

DOI:10.12171/j.1000-1522.20210189

塞罕坝华北落叶松纯林和混交林土壤肥力质量评价

常旭¹ 邱新彩¹ 刘欣² 彭道黎¹ 程顺³

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 山西省太原国有林场, 山西 太原 030003; 3. 河北省塞罕坝机械林场, 河北 围场 068466)

摘要:【目的】基于土壤质量指数(SQI), 研究华北落叶松林不同混交方式对土壤肥力质量的影响, 为其合理经营和地力恢复提供理论依据。【方法】该研究以河北省塞罕坝林场华北落叶松纯林(落叶松纯林)、华北落叶松白桦混交林(落桦混交林)和华北落叶松樟子松混交林(落樟混交林)为研究对象, 采集和分析 0~20 cm 土层的土壤进行土壤理化性质、生物性质的调查研究, 利用 SQI 法进行土壤肥力质量评价。建立 SQI 包括 3 个步骤: 采用主成分分析法筛选最小数据集(MDS), 利用非线性得分函数计算 MDS 指标得分, 利用加权求和模型计算 SQI。【结果】不同混交方式间土壤理化和生物性质存在不同程度的差异。与落叶松纯林相比, 落桦混交林的土壤理化和生物性质有了明显改善; 落樟混交林的土壤理化状况较差, 土壤生物性质与落叶松纯林没有明显差异。在 17 个土壤肥力质量指标中, MDS 由土壤微生物生物量氮、全磷、氨氮 3 个指标组成。不同混交方式间 SQI 差异显著, 表现为落桦混交林(0.59) > 落叶松纯林(0.47) > 落樟混交林(0.39)。【结论】土壤肥力质量在不同混交方式下差异显著, 塞罕坝机械林场落叶松白桦混交林有利于改善土壤肥力。利用指数法建立 SQI 进行土壤肥力质量评价, 可为其他树种或其他地区的森林土壤质量评价提供借鉴。

关键词: 华北落叶松; 混交林; 土壤质量指数; 评价

中图分类号: S714.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2021)08-0050-10

引文格式: 常旭, 邱新彩, 刘欣, 等. 塞罕坝华北落叶松纯林和混交林土壤肥力质量评价 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(8): 50-59. Chang Xu, Qiu Xincan, Liu Xin, et al. Soil fertility quality evaluation of pure and mixed *Larix principis-rupprechtii* forests in Saihanba, Hebei Province of northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(8): 50-59.

Soil fertility quality evaluation of pure and mixed *Larix principis-rupprechtii* forests in Saihanba, Hebei Province of northern China

Chang Xu¹ Qiu Xincan¹ Liu Xin² Peng Daoli¹ Cheng Shun³

(1. School of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Taiyuan State-Owned Forest Farm of Shanxi Province, Taiyuan 030003, Shanxi, China;

3. Saihanba Mechanized Forest Farm of Hebei Province, Weichang 068466, Hebei, China)

Abstract: [Objective] In this study, soil quality index (SQI) was used to evaluate the effects of different mixed modes on soil fertility quality in *Larix principis-rupprechtii* forests, in order to provide theoretical basis for proper management and soil fertility recovery. [Method] The pure *Larix principis-rupprechtii* stands (LP), mixed *Larix principis-rupprechtii* and *Betula platyphylla* stands (BL), and mixed *Larix principis-rupprechtii* and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* stands (ML) were selected as the research objects in Saihanba Mechanized Forest Farm of Hebei Province, northern China. The soils of 0-20 cm soil depths were collected and analyzed to investigate the soil physicochemical and biological properties. SQI was used to evaluate soil fertility quality. SQI was determined in three steps by selecting a minimum data set (MDS) through principal component analysis, scoring the MDS indicators using non-linear scoring functions, and

收稿日期: 2021-05-17 修回日期: 2021-06-21

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2016YFD0600205)。

第一作者: 常旭。主要研究方向: 森林资源监测与评价。Email: 837378159@qq.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。

责任作者: 彭道黎, 教授。主要研究方向: 森林资源监测与评价、林业遥感与信息技术、森林经营理论与技术。Email: dlpeng@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

integrating the indicator scores into a SQI using the weighted additive equation. [Result] There were different degrees of differences in soil physicochemical and biological properties among different mixed modes. Compared with LP, the soil physicochemical and biological properties of BL were significantly improved. The soil physicochemical conditions in ML were worse than those in LP. And there were no obvious differences in soil biological properties in ML and LP. The MDS consisted of soil microbial biomass nitrogen, total phosphorus, and ammonia nitrogen among 17 soil fertility quality indicators. There were significant differences in the SQI among three mixed modes, which were showed as: BL (0.59) > LP (0.47) > ML (0.39). [Conclusion] The soil fertility quality differed significantly among varied mixed modes. The mixed *Larix principis-rupprechtii* and *Betula platyphylla* stands in Saihanba Mechanical Forest Farm can improve soil fertility. Soil fertility quality evaluation based on SQI by indexing approach can provide the basis for evaluating forest soil quality of other species and regions.

Key words: *Larix principis-rupprechtii*; mixed forests; soil quality index; evaluation

我国人工林快速发展,目前我国人工林面积居世界首位^[1]。但随着人工林快速的发展,地力衰退问题也日益明显,主要表现在土壤环境变差、养分受阻、肥力下降、林分生产力降低^[2]。在可持续发展背景下,维持土壤肥力、防止土壤退化、评估经营管理措施对土壤性质的影响,显得尤为重要^[3]。人工林的经营多为单一树种的纯林模式,在这种模式的长期经营下,出现了生物多样性减少、生态稳定性差、生产力下降、地力衰退等问题,影响了人工林生态系统的可持续发展^[4]。相关研究表明,营造混交林能有效解决纯林地力衰退的问题^[5]。混交林可以提高群落的生物多样性,促进树木生长和提高林分生产力,改善土壤养分循环和土壤肥力,增强对气候变化的适应性,维持生态系统稳定性^[5-7]。因此,选择适宜的树种营造混交林,对调节林内环境、改善土壤肥力、恢复人工林生态功能有着重要意义。

土壤肥力评价是一种有效结合多种土壤信息进行定量分析和指导土地可持续管理的决策工具^[8]。目前,评价土壤肥力没有统一的量化体系与工具^[9]。选择简单、敏感而具有代表性的评价指标是科学地揭示土壤肥力的前提和关键,林地土壤肥力指标通常由土壤物理指标、化学指标和生物指标组成^[10]。以往研究以土壤理化指标为主,生物指标主要关注酶活性,且生物指标所占比例较小^[11]。而土壤微生物群落结构、微生物生物量等生物指标对土壤变化的反应非常敏感,在研究中发现土壤酶活性是土壤肥力的敏感指标^[12-13],包括蔗糖酶、脲酶、多酚氧化酶、 β -葡萄糖苷酶、酸性磷酸酶和 N-乙酰葡萄糖苷酶等,它们对自然和人为因素引起的土壤的变化非常敏感^[9],应在区域研究中得到重视。近些年,灰色关联法^[14]、层次分析法^[15]、主成分分析法^[16]、GIS 技术结合数学模型^[17]等评价方法应用较多,其中利用指数法建立土壤质量指数(soil quality index, SQI)是最

