paulownia*)<sup>[15]</sup>、红松(*Pinus koraiensis*)<sup>[16]</sup>等不同区域的人工林进行了立地类型划分与质量评价研究,均得到了较好的效果。云杉(*Picea asperata*)作为中国特有树种,广泛分布于多个生态区域,但关于云杉人工林立地类型划分与质量评价的研究未得到充分关注,其具体的划分标准与质量评价体系尚不明晰。川西地区现有人工林面积约 2000 万亩,是四川省人工林面积占比高的林区。云杉作为川西山地主要的人工林类型,普遍存在生长不良、土壤肥力退化、生产力较低、自我更新能力弱等多重生态问题<sup>[17]</sup>,不仅影响云杉人工林的生态服务功能,也对其可持续发展构成了威胁。前期针对云杉人工林的相关研究,涵盖不同经营措施下云杉人工林的生物量、生物多样性、水源涵养功能及土壤微生物群落等方面<sup>[18-19]</sup>,对云杉立地的关键影响因子的认识尚不足,对云杉人工林生长特性与不同立地条件及林地生产力的系统研究仍较为缺乏。

本研究以岷江上游杂谷脑流域云杉人工林为研究对象,将云杉人工林的生长状况与其立地类型及质量评价紧密结合,采用多元地位指数间接评价法,紧密结合林业生产实践筛选关键立地因子,基于数量化理论模型,开展云杉人工林的立地类型划分及质量评价技术研究,旨在为区域人工林开展立地质量精准评价、制定针对性的经营策略、提高森林生长速率和生态效益奠定研究基础和提供数据参考,也为区域云杉人工林的健康经营和高质量发展提供理论支撑。

## 1 研究区概况

杂谷脑流域总面积约 4620 km<sup>2</sup>,位于四川省阿坝藏族羌族自治州理县(30°54'43"~31°12'12"N, 102°33'46"~103°30'30"E),地处青藏高原东缘与四川盆地西北部的交汇地带,流域内地形特征自高山向高原逐渐过渡,形成了典型的中高山峡谷地貌(图 1)。流域海拔 1378~5766 m,坡度较陡,大多在 20°~60°。该区域气候属于亚热带季风气候,降

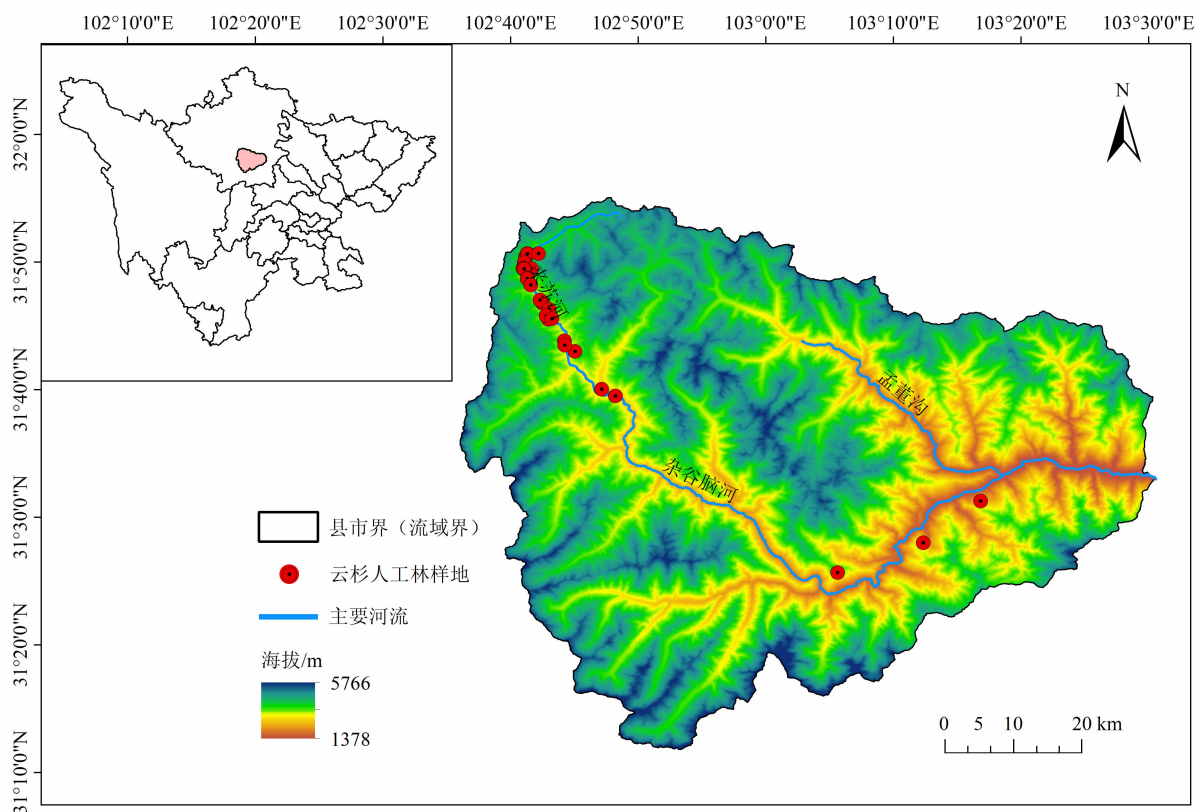


图1 研究区示意图

Fig. 1 Location of the Zagunao basin, China

水量少,蒸发量大,气候差异显著,具有山地立体气候特征。近20年年平均气温 $6^{\circ}\text{C} \sim 9^{\circ}\text{C}$ ,年降雨量 $690 \sim 900 \text{ mm}$ 。土壤类型主要为山地棕壤、山地暗棕壤,土壤特征总体表现为土壤贫瘠、土层浅薄,且砾石含量较高<sup>[20]</sup>。境内主要河流有杂谷脑河、来苏河等。动植物资源丰富,其中国家Ⅰ级保护植物有3种,国家Ⅱ级保护植物有7种,珍稀植物有9种;国家Ⅰ、Ⅱ级重点保护兽类共23种,国家Ⅰ级、Ⅱ级保护鸟类25种。

杂谷脑流域内云杉人工林主要分布在亚高山暗针叶林区,林区植被垂直带谱明显,植被类型随海拔和坡向的不同差异显著。海拔 $2400 \sim 4200 \text{ m}$ 原生森林较为常见,优势树种以粗枝云杉(*Picea asperata*)、紫果云杉(*Picea purpurea*)、青杆(*Picea wilsonii*)、岷江冷杉(*Abies fargesii* var. *faxoniana*)、桦木(*Betula*)以及川滇高山栎(*Quercus aquifolioides*)等为主。自20世纪50年代开展大规模采伐,采伐迹地陆续进行以云杉为主的人工更新,由于云杉为阳性树种,其在阳坡的表现明显优于阴坡,导致阳坡和半阳坡最终被云杉人工林所占据<sup>[18]</sup>,而在阴坡则

形成云杉人工林与天然次生林镶嵌分布的特征。

## 2 研究方法

### 2.1 样地调查

地形因子和林分因子:基于研究区域森林资源一类清查固定样地、二类资源调查样地,在充分考虑不同坡度、坡向、坡位等立地条件,包含不同林龄阶段,且受人为干扰较小等因素,开展云杉人工林样地补充调查,共设置83块 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 样地,分别记录各调查样地的地形因子、林分因子,其中地形因子包括经纬度、海拔、坡度、坡向、坡位。林分因子包括郁闭度、林龄、平均胸径、平均树高、枯落物层厚度、腐殖质层厚度等指标。样地基本信息如表1所示。

