

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2025.01.034

CSTR:32310.14.stbcbx.2025.01.034

金哲浩,王克勤,黄帅,等.基于 MDS 的滇池流域 5 种典型林分土壤质量评价[J].水土保持学报,2025,39(1):

JIN Zhehao, WANG Keqin, HUANG Shuai, et al. Soil quality assessment of five typical forest stands in the dianchi lake basin based on MDS[J].

Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1):

基于 MDS 的滇池流域 5 种典型林分土壤质量评价

金哲浩^{1,3}, 王克勤^{1,3}, 黄帅^{1,3}, 于君宝^{1,2}, 刘芝芹^{1,2}

(1.云南省高原湿地保护修复与生态服务重点实验室,西南林业大学生态与环境学院(湿地学院),
昆明 650224;2.国家高原湿地研究中心,昆明 650224;3.西南林业大学水土保持学院,昆明 650000)

摘 要: [目的] 土壤质量是生态系统健康与可持续土地管理的重要指标。[方法] 通过主成分分析(PCA)筛选土壤质量的关键表征指标 12 个(有机质、全氮、速效氮、毛管孔隙度、pH 等),并采用最小数据集法(MDS)评估滇池流域 5 种典型人工林分的土壤质量指数(SQI)。[结果] 1)滇青冈林和云南松林的土壤质量显著优于桉树人工林,其中滇青冈林水分保持能力最强,云南松林在养分供应和肥力维持方面表现突出;混交林的有机质和速效氮质量分数最高,展现较强的养分积累潜力;灌木林的土壤质量中等,有机质和全氮质量分数介于混交林与桉树林之间;桉树林的 SQI 最低,表明单一树种经营对土壤结构和养分循环的不利影响显著。2)分层分析显示,表层(0~20 cm)云南松林的 SQI 最高,次表层(20~40 cm)滇青冈林表现最佳,深层(40~60 cm)滇青冈林和混交林优于其他林分。整体 SQI 平均值排序为滇青冈林(0.60)>云南松林(0.54)>混交林(0.47)>灌木林(0.33)>桉树林(0.20)。3)MDS 分析结果与全面数据集(TDS)拟合良好($R^2=0.69$),验证该方法在土壤质量评价中的有效性。[结论] 研究结果为滇池流域的土壤管理提供科学依据,建议在水源涵养区推广滇青冈与云南松的混交种植,同时改善桉树人工林的经营模式以恢复土壤质量。

关键词: 土壤质量; 滇池流域; 最小数据集法; 主成分分析; 土壤质量指数

中图分类号: **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242-(2025)01-0000-00

Soil Quality Assessment of Five Typical Forest Stands in the Dianchi Lake Basin based on MDS

JIN Zhehao^{1,3}, WANG Keqin^{1,3}, HUANG Shuai^{1,3}, YU Junbao^{1,2}, LIU Zhiqin^{1,2}

(1.Key Laboratory for Plateau Wetland Conservation, Restoration, and Ecosystem Services of Yunnan Province, School of Ecology and Environment (Wetland College), Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2.National Plateau Wetland Research Center, Kunming 650224, China; 3.School of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650000, China)

Abstract: [Objective] Soil quality is a critical indicator of ecosystem health and sustainable land management. [Methods] Key soil quality indicators (e.g., organic matter, total nitrogen, available nitrogen, capillary porosity, and pH) were identified through principal component analysis (PCA), and the soil quality index (SQI) of five typical artificial forest types in the Dianchi Lake Basin was evaluated using the minimum dataset (MDS) method. [Results] 1) *Cyclobalanopsis glauca* (CG) and *Pinus yunnanensis* (PY) forests exhibited significantly higher soil quality than *Eucalyptus* plantations. CG showed the greatest water retention capacity, while PY had outstanding performance in nutrient supply and fertility maintenance. Mixed forests had the highest organic matter and available nitrogen contents, showing strong nutrient accumulation potential.

收稿日期:2024-10-29

修回日期:2024-11-19

录用日期:2024-11-26

网络首发日期(www.cnki.net):2024-00-00

资助项目:国家自然科学基金项目(42377444);国家级大学生创新创业训练计划项目;云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目;云南省一流建设学科“水土保持与荒漠化防治学”建设项目;西南林业大学博士科研启动基金项目(111429);云南省本科专业综合评价“水土保持与荒漠化防治”专业建设项目(52200805)

第一作者:金哲浩(1997—),男,硕士研究生,主要从事森林水文研究。E-mail: doctor_jinzhehao@163.com

通信作者:刘芝芹(1977—),女,博士,副教授,主要从事森林生态与水文研究。E-mail: lzq-xl@163.com

于君宝(1970—),教授,主要从事生态修复与湿地生态研究。E-mail: yu.junbao@gmail.com

<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

Shrub forests demonstrated moderate soil quality, with organic matter and total nitrogen levels between that of mixed forests and *Eucalyptus* plantations. In contrast, *Eucalyptus* plantations had the lowest SQI, highlighting the adverse effects of monoculture on soil structure and nutrient cycling. 2) Stratified analysis showed that PY had the highest SQI in the surface layer (0~20 cm), CG performed best in the subsurface layer (20~40 cm), while CG and mixed forests were superior in the deep layer (40~60 cm). The average SQI values ranked in the order of CG (0.60) > PY (0.54) > mixed forest (0.47) > shrub forest (0.33) > *Eucalyptus* plantation (0.20). 3) MDS results showed a strong correlation with the Total Dataset (TDS) ($R^2=0.69$), confirming the method's effectiveness for soil quality assessment. [Conclusion] The study can provide scientific guidance for soil management in the Dianchi Lake Basin. Mixed planting of CG and PY in water conservation areas is recommended, and management of *Eucalyptus* plantation should be improved to restore soil quality.

Keywords: soil quality; Dianchi Lake Basin; minimum dataset; principal component analysis; soil quality index

Received: 2024-10-29

Revised: 2024-11-19

Accepted: 2024-11-26

Online(www.cnki.net): 2024-00-00

土壤质量指土壤在支持植物生产力、维护水和空气质量及促进人类健康方面的能力^[1]。此概念涵盖土壤的多功能性,既包括其支持农业生产的能力,也包括其在生态系统服务中的关键角色,如碳存储、养分循环、水分保持和防止侵蚀等功能。土壤侵蚀显著影响碳和养分的循环,导致有机碳减少及氮和磷等养分的流失。通过有效管理土壤有机碳(SOC),如减少侵蚀并增强土壤养分利用效率,可改善碳储存并促进养分循环^[2]。采取覆盖作物或保留植被等措施,不仅可以减少土壤侵蚀,而且能提升土壤的水分保持能力,从而增强生态系统服务功能^[3]。同时,植被覆盖通过防止水蚀和风蚀有效减少土壤流失,并保留土壤中的有机碳和其他关键养分,进一步保护土壤资源^[4]。高质量的土壤不仅提升农业生产力,还能提供如水分存储和抗侵蚀等关键生态服务,在环境保护中发挥着不可或缺的作用^[5]。土壤质量被广泛视为实现长期生态平衡和可持续土地管理的重要指标^[6]。由于土壤质量难以直接测定,通常采用土壤理化性质的综合评估来间接反映其质量。