常用的方法^[18-19]。SQI 法将物理、生化指标组合为一个单独的指数,易于实施且定量灵活,在农业、草原和森林生态土壤质量评价中取得良好效果^[20-21]。李洁等^[22]采用 SQI 法比较冀西北 3 种植被恢复类型(落叶松林、虎榛子灌木、油松林)对改善土壤肥力的作用差异,结果表明落叶松林对改善土壤肥力作用最大。郝宝宝等^[23]测定陕北风沙区 4 种典型植被类型的土壤化学性质,采用 SQI 进行土壤肥力评价,得出 4 种植被类型在土壤改良方面的效果大小。张连金等^[24]采用 SQI 法评价北京九龙山 13 种林分的土壤肥力,结果表明提高有效磷和全氮含量是影响土壤肥力的关键因素。另外, SQI 因研究地区、土地利用方式、土壤功能和植被类型等而异^[10],没有在不同的区域和尺度通用的 SQI^[25]。因此,利用 SQI 评价土壤肥力要有针对性,以便为该区域土壤质量管理提供可靠资料。

华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)在河北省塞罕坝地区的木材生产以及京津冀地区水源涵养和森林生态系统的形成与维护中发挥着重要作用^[26]。目前关于华北落叶松林的研究,多集中在林分的生长和生产力^[27]、群落结构和物种多样性^[28]、凋落物性质^[29]等方面,对于土壤理化性质的研究也有很多^[30],而对华北落叶松林的土壤生物指标如微生物性质和酶活性的关注相对较少。目前,对华北落叶松纯林和混交林进行土壤肥力质量评价的研究相对缺乏,综合土壤理化和生物指标进行评价的研究则更少。本研究在河北省塞罕坝机械林场设置华北落叶松纯林(以下简称落叶松纯林)、华北落叶松白桦混交林(以下简称落桦混交林)、华北落叶松樟子松混交林(以下简称落樟混交林)3 种混交方式的试验样地,测定土壤理化性质、生物性质共 17 个指标,研究不同混交方式对土壤肥力特征的影响,并采用 SQI 法对不同混交方式下的土壤肥力质量进行评价,以期有

针对性地为该区华北落叶松林的合理经营和地力恢复提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于河北省围场县西北部塞罕坝机械林场(42°02′~42°36′N, 116°51′~117°39′E), 是大兴安岭山系、内蒙古高原与冀北山地的交汇地, 属于坝下与坝上的过渡带, 也是森林与草原、半湿润与半干旱地区的交错带, 海拔 1 500~1 940 m。主要土壤类型以棕壤、灰色森林土、风沙土、沼泽土、草甸土、黑土为主。该区域有林地面积为 $7.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 人工林面积达 $5.7 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[31], 主要乔木树种有华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、白桦(*Betula platyphylla*)、云杉(*Picea asperata*)和山杨(*Populus davidiana*)等。

1.2 样地设置

在对塞罕坝机械林场进行全面踏查的基础上, 依据典型性和代表性原则, 在成土环境因子基本一致的林分内, 选择邻近分布, 年龄、海拔、坡向、坡位等立地条件基本相同, 整地抚育、施肥等营林和管理措施也相同, 长势良好的落叶松林设置不同混交方式的标准地, 本研究选取落叶松纯林、落叶松白桦(落桦混交比 6:4)混交林、落叶松樟子松(落樟混交比 6:4)混交林 3 种类型, 林龄为 36 年, 每种类型设置 3 块重复标准地, 共 9 块标准地, 每块标准地面积为 20 m × 30 m。2017 年测量和记录各样地的立地条件等基本特征, 进行每木检尺, 记录乔木的胸径、树高等基本信息, 样地概况见表 1。

1.3 土壤样品采集与分析

选取当年 5 月(春季)、7 月(夏季)、10 月(秋季)和 12 月(冬季)进行土样采集。由于土壤表层是营养元素的富集层, 所以采集 0~20 cm 土层的土壤。在 9 块样地内, 按照 S 型布点法选择 5 个取样点, 用土钻向下挖取 0~20 cm 土层土样。将每一样地 5 个点的土样混合, 去除石块、根系等杂质, 然后用四分

法取 1 kg 左右土样带回实验室, 一部分保存于 4℃ 冰箱用于土壤氨氮、硝氮、微生物和酶活性测定, 另一部分自然风干、过筛, 用于其他理化性质的测定。

根据鲍士旦^[32]的方法测定土壤理化性质: 土壤质量含水率用 105℃ 烘干鲜土至恒质量来进行测定; pH 采用电位法, 将土: 水为 1:2.5 (w/v) 的土壤悬浊液震荡 30 分钟后, 用 pH 计(PB-21, Sartorius, Germany)测定; 土壤有机碳和全氮含量采用元素分析仪(FLASH 2000 CHNS/O, Thermo Scientific, USA)测定; 新鲜土壤样品经过氯化钾浸提后, 使用连续流动分析仪(SEAL AA3, Germany)测定土壤氨氮和硝氮; 全磷采用浓硫酸—高氯酸消煮—钼锑抗比色法测定; 有效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定, 用紫外分光光度计(UV-2600, Shimadzu, Japan)进行比色。

土壤生物性质共测定 9 项指标。采用磷脂脂肪酸(PLFA)法测定土壤微生物群落结构(PLFA 总量(total PLFAs)、细菌(bacteria)、真菌(fungi)和放线菌(actinomycete))。微生物生物量碳(microbial biomass C, MBC)、微生物生物量氮(microbial biomass N, MBN)采用氯仿熏蒸浸提, 并利用 Multi N/C 3100 TOC(总有机碳)分析仪测定^[33]。蔗糖酶(invertase, INV)采用 3,5—二硝基水杨酸比色法, 脲酶(urease, URE)采用苯酚—次氯酸钠比色法, 酸性磷酸酶(acid phosphatase, ACP)活性采用磷酸苯二钠比色法测定^[34]。

1.4 土壤质量指数建立

SQI 建立主要包括 3 个步骤: (1)选择合适指标构建最小数据集(MDS), (2)计算 MDS 指标得分并确定指标权重, (3)将指标得分组合成 SQI。

1.4.1 筛选 MDS

利用主成分分析法筛选 MDS, 选择特征值大于 1 的主成分, 对选定主成分进行方差最大旋转以增强不相关成分的可解释性^[35]。在每个选取的主成分中, 选取因子载荷绝对值在最大因子载荷 10% 范围内的指标为高因子载荷指标^[36]。当一个主成分内只留有一个高因子载荷指标时, 则该指标进入 MDS;