林分平均树高:以每块样地内测得的3~5株优势木平均树高作为样地平均树高。其中,优势木是根据胸径等于或者接近平均胸径的有代表性的林木。

林分平均年龄:在每个调查样地选择3株平均木,利用生长锥钻取胸径处的树芯,带回实验室通过

WinDendro 年轮分析仪交叉定年法进行年龄测定。

土壤因子:在植被调查的同时,每块样地内挖一个土壤剖面,记录土壤的有效深度,即为土壤厚度;同时沿样地对角线选取 3 个点,每个点用直径为 3 cm 的土钻钻取 0~20 cm 的表层土,置于自封袋后并带回实验室,将 3 个点的土样混合均匀,待土样自然风干后,使用孔径为 2 mm 的土壤筛对干燥后的土壤样品进行筛分,将 >2 mm 的砾石与 <2 mm 的细土分离。根据筛上(>2 mm 的砾石)重量和整个土壤样品的重量,计算 >2 mm 砾石在土壤中的含量百分比;土壤类型主要根据土壤剖面的颜色、质地等,并参考《四川植被》,最终确定云杉人工林的主要土壤类型。

2.2 立地主导因子筛选及分级

本研究以对云杉生长影响显著且在实践中便于测量和易获取为准则<sup>[14]</sup>来选取调查因子,并采用主导因子分析法<sup>[21]</sup>来筛选主导因子。以《森林立地分类与评价的立地要素原理与方法》为参照,基于《森林立地质量评价技术规程(LY/T 3315-2022)》和《四川省森林立地类型表》中各立地因子的分类标准,对上述立地因子进行类目划分,并用数字 1~4

对各级进行量化赋值。此外,考虑到林龄也是影响云杉生长的重要因子,所以本研究也将其纳入类目划分,并对不同龄级赋予相应值。具体因子类目划分及赋值见表 2。

通过分析变量间的相关性、Bartlett's 球形检验结果来判断主成分分析方法的适用性。基于主成分分析的总方差解释率,累积贡献率大于 70% 的成分可确定为主成分。由于根据初始值提取的因子载荷,其因子解不唯一,需要对因子进行旋转。根据旋转后的成分矩阵,筛选影响云杉人工林高生长的主导立地因子。

2.3 数量化理论模型的建立

数量化理论 I 能够有效整合立地条件中的多维度因素,包括定量因子(如海拔、坡度)和定性因子(如坡位、土壤类型),从而全面评估这些复杂因素的综合影响效应<sup>[22]</sup>。本研究将林分平均树高作为表征立地质量的评价指标,利用示性函数(0,1)数量化方法将海拔等 8 个因子作为类目,结合类目划分表,建立各样地立地因子的[0,1]反应矩阵。

将上述[0,1]数据矩阵与各调查样地的林分平均树高建模,从而构建数量化理论 I 模型。在构建

表 1 调查样地基本信息  
Tab. 1 Basic information of the sampling plots

数值类型	年龄/a	平均胸径/cm	平均树高/m	海拔/m	坡度/(°)	土壤厚度/cm	腐殖质厚度/mm	土壤砾石量/%
平均值	32	15.2	9.9	3439	21	72	10.8	13
最大值	65	32.0	20.5	4110	46	100	20	40
最小值	14	7.1	4.0	2604	5	25	1	0

表 2 立地因子分级赋值表  
Tab. 2 The grading assignment table of the site factors

立地因子	分级标准			
	1	2	3	4
海拔	低海拔(1600~2400 m]	中海拔(2400~3200 m]	高海拔(3200~4200 m]	
坡度	缓坡(6°~15°)	斜坡(16°~25°)	陡坡(26°~35°)	急坡(36°~45°)
坡向	阳坡	半阳坡	半阴坡	阴坡
坡位	上坡	中坡	下坡	
腐殖质厚度	<2 cm	2~4.9 cm	≥5 cm	
土层厚度	薄土层≤40 cm	中土层 41~80 cm	厚土层>80 cm	
土壤类型	山地棕壤	山地暗棕壤	棕色针叶林土	
林龄	幼龄(≤30 a)	中龄(31~50 a)	近熟(51~60 a)	成熟(61~80 a)

数量化理论模型前首先采用主成分分析法解决各因子之间的共线性问题,然后将立地因子作为自变量,林分平均树高作为因变量,通过 SPSS23.0 软件进行计算。根据计算结果,确定各个因子在不同分类类目下的得分值和每种因子的得分范围,进而编制立地质量得分表,并以此为基础开展立地质量评价。数量化理论模型为:

$$y_i = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{r_j} \delta_i(j,k) b_{jk} + \varepsilon_i \tag{1}$$

式中,  $y_i$  为因变量,即第  $i$  块林分平均树高;  $i$  为样地数( $i = 1, 2, \dots, n$ );  $j$  为立地因子数( $j = 1, 2, \dots, m$ );  $k$  为第  $j$  个因子下的类目( $k = 1, 2, \dots, r_j$ );  $\delta_i(j, k)$  为第  $j$  个因子第  $k$  个水平的等级反映(0 或 1);  $b_{jk}$  为立地因子  $j$  的第  $k$  个水平的得分值;  $\varepsilon_i$  为第  $i$  次抽样的随机误差。

2.4 模型精度检验

搜集杂谷脑流域森林二类调查样地数据,将样地数据代入模型得到预测值,本研究采用复相关系数与均方根误差作为模型精度评估的双重标准。复相关系数衡量线性回归准确性,值越大,说明模型越精确;均方根误差则反映预测值与实际观测值间的差异,其值越小越好。

复相关系数为:

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}^i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y^i - \bar{y})^2}} \tag{2}$$

剩余均方差为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}^i - y^i)^2}{n}} \tag{3}$$

式中,  $n$  为验证数据数量;  $y^i$  为真实值;  $\hat{y}^i$  为模型预

测值;  $\bar{y}$  为  $y$  的平均值。

3 结果与分析

3.1 云杉人工林立地类型划分

3.1.1 主导立地因子分析

在立地类型划分中,林龄不作为立地因子纳入分析。主成分分析结果显示: KMO ( Kaiser-Meyer-Olkin) 值为 0. 732, 大于 0. 7, Bartlett 球形检验显著性  $P < 0.05$ , 说明数据集中各变量之间存在足够的共同方差, 适宜采用主成分分析法筛选主导因子。

由表 3 看出前两个成分的特征值均大于 1, 第三个成分的特征值虽然小于 1, 但第三主成分能够解释 13. 263% 的数据变异性, 且前 3 个因子的累积方差解释率为 73. 789%。因此, 本研究采用前 3 个变量作为新变量, 来替换 7 个初始变量概括绝大部分的信息。

采用最大方差法进行旋转后, 各因子的变量之间差距较小(表 4)。依据各主成分构成, 将权重系数最高的立地因子确定为云杉高生长的主导因子。在第一主成分中, 主要由土层厚度(0. 891) 决定; 第二主成分则以海拔(0. 932) 为主导因子; 第三主成分由坡向(0. 959) 主导。综上所述, 云杉人工林生长的主导立地因子确定为土层厚度、海拔及坡向。

3.1.2 立地类型划分

根据上述筛选出的 3 个主导立地因子进行立地类型的划分。在遵循立地区划单位与分类单位相一致的分区分类原则下, 由于研究区域坡向对云杉人工林的分布、生长以及土壤的发育等存在显著差异, 因此本研究以坡向作为划分立地类型组的依据, 分