土壤质量对生态系统管理和林业的可持续发展至关重要。有研究^[7]表明,中亚热带地区的青冈栎类天然次生林的土壤养分显著高于杉木纯林、木荷纯林及多种混交林,尤其在土壤有机质、全氮和全磷方面表现出显著优势。不同林分类型对土壤养分的垂直分布具有重要影响,0~20、20~40 cm 土层的土壤养分分布特征受到不同林分类型的显著影响,进一步强调不同林分类型在土壤养分管理和维持生态系统功能中的重要性^[8]。近年来,滇池流域因农田和建筑用地的扩展,导致土壤侵蚀和养分流失,加之过度施肥,农田土壤普遍存在酸化和有机质减少的问题,对生态环境造成严重影响^[9]。相比之下,草地和林地 in 保持

土壤肥力和减少侵蚀方面表现优异,其土壤有机碳和氮通常高于耕地,进而有助于维持土壤质量和减少养分流失^[10]。不同林分显著影响土壤有机碳(SOC)、氮(N)、磷(P)等养分质量分数。研究^[11]表明,针叶林土壤的酸性较高,碳氮比(C:N)较高,而阔叶林通常具有较高的养分供应能力,如 SOC 和 N 的质量分数更高,可能与阔叶树种丰富的凋落物及快速分解机制有关。

在土壤质量的众多评价方法中,最小数据集法(minimum data set, MDS)因其简化数据处理并保持评估精度而得到广泛应用。MDS 通过筛选关键土壤理化指标,减少数据集的复杂性,同时,在评估精度上与全体数据集(total data set, TDS)相当^[12]。相关研究^[13]表明,MDS 不仅简化土壤质量评价过程,而且显著提高评估效率。相比之下,层次分析法(AHP)和土壤健康评价指标体系(SHI)在处理复杂系统时较为繁琐,增加评估的复杂性^[14]。MDS 的有效性在不同地区和生态系统中得到验证。刘志勇等^[15]采用该方法对黔西南州烟田土壤质量进行评价;邱巡巡等^[16]则评估祁连山南坡不同土地利用方式下的土壤质量;程彩云等^[17]分析喀斯特地区不同类型人工林的土壤质量;何金宝等^[18]利用该法对三江平原的黑土地进行土壤质量评价。以上研究表明,MDS 能够有效反映土壤质量的空间和功能差异,适用于多种生态系统,为土壤管理提供科学依据。

滇池流域作为中国南方高原的重要生态区域,不仅是云南省社会经济的核心区,而且是区域生态系统健康与生态平衡的关键组成部分。其土壤质量对流域水源涵养、植被生产力及气候调节等多种生态系统服务具有重要影响。然而,滇池流域近年来面临着土地利用变化、植被退化和人为干扰等多重

压力,导致土壤退化风险上升,对区域生态安全构成威胁。因此,对滇池流域土壤质量进行科学系统的评估,不仅是实现区域生态保护的重要任务,也为南方高原生态系统管理提供科学参考。现有关于土壤质量的研究多集中于黄土高原、青藏高原等典型生态脆弱区,而对滇池流域独特的南方高原区域的研究相对较少,尤其是对不同林分类型对土壤质量影响的系统性分析。因此,本研究以滇池流域为研究区域,结合最小数据集法(MDS)与主成分分析法(PCA),系统性地评估 5 种人工林:混交林(华山松与云南油杉)、云南松林、滇青冈林、桉树林及灌木林的土壤质量。这种方法能够在减少数据冗余的同时,精确揭示影响土壤质量的关键指标,为流域后续的水土保持提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

滇池流域位于中国云南省中部(102°30′~103°00′E,24°28′~25°28′N),总面积 2 920 km²。滇池是该流域的核心湖泊,面积 309 km²,流域自东北向西南逐渐降低,地形多样,主要以丘陵为主,占流域总面积的 69.5%。流域属于亚热带高原山地季风气候,年平均降水量 797~1 007 mm,主要集中在夏季。流域土壤主要为红壤,pH 4.0~7.5,植被丰富,包含 165

科 674 属 1 682 种维管植物,以亚热带常绿阔叶林和针叶林为主,优势种包括云南松(*Pinus yunnanensis*)和华山松(*Pinus armandii*)等。

1.2 样品采集与分析

在 2023 年 10—12 月于滇池流域的西山森林公园内进行实地考察并根据《云南水土保持植物手册》选取具有代表性的 5 种典型林分覆盖的林地中进行土壤样品采集。根据植被均匀度和区域代表性,每种林分类型随机选择具有代表性的 3 个样地。为覆盖样地的空间异质性,在每个选定样地内使用系统抽样法沿对角线均匀布置 3 个测试点。

在每个测试点,使用 100 cm³ 的环刀分层采集原状土样,采样深度设定为 0~20、20~40、40~60 cm,分层方式为闭区间左开区间,即每层的下边界值(如 20、40 cm)归入下一层。每层采集 1 kg 的土样,并从每个土样中分别采集 3 个子样本。收集的土样被带回实验室,测定土壤的理化指标,包括体积质量、含水率、孔隙度、pH、有机质、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷和速效钾等,共采集环刀 270 个,土样 90 袋。测定方法参照《土壤农业化学常规分析方法》。为确保数据的准确性和可靠性,对各土样中的 3 个子样本的试验结果取平均值。不同植被类型的基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information of the sampling sites

林分类型	海拔/m	坡度/(°)	坡向	伴生植物	林龄/a	郁闭度/%	树高/m
华山松+云南油杉混交林	2 010	15	N	云南含笑、三叶鬼针	36	90	16.2
云南松林	2 110	13	NE	小铁子、碎米花杜鹃	31	90	11.5
滇青冈林	1 950	18	SW	箭竹、紫茎泽兰、青蒿	21	85	18.5
桉树林	1 900	10	N	紫茎泽兰	11	40	15.6
灌木林	1 950	15	NE	慈竹、雀舌黄杨	21	90	3.0

1.3 土壤质量评价

通过主成分分析(PCA)对 12 个土壤理化指标进行降维,以减少冗余信息并提高数据处理效率。采用特征值≥1 作为筛选标准,选取解释总方差累积贡献率超过 70% 的主成分,确保所选主成分能够充分代表原始数据的主要信息。在主成分分组的基础上,比较每组内 Norm 值最高的指标,进一步筛选出 Norm 值相差不超过 10% 的关键指标^[19]。关键指标被认为对土壤质量综合信息贡献最大,从而构成最小数据集(MDS)。

为提高 MDS 的科学性和代表性,每个分组内选取综合荷载最大的指标作为该组的代表性指标。综合荷载越大,表明该指标在土壤质量评价中的解释力越强。为验证 MDS 的有效性,进一步对总数据集(TDS)中的所有指标进行综合荷载计算,并将 TDS