表 1 样地基本特征

Tab. 1 Basic information for the sample plots

混交方式 Mixing mode	坡度 Slope degree/(°)	坡向 Slope aspect	海拔 Elevation/m	株数密度/(株·hm ⁻²) Plant density/ (tree·ha ⁻¹)	郁闭度 Canopy density	平均胸径 Average DBH/cm	平均树高 Average tree height/m
落叶松纯林 Pure <i>Larix principis-rupprechtii</i> forest	9	西北, 西, 西南 Northwest, west, southwest	1 598	1 195	0.77	20.28	15.88
落桦混交林 Mixed <i>Larix principis-rupprechtii</i> and <i>Betula platyphylla</i> forest	12	西北, 西 Northwest, west	1 588	1 289	0.73	18.20	14.90
落樟混交林 Mixed <i>Larix principis-rupprechtii</i> and <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> forest	11	西北, 西南 Northwest, southwest	1 589	1 328	0.83	19.08	15.32

当一个主成分内留有不只一个高因子载荷指标时, 进行相关性分析, 若相关系数 $r < 0.7$, 各指标均入选 MDS; 若相关性 $r > 0.7$, 相关系数之和最大的高因子载荷指标入选 MDS^[35]。

1.4.2 计算指标得分和指标权重

由主成分分析获取 MDS 指标的权重值, 指标所属主成分的方差贡献率占特征值大于 1 的主成分的累积方差贡献率的比值即为权重值^[37]。根据各指标对土壤质量的正负效应, 将 MDS 指标分为“越多越好”和“越少越好”两种类型^[36], 然后对其进行标准化使其转换成 0~1 的无量纲值。本研究使用非线性得分函数进行标准化得到指标得分。非线性得分函数如式(1):

$$S_{ni} = a / (1 + (x/x_0)^b) \quad (1)$$

式中: S_{ni} 代表指标的非线性得分; a 为得分最大值, 本文中 $a = 1$; x 是指标的值, x_0 是每个指标的平均值; b 是等式斜率, 对“越多越好”指标, $b = -2.5$, 对“越少越好”指标, $b = 2.5$ ^[36-37]。

1.4.3 计算 SQI

利用加权求和模型计算 SQI, 公式如式(2):

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i S_i \quad (2)$$

式中: W_i 是指标的权重值; S_i 是指标得分; n 为 MDS 的指标个数。

1.5 数据分析

使用 Excel 2016 进行数据整理。运用单因素方差分析和 Tukey's 差异显著性检验($P < 0.05$)以了解各变量在 3 种混交方式间是否存在显著性差异, 利用主成分分析和 Pearson 相关分析以筛选 MDS, 用 SPSS 19.0 完成方差分析、主成分分析。利用 Origin 8.5 软件完成作图。

2 结果与分析

2.1 华北落叶松纯林和混交林中土壤肥力质量指标变化

2.1.1 土壤理化性质变化

由表 2 可知, 土壤理化性质在不同混交方式间存在不同程度的差异。落桦混交林中的土壤质量含水率和有效磷含量显著高于落樟混交林, pH 则显著低于落樟混交林($P < 0.05$)。土壤有机碳和全磷含量在不同混交方式间表现出显著差异($P < 0.05$), 变化趋势均为落桦混交林 > 落叶松纯林 > 落樟混交林, 落桦混交林的有机碳含量分别比落叶松纯林和落樟混交林高 17.76% 和 39.01%, 全磷含量在落桦混交林中分别比落叶松纯林和落樟混交林高 22.58% 和 46.15%。全氮含量在落桦混交林中分别是落叶松纯林和落樟混交林的 1.41 和 1.78 倍。土壤氨氮含量的变化范围为 9.51~12.44 mg/kg, 在 3 种混交方式间无显著差异($P > 0.05$)。土壤硝氮含量在落桦混交林(2.90 mg/kg)中最高, 比落叶松纯林高 31.82%, 比落樟混交林高 65.71%。

2.1.2 土壤生物性质变化

表 3 为华北落叶松纯林和混交林的土壤生物性质变化, 混交方式对土壤生物性质均有显著影响($P < 0.05$)。落桦混交林的 PLFA 总量显著高于落叶松纯林和落樟混交林($P < 0.05$)。土壤细菌、真菌和放线菌含量均在落桦混交林中观测到最大值, 比在落叶松纯林中分别增加 47.64%、35.16% 和 49.60%, 比在落樟混交林中分别提高 66.67%、44.28% 和 71.30%。落桦混交林中土壤微生物量碳含量(372.28 mg/kg)最高, 是落叶松纯林的 1.11 倍, 是落樟混交林的 1.18 倍。落桦混交林的土壤微生物量氮含量显著高于落叶松纯林 24.14%($P < 0.05$)。土壤蔗糖酶、脲酶

表 2 落叶松纯林和混交林中土壤理化性质变化

Tab. 2 Changes of soil physicochemical properties in pure and mixed *Larix principis-rupprechtii* forests

指标 Indicator	落叶松纯林 Pure <i>Larix principis-rupprechtii</i> forest	落桦混交林 Mixed <i>Larix principis-rupprechtii</i> and <i>Betula platyphylla</i> stand	落樟混交林 Mixed <i>Larix principis-rupprechtii</i> and <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> forest
质量含水率 Mass moisture content/%	16.06 ± 0.91ab	17.96 ± 0.93a	14.45 ± 0.56b
pH	6.34 ± 0.05ab	6.24 ± 0.03b	6.39 ± 0.04a
有机碳 Organic C/(g·kg ⁻¹)	29.17 ± 1.27b	34.35 ± 1.84a	24.71 ± 1.35c
全氮 Total N/(g·kg ⁻¹)	1.97 ± 0.12b	2.77 ± 0.26a	1.56 ± 0.12b
全磷 Total P/(g·kg ⁻¹)	0.31 ± 0.01b	0.38 ± 0.01a	0.26 ± 0.01c
氨氮 Ammonia N/(mg·kg ⁻¹)	10.26 ± 1.09a	12.44 ± 1.11a	9.51 ± 0.90a
硝氮 Nitrate N/(mg·kg ⁻¹)	2.20 ± 0.25b	2.90 ± 0.27a	1.75 ± 0.17b
有效磷 Available P/(mg·kg ⁻¹)	2.91 ± 0.11ab	3.37 ± 0.21a	2.81 ± 0.20b

注: 不同小写字母表示不同混交方式间差异显著($P < 0.05$), 数值为平均值 ± 标准误。下同。Notes: different lowercase letters mean significant differences among varied mixed modes at $P < 0.05$ level. Values are mean ± standard error. The same below.