表 3 总方差解释表  
Tab.3 Total variance explained of the research

因子	起始特征值			截取平方和代入			循环平方和代入		
	总计	方差百分比/%	累积/%	总计	方差百分比/%	累积/%	总计	方差百分比/%	累积/%
1	3. 023	43. 186	43. 186	3. 023	43. 186	43. 186	2. 560	36. 575	36. 575
2	1. 214	17. 340	60. 526	1. 214	17. 340	60. 526	1. 358	19. 396	55. 971
3	0. 928	13. 263	73. 789	0. 928	13. 263	73. 789	1. 247	17. 818	73. 789
4	0. 647	9. 245	83. 034						
5	0. 520	7. 435	90. 469						
6	0. 375	5. 358	95. 827						
7	0. 292	4. 173	100. 000						

表 4 旋转后的因子矩阵  
Tab. 4 Rotated factor matrix of the research

立地因子	成分矩阵		
	成分 1	成分 2	成分 3
海拔	-0.040	<b>0.932</b>	-0.054
坡度	-0.714	0.052	0.066
坡向	-0.071	0.042	<b>0.959</b>
坡位	0.684	-0.352	-0.135
土层厚度	<b>0.891</b>	-0.122	0.040
腐殖层厚度	0.551	-0.542	-0.326
土壤类型	0.691	0.231	-0.440

为阳坡半阳坡、阴坡半阴坡两个立地类型组,以土壤厚度和海拔进一步划分立地类型。通过各主导因子的分级组合,杂谷脑流域内的云杉人工林共划分为 18 个立地类型,据此编制杂谷脑流域云杉人工林的立地类型表(表 5)。

表 5 杂谷脑流域云杉人工林立地类型  
Tab. 5 Site types of spruce plantation in the Zagunao basin

编号	立地类型组	立地类型号	立地类型名称
1	阳坡半阳坡	I1	薄土层低海拔立地类型
2	阳坡半阳坡	I2	薄土层中海拔立地类型
3	阳坡半阳坡	I3	薄土层高海拔立地类型
4	阳坡半阳坡	I4	中土层低海拔立地类型
5	阳坡半阳坡	I5	中土层中海拔立地类型
6	阳坡半阳坡	I6	中土层高海拔立地类型
7	阳坡半阳坡	I7	厚土层低海拔立地类型
8	阳坡半阳坡	I8	厚土层中海拔立地类型
9	阳坡半阳坡	I9	厚土层高海拔立地类型
10	阴坡半阴坡	II1	薄土层低海拔立地类型
11	阴坡半阴坡	II2	薄土层中海拔立地类型
12	阴坡半阴坡	II3	薄土层高海拔立地类型
13	阴坡半阴坡	II4	中土层低海拔立地类型
14	阴坡半阴坡	II5	中土层中海拔立地类型
15	阴坡半阴坡	II6	中土层高海拔立地类型
16	阴坡半阴坡	II7	厚土层低海拔立地类型
17	阴坡半阴坡	II8	厚土层中海拔立地类型
18	阴坡半阴坡	II9	厚土层高海拔立地类型

基于已构建的云杉人工林立地类型表,结合 ArcGIS 平台,通过分类渲染技术,绘制出杂谷脑流域内云杉人工公益林的立地类型空间分布图,如图 2 所示。

从图 2 可以看出,流域内现有云杉人工公益林的立地类型主要有 13 类,其主要分布在中土层和薄土层,其中薄土层地块面积占流域云杉人工林总面积的 4.9%,为 779.1 hm<sup>2</sup>;中土层的地块则占比达 95.0%,面积为 15 140.4 hm<sup>2</sup>。在海拔分布上,主要位于中、高海拔(2400 ~ 4200 m),其高海拔的地块面积为 10 533.4 hm<sup>2</sup>,占总面积的 66.2%。从坡向分布来看,杂谷脑流域内云杉人工林主要分布在阳坡和半阳坡,面积为 8683.3 hm<sup>2</sup>,占云杉人工林总面积的 54.5%,其次在半阴坡分布面积较多,占比为 28.8%,阴坡分布面积占比最低。通过综合分析,阳坡半阳坡中土层高海拔、阴坡半阴坡中土层高海拔两个立地类型的云杉人工林地块数较多,总面积达 10 107.8 hm<sup>2</sup>,占流域内云杉人工林总面积的 63.5%,且阳坡半阳坡分布面积较大。综上,研究区域内云杉人工林绝大多数分布在阳坡半阳破中土层高海拔的立地之中。

通过分析发现,各立地类型的云杉人工林主要处于中龄林和近熟林阶段,这两个龄组占比达 77.2%。通过对比各个立地类型的平均胸径、平均树高,发现阳坡半阳坡中土层高海拔的平均胸径和平均树高最高,分别为 17.3 cm 和 11.0 m,其次为阳坡半阳坡中土层中海拔和阴坡半阴坡中土层高海拔。

3.2 云杉人工林立地质量评价

3.2.1 数量化理论模型构建

根据样地调查结果,结合立地因子的类目划分(表 2),采用数量化理论 I 模型计算各类因子与云杉人工林平均树高的回归系数及有关参数。由于本研究中涵盖不同林龄样地,且林龄也是影响云杉林平均高的重要因子,因此在构建数量化模型并开展立地质量得分评价时,纳入林龄因子。以林分平均树高( $Y$ )为因变量,以海拔( $X_1$ )、坡度( $X_2$ )、坡向( $X_3$ )、坡位( $X_4$ )、土壤厚度( $X_5$ )、腐殖层厚度( $X_6$ )、土壤类型( $X_7$ )和林龄( $X_8$ )为自变量构建数量化理论模型,得到的回归模型为:

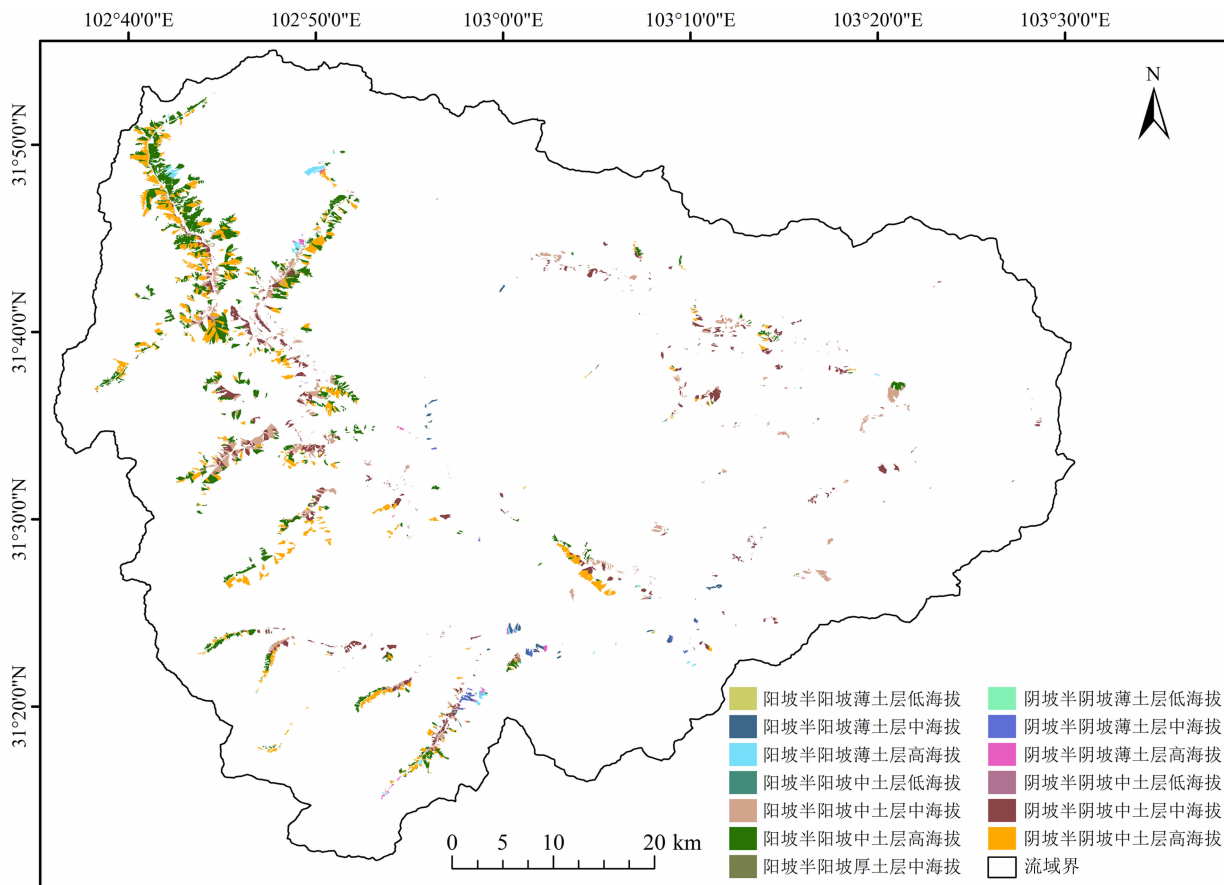


图2 杂谷脑流域云杉人工林立地类型分布图

Fig. 2 Spatial distribution of site types of spruce plantation in the Zagunao basin

$$\begin{aligned}
 Y = & 10.602 - 0.849X_{13} + 1.816X_{21} - 0.354X_{23} + \\
 & 2.882X_{24} + 2.277X_{31} - 1.713X_{33} - 0.705X_{34} - \\
 & 2.195X_{41} - 0.545X_{42} - 5.360X_{51} - 0.122X_{52} + \\
 & 3.585X_{61} + 1.067X_{63} - 0.386X_{71} - 2.628X_{73} - \\
 & 2.264X_{81} + 5.176X_{83} + 10.010X_{84} \quad (4)
 \end{aligned}$$

式中,  $Y$  代表林分平均树高;  $X_{13}$  代表高海拔;  $X_{21}$ 、 $X_{23}$ 、 $X_{24}$  分别代表缓坡、陡坡、急坡;  $X_{31}$ 、 $X_{33}$ 、 $X_{34}$  分别代表阳坡、半阴坡、阴坡;  $X_{41}$ 、 $X_{42}$  分别代表上坡、中坡。  $X_{51}$ 、 $X_{52}$  分别代表腐殖质厚  $< 2$  cm 和  $2 \text{ cm} \leq$  腐殖质厚度  $\leq 4.9$  cm;  $X_{61}$ 、 $X_{63}$  分别代表薄土层、厚土层;  $X_{71}$ 、 $X_{73}$  分别代表山地棕壤、棕色针叶林土;  $X_{81}$ 、 $X_{83}$ 、 $X_{84}$  分别代表幼龄林、近熟林和成熟林。模型的决定系数  $R^2 = 0.721$ , 且模型总体评价的方差分析显示  $F = 9.17$ ,  $P < 0.0001$ , 达到极显著水平, 说明上述所构建的云杉平均树高与立地因子的回归模型是可靠的。

### 3.2.2 模型精度验证

分别采用公式(2)和公式(3)计算复相关系数( $R$ )与剩余均方差( $RMSE$ )两种检验指标, 计算结果

为: 复相关系数  $R = 0.754$ , 均方根误差  $RMSE = 0.556$ 。从结果来看, 林分平均高实测值与模型预测值整体上呈现较为显著的线性关系, 且误差在合理范围内, 说明所建模型能够较好地对林分平均高进行预测(图3)。

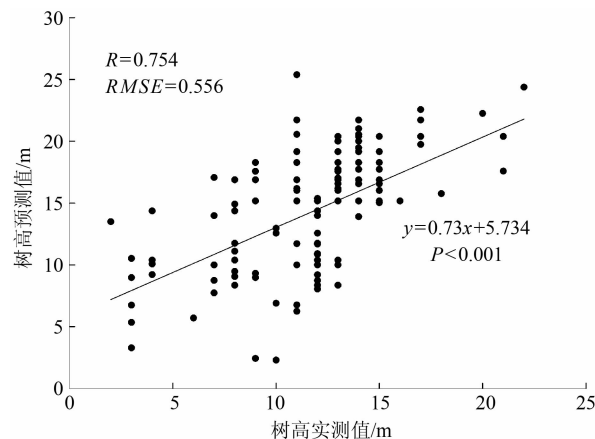


图3 林分平均高实测值与模型预测值对比

Fig. 3 Comparison between measured and predicted values of average stand height

3.2.3 云杉人工林立地质量得分

鉴于预测方程涉及多类目与项目,且各类目得分值各异,为简化实际应用流程,将上述复杂方程转化为直观的立地质量得分表,如表 6 所示。

通过分析表明,云杉人工林的生长特性在不同环境条件下表现出显著差异。具体而言,云杉人工林在高海拔(>3200 m)区域生长状况不佳,相比之下,在阳坡和缓坡地段则表现出更好的生长趋势,而

陡坡则不利于其生长。此外,坡位与云杉的生长呈反比关系,即随坡位上升生长状况下降。腐殖质的厚度对云杉生长有正面影响。同时,云杉在薄土层( $\leq 40$  cm)条件下生长更好。土壤类型方面,云杉在山地暗棕壤中的生长表现最为优越。从龄组的得分看出,龄组越大,得分值越高,说明云杉人工林高生长随龄组的增加而增加。综合来看,杂谷脑流域云杉人工林适宜的生长环境为中低海拔(1600 ~

表 6 云杉人工林立地质量得分表  
Tab. 6 Site quality score of spruce plantation

立地因子	类目	变量	得分值	标准误差	<i>T</i> 值	<i>P</i> 值	容差	<i>VIF</i>
截距		常量	10.602	1.743	6.083	0.000		
海拔	低海拔 1600 ~ 2400 m	$X_{11}$	0					
	中海拔 2400 ~ 3200 m	$X_{12}$	0					
	高海拔 3200 ~ 4200 m	$X_{13}$	-0.849	0.954	-0.889	0.377	0.665	1.504
坡度	缓坡( $\leq 15^\circ$ )	$X_{21}$	1.816	0.936	1.939	0.057	0.406	2.465
	斜坡( $16^\circ \sim 25^\circ$ )	$X_{22}$	0					
	陡坡( $26^\circ \sim 35^\circ$ )	$X_{23}$	-0.354	0.875	-0.404	0.687	0.517	1.933
	急坡( $\geq 36^\circ$ )	$X_{24}$	2.882	1.242	2.320	0.024	0.557	1.794
坡向	阳坡	$X_{31}$	2.277	1.528	1.490	0.141	0.699	1.431
	半阳坡	$X_{32}$	0					
	半阴坡	$X_{33}$	-1.713	0.727	-2.355	0.022	0.573	1.746
	阴坡	$X_{34}$	-0.705	1.037	-0.680	0.499	0.395	2.533
坡位	上坡	$X_{41}$	-2.195	0.916	-2.397	0.019	0.777	1.287
	中坡	$X_{42}$	-0.545	1.071	-0.509	0.613	0.384	2.602
	下坡	$X_{43}$	0					
腐殖质厚度	< 2 cm	$X_{51}$	-5.360	1.919	-2.793	0.007	0.583	1.714
	2 ~ 4.9 cm	$X_{52}$	-0.122	1.053	-0.116	0.908	0.698	1.432
	$\geq 5$ cm	$X_{53}$	0					
土层厚度	薄土层 $\leq 40$ cm	$X_{61}$	3.585	1.554	2.306	0.024	0.547	1.827
	中土层 41 ~ 80 cm	$X_{62}$	0					
	厚土层 > 80 cm	$X_{63}$	1.067	1.178	0.906	0.368	0.223	4.480
土壤类型	山地棕壤	$X_{71}$	-0.386	0.947	-0.408	0.685	0.367	2.725
	山地暗棕壤	$X_{72}$	0					
	棕色针叶林土	$X_{73}$	-2.628	0.837	-3.140	0.003	0.508	1.970
龄组	幼龄	$X_{81}$	-2.264	0.839	-2.699	0.009	0.653	1.531
	中龄	$X_{82}$	0					
	近熟	$X_{83}$	5.176	0.883	5.859	0.000	0.524	1.907
	成熟	$X_{84}$	10.010	2.051	4.881	0.000	0.757	1.321