与 MDS 的结果进行对比分析。通过这种对比分析,评估 MDS 在保留主要信息的前提下简化数据集的有效性,并验证其与 TDS 评价结果的一致性。计算公式为:

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_1^k (U_{ik}^2 \lambda_k)}$$
 (1)

式中: N_{ik} 为 i 指标在全部 k 个主成分的累加因子荷载; U_{ik} 为 i 指标的单个因子荷载; λ_k 为第 k 个主成分的特征值。

通过建立指标与土壤质量之间的隶属函数,对进入 MDS 的指标求隶属度值^[5],计算公式为:

$$u(x) = \begin{cases} 1 & x \geq x_2 \\ 0.9 \times \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} & x_2 < x < x_1 \\ 0 & x \leq x_1 \end{cases}$$
 (2)

式中: x 为土壤质量指标的实际测量值; x_1 为最小值; x_2 为最大值; $u(x)$ 为指标标准化后的值。

把各项指标线性得分与权重因子进行加权求和,土壤质量指数(SQI)计算公式为:

$$SQI=\sum_{i=1}^nW_iN_i \tag{3}$$

式中: N_i 和 W_i 分别为第*i*种评价指标所对应的线性得分和权重系数; n 为数据集中土壤指标总数。

1.4 数据处理

本研究采用 SPSS 27.0 软件进行主成分分析(PCA)和相关性分析,以筛选关键指标并探讨其相互关系。为评估不同植被类型对土壤指标的影响,采用单因素方差分析(ANOVA)和邓肯检验,以确保显著性检验的准确性。数据可视化则通过 Excel 软件实现,以直观展示分析结果。主成分分析(PCA)通过提取特征值>1 的主成分,减少数据冗余并保留主要信息。此方法在土壤质量评估中尤为重要,因为涉及的 13 个指标可能存在相关性,而 PCA 能有效降低多重共线性。使用最小数据集法(MDS)筛选关键指标则进一步简化数据集,提高评估效率。

2 结果与分析

2.1 林龄差异分析

不同林分类型的林龄存在显著差异($p<0.05$)。如华山松+云南油杉混交林龄为 36 a,而桉树林龄为 11 a,林龄差异可能是导致土壤质量差异的重要因素。成熟林更长的生长周期可能通过增加凋落物积累和根系活动改善土壤肥力,而年轻林由于生长时间较短,土壤有机质质量分数较低。表明林龄是土壤质量差异的重要自然成因之一。尽管林龄差异是一个不可忽视的因素,但本研究的主要目的是探讨不同林分类型在当前条件下的土壤质量特点。因此,林龄的影响并不削弱研究结果的价值,而是提供更全面的理解。

2.2 不同林分类型对土壤特性的影响

由表 2 可知,不同林分的土壤物理、化学及养分特性表现出显著差异,反映植被覆盖类型及其对土壤生态过程的影响。桉树林土壤体积质量最高(1.48 g/cm³),毛管孔隙度(27.72%)和自然含水率(12.60%)均最低,土壤结构紧实,限制水分渗透与储存,同时 pH 最低(4.77),表明酸化显著,可能抑制微生物活性和养分循环。桉树林养分供应能力最差,且养分指标变异性较高,揭示其土壤质量和稳定性存在问题,需优化管理策略。

混交林在各项土壤指标上表现最佳,毛管孔隙度(44.02%)、自然含水率(20.73%)、有机质(35.21

g/kg)、全量和速效养分均为最高,土壤水分和养分分布稳定,展现显著的生态优势。滇青冈林次之,其毛管孔隙度(47.91%)和养分体积分数接近混交林,但速效氮略低,整体仍具有良好的水分调节和养分供应能力。

云南松林的土壤性质相对稳定,体积质量适中,水分保持能力较好,但部分养分供应能力稍逊于混交林和滇青冈林,部分指标如非毛管孔隙度变异性较高,反映出局部水分和养分保持能力需改善。灌木林土壤体积质量最低(1.41 g/cm³),毛管孔隙度和自然含水率中等,具有良好的通气条件,但水分保持能力有限,其全钾变异性最低,养分分布较稳定。

总体来看,混交林土壤质量最佳,滇青冈林次之,适合生态土壤管理。云南松林虽表现稳定,但仍需改善局部水分和养分供应。灌木林需加强水分调节,而桉树林由于土壤结构紧实、养分低及变异性高,综合劣势显著,长期单一树种经营对土壤质量影响不利。

表 2 5 种不同林分土壤理化指标的描述性统计
Table 2 Descriptive statistics of soil physicochemical indices for five different stands

土壤指标	土地利用类型	最小值	最大值	均值±标准差	变异系数/%
土壤体积质量/ (g·cm ⁻³)	云南松林	1.06	1.52	1.3±0.16c	12.7
	混交林	1.21	1.38	1.29±0.06c	4.8
	桉树林	1.38	1.59	1.48±0.07a	4.4
	滇青冈林	1.17	1.44	1.30±0.08c	6.3
	灌木林	1.28	1.54	1.41±0.08b	5.8
毛管孔隙度/%	云南松林	32.72	42.28	38.83±2.40b	6.2
	混交林	37.55	54.48	44.02±4.26a	9.7
	桉树林	24.71	28.96	27.72±1.04d	3.8
	滇青冈林	44.15	52.17	47.91±2.12ab	4.4
	灌木林	27.15	36.83	31.49±2.27c	7.2
非毛管孔隙度/%	云南松林	5.03	16.35	9.63±3.11c	32.3
	混交林	8.99	16.57	13.09±2.82b	21.6
	桉树林	3.60	9.61	5.98±1.36e	22.7
	滇青冈林	9.28	20.69	15.08±3.29a	21.8
	灌木林	6.04	9.69	8.32±0.96d	11.6
pH	云南松林	4.74	5.71	5.25±0.24c	4.6
	混交林	5.14	5.80	5.47±0.22b	3.9
	桉树林	4.39	5.03	4.77±0.21d	4.5
	滇青冈林	5.20	5.95	5.54±0.17b	3.0
	灌木林	5.14	5.98	5.65±0.20a	3.6
有机质/ (g·kg ⁻¹)	云南松林	18.94	32.34	25.30±4.59c	18.1
	混交林	28.61	40.13	35.21±4.43a	12.6
	桉树林	9.32	20.36	14.54±4.12e	28.4
	滇青冈林	23.07	38.77	30.17±4.85b	16.1
	灌木林	14.39	25.42	19.78±4.08d	20.6