表 3 落叶松纯林和混交林中土壤生物性质变化

Tab. 3 Changes of soil biological properties in pure and mixed <i>Larix principis-rupprechtii</i> forests			
指标 Indicator	落叶松纯林 Pure <i>Larix principis-rupprechtii</i> stand	落桦混交林 Mixed <i>Larix principis-rupprechtii</i> and <i>Betula platyphylla</i> forest	落樟混交林 Mixed <i>Larix principis-rupprechtii</i> and <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> forest
PLFA总量 Total PLFAs/(nmol·g ⁻¹)	36.38 ± 1.38b	51.66 ± 3.34a	32.52 ± 1.67b
细菌 Bacteria/(nmol·g ⁻¹)	20.32 ± 0.78b	30.00 ± 2.05a	18.00 ± 0.98b
真菌 Fungi/(nmol·g ⁻¹)	3.64 ± 0.11b	4.92 ± 0.30a	3.41 ± 0.16b
放线菌 Actinomycete/(nmol·g ⁻¹)	3.79 ± 0.19b	5.67 ± 0.49a	3.31 ± 0.18b
微生物生物量碳 Microbial biomass C/(mg·kg ⁻¹)	334.55 ± 12.77ab	372.28 ± 16.46a	316.13 ± 9.98b
微生物生物量氮 Microbial biomass N/(mg·kg ⁻¹)	42.63 ± 2.24b	52.92 ± 3.18a	38.31 ± 2.16b
蔗糖酶 Invertase/(mg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	49.01 ± 2.20ab	56.66 ± 3.66a	44.62 ± 3.87b
脲酶 Urease/(mg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	0.23 ± 0.01b	0.36 ± 0.03a	0.21 ± 0.01b
酸性磷酸酶 Acid phosphatase/(nmol·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	774.82 ± 76.25b	1 064.93 ± 105.86a	721.65 ± 56.77b

和酸性磷酸酶活性在落桦混交林中显著高于落叶松纯林和落樟混交林($P < 0.05$)。

2.2 华北落叶松纯林和混交林土壤质量指数 (SQI)

2.2.1 最小数据集 (MDS) 指标

选取 17 项土壤肥力质量指标进行主成分分析,

结果表明前 3 个主成分的特征值大于 1, 累积贡献率达到 90%, 可提取主成解释释绝大多数变异(表 4)。选定主成分的载荷矩阵进行方差最大旋转后, 第一主成分的高因子载荷指标为硝氮、微生物生物量碳、微生物生物量氮、蔗糖酶、酸性磷酸酶 5 个(表 4),

表 4 主成分因子旋转载荷矩阵、特征值与方差贡献率

Tab. 4 Rotated factor loading matrix, eigenvalue and variance explained of principal component analysis			
指标 Indicator	主成分 Principal component		
	1	2	3
质量含水率 Mass moisture content	0.794	0.368	-0.011
pH	-0.087	-0.234	-0.946
有机碳 Organic C	0.785	0.446	0.337
全氮 Total N	0.800	0.493	0.275
全磷 Total P	0.067	0.895	0.171
氨氮 Ammonia N	0.813	-0.021	0.463
硝氮 Nitrate N	0.888	0.292	-0.094
有效磷 Available P	0.813	0.285	0.246
PLFA总量 Total PLFAs	0.739	0.588	0.244
细菌 Bacteria	0.726	0.601	0.253
真菌 Fungi	0.617	0.682	0.135
放线菌 Actinomycete	0.736	0.561	0.194
微生物生物量碳 Microbial biomass C	0.909	0.349	-0.057
微生物生物量氮 Microbial biomass N	0.875	0.433	0.08
蔗糖酶 Invertase	0.927	0.158	0.118
脲酶 Urease	0.545	0.749	0.075
酸性磷酸酶 Acid phosphatase	0.875	0.301	0.265
特征值 Eigenvalue	9.524	4.075	1.676
方差贡献率 Variance contribution rate/%	56.025	23.973	9.860
累积方差贡献率 Cumulative variance contribution rate/%	56.025	79.998	89.858

注: 粗体的因子载荷表示高因子载荷, 粗体并加下划线的因子载荷对应入选最小数据集的指标。Notes: boldface factor loadings are considered highly weighted. Boldface and underlined loading values correspond to the indicators included in the MDS.

其中微生物生物量氮与其他 4 个指标的相关系数均大于 0.7(表 4), 且微生物生物量氮与其他 4 个指标的相关系数绝对值之和最大(表 5), 所以微生物生物量氮入选 MDS; 而第二主成分只有全磷 1 个高因子

载荷指标, 则入选 MDS; 同上, 第三主成分只有氨氮 1 个高因子载荷指标, 也入选 MDS。因此华北落叶松纯林和混交林中土壤肥力质量评价的 MDS 由土壤微生物生物量氮、全磷和氨氮 3 个指标组成。

表 5 高因子载荷指标间的相关性

Tab. 5 Correlation coefficients for highly weighed variables

土壤指标 Soil indicator	硝氮 Nitrate N	微生物生物量碳 Microbial biomass C	微生物生物量氮 Microbial biomass N	蔗糖酶 Invertase	酸性磷酸酶 Acid phosphatase
硝氮 Nitrate N	1.000	0.909	0.912	0.886	0.820
微生物生物量碳 Microbial biomass C	0.909	1.000	0.947	0.894	0.900
微生物生物量氮 Microbial biomass N	0.912	0.947	1.000	0.880	0.930
蔗糖酶 Invertase	0.886	0.894	0.880	1.000	0.854
酸性磷酸酶 Acid phosphatase	0.820	0.900	0.930	0.854	1.000

2.2.2 指标得分与权重

计算 MDS 指标对应主成分的方差贡献率占特征值大于 1 主成分的累积方差贡献率的比值, 得到土壤微生物生物量氮、全磷、氨氮的权重值分别为 0.623、0.267、0.110。土壤微生物生物量氮、全磷和氨氮均对土壤质量发挥正效应, 属于“越多越好”指标。本文使用非线性得分函数对 MDS 指标进行标准化, 得到 3 个指标的得分值(图 1)。土壤微生物生物量氮得分在落桦混交林(0.42 ~ 0.74)中最高, 比落叶松纯林显著高 15.63% ~ 35.48%, 比落樟混交林显著高 29.82% ~ 55.56%($P < 0.05$, 图 1a)。在春季, 土壤全磷得分在落叶松纯林和落桦混交林中显著高于落樟混交林($P < 0.05$); 在夏季、秋季和冬季, 全磷得分均在落桦混交林(0.56 ~ 0.69)中最高, 是落叶松纯林的 1 ~ 1.53 倍, 是落樟混交林的 1.14 ~ 2.56 倍(图 1b)。在春季、夏季和冬季, 土壤氨氮得分在落桦混交林中显著高于落叶松纯林和落樟混交林; 在秋季, 其在落叶松纯林和落桦混交林中显著高于落樟混交林($P < 0.05$, 图 1c)。