3200 m)、阳坡半阳坡、缓坡或急坡 ( $\leq 15^\circ$  或  $\geq 36^\circ$ )、下坡位、腐殖质厚 ( $\geq 5\text{ cm}$ ) 且土层较薄 ( $\leq 40\text{ cm}$ ) 的山地暗棕壤。

3.2.4 云杉人工林立地质量等级划分

在计算每个类目因子得分极差(最大值和与最小值之和之差)后进行四等分,并以最大得分值为起点,逐步递减等分后的极差值进而得出四个连续但不重叠的得分区间,这四个区间分别对应四个立地质量等级,由高到低依次标记为“优”“良”“中”和“差”(表 7)。

表 7 云杉人工林立地质量等级评价表  
Tab. 7 Site quality evaluation grades of spruce plantation

立地质量等级	各类项目得分	立地质量评价
I	20.83 ~ 29.36	优
II	12.30 ~ 20.83	良
III	3.77 ~ 12.30	中
IV	-4.76 ~ 3.77	差

按照立地质量等级评价表,对杂谷脑流域云杉人工林立地质量进行等级划分,如图 4 所示。从图中可以看出,杂谷脑流域云杉人工林的立地质量大多为 II、III(良和中)两个等级,其中 II 级地块占比最高,达 60.5%;立地等级 I 级的占 6.46%,IV 级地数量最低,仅占 0.54%,且分布较为零散,说明目前流域内的云杉人工林立地质量普遍处于中等水平,其林地生产力仍然具有很大的潜力。

4 讨论

在探讨立地类型划分时,往往需要综合考量气候、地形、土壤特性及腐殖质层等多个环境因素。本研究采用主成分分析法筛选出影响云杉人工林生长的主导因子为土层厚度、海拔和坡向,考虑到研究区域内,云杉的分布和生长受坡向影响的差异较大,不同坡向影响太阳辐射的接收量、土壤湿度和温度等微气候因子,致使水热条件不同,进而影响光合作用和有机质的积累<sup>[15]</sup>。因此本研究优先选择坡向作

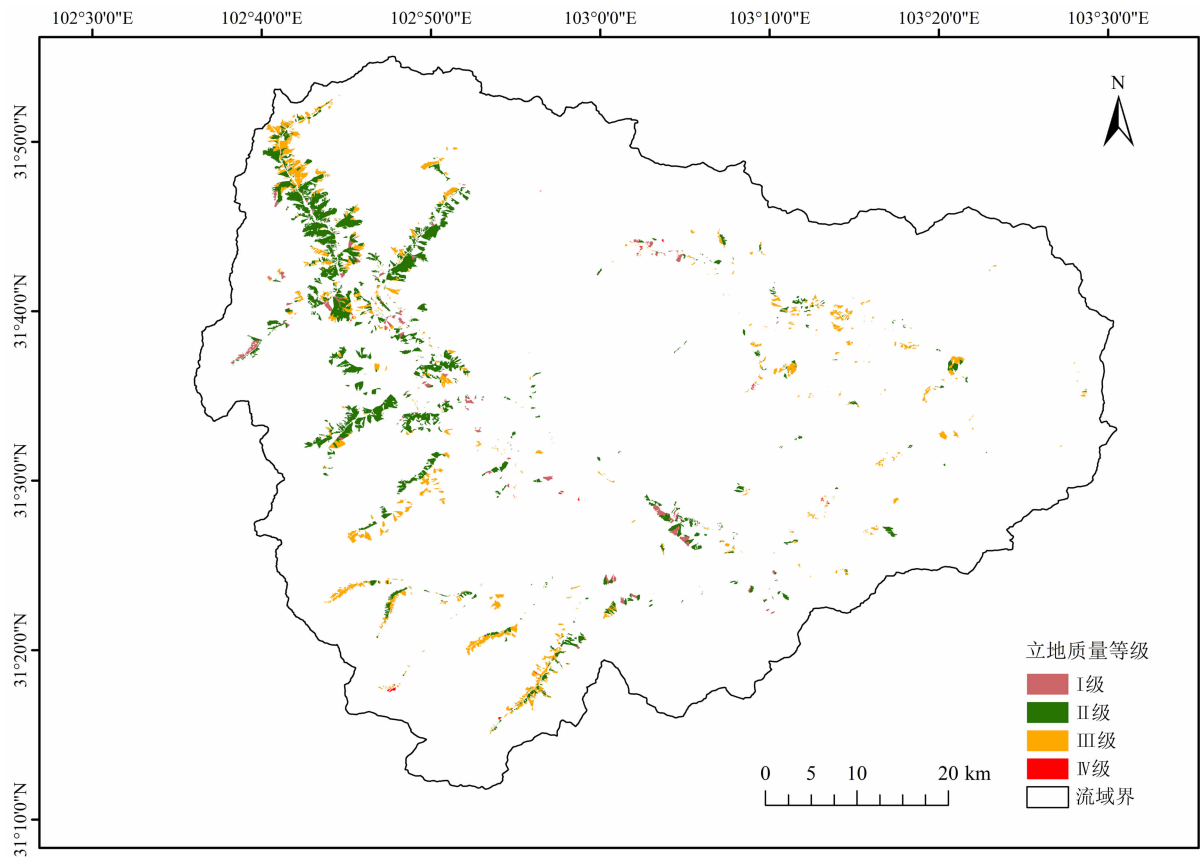


图 4 杂谷脑流域云杉人工林立地质量等级分布图

Fig. 4 Spatial distribution of site quality grades for spruce plantation in the Zagunao basin

为立地类型组划分的主要依据,以土壤厚度和海拔的因子组合来划分立地类型。通过分析,杂谷脑流域内云杉人工林的立地类型有13种,以阳坡半阳坡中土层高海拔、阴坡半阴坡中土层高海拔两类为主。虽然云杉是阳性树种,但本研究中其在阴坡和半阴坡的分布也较多,且生长状况较好,这可能和云杉耐阴,且阴坡、半阴坡在干旱季节受到太阳辐射直接照射的时间较短,土壤水分蒸发量少于阳坡,导致其保水保肥能力高于阳坡有关<sup>[15]</sup>。本研究中杂谷脑流域的云杉人工林主要分布于土壤厚度适中(40~80 cm)的中低海拔(1600~3200 m)地区,这与隆孝雄<sup>[23]</sup>研究中关于川西北高山立地亚区、立地类型组及适生树种的结果是一致的。