续表 1

土壤指标	土地利用类型	最小值	最大值	均值±标准差	变异系数/%
自然 含水率/%	云南松林	12.33	26.03	18.74±5.02a	26.80
	混交林	13.75	27.50	20.73±5.22a	25.2
	桉树林	8.87	15.75	12.60±1.99c	15.8
	滇青冈林	13.09	26.00	20.62±3.74a	18.1
	灌木林	12.11	19.49	14.82±2.37b	16.0
全氮/ (g·kg ⁻¹)	云南松林	0.98	1.60	1.20±0.17c	14.1
	混交林	1.42	2.17	1.82±0.21a	11.7
	桉树林	0.47	1.36	0.88±0.28e	32.3
	滇青林	1.53	1.91	1.72±0.16b	9.1
	灌木林	0.76	1.21	1.01±0.15d	14.6
全磷/ (g·kg ⁻¹)	云南松林	0.33	1.87	1.41±0.41b	26.7
	混交林	1.48	2.28	1.78±0.22a	20.6
	桉树林	0.12	1.22	0.68±0.28c	40.7
	滇青冈林	1.01	2.78	1.57±0.51a	25.0
	灌木林	0.44	1.80	1.16±0.45b	20.8
全钾/ (g·kg ⁻¹)	云南松林	13.47	21.16	17.36±1.70a	9.8
	混交林	12.82	21.68	17.25±2.84a	16.4
	桉树林	9.34	17.23	12.30±2.67d	21.7
	滇青冈林	13.16	18.65	15.92±1.45b	9.1
	灌木林	12.08	15.57	14.00±0.98c	7.0
速效氮/ (mg·kg ⁻¹)	云南松林	86.13	101.95	93.72±4.16c	4.4
	混交林	99.73	118.17	109.74±4.99a	4.5
	桉树林	47.75	71.63	58.20±8.43e	14.5
	滇青冈林	94.23	112.85	100.35±4.75b	4.7
	灌木林	53.42	84.33	70.02±10.03d	14.3
速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	云南松林	9.99	18.27	13.75±3.07b	22.3
	混交林	10.79	22.64	18.03±3.63a	20.1
	桉树林	5.20	14.54	10.97±3.10c	28.2
	滇青冈林	12.83	22.24	16.66±3.04a	18.3
	灌木林	8.18	19.62	13.68±3.14b	23.0
速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	云南松林	112.37	143.13	127.69±8.48b	6.6
	混交林	119.29	162.02	141.37±9.04a	6.4
	桉树林	84.31	128.08	110.48±13.75d	12.4
	滇青冈林	118.81	157.90	137.12±14.35a	10.5
	灌木林	94.38	140.44	116.87±11.00c	9.4

2.3 全数据集(TDS)的确定

使用 SPSS 软件对 5 种林分类型的土壤理化指标进行因子分析,提取每个指标的公因子方差,以反映其对总体方差的贡献,并通过主成分法确定因子载荷和公因子方差。根据公因子方差计算权重。由表 3 可知,土壤体积质量、自然含水率、全钾和速效磷在不同林地中均具有较高的公因子方差和权重,是关键性主导指标。桉树林的土壤体积质量和全钾,滇青冈

林地的非毛管孔隙度和速效钾,灌木林地的有机质和速效磷,混交林地的土壤体积质量和自然含水率,以及云南松林的土壤体积质量和自然含水率,在各自林地类型中表现出显著,表明不同林地类型的土壤质量主导指标存在差异。

2.4 最小数据集(MDS)的确定

为评估滇池流域不同林分的土壤质量,采用主成分分析(PCA)筛选关键理化指标,确定最小数据集(MDS)。桉树林的 2 个主成分(PC1 和 PC2)占总方差的 83.793%,特征值分别为 8.636 和 1.419,第 1 主成分中大部分土壤指标具有较大因子荷载值,毛管孔隙度则为第 2 主成分的主要指标,最终筛选的 MDS 指标为全钾、pH 和毛管孔隙度。滇青冈林的 3 个主成分(PC1、PC2、PC3)占总方差的 82.853%,第 1 主成分涵盖体积质量、自然含水率等,第 2 主成分为 pH 和全磷,第 3 主成分为毛管孔隙度,最终确定全钾、全磷和毛管孔隙度为关键指标。灌木林的 2 个主成分占总方差的 75.213%,分别涵盖体积质量、自然含水率等多项指标及毛管孔隙度和全磷,最终 MDS 指标为有机质和毛管孔隙度。混交林的 2 个主成分占总方差的 84.383%,主要包括体积质量、自然含水率、毛管孔隙度和全磷,筛选出的 MDS 指标为有机质和毛管孔隙度。云南松林的 2 个主成分占总方差的 79.594%,涵盖体积质量、自然含水率、速效氮和速效钾等指标,最终确定自然含水率和速效钾为关键指标。综合分析表明,各林分类型的 MDS 指标体现植被类型对土壤质量关键影响因子的选择性作用,桉树林中的全钾、pH 及毛管孔隙度作为关键指标,反映其土壤质量受理化性质的显著影响(表 4)。

2.5 基于 MDS 的土壤质量评价

采用最小数据集(MDS)方法计算不同林分类型在 3 个土层(0~20、20~40、40~60 cm)的土壤质量指数(SQI)来确定不同林分类型对土壤质量影响的程度。采用闭区间左开区间的划分规则,并根据标准对其进行评级:1.0~0.8 为Ⅰ级(非常高),0.8~0.6 为Ⅱ级(高),0.6~0.4 为Ⅲ级(中),0.4~0.2 为Ⅳ级(低),0.2~0 为Ⅴ级(非常低)^[34]。

从图 1 可以看出,各植被类型在不同土层的 SQI 结果。表层(0~20 cm)为云南松林 0.705(Ⅱ级)>滇青冈林 0.663(Ⅱ级)>混交林 0.584(Ⅲ级)>灌木林 0.530(Ⅲ级)>桉树林 0.247(Ⅳ级);中层(20~40 cm)为滇青冈林 0.624(Ⅱ级)>云南松林 0.605(Ⅱ级)>混交林 0.476(Ⅲ级)>灌木林 0.251(Ⅳ级)>桉树林 0.197(Ⅴ级);深层(40~60 cm)为滇青冈林 0.530(Ⅲ级)>混交林 0.373

(Ⅲ级) > 云南松林 0.322(Ⅲ级) > 灌木林 0.218(Ⅳ级) > 青冈林(0.60) > 云南松林(0.54) > 混交林(0.47) > 桉树林 0.158(Ⅴ级)。各林地 SQI 平均值排序为滇 木林(0.33) > 桉树林(0.20)。

表 3 总数据集土壤指标的公因子方差和权重

Table 3 Total dataset common factor variance and weight of soil indices

评价指标	桉树林地		滇青冈林地		灌木林地		混交林地		云南松林地	
	公因子方差	权重	公因子方差	权重	公因子方差	权重	公因子方差	权重	公因子方差	权重
体积质量	0.87	0.09	0.87	0.10	0.90	0.09	0.78	0.08	0.97	0.09
自然含水率	0.79	0.08	0.88	0.09	0.79	0.09	0.93	0.09	0.96	0.09
毛管孔隙	0.86	0.08	0.89	0.05	0.85	0.04	0.71	0.08	0.63	0.08
非毛管孔	0.34	0.06	0.92	0.09	0.67	0.08	0.92	0.09	0.86	0.09
pH	0.90	0.09	0.66	0.08	0.64	0.08	0.91	0.09	0.65	0.08
有机质	0.88	0.08	0.88	0.09	0.96	0.10	0.95	0.09	0.96	0.09
全氮	0.93	0.08	0.93	0.09	0.79	0.09	0.85	0.09	0.84	0.09
全磷	0.82	0.08	0.53	0.05	0.38	0.05	0.79	0.06	0.51	0.07
全钾	0.96	0.09	0.94	0.09	0.69	0.09	0.94	0.09	0.80	0.08
速效氮	0.88	0.08	0.70	0.08	0.85	0.09	0.82	0.08	0.73	0.06
速效磷	0.91	0.09	0.86	0.09	0.86	0.10	0.91	0.09	0.91	0.09
速效钾	0.91	0.09	0.90	0.10	0.65	0.08	0.61	0.07	0.74	0.08