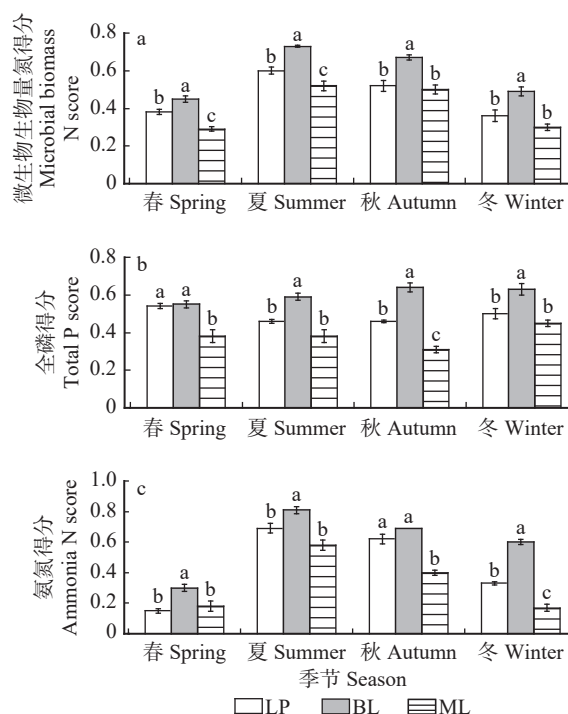
2.2.3 土壤质量指数

最终, 华北落叶松纯林和混交林土壤肥力评价的土壤质量指数(SQI)可描述如下:

$$SQI = 0.623 \times S_{MBN} + 0.267 \times S_{STP} + 0.110 \times S_{NH_3-N} \quad (3)$$

式中: S_{MBN} 、 S_{STP} 、 S_{NH_3-N} 分别为微生物生物量氮、全磷、氨氮的指标得分。

SQI 在春季、夏季、秋季和冬季的变化范围分别为 0.27 ~ 0.72、0.45 ~ 0.72、0.40 ~ 0.69、0.31 ~ 0.58, 在不同混交方式间表现出显著差异($P < 0.05$, 图 2)。在 4 个季节中, 3 种混交方式间 SQI 的变化趋势均为落桦混交林 > 落叶松纯林 > 落樟混交林, 落桦混交林的 SQI(0.45 ~ 0.72)分别比落叶松纯林和落樟混交林高 20.00% ~ 25.00% 和 33.33% ~ 66.67%。



不同小写字母表示不同混交方式间差异显著 ($P < 0.05$), LP, 落叶松纯林; BL, 落桦混交林; ML, 落樟混交林。下同。Different lowercase letters indicate significant differences among varied mixed modes at $P < 0.05$ level. LP, pure *Larix principis-rupprechtii* forest; BL, mixed *Larix principis-rupprechtii* and *Betula platyphylla* forest; ML, mixed *Larix principis-rupprechtii* and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest. The same below.

图 1 最小数据集指标 (MDS) 的得分值

Fig. 1 Scores of minimum data set indicators

3 讨 论

3.1 混交方式对土壤理化和生物性质的影响

本文选取 17 项土壤肥力质量指标, 不仅包括学者推荐的土壤物理性质、养分含量、pH 等理化性质指标^[10], 还根据试验地所在区域, 加入土壤微生物群落结构、微生物生物量碳氮和酶活性作为生物指

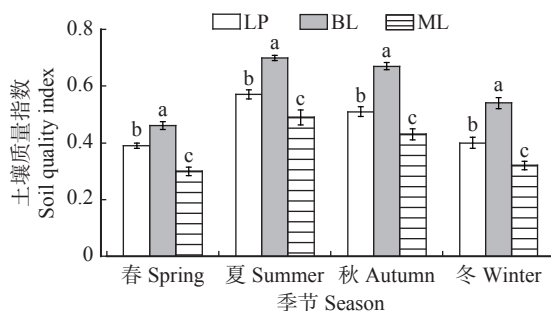


图2 华北落叶松纯林和混交林中土壤质量指数 (SQI) 变化

Fig. 2 Changes of soil quality index in pure and mixed *Larix principis-rupprechtii* forest

标。近些年,土壤理化指标因其分析方法简单可行,在土壤肥力质量评价中被广泛使用^[16]。土壤生物指标能反映出土壤生态系统健康状况,且对土壤质量变化敏感,在土壤质量评价中越发受到重视^[9]。

土壤水分是森林土壤的重要组成部分,参与土壤中物质的转化过程,是土壤肥力的重要因素^[30]。落桦混交林的土壤质量含水率高于落叶松纯林(表2),与陈立新等^[2]的研究结果基本一致。落樟混交林的土壤质量含水率低于落叶松纯林(表2),可能是因为落樟混交林的郁闭度高(表1),林内透光率低,枯枝落叶层樟子松叶片的保水效果差,且樟子松根系吸水能力强。土壤 pH 是土壤酸碱性的最直接反映,不但影响土壤微生物的种群和活性,而且与土壤中养分的形成、转化和有效性密切相关^[16]。秦娟等^[38]研究发现针阔混交林(马尾松麻栎混交林和马尾松枫香混交林)的土壤 pH 高于针叶纯林(马尾松纯林)。与秦娟不一致,本文中 pH 大小表现为落桦混交林 < 落叶松纯林 < 落樟混交林(表2),这说明了营造落桦混交林能在一定程度上提高土壤酸性。而土壤酸性的增加意味着土壤肥力的提高,有利于森林的更新^[39]。土壤有机碳是土壤养分转化的核心,影响着土壤肥力的保持与提高,是判定土壤肥力质量的重要指标之一^[40]。土壤养分状况是决定植物生长和生态系统生产力的关键因素,是土壤肥力的核心指标^[16]。落桦混交林的土壤有机碳和养分含量整体上高于落叶松纯林(表2),这与丛高^[40]的研究一致。落桦混交林的郁闭度低(表1),林下光照充足,植被长势良好,改变了凋落物组成,土壤动物的种类和数量也更加丰富^[26],因此凋落物分解速率加快,有利于土壤有机碳和养分的循环和积累。落樟混交林土壤有机碳和养分含量整体上低于落叶松纯林(表2),说明研究区域的落樟混交林不利于土壤有机碳和养分的循环,与牛庆花等^[41]研究结果相反,这可能与落樟混交林中郁闭度高和凋落物分解慢有关^[29]。