数量化理论模型作为评价森林立地质量评价的经典方法,被本研究应用于杂谷脑流域的云杉人工公益林,实现了对其立地质量的科学分类与评价。在构建数量化模型的过程中,海拔、坡向、坡度、坡位、土壤厚度等立地因子是不可或缺的关键自变量因子<sup>[24-25]</sup>,也有部分研究纳入了土壤养分<sup>[1,26]</sup>、地形地貌<sup>[27-28]</sup>等立地因子以丰富评价维度,提升模型的综合性和准确性。本研究在立地质量评价体系中,纳入了土壤厚度、腐殖质层厚度和土壤类型这三个核心土壤养分影响因子,旨在更精确地反映云杉人工林生长所需土壤条件,从而更贴合其培育与发展目标。此外,气候因素在广泛地理区域中能够显著影响立地质量<sup>[29-30]</sup>,对于大尺度研究而言,其作为重要考量因素不可或缺<sup>[31]</sup>,并直接关系到评估结果的可靠性。但本研究聚焦于流域尺度,气候的变异性 and 复杂性相对较小,因此未将气候因子纳入。相较之下,地形和土壤因子则直接影响着立地质量,尤其是地形因子,在山地立地质量评估中展现出更稳定且易于测量的优势<sup>[31]</sup>。本研究通过数量化理论I分析,建立云杉人工林立地质量等级评价表,结果表明在阳坡半阳坡的下坡位、中低海拔(1600~3200 m)、薄土层( $\leq 40$  cm)、山地暗棕壤、腐殖质较厚( $\geq 5$  cm)的缓坡地区的立地质量最好。这一结果可以从以下三个方面来解释。首先,下坡位因重力作用及地形特征,土壤养分流动趋于平缓,且能够累积更多的枯落物和腐殖质,不仅提升了土壤的保水能力,还促进了养分的自然循环与富集。因此,相较于中、上坡位,下坡位的土壤呈现出更为优越的水

肥条件,有利于植被的生长与发育<sup>[3]</sup>。其次,云杉属于浅根性树种,薄土层土壤营养成分可能更容易被云杉吸收,利于其根系的快速发展。除此之外,杂谷脑流域土壤特征整体表现为土层浅薄、土壤贫瘠,且石砾含量较高<sup>[20]</sup>,这也是直接影响本研究结果的一个重要因素,即在本研究区域内云杉现有立地条件是以薄土层为主,因而会呈现出本研究中的薄土层立地下云杉生长较好的结果。第三,腐殖质厚的土壤富含有机质,且缓坡地区水土流失相对较少,土壤和腐殖质的稳定性更高,适合云杉的长期生长。

此外,考虑到不同年龄阶段的树木具有不同的生长特性和需求,本研究在进行立地质量评价时,将林龄因素纳入评估,有助于确定当前的生长潜力和未来的生产能力。虽然林龄本身不是立地因子的直接组成部分,但它通过影响树木的生理生态过程,间接作用于立地质量。随着林龄的增加,土壤结构可能因根系活动和有机质的积累而得到改善,土壤肥力提高,从而有利于树木的生长。从本研所得的立地质量评价的结果来看,杂谷脑流域现有云杉人工林的立地质量等级总体处于中等及以上的水平,说明在该区域的自然立地条件比较适合云杉人工林的生长,但93%的立地质量仅达到良好和中等,其林地生产力仍有很大提升空间。因此,在林业生产实践中应基于立地质量,尤其要重点考虑土壤厚度、海拔和坡向等立地因素制定相应的营林措施和管理策略,对于生长速度较慢的立地类型,可能需要采取更加精细化的管理措施来提高云杉人工林的生长效率;而对于生长条件优越的立地类型,则可以考虑采取更高强度的林业经营活动,以充分发挥林地的生产潜力。

本研究在构建基于数量化理论模型的立地质量评价体系时,由于全面调查与测定众多立地因子的成本较高,模型构建过程中未能涵盖所有相关因子。因此,精准识别并选取特定树种生长过程中的主导或限制性因子,成为立地质量评价精度的关键环节<sup>[14]</sup>。此外,森林经营措施也是影响人工林生长的一项重要因素,有研究表明,立地条件较差时,更适宜采用较小的间伐强度<sup>[32]</sup>;进一步的研究也指出,抚育间伐措施对于改善油松林乔木层生产力的效果亦随立地条件的不同而有所差异<sup>[33]</sup>,这可能是由于不同立地条件生态系统的抗逆性不同。因此,在评

价立地质量时,还需要考虑不同经营措施的效果及其对立地条件的影响<sup>[34]</sup>,如何将森林经营策略与林分的立地条件和立地质量等级有机结合起来仍有待进一步研究。

不同立地类型人工林具有不同的林分结构和功能,由于云杉具有耐阴性、耐寒性和混交性,其生态幅度较宽,因而适合其生长的立地类型较多。因此,针对不同类型的立地条件,未来云杉人工林的经营策略与用途应依据其生产力等级来定位,旨在最大化地挖掘林地生产潜力,并提升林分整体质量,使人工林的经营管理技术达到一个较高的水平<sup>[35]</sup>。根据本研究中立地质量评价结果,秉承多功能森林经营“理念,对于分布在江河干线周围的立地质量较好的Ⅰ、Ⅱ级林地应以培育水源涵养林为主,同时兼顾森林碳汇功能;Ⅲ级立地可以通过采取人工管理措施,如土壤改良,人工整地等措施来改善立地条件,以培育水土保持林为主,兼顾水源涵养和碳汇功能;对于Ⅳ级立地条件差的立地类型,不宜进行更多的人为干扰,必要时进行封山育林,此类林分可作为保护生态环境的防护林、水土保持林。考虑到本研究区域的局限性,其结论主要聚焦于川西山地云杉人工林,未来的研究应根据云杉人工林的分布情况,拓展研究范围,增加样本采集点,进一步优化云杉人工林立地类型分类体系的普适性和准确性。

## 5 结论

本研究将云杉人工公益林分为2个立地类型组(阳坡半阳坡立地类型组、阴坡半阴坡立地类型组)和18个立地类型。杂谷脑流域内云杉人工公益林的立地类型主要有13类,以阳坡半阳坡中土层高海拔、阴坡半阴坡中土层高海拔两个立地类型分布较多。通过构建数量化理论模型,制定了立地质量得分表与立地等级评价体系。杂谷脑流域内云杉人工林立地质量等级主要为Ⅱ、Ⅲ(良和中)两个等级,占云杉人工林总面积的93%,且Ⅱ级立地占比最高。杂谷脑流域现有云杉人工林的立地普遍处于中等水平,今后在云杉人工林的经营管理过程中应基于立地类型,根据不同立地条件开展定向经营,进而充分发挥林地的生产潜力。