总体来看,桉树林在所有土层的 SQI 均处于较低水平,尤其在深层表现最差。滇青冈林在表层和 中层表现优异,评级为Ⅱ级,在深层有所下降,但仍 为Ⅲ级。灌木林的土壤质量随着土层深度的增加而 下降,整体评级较低。混交林在各土层表现较为均 衡,SQI 均为Ⅲ级。云南松林在表层和中层表现较

好,评级为Ⅱ级,在深层有所下降,但仍保持在Ⅲ级。 综上,滇青冈林和云南松林在表层和中层土壤质量 较优,具备较好的土壤改良能力。混交林土壤质量较 为稳定,表现均衡。桉树林和灌木林的土壤质量较 差,桉树林在改良土壤方面的效果较弱,需采取相应 措施进行改善。

表 4 MDS 土壤指标的公因子方差和权重

Table 4 Common factor variance and weight of soil indices in minimum dataset

评价指标	桉树林		滇青冈林		灌木林		混交林		云南松林	
	公因子方差	权重	公因子方差	权重	公因子方差	权重	公因子方差	权重	公因子方差	权重
体积质量										
自然含水率									0.78	0.50
毛管孔隙度	0.52	0.28	0.25	0.27	0.55	0.50	0.81	0.50		
非毛管孔隙度										
pH	0.89	0.36								
有机质					0.55	0.50	0.81	0.50		
全氮										
全磷			0.37	0.33						
全钾	0.90	0.36	0.54	0.40						
速效氮										
速效磷										
速效钾									0.78	0.50

2.6 MDS 评价的精度验证

为验证 MDS 的准确性,研究对比分析基于全量 数据集的土壤质量指数(SQI-TDS)与基于最小数据 集的土壤质量指数(SQI-MDS)之间的差异。通过线 性拟合结果表明,SQI-TDS 与 SQI-MDS 之间存在显 著正相关性(图 1)。表明 MDS 构建的土壤质量评价

指标可以有效替代 TDS,用于评价滇池流域 5 种典 型土地利用类型的土壤质量。

3 讨论

3.1 不同林分类型对土壤质量的影响

本研究对滇池流域 5 种典型林分的土壤理化性 质分析发现,不同林分类型显著影响土壤质量,特别

是在有机质、全氮、速效氮和 pH 等关键指标上存在显著差异。研究结果表明,混交林、云南松林和滇青冈林的土壤质量显著优于桉树林,说明植被结构和根系分布直接影响土壤质量。

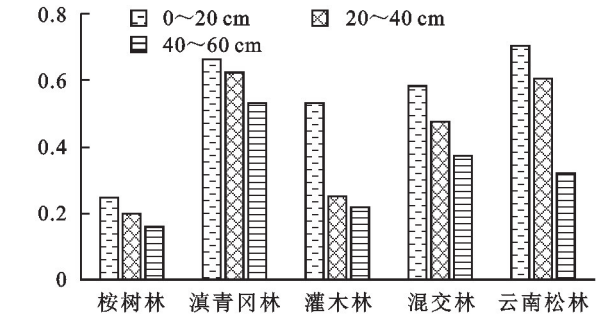


图 1 不同土层土壤质量指数 (SQI)

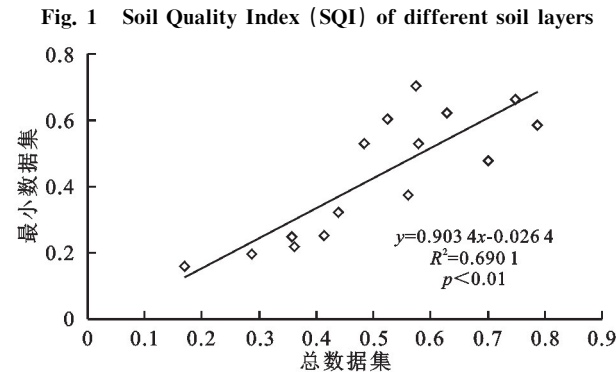


图 2 MDS 与总数据集土壤质量指数的相关性

Fig. 2 Correlation between MDS and the overall Soil Quality Index

混交林表现出较高的土壤有机质质量分数,有机质的平均值显著高于桉树林的($p<0.05$)。这种高质量分数的有机质归因于混交林多样化的植物群落和复杂的根系结构,能够提供更多的凋落物和根系分泌物,从而增加土壤中的有机质和养分,促进微生物活动和碳氮循环^[20]。由表 2 可知,混交林的全氮也表现优异,显著高于桉树林的全氮($p<0.05$)。彭素琴等^[21]和 LI 等^[22]的研究表明,混交林通过增加凋落物的多样性、改善微环境、促进微生物多样性等机制,间接影响凋落物分解过程,从而增强土壤肥力和养分循环,有助于改变土壤微生物群落结构,提高物质和养分的循环效率。综上所述,混交林的土壤有机质和全氮显著高于桉树林,多样化的植物群落和复杂的根系结构是其优势的关键因素。

云南松林表现出较好的土壤质量。其 pH 接近中性,有利于微生物活性和养分循环。相关研究^[23]指出,云南松林的树冠截留率和枯枝落叶层水分保持能力均低于阔叶林和混交林,导致在减少地表径流和氮磷输出方面稍显不足。为进一步提升云南松纯林的水分保持能力,建议适当增加表层覆盖物以减少水

分流失和地表径流。

滇青冈林的深根系使其能够有效吸收深层土壤中的水分,展现出较强的水分保持能力^[24]。由表 2 所示,滇青冈林的毛管孔隙度和非毛管孔隙度在所有林分类型中表现优异。其 pH 为 5.54,显著高于桉树林的 4.77($p<0.05$),中性酸碱度有助于促进微生物活性和养分循环。DING 等^[25]进一步证实,深根系树种在干旱条件下的水分获取能力明显优于浅根系树种,并通过其复杂的根系结构改善土壤水分保持能力,使得滇青冈林成为重要的水源涵养林,具有较高的水分持留能力和养分循环效率。建议在滇池流域推广与该植被进行混交,尤其在水源涵养区和土壤退化严重的地区;同时,应通过减少过度采伐和人为干扰,保持其深根系统的保护,保持土壤中的养分循环与水分平衡,从而维持其较高的土壤质量^[26]。