在3种混交方式中,落桦混交林的土壤微生物

PLFA 和微生物生物量碳氮高于落叶松纯林和落樟混交林(表3),与陈立新等^[42]的研究结果类似。落桦混交林中,郁闭度低,改善了林地环境条件和土壤环境条件,可以促进微生物生长繁殖和代谢活动^[42]。另外,白桦的加入改变了凋落物组成,加快凋落物分解,为微生物提供了丰富的营养物质^[29]。落樟混交林和落叶松纯林的土壤细菌、真菌和放线菌数量无显著差异(表3),这与邹莉等^[43]的研究结果不一致,原因可能是试验区落樟混交林的土壤环境和凋落物状况未得到改善。落桦混交林的土壤蔗糖酶、脲酶和酸性磷酸酶活性均高于落叶松纯林和落樟混交林(表3),说明落桦混交林能提高土壤酶的分泌。相关研究表明,较高的林下植被盖度及多样性和凋落物分解速率通常有利于土壤酶活性的增强,是因为它们会改善土壤湿度、温度、pH、通风等土壤环境条件,还能影响养分利用率和微生物养分需求^[44]。另外,土壤水分、pH 等环境因子的改善(表2)可以促进土壤酶的分泌。

3.2 华北落叶松纯林和混交林土壤质量指数 (SQI)

从17个土壤质量指标中,选出土壤微生物生物量氮、全磷和氨氮构成 MDS。土壤微生物生物量氮是土壤有机氮中最活跃的组分^[45]。全磷是衡量土壤中各种形态磷总和的一个指标^[30]。土壤氨氮在一定程度上反应土壤的养分供给状况^[45]。这3项指标与其他未选入 MDS 的指标间存在不同程度的相关性,包含了土壤理化和生物学指标。通过结构方程模型 (SEM) 可以分析这些理化和生物指标与土壤肥力质量的关系。结构方程模型因其数学严谨性、推理能力、描述变量之间复杂关系的灵活性以及生态因子之间网络的直观表示^[46],而越来越多地应用于科学研究中^[47-49]。由于本文数据量有限,尚不能进行扫描电镜分析。扫描电镜适用于大样本的统计分析。Kline^[50]发现,在 SEM 分析中,如果样本数小于 100,参数估计结果是不可靠的。在未来的研究中会收集更多样本,以便更好地了解土壤理化和生物性质的变化对塞罕坝地区土壤肥力质量的影响,这也为下一步的研究指明方向。MDS 在土壤质量评价中被广泛接受和使用,其可以充分代表总数据集,并能减少数据冗余、降低时间和成本^[51]。在加权求和质量指数模型中,权重被应用于关键土壤指标,并独立确定每个土壤指标的得分^[52]。本研究中,加权求和质量指数模型提高了土壤微生物生物量氮的权重,并降低了土壤全磷和氨氮的权重,从而改善了加权求和指数的辨别力,并突出了微生物生物量氮的重要性。SQI 法可以为评估森林土壤肥力质量提供一种实用的定量工具,并为其他树种或其他地区提供参考。

本研究发现3种混交方式间的SQI差异显著,其变化趋势为落桦混交林>落叶松纯林>落樟混交林(图2),表明华北落叶松与阔叶树的混交能显著提高土壤肥力,而与常绿针叶树的混交降低了土壤肥力。与本研究结果类似,杨晓娟等^[16]研究发现在东北过伐林区针阔混交林的土壤肥力质量高于落叶松纯林。在山西太岳山不同林型土壤肥力评价中,邵森^[53]研究发现油松落叶松混交林的SQI优于落叶松纯林和油松纯林,原因是凋落物的周转速度快于纯林,与本文结果不同。华北落叶松与白桦混交,增加了林下植被多样性和地上生物量,枯枝落叶层较松软,凋落物分解速率加快^[54],这会使SQI有所提高。选择种间关系协调的树种对混交林营造成功与否至关重要。从维持土壤肥力角度衡量,本研究表明研究区域的华北落叶松宜与白桦混交而不宜与樟子松混交。从化感物质影响凋落物分解速率及养分释放的角度出发,谢博^[55]研究发现落叶松适宜与红桦、灰楸和杜仲混交,而不宜与太白杨混交。从凋落叶混合分解速率的角度考虑,黄土高原落叶松宜与白榆、白桦和辽东栎混交,而不宜与刺槐混交^[56]。

4 结 论

本研究采用指数法建立SQI,对河北省塞罕坝机械林场华北落叶松纯林和混交林进行土壤肥力质量评价。混交方式对17项土壤肥力质量指标存在不同程度的影响,与落叶松纯林相比,落桦混交林的土壤理化和生物性质有了明显改善,落樟混交林的土壤理化状况较差,土壤生物性质没有明显差异。本文筛选出土壤微生物生物量氮、全磷和氨氮构成MDS。不同混交方式间的土壤肥力质量差异显著,落桦混交林有利于提高土壤肥力。本文采用SQI法进行土壤肥力质量评价,可为其他树种或其他地区的土壤质量评价提供借鉴。

参 考 文 献

- [1] 国家林业和草原局. 中国森林资源报告[M]. 北京: 中国林业出版社, 2019.
National Forestry and Grassland Administration. Chinese forest resources report[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2019.
- [2] 陈立新, 陈祥伟, 段文标. 落叶松人工林凋落物与土壤肥力变化的研究[J]. 应用生态学报, 1998, 9(6): 581-586.
Chen L X, Chen X W, Duan W B. Larch litter and soil fertility[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1998, 9(6): 581-586.
- [3] Bone J, Barraclough D, Eggleton P, et al. Prioritising soil quality assessment through the screening of sites: the use of publicly collected data[J]. Land Degrad Develop, 2014, 25(3): 251-266.
- [4] 闫德仁, 刘永军, 张幼军. 落叶松人工林土壤养分动态[J]. 东北林业大学学报, 2003, 31(3): 16-18.
- Yan D R, Liu Y J, Zhang Y J. Dynamic of soil nutrients under larch plantation[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2003, 31(3): 16-18.
- [5] 程旭, 吴彦强, 刘广营, 等. 迹地更新营造白桦、落叶松混交林试验[J]. 河北林业科技, 2005(2): 12-22.
Cheng X, Wu Y Q, Liu G Y, et al. Experiment on renewal of site to build mixed birch and larch forest[J]. The Journal of Hebei Forestry Science and Technology, 2005(2): 12-22.
- [6] 刘世荣, 李春阳. 落叶松人工林养分循环过程与潜在地力衰退趋势的研究[J]. 东北林业大学学报, 1993, 21(2): 19-24.
Liu S R, Li C Y. Nutrient cycling and stability of soil fertility in larch plantation in the eastern part of northern China[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1993, 21(2): 19-24.
- [7] 范辉华. 杉木、拟赤杨混交对杉木持续生长的影响[J]. 林业科学研究, 2001, 14(4): 455-458.
Fan H H. Influence of mixture with *Alniphyllum fortunei* on sustainable growth of Chinese fir[J]. Forest Research, 2001, 14(4): 455-458.
- [8] Nakajima T, Lal R, Jiang S. Soil quality index of a crosby silt loam in central Ohio[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 146(part B): 323-328.
- [9] Qiu X C, Peng D L, Wang H B, et al. Minimum data set for evaluation of stand density effects on soil quality in *Larix principis-rupprechtii* plantations in North China[J/OL]. Ecological Indicators, 2019, 103: 236-247 [2021-01-02]. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.04.010>.
- [10] 骆东奇, 白洁, 谢德体. 论土壤肥力评价指标和方法[J]. 土壤与环境, 2002, 11(2): 202-205.
Luo D Q, Bai J, Xie D T. Research on evaluation norm and method of soil fertility[J]. Soil and Environmental Sciences, 2002, 11(2): 202-205.
- [11] Raiesi F. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions[J/OL]. Ecological Indicators, 2017, 75: 307-320 [2020-12-29]. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.049>.
- [12] Guo L L, Sun Z G, Zhu O Y, et al. A comparison of soil quality evaluation methods for Fluvisol along the lower Yellow River[J/OL]. Catena, 2017, 152: 135-143 [2020-12-20]. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.015>.
- [13] Dose H L, Fortuna A, Cihacek L J, et al. Biological indicators provide short term soil health assessment during sodic soil reclamation[J/OL]. Ecological Indicators, 2015, 58: 244-253 [2020-12-01]. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.05.059>.
- [14] 覃其云, 曹继钊, 李军, 等. 马尾松人工幼林土壤肥力变化及其综合评价研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(3): 64-69.
Qin Q Y, Cao J Z, Li J, et al. Comprehensive evaluation on soil fertility variations in *Pinus massoniana* young plantation[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013, 33(3): 64-69.
- [15] 孙宇, 李际平, 曹小玉, 等. 不同龄组杉木生态公益林土壤肥力综合评价[J]. 林业资源管理, 2019(1): 57-62.
Sun Y, Li J P, Cao X Y, et al. Comprehensive evaluation of soil