## 参考文献(References)

- [1] 陈祥伟, 胡海波. 林学概论[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 182. [CHEN Xiangwei, HU Haibo. Forestry panorama [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005: 182]
- [2] 袁雪丽, 汪阳东, 黄兴召, 等. 基于数量化理论对山苍子立地类型划分及评价[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(5): 91-96. [YUAN Xueli, WANG Yangdong, HUANG Xingzhao, et al. Classification and evaluation of *Litsea cubeba* site types based on quantification theory [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(5): 91-96] DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2020.05.14
- [3] 申琳琳, 邓海燕, 林洪, 等. 江西赣州桉树人工林立地类型划分及评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(5): 33-43. [SHEN Linlin, DENG Haiyan, LIN Hong, et al. Site classification and evaluation of *Eucalyptus* plantations in Ganzhou, Jiangxi Province [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(5): 33-43] DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2022.05.004
- [4] 张宴恺. 东北东部山地樟子松立地类型划分及立地质量评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022: 1-33. [ZHANG Yankai. Site classification and site quality evaluation of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv. in eastern mountain area of northeast China [D]. Haerbin: Northeast Forestry University, 2022: 1-33]
- [5] 李仁平. 辽东山区油松建筑材林立地类型划分及立地质量评价[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018: 1-62. [LI Renping. Classification of forest sites and evaluation of building timber forests dominated by *Pinus tabulaeformis* in Liaodong mountain areas [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018: 1-62]
- [6] 闫焯琛. 大清河流域山丘区立地类型划分与评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2020: 1-99. [YAN Huachen. Classification and evaluation of site types in hilly areas of Daqing river basin [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020: 1-99] DOI: 10.26949/d.cnki.gblyu.2020.001029
- [7] 汤维, 黄朗, 杨浩, 等. 基于平均优势木胸径的湖南杉木人工林立地质量评价模型[J]. 中南林业科技大学学报, 2024, 44(5): 26-34. [TANG Wei, HUANG Lang, YANG Hao, et al. Site quality evaluation model of Chinese fir plantation in Hunan based on the DBH of average dominant trees [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2024, 44(5): 26-34] DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2024.05.003
- [8] 段光爽, 郑亚丽, 洪亮, 等. 基于潜在生产力的华北落叶松纯林和白桦山杨混交林立地质量评价[J]. 林业科学, 2022, 58(10): 1-9. [DUAN Guangshuang, ZHENG Yali, HONG Liang, et al. A potential productivity-based approach of site quality evaluation for larch pure forest and birch-aspen mixed forest [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(10): 1-9] DOI: 10.11707/j.1001-7488.20221001
- [9] 陈涛, 王露露, 王思崇, 等. 河南省丘陵低山区刺槐人工林立

- 地分类及立地质量评价[J]. 西北林学院学报, 2023, **38**(1): 153–159. [CHEN Tao, WANG Lulu, WANG Sichong, et al. Site classification and quality evaluation of *Robinia pseudoacacia* plantation in hilly and low mountainous areas in Henan [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, **38**(1): 153–159] DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2023.01.21
- [10] 李艳洁. 将乐林场杉木人工林立地类型划分与立地质量评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2017: 1–45. [LI Yanjie. Site classification and site quality evaluation of Chinese fir plantation in Jiangle stated-owned forestry [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017: 1–45]
- [11] 张晓文, 于青军, 罗桂生, 等. 平泉油松建筑材林立地类型划分及立地质量评价[J]. 林业科学, 2021, **57**(9): 1–12. [ZHANG Xiaowen, YU Qingjun, LUO Guisheng, et al. Site classification and site quality evaluation of *Pinus tabulaeformis* plantation for construction timber in Pingquan, Hebei Province [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, **57**(9): 1–12] DOI: 10.11707/j.1001-7488.20210901
- [12] 张春霞, 冯自茂, 李文鑫, 等. 陕西黄陵油松人工林立地类型划分及评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, **49**(1): 55–63. [ZHANG Chunxia, FENG Zimao, LI Wenxin, et al. Site classification and evaluation of *Pinus tabulaeformis* plantation in Huangling, Shaanxi [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2021, **49**(1): 55–63] DOI: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2021.01.007
- [13] 刘平, 于磊, 李仁平, 等. 辽东山区油松建筑材林立地质量评价研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2019, **50**(1): 70–77. [LIU Ping, YU Lei, LI Renping, et al. Site quality evaluation of *Pinus tabulaeformis* building timber forest in the mountainous area of eastern Liaoning Province, China [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2019, **50**(1): 70–77] DOI: 10.3969/j.issn.1000-1700.2019.01.009
- [14] 唐诚, 王春胜, 庞圣江, 等. 广西大青山西南桦人工林立地类型划分及评价[J]. 西北林学院学报, 2018, **33**(4): 52–57. [TANG Cheng, WANG Chunsheng, PANG Shengjiang, et al. Site classification and evaluation of *Betula alnoides* plantations at Guangxi Daqing mountain [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, **33**(4): 52–57] DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2018.04.08
- [15] 庞宏东, 李玲, 杨代贵, 等. 南方丘陵山地泡桐人工林立地类型划分与质量评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, **42**(8): 40–47. [PANG Hongdong, LI Ling, YANG Daigui, et al. Site classification and quality evaluation of *Paulownia* plantation in the hilly area of south China [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, **42**(8): 40–47] DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2022.08.004
- [16] 杨文, 陈立新, 段文标, 等. 红松人工林立地质量评价及生长收获效益[J]. 中南林业科技大学学报, 2024, **44**(6): 102–111. [YANG Wen, CHEN Lixin, DUAN Wenbiao, et al. Site quality evaluation and growth harvest benefit of *Pinus koraiensis* plantation [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2024, **44**(6): 102–111] DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2024.06.010
- [17] 李旭华, 徐峥静茹, 蔡蕾, 等. 不同抚育措施对川西亚高山云杉人工林土壤微生物群落结构的短期影响[J]. 应用与环境生物学报, 2023, **29**(3): 663–669. [LI Xuhua, XU Zhengjingru, CAI Lei, et al. Short-term effects of different tending measures on soil microbial communities in subalpine spruce plantations of western Sichuan [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental, 2023, **29**(3): 663–669] DOI: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2022.03007
- [18] 冯秋红, 黄劲松, 徐峥静茹, 等. 密度调控对川西亚高山云杉人工林生物量和生物多样性的影响[J]. 四川林业科技, 2016, **37**(3): 10–14. [FENG QiuHong, HUANG Jinsong, XU Zhengjingru, et al. Effects of density adjusting on biomass and biodiversity of artificial *Picea asperata* forest in sub-alpine region of western Sichuan, China [J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2016, **37**(3): 10–14] DOI: 10.16779/j.cnki.1003-5508.2016.03.002
- [19] 冯秋红, 吴晓龙, 徐峥静茹, 等. 密度调控对川西山地云杉人工林地被物及土壤水文特征的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, **42**(1): 98–104. [FENG QiuHong, WU Xiaolong, XU Zhengjingru, et al. Effects of density adjustment on ground cover and soil hydrological function of *Picea asperata* plantation in the subalpine region of western Sichuan Province, China [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2018, **42**(1): 98–104] DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.201601020
- [20] 徐亚莉, 张明芳, 李强, 等. 基于植被和环境因子的亚高山森林土壤水源涵养功能空间尺度上推模型构建——以岷江上游杂谷脑流域为例[J]. 生态学报, 2023, **43**(13): 5614–5626. [XU Yali, ZHANG Mingfang, LI Qiang, et al. Upscaling subalpine forest soil water-holding capacity based on vegetation and environmental factors: An example of the Zagunao River watershed in the upper reach of the Minjiang River in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, **43**(13): 5614–5626] DOI: 10.5846/stxb202206071611
- [21] 马明东, 刘跃建. 应用4种数学方法对暗针叶云杉林分生境属性的研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, **14**(1): 196–201. [MA Mingdong, LIU Yuejian. Analysis on the environmental property of *Picea asperata* stand through four mathematical methods [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, **14**(1): 196–201]
- [22] 张沛健, 卢万鸿, 徐建民, 等. 雷琼地区尾细桉人工林立地类型划分及其质量评价[J]. 林业科学研究, 2021, **34**(6): 130–139. [ZHANG Peijian, LU Wanhong, XU Jianmin, et al.