桉树林的土壤质量则相对较差。有机质和全氮均显著低于其他林分类型。桉树林的体积质量较高,显示出其土壤结构较为紧实,限制水分渗透和根系生长。桉树林的 pH 为 4.77,酸性较强,抑制土壤微生物活性,进而影响养分有效性^[27]。研究^[28]指出,桉树通过化感作用抑制其他植物和微生物的生长,导致其土壤肥力下降。同时,较高的变异系数(如全氮的变异系数为 0.323)表明,桉树林的土壤质量不稳定。将固氮植物与桉树进行混交,可在改善土壤养分供应的同时减少养分流失^[29]。通过合理的灌溉和有机肥料的使用,也可逐步恢复土壤质量^[30]。

灌木林的土壤质量介于混交林和桉树林之间,显示其在有机质和全氮方面处于中等水平。尽管灌木林在深层土壤中的水分保持和养分积累能力较弱,但其表层土壤的速效氮却较高,达到 70.02 mg/kg。主要是由于灌木林的冠层下土壤中积累大量的铵和硝酸盐,随着灌木覆盖率的增加,无机氮浓度也相应增加^[31],表明在表层土壤养分循环中具有一定的优势,将有助于减缓土壤侵蚀并促进肥力恢复^[32]。建议采取增加地表覆盖物和防止水土流失的措施,不仅有助于减少水分流失,而且能通过地表有机质的积累逐步提升土壤肥力^[33]。

3.2 土壤质量指数 (SQI) 的综合评估

本研究通过土壤质量指数 (SQI) 对不同林分的土壤综合质量进行评估表明,林分类型对土壤质量具有显著影响。SQI 作为一种综合评估工具,能够全面反映土壤的健康状况。桉树林在各土层的 SQI 显著低于其他林分,尤其在深层土壤 (40~60 cm) 中,其 SQI 仅为 0.158,远低于滇青冈林的 0.530 和云南松

林的 0.322, 差距较大。表明桉树林在土壤质量方面存在显著问题, 既包括养分流失, 也涉及土壤物理结构的退化。

在表层土壤(0~20 cm)中, 桉树林的 SQI 为 0.247(Ⅳ级), 显著低于滇青冈林的 0.621(Ⅱ级)。滇青冈林和云南松林的 SQI 分别为 0.663 和 0.705(Ⅱ级), 显示出与高质量植被相当的土壤健康状态。在中层土壤(20~40 cm), 桉树林的 SQI 降至 0.197(Ⅴ级), 低于曾铭^[34]研究中的最低值 0.494(Ⅲ级)。而在深层土壤中, 桉树林的 SQI 为 0.158(Ⅴ级), 进一步证实桉树林在土壤质量方面的不足。上述结果表明, 桉树林在各土层的 SQI 均低于其他植被类型, 特别是在中、深层土壤中质量更为欠佳。尽管混交林在有机质质量分数上表现良好, 但 SQI 值未能达到预期, 可能是由于 MDS 所选取的土壤指标在各林分所占权重不同所致。

进一步分析发现, 滇青冈林样地的 SQI 平均值(0.60)最高, 是由于阔叶树种的落叶分解速度较快。阔叶树种的落叶能够迅速转化为可利用的养分, 进而促进微生物活动和养分循环。相比之下, 针叶树种的针叶分解速度较慢, 即使混交林中包含 2 种针叶树种, 其整体有机质的分解效率和养分转化效率仍低于阔叶树种的效果^[35-36], 与李鹏^[37]的研究结果一致, 即树种是决定混交林之间土壤化学性质差异的关键因素。虽然混交林的养分较高, 但其生态效用仍取决于树种的特性。

土壤质量指数(SQI)作为一种有效的评估工具, 通过整合不同的理化指标, 能够准确识别土壤在不同生态系统和土地利用类型下的综合健康状况。此方法特别适用于像滇池流域这样存在多种植被类型的复杂生态环境。本研究揭示不同植被类型对生态系统整体功能的影响, 其中滇青冈林和云南松林通过根系和有机质的输入改善土壤质量, 提升水分保持能力和养分循环效率, 为生态系统提供重要的服务。灌木林在中、深层土壤中的 SQI 较低, 表明其生态作用有限。未来在进行生态修复时, 需要考虑将灌木林与其他植被类型结合, 以促进综合生态修复效果。SQI 作为一种综合评估方法, 在复杂生态环境中展现出广阔的应用前景。

3.3 最小数据集法(MDS)的应用与有效性

采用最小数据集法(MDS)进行土壤质量评价, 显著简化评估指标, 提升效率。MDS 结果与总数据集(TDS)的结果高度一致($R^2 = 0.69$), 表明在简化数据集的情况下, MDS 方法依然能够保持较高的准确

性^[38]。进一步验证 MDS 在土壤质量评价中的可靠性, 尤其在大规模研究或长期监测中具有重要的应用价值^[39]。

通过 MDS 的分析, 滇池流域 5 种典型林地的土壤质量差异得以简明呈现。尽管 MDS 简化数据集, 其评估结果与以往使用全面数据集的研究保持一致, 进一步支持 MDS 的有效性。滇池流域的土壤质量深受气候变化、地形特征影响, 如降水量和气温的季节性波动, 可能对土壤水分保持和养分供应产生重要影响^[40-41]。研究^[42]表明, 山地地形及高坡度区域容易导致土壤侵蚀加剧, 而森林和草地对土壤养分的保护作用明显优于农田和废弃地。气候变化在流域内影响显著, 其中降水变化对水文和生态系统的冲击尤为明显, 尤其是山地子流域在降水减少和极端气候事件中受到的影响最大^[43], 加剧不同林地之间的土壤质量差异, 进一步展示 MDS 方法在应对复杂环境时的适用性。

MDS 方法在应用中存在一定局限性。如 MDS 依赖于筛选出的少数关键指标, 导致一些潜在重要信息的遗漏。不同研究中所选择的关键指标可能不完全一致, 影响结果的可比性。未来的研究可以通过结合其他方法进一步优化 MDS 的结果, 确保在简化数据集时, 保留更多有价值的信息。

4 结论

1) 滇青冈林和云南松林在土壤有机质和全氮等关键指标上表现优于桉树林, 表明植被结构与土壤质量之间存在密切关系, 尤其在表层和中层土壤中, 滇青冈和云南松林展示出更优的土壤改良能力。

2) 通过计算不同土层的 SQI 发现, 桉树林在所有土层中土壤质量均较低, 尤其在深层土壤(40~60 cm)表现较差; 滇青冈和云南松林则具有较强的土壤改良和水分保持能力, 为区域土壤质量的提升提供有效的生态服务。

3) 采用的最小数据集法(MDS)和主成分分析(PCA)成功筛选出反映土壤质量的关键指标, 验证 MDS 在土壤质量评价中的可靠性, 并与全面数据集表现出较好的相关性($R^2 = 0.69$)。

4) 建议在滇池流域推广滇青冈林或与云南松林混交, 以进一步提升土壤质量和生态稳定性。同时应针对桉树林采取改良措施, 增强其土壤养分和水分保持能力。

参考文献:

[1] SEIFU W, ELIAS E. Soil quality attributes and their

- role in sustainable agriculture: A review[J]. International Journal of Plant and Soil Science, 2018, 26(3): 1-26.
- [2] 贺郝钰, 刘蔚, 常宗强, 等. 腾格里沙漠南缘植被恢复对土壤有机碳组成及稳定性的影响[J/OL]. 中国沙漠. (2024-11-13) [2024-11-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1070.P.20241112.1353.002.html>.
HE H Y, LIU W, CHANG Z Q, et al. Effects of revegetation on soil organic carbon composition and stability in the southern edge of the Tengger Desert[J/OL]. Journal of Desert Research. (2024-11-13) [2024-11-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1070.P.20241112.1353.002.html>.
- [3] COSTANTINI E A C, CASTALDINI M, DIAGO M P, et al. Effects of soil erosion on agro-ecosystem services and soil functions: A multidisciplinary study in nineteen organically farmed European and Turkish vineyards[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 223: 614-624.
- [4] AMUNDSON R, BERHE A A, HOPMANS J W, et al. Soil and human security in the 21st century[J]. Science, 2015, 348(6235): e1261071.
- [5] THAKUR N, SHARMA R. Soil quality[J]. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 2019, 8(7): 2920-2930.
- [6] LAL R. Soil health and carbon management[J]. Food and Energy Security, 2016, 5(4): 212-222.
- [7] 曹小玉, 赵文菲, 李际平, 等. 中亚热带几种典型森林土壤养分含量分析及综合评价[J]. 生态学报, 2022, 42(9): 3525-3535.
CAO X Y, ZHAO W F, LI J P, et al. A comprehensive evaluation of soil nutrients in main typical forests in central-subtropical China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(9): 3525-3535.
- [8] 黎丽娟. 文昌市 5 种森林类型土壤养分含量特征分析[J]. 热带林业, 2023, 51(3): 32-35.
LI L J. Analysis of soil nutrient content characteristics of 5 forest types in Wenchang City[J]. Tropical Forestry, 2023, 51(3): 32-35.
- [9] ZHANG Z Y, LI J X, HU Z N, et al. Impact of land use/land cover and landscape pattern on water quality in Dianchi Lake Basin, southwest of China [J]. Sustainability, 2023, 15(4): e3145.
- [10] WU Q J, YANG R Y, YANG Z S. A study on the rationality of land use change in the Dianchi Basin during the last 40 years under the background of lake revolution[J]. Sustainability, 2022, 14(18): e11479.
- [11] WANG R J, MA J W, LIANG H Z, et al. Changes in soil properties, microbial quantity and enzyme activities in four *Castanopsis hystrix* forest types in subtropical China[J]. Plants, 2023, 12(13): e2411.
- [12] 李鑫, 张文菊, 邬磊, 等. 土壤质量评价指标体系的构建及评价方法[J]. 中国农业科学, 2021, 54(14): 3043-3056.
LI X, ZHANG W J, WU L, et al. Advance in indicator screening and methodologies of soil quality evaluation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(14): 3043-3056.
- [13] 左文建, 胡顺磊, 段伟, 等. 基于 AHP 筛选的有机污染土联合修复技术案例研究[J]. 土壤, 2023, 55(2): 390-398.
ZUO W J, HU S L, DUAN W, et al. Case study of combined remediation technology for organic contaminated soils based on AHP screening[J]. Soils, 2023, 55(2): 390-398.
- [14] 张江周, 李奕赞, 李颖, 等. 土壤健康指标体系与评价方法研究进展[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 603-616.
ZHANG J Z, LI Y Z, LI Y, et al. Advances in the indicator system and evaluation approaches of soil health [J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(3): 603-616.
- [15] 刘志勇, 罗富方, 鲁万华, 等. 基于最小数据集的黔西南州烟田土壤质量评价[J]. 河南农业科学, 2024, 53(7): 100-108.
LIU Z Y, LUO F F, LU W H, et al. Soil quality assessment of tobacco field based on minimum data set in southwest Guizhou autonomous prefecture[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2024, 53(7): 100-108.
- [16] 邱巡巡, 曹广超, 赵青林, 等. 基于最小数据集的祁连山南坡不同土地利用方式土壤质量评价[J]. 草地学报, 2024, 32(9): 2952-2961.
QIU X X, CAO G C, ZHAO Q L, et al. Assessment of soil quality under different land use practices on the southern slope of Qilian Mountains based on minimum data set [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(9): 2952-2961.
- [17] 程彩云, 薛建辉, 马洁. 基于最小数据集的喀斯特不同类型人工林土壤质量评价[J/OL]. 南京林业大学学报(自然科学版). (2024-05-20) [2024-11-18]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1161.S.20240517.2019.002.html>.
CHENG C Y, XUE J H, MA J. Assessment of different karst plantation types of on soil quality based on a minimum data set[J/OL]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition). (2024-05-20) [2024-11-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1161.S.20240517.2019.002.html>.
- [18] 何金宝, 赵建, 刘洪博, 等. 基于最小数据集的三江平原黑土地土壤质量评价: 以黑龙江宝清县平原区为例[J]. 地质通报, 2024, 43(10): 1841-1854.
HE J B, ZHAO J, LIU H B, et al. Evaluation of black soil quality in Sanjiang Plain based on minimum data set: Taking the plain area of Baoqing County in Hei-