- fertility of *Cunninghamia lanceolata* ecological public welfare forests in different age groups[J]. Forest Resources Management, 2019(1): 57–62.
- [16] 杨晓娟, 王海燕, 刘玲, 等. 东北过伐林区不同林分类型土壤肥力质量评价研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1553–1560.
- Yang X J, Wang H Y, Liu L, et al. Evaluation of soil fertility quality under different forest stands in over-logged forest region, northeast China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(9): 1553–1560.
- [17] 岳西杰, 葛玺祖, 王旭东. 基于 GIS 的黄土丘陵沟壑区土壤质量评价研究: 以陕西省长武县为例[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(3): 144–149.
- Yue X J, Ge X Z, Wang X D. GIS-based research on soil quality evaluation in the loess hilly gully region: a case study of Changwu County[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(3): 144–149.
- [18] Qi Y B, Darilek J L, Huang B, et al. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China[J]. *Geoderma*, 2009, 149(3–4): 325–334.
- [19] Cheng J J, Ding C F, Li X G, et al. Soil quality evaluation for navel orange production systems in central subtropical China[J/OL]. Soil and Tillage Research, 2016, 155: 225–232 [2019–12–01]. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.08.015>.
- [20] 乔云发, 钟鑫, 苗淑杰, 等. 基于最小数据集的东北风沙土农田耕层土壤质量评价指标[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 132–138.
- Qiao Y F, Zhong X, Miao S J, et al. Evaluation indicators of soil quality in plough layer of aeolian sandy land in Northeast China based on minimum data set[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(4): 132–138.
- [21] 郭剑波, 赵国强, 贾书刚, 等. 施肥对高寒草原草地质量指数及土壤性质影响的综合评价[J]. 草业学报, 2020, 29(9): 85–93.
- Guo J B, Zhao G Q, Jia S G, et al. Comprehensive evaluation of effects of fertilization on grassland quality index and soil properties in alpine steppe[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(9): 85–93.
- [22] 李洁, 滑磊, 任启文, 等. 冀西北 3 种植被恢复类型土壤理化性质差异及肥力评价[J]. 生态环境学报, 2020, 29(8): 1540–1546.
- Li J, Hua L, Ren Q W, et al. Physicochemical properties difference and fertility evaluation of soil within three types vegetation restoration in northwest Hebei[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(8): 1540–1546.
- [23] 郝宝宝, 艾宁, 刘广全, 等. 陕北风沙区不同植被类型土壤养分特征与肥力评价[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2020, 49(5): 678–682.
- Hao B B, Ai N, Liu G Q, et al. Soil nutrient characteristics and fertility evaluation of different vegetation types in aeolian sand region of northern Shaanxi[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2020, 49(5): 678–682.
- [24] 张连金, 赖光辉, 孙长忠, 等. 北京九龙山不同林分土壤肥力诊断与综合评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(1): 1–6.
- Zhang L J, Lai G H, Sun C Z, et al. Diagnosis and comprehensive evaluation on soil fertility of different stands in Beijing Jiulong Mountain[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37(1): 1–6.
- [25] Imaz M J, Virto I, Bescansa P, et al. Soil quality indicator response to tillage and residue management on semi-arid Mediterranean cropland[J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 107(1): 17–25.
- [26] 扈梦梅, 田龙, 吴亚楠, 等. 塞罕坝华北落叶松人工林间伐和混交改造对大型土壤动物群落结构的影响[J]. 林业科学, 2019, 55(11): 153–162.
- Hu M M, Tian L, Wu Y N, et al. Influences of thinning and mixed transformation of *Larix principis-rupprechtii* plantations on the community structure of soil macro faunal in Saihanba Area[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(11): 153–162.
- [27] 李文博, 吕振刚, 黄选瑞, 等. 塞罕坝华北落叶松人工林生产力及其空间分布预测[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(7): 1365–1375.
- Li W B, Lü Z G, Huang X R, et al. Predicting productivity and spatial distribution of *Larix principis-rupprechtii* plantation[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(7): 1365–1375.
- [28] 方文静, 蔡琼, 朱江玲, 等. 华北地区落叶松林的分布、群落结构和物种多样性[J]. *植物生态学报*, 2019, 43(9): 742–752.
- Fang W J, Cai Q, Zhu J L, et al. Distribution, community structures and species diversity of larch forests in North China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, 43(9): 742–752.
- [29] 刘欣. 华北落叶松不同林型凋落物对土壤性质影响的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- Liu X. Study on the effects of different forest type litters about *Larix principis-rupprechtii* on the soil properties[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [30] 刘欣, 彭道黎, 邱新彩. 华北落叶松不同林型土壤理化性质差异[J]. *应用与环境生物学报*, 2018, 24(4): 735–743.
- Liu X, Peng D L, Qiu X C. Differences in soil physicochemical properties between different forest types of *Larix principis-rupprechtii*[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2018, 24(4): 735–743.
- [31] 张宇辰, 彭道黎. 间伐对塞罕坝华北落叶松人工林土壤活性有机碳的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2020, 26(4): 961–968.
- Zhang Y C, Peng D L. Effects of thinning on the soil active organic carbon of *Larix principis-rupprechtii* plantations in Saihanba[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2020, 26(4): 961–968.
- [32] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [33] 吴然, 康峰峰, 韩海荣, 等. 山西太岳山不同林龄华北落叶松林土壤微生物特性[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(12): 3183–3190.
- Wu R, Kang F F, Han H R, et al. Soil microbial properties in *Larix principis-rupprechtii* plantations of different ages in Mt. Taiyue, Shanxi, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(12): 3183–3190.
- [34] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1983.
- Guan S Y. Soil enzyme and its research method[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1983.
- [35] Li P, Zhang T, Wang X, et al. Development of biological soil quality indicator system for subtropical China[J/OL]. Soil & Tillage Research, 2013, 126: 112–118 [2020–12–12]. <http://>