- Site classification and quality evaluation of *Eucalyptus urophylla* × *E. tereticornis* plantation in Hainan Island and Leizhou peninsula region [J]. Forest Research, 2021, **34**(6): 130 – 139] DOI: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.06.016
- [23] 隆孝雄. 四川立地分区及适生树种[J]. 四川林业科技, 2001, **22**(4): 54 – 58. [LONG Xiaoxiong. Site classification and suitable tree species in Sichuan Province [J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2001, **22**(4): 54 – 58] DOI: 10.16779/j.cnki.1003 – 5508.2001.04.008
- [24] 李正茂, 李昌珠, 张良波, 等. 油料树种光皮树人工林立地质量评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, **30**(3): 75 – 79. [LI Zhengmao, LI Changzhu, ZHANG Liangbo, et al. Evaluation of *Cornus wilsoniana* plantation site quality [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2010, **30**(3): 75 – 79] DOI: 10.14067/j.cnki.1673 – 923x.2010.03.013
- [25] 李秉钧, 蔡宗明, 刘聘, 等. 福建省福建柏人工林立地类型划分及质量评价[J]. 西北林学院学报, 2023, **38**(5): 86 – 92. [LI Bingjun, CAI Zongming, LIU Pin, et al. Site classification and evaluation of *Fokienia hodginsii* plantation in Fujian Province [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, **38**(5): 86 – 92] DOI: 10.3969/j.issn.1001 – 7461.2023.05.12
- [26] 李贤伟, 李守剑, 张健, 等. 四川盆地西缘水杉人工林立地质量评价研究[J]. 四川农业大学学报, 2002, **20**(2): 106 – 109. [LI Xianwei, LI Shoujian, ZHANG Jian, et al. Study on site quality evaluation of *Metasequoia glyptostroboides* in the west of Sichuan basin [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2002, **20**(2): 106 – 109] DOI: 10.3969/j.issn.1000 – 2650.2002.02.010
- [27] 黄国胜, 马炜, 王雪军, 等. 基于一类清查数据的福建省立地质量评价技术[J]. 北京林业大学学报, 2014, **36**(3): 1 – 8. [HUANG Guosheng, MA Wei, WANG Xuejun, et al. Forestland site quality evaluation of Fujian Province based on continuous forest inventory data [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, **36**(3): 1 – 8] DOI: 10.13332/j.cnki.jbfu.2014.03.001
- [28] 陆海飞, 刘望舒, 徐建民, 等. 广西中南部尾巨桉人工林立地类型划分及立地质量评价[J]. 林业科学, 2021, **57**(5): 13 – 24. [LU Haifei, LIU Wangshu, XU Jianmin, et al. Site classification and quality evaluation of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantation in the south Central Guangxi, China [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, **57**(5): 13 – 24] DOI: 10.11707/j.1001 – 7488.20210502
- [29] SHARMA R P, BRUNNER A, EID T. Site index prediction from site and climate variables for Norway spruce and Scots pine in Norway [J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2012, **27**(7): 619 – 636. DOI: 10.1080/02827581.2012.685749
- [30] ALBERT M, SCHMIDT M. Climate-sensitive modelling of site productivity relationships for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and common beech (*Fagus sylvatica* L.) [J]. Forest Ecology and Management, 2010, **259**(4): 739 – 749. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.04.039
- [31] AERTSEN W, KINT V, VAN ORSHOVEN J, et al. Evaluation of modelling techniques for forest site productivity prediction in contrasting ecoregions using stochastic multicriteria acceptability analysis (SMAA) [J]. Environmental Modelling and Software, 2011, **26**(7): 929 – 937. DOI: 10.1016/j.envsoft.2011.01.003
- [32] 段劭, 马履一, 贾黎明, 等. 抚育间伐对侧柏人工林及林下植被生长的影响[J]. 生态学报, 2010, **30**(6): 1431 – 1441. [DUAN Jie, MA Lyuyi, JIA Liming, et al. Effect of thinning on *Platycladus orientalis* plantation and the diversity of undergrowth vegetation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, **30**(6): 1431 – 1441]
- [33] 武朋辉, 白高平, 党坤良, 等. 抚育间伐对秦岭南坡油松中龄林生长的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, **37**(1): 20 – 26. [WU Penghui, BAI Gaoping, DANG Kunliang, et al. Thinning effects on growth of *Pinus tabulaeformis* middle-age forest on southern slope of Qinling Mountains [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, **37**(1): 20 – 26] DOI: 10.14067/j.cnki.1673 – 923x.2017.01.004
- [34] 李青辉. 山西油松人工林立地分类及立地质量评价[D]. 太谷: 山西农业大学, 2022: 1 – 37. [LI Qinghui. Site classification and site quality evaluation of *Pinus tabulaeformis* plantation in Shanxi [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2022: 1 – 37] DOI: 10.27285/d.cnki.gsxn.2022.000084
- [35] 刘军, 张春华, 楚立明, 等. 红皮云杉人工林立地分类与经营方向选择[J]. 林业科技, 2000, **25**(2): 19 – 20. [LIU Jun, ZHANG Chunhua, CHU Liming, et al. The classification of site conditions and selection of management directions for *Picea koraiensis* plantations [J]. Forestry Science and Technology, 2000, **25**(2): 19 – 20] DOI: 10.3969/j.issn.1001 – 9499.2000.02.009

# Classification of Site Type and Quality Evaluation for Artificial Forest of *Picea Asperata* in Western Sichuan: A Case Study of the Zagunao Basin in the Upper Reach of the Minjiang River, China

LI Xuhua, LIU Tao, CAI Lei, XU Zhengjingru, LIU Xingliang, FENG Qihong\*

(a. Ecological Restoration and Conservation for Forest and Wetland Key Laboratory of Sichuan Province, SAF, Chengdu 610081, China;

b. Sichuan Giant Panda National Park Observation and Research Station, SAF, Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture 623006,

Sichuan, China; c. Wolong Forest Ecology Observation and Research Station of Sichuan Province, SAF, Aba

Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture 623006, Sichuan Academy of Forestry Sciences (SAF), Sichuan, China)

**Abstract:** A proper classification of forest site types and objective evaluation of the quality of the sites are prerequisites for achieving targeted improvement of forest quality and are also the basis for refining forest management. However, there were severely disputes over forest site classification and quality evaluation, mostly because of inconsistent regional standards and incomplete evaluation frameworks, necessitating further exploration these issues in concert with regional geo-environment features.

In this study, it took artificial forest of spruce (*Picea asperata*) in the Zagunao basin in the upper reach of the Minjiang River, western Sichuan, China as research target. Several methods such as principal component analysis (PCA) and Quantification Theory I were used to complete the investigation.

(1) Soil layer thickness, elevation, and slope aspect were major site determinants of spruce plantation growth. In combination with different site factors, spruce plantation could be divided into two major site type groups and 18 distinct site types. In the Zagunao basin, there existed 13 site types of spruce plantations, which primarily distributed on sunny or semi-sunny slopes with moderately deep soils (41 – 80 cm) at high elevations (3200 – 4200 m).

(2) The forest site qualities of spruce plantations in the Zagunao basin were predominantly rated as good or moderate grades, accounting for 93% of the total. High-quality sites were primarily found in mid-elevation (2400 – 3200 m) zones with shallow soils ( $\leq 40$  cm) on sunny or semi-sunny slopes.

(3) Overall, the site qualities of spruce plantations were generally at a medium or above level, indicating considerable potential for improvement on forest productivity. For Class II sites, concerted efforts should be made on cultivating water conservation forests while also considering forest carbon sequestration functions. For Class III sites, emphasis should be placed on the development of soil and water conservation forests.

This study provides a scientific foundation and technical support for the sustainable management and quality improvement of spruce plantations in the mountainous regions of western Sichuan, China.

**Key words:** spruce plantation; site classification; site quality evaluation; quantification theory type I

(责任编辑 李 嵘)