- longjiang Province as an example[J].Geological Bulletin of China,2024,43(10):1841-1854.
- [19] 苟国花,樊军,王茜,等.基于最小数据集的青藏高原南北部不同土地利用方式土壤质量评价[J].应用生态学报,2023,34(5):1360-1366.
- GOU G H, FAN J, WANG X, et al. Soil quality evaluation of different land use patterns on the southern and northern Qinghai-Tibet Plateau based on minimal data set[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2023,34(5):1360-1366.
- [20] 胡尔查,王铮,李梓豪,等.毛乌素沙地不同人工林林下植物多样性及其与土壤理化性质的关系[J].林业科学研究,2024,37(4):174-181.
- HU E C, WANG Z, LI Z H, et al. Understory plant diversity and its relationship with soil physicochemical properties in different plantations in mu us sandy land [J].Forest Research,2024,37(4):174-181.
- [21] 彭素琴,刘郁林,毛璐,等.马尾松补植木荷对土壤微生物生物量碳氮的动态影响[J/OL].广西师范大学学报(自然科学版). (2024-09-13) [2024-11-18]. <https://doi.org/10.16088/j.issn.1001-6600.2024062801>.
- PENG S Q, LIU Y L, MAO R, et al. Dynamic effects of *Pinus massoniana* replanted with broad-leaved trees of *Schima superb* on soil microbial biomass carbon and nitrogen[J/OL]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition). (2024-09-13) [2024-11-18]. <https://doi.org/10.16088/j.issn.1001-6600.2024062801>.
- [22] LI K, LU Y, WANG Q W, et al. Leaf litter mixtures alter decomposition rate, nutrient retention, and bacterial community composition in a temperate forest[J]. Forestry Research,2023,3(1):e22.
- [23] LI Y, LI B, ZHANG X, et al. Differential water and soil conservation capacity and associated processes in four forest ecosystems in Dianchi Watershed, Yunnan Province, China[J].Journal of Soil and Water Conservation,2015,70(3):198-206.
- [24] 彭晓红,丁文荣.滇中高原岩溶区典型植物旱雨季水分来源的差异特征[J].应用与环境生物学报,2023,29(1):204-211.
- PENG X H, DING W R. Different characteristics of water sources of typical plants in dry and rainy seasons in karst area of central Yunnan Plateau [J].Chinese Journal of Applied and Environmental Biology,2023,29(1):204-211.
- [25] DING Y L, NIE Y P, CHEN H S, et al. Water uptake depth is coordinated with leaf water potential, water-use efficiency and drought vulnerability in Karst vegetation[J].New Phytologist,2021,229(3):1339-1353.
- [26] 周跃,张军,骆华松,等.松属、青冈属乔木侧根的长度在防护林固土护坡作用中的意义[J].植物生态学报,2001,25(1):105-109.
- ZHOU Y, ZHANG J, LUO H S, et al. Tensile strength in lateral roots of pinus and cyclobalanopsis and its significance in maintaining slope stability in a shelter-forest system [J].Acta Phytoecologica Sinica,2001,25(1):105-109.
- [27] 马安琪,邓海燕,朱琪,等.桉树—红锥混交林林分生长和土壤肥力分析[J].林业与环境科学,2024,40(3):100-108.
- MA A Q, DENG H Y, ZHU Q, et al. Analysis of stand growth and soil fertility in mixed eucalyptus-*Castanopsis hystrix* plantations[J].Forestry and Environmental Science,2024,40(3):100-108.
- [28] 周世杰,赵筱青,黄佩,等.澜沧县桉树引种对林下植物多样性及生境质量的影响研究[J].云南大学学报(自然科学版),2024,46(2):345-354.
- ZHOU S J, ZHAO X Q, HUANG P, et al. Study on the effects of Eucalyptus introductions on understory plant diversity and habitat quality in Lancang County [J].Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition),2024,46(2):345-354.
- [29] 莫雪青,肖纳,谭许脉,等.固氮树种对桉树人工林土壤团聚体酶活性及其化学计量比的影响[J].广西植物,2022,42(4):569-579.
- MO X Q, XIAO N, TAN X M, et al. Effects of nitrogen-fixing tree species on soil aggregate-associated enzyme activities and coenzymatic stoichiometric ratios in Eucalyptus plantations[J].Guihaia,2022,42(4):569-579.
- [30] 毛健辉,张健朗,霍春宇,等.滴灌施肥对桉树人工林土壤酶活性和细菌群落组成的影响[J].中南林业科技大学学报,2024,44(6):81-91.
- MAO J H, ZHANG J L, HUO C Y, et al. Effects of drip fertilization on soil enzyme activities and bacterial community composition in Eucalyptus artificial forest [J].Journal of Central South University of Forestry and Technology,2024,44(6):81-91.
- [31] TURPIN-JELFS T, MICHAELIDES K, BIEDERMAN J A, et al. Soil nitrogen response to shrub encroachment in a degrading semi-arid grassland[J].Biogeosciences,2019,16(2):369-381.
- [32] 胡林安,邱江梅,李强.云南岩溶断陷盆地植被演替土壤碳氮磷化学计量学特征[J].中国岩溶,2023,42(6):1213-1223.
- HU L A, QIU J M, LI Q. Stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in different stages of vegetation succession at Karst graben basin of Yunnan Province, China[J].Carsologica Sinica,2023,42

- (6):1213-1223.
- [33] CHEN H, ZHANG X P, ABLA M, et al. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2018, 170:141-149.
- [34] 曾铭.滇池流域富磷区不同植物群落的水土保持与质量改善效应[D].昆明:云南大学, 2022.
- ZENG M. Effects of soil and water conservation and quality improvement of different plant communities in phosphorus-rich areas of Dianchi Lake Basin[D]. Kunming: Yunnan University, 2022.
- [35] 王亚萍, 刘庆安, 庞军柱, 等. 秦岭南坡不同林分类型枯落物层和土壤层水文功能综合评价[J]. *西北林学院学报*, 2024, 39(3):50-58.
- WANG Y P, LIU Q A, PANG J Z, et al. Comprehensive evaluation of hydrological function of litter and soil layers in different stand types in the south slope of the Qinling Mountains[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2024, 39(3):50-58.
- [36] 邓继峰, 万龙燕, 侯瑞萍, 等. 辽东山区 5 种林分土壤颗粒分形特征与土壤性质[J]. *东北林业大学学报*, 2024, 52(9):99-108.
- DENG J F, WAN L Y, HOU R P, et al. Soil grain fractal characteristics and soil properties of five forest stand types in the Liaodong Mountains area[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2024, 52(9):99-108.
- [37] 李鹏, 齐实, 张林, 等. 北京山区不同植被恢复类型土壤质量综合评价[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(1):337-346.
- LI P, QI S, ZHANG L, et al. Comprehensive evaluation of soil quality of different vegetation restoration types in mountainous areas of Beijing[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(1):337-346.
- [38] 李笑雨, 白金珂. 青藏高原南部 4 种土地利用方式土壤质量评价[J]. *草业科学*, 2024, 41(7):1614-1623.
- LI X Y, BAI J K. Evaluation of soil quality of different land use types in the southern Tibetan Plateau[J]. *Practical Science*, 2024, 41(7):1614-1623.
- [39] LI X Y, WANG D Y, REN Y X, et al. Soil quality assessment of croplands in the black soil zone of Jilin Province, China: Establishing a minimum data set model[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 107:e105251.
- [40] 胡伟, 刘文辉, 刘凯强, 等. 基于最小数据集土壤质量评价及生物指标的确立[J/OL]. *草地学报*. (2024-04-18) [2024-11-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3362.S.20240417.1610.016.html>.
- HU W, LIU W H, LIU K Q, et al. Evaluation of soil quality and establishment of bio-indicators based on minimal data set[J/OL]. *Acta Agrestia Sinica*. (2024-04-18) [2024-11-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3362.S.20240417.1610.016.html>.
- [41] 杨维, 李慧婷, 季海明. 西宁市南北山主要造林树种的土壤水分特征研究[J]. *林业调查规划*, 2024, 49(3):124-132.
- YANG W, LI H T, JI H M. Soil moisture characteristics of major afforestation tree species in north and south mountains of Xining City[J]. *Forest Inventory and Planning*, 2024, 49(3):124-132.
- [42] NIU X Y, WANG Y H, YANG H, et al. Effect of land use on soil erosion and nutrients in Dianchi Lake watershed, China[J]. *Pedosphere*, 2015, 25(1):103-111.
- [43] DUAN Z Z, WANG M J, LIU Y, et al. Predicting hydrological alterations to quantitative and localized climate change in plateau regions: A case study of the Lake Dianchi Basin, China[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2022, 36(4):969-983.