- [dx.doi.org/10.1016/j.still.2012.07.011](https://doi.org/10.1016/j.still.2012.07.011).
- [36] Shao G D, Ai J J, Sun Q W, et al. Soil quality assessment under different forest types in the Mount Tai, central Eastern China[J/OL]. *Ecological Indicators*, 2020, 115: 106439 [2020-12-12]. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106439>.
- [37] Askari M S, Holden N M. Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management[J/OL]. *Geoderma*, 2014, 230-231: 131-142 [2020-12-12]. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.019>.
- [38] 秦娟, 唐心红, 杨雪梅. 马尾松不同林型对土壤理化性质的影响[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(4): 598-604.
Qin J, Tang X H, Yang X M. Effects of soil physical and chemical properties on different forest types of *Pinus massoniana*[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(4): 598-604.
- [39] 谷会岩, 金靖博, 陈祥伟, 等. 采伐干扰对大兴安岭北坡兴安落叶松林土壤化学性质的影响[J]. *土壤通报*, 2009, 40(2): 272-275.
Gu H Y, Jin J B, Chen X W, et al. Effects of logging disturbance on soil chemical properties of *Larix gmelini* forests in the northern slope on Greater Hinggan Mountains[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(2): 272-275.
- [40] 丛高, 张志丹, 张晋京, 等. 长白山不同林型土壤有机碳特征[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(3): 179-184.
Cong G, Zhang Z D, Zhang J J, et al. Research on characteristics of soil organic carbon in different forest types in Changbai Mountain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(3): 179-184.
- [41] 牛庆花, 郭宇嘉, 任子蓓, 等. 坝上地区典型防护林土壤改良效益[J]. *东北林业大学学报*, 2019, 47(9): 63-70.
Niu Q H, Guo Y J, Ren Z B, et al. Improvement benefits on soil of typical shelterbelt stands in Bashang Area[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2019, 47(9): 63-70.
- [42] 陈立新, 陈祥伟, 史桂香, 等. 提高落叶松人工林林地质量的研究[J]. *东北林业大学学报*, 1998, 26(3): 6-11.
Chen L X, Chen X W, Shi G X, et al. Study on improving the quality of forest land of larch plantations[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 1998, 26(3): 6-11.
- [43] 邹莉, 唐庆明, 王轶. 落叶松、樟子松纯林及混交林土壤微生物的群落分布特征[J]. *东北林业大学学报*, 2010, 38(11): 63-64.
Zou L, Tang Q M, Wang Y. Ecological distribution of soil microorganism in pure and mixed forests of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Larix gmelini*[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2010, 38(11): 63-64.
- [44] Zhang W, Xu Y D, Gao D X, et al. Ecoenzymatic stoichiometry and nutrient dynamics along a revegetation chronosequence in the soils of abandoned land and *Robinia pseudoacacia* plantation on the Loess Plateau, China[J/OL]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 134: 1-14 [2020-12-01]. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.03.017>.
- [45] 林达, Dao Ngoc Chuong, 洪森先, 等. 间伐对杨树人工林土壤微生物量和氮含量的影响[J]. *森林与环境学报*, 2016, 36(4): 416-422.
Lin D, Chuong D N, Hong S X, et al. Effects of thinning intensity and method on soil microbial biomass and nitrogen content in the poplar plantations[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2016, 36(4): 416-422.
- [46] Lamb E G, Mengersen K L, Stewart K J, et al. Spatially explicit structural equation modeling[J]. *Ecology*, 2014, 95(9): 2434-2442.
- [47] Hu L, Ade L J, Wu X W, et al. Changes in soil C: N: P stoichiometry and microbial structure along soil depth in two forest soils[J]. *Forests*, 2019, 10(2): 113.
- [48] Sun J, Ma B B, Lu X Y. Grazing enhances soil nutrient effects: trade-offs between aboveground and belowground biomass in alpine grasslands of the Tibetan Plateau[J]. *Land Degrad Develop*, 2018, 29(2): 337-348.
- [49] Jing X, Sanders N J, Shi Y, et al. The links between ecosystem multifunctionality and above- and belowground biodiversity are mediated by climate[J/OL]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8159 [2020-12-12]. DOI: 10.1038/ncomms9159.
- [50] Kline R. Principals and practice of structural equation modeling[M]. New York: Guilford Press, 1998.
- [51] 邓绍欢, 曾令涛, 关强, 等. 基于最小数据集的南方地区冷浸田土壤质量评价[J]. *土壤学报*, 2016, 53(5): 1326-1333.
Deng S H, Zeng L T, Guan Q, et al. Minimum dataset-based soil quality assessment of waterlogged paddy field in South China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(5): 1326-1333.
- [52] Nabiollahi K, Golmohamadi F, Taghizadeh-Mehrjardi R, et al. Assessing the effects of slope gradient and land use change on soil quality degradation through digital mapping of soil quality indices and soil loss rate[J/OL]. *Geoderma*, 2018, 318: 16-28 [2021-01-28]. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.024>.
- [53] 邵森. 山西太岳山针叶林土壤肥力随林龄和营林措施变化特征的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
Shao S. The study on the changes of soil quality in coniferous forest with age and silvicultural measures of Shanxi Taiyue Mountain[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018.
- [54] 边丽宁. 华北落叶松纯林与混交林生长、林下植被和枯落物差异分析[D]. 保定: 河北农业大学, 2018.
Bian L N. Difference of growth, understory vegetation and litter in pure and mixed forests of *Larix principis-rupprehti*[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2018.
- [55] 谢博. 针阔混交林中针叶树种枯落物分解所受的化感影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
Xie B. Allelopathic effects of broad-leaf litter on coniferous litter decomposition in coniferous and broadleaved mixed forest[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017.
- [56] 刘增文, 杜良贞, 张晓曦, 等. 黄土高原不同树种枯落叶混合分解效应[J]. *生态学报*, 2012, 32(8): 2596-2602.
Liu Z W, Du L Z, Zhang X X, et al. Effects of mix-leaf litter decomposition of different trees in the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(8): 2596-2602.

(责任编辑 范娟 孟瑶
责任编辑 孙向阳)