

# 不同经营强度对雷竹林土壤理化性质及土壤质量的影响

高雨<sup>1,2</sup>, 曹迁<sup>3</sup>, 陈蕾如<sup>1,2</sup>, 张志丽<sup>1,2</sup>, 张爱婷<sup>1,2</sup>, 徐小牛<sup>1,2</sup>

(1.安徽省林木资源培育重点实验室, 安徽 合肥 230036; 2.安徽农业大学  
林学与园林学院, 安徽 合肥 230036; 3.安徽省黄山市黄山区新华林业站, 安徽 黄山 245718)

**摘要:** [目的] 开展不同经营强度对雷竹林土壤理化性质及土壤质量的影响研究, 为雷竹林科学经营及养分管理提供科学依据。[方法] 采用样地调查法对安徽黄山市黄山区新华乡不同经营强度下雷竹林土壤理化性质进行分析, 利用主成分分析法建立土壤养分最小数据集比较该地区不同经营强度下雷竹林的土壤质量状况。[结果] 不同经营强度下土壤理化性质差异显著。在0—10 cm土层中, 中度经营的土壤容重显著低于高度经营、粗放经营; 中、高强度经营的土壤含水量显著低于粗放经营。在0—10 cm土层中, 土壤pH值: 强度经营(4.12) > 粗放经营(4.01) > 中度经营(3.97); 中度经营的土壤有机碳(24.82 g/kg)、全氮(1.67 g/kg)显著高于粗放经营(18.64, 1.35 g/kg)和强度经营(17.39, 1.25 g/kg); 中、强度经营的土壤全磷(0.53, 0.49 g/kg)显著高于粗放经营(0.27 g/kg)。中、强度经营下的C/P范围(30.99~53.40)、N/P范围(2.77~3.60)均低于粗放经营[(64.82~78.96), (5.20~5.56)], 3种不同经营强度下土壤C/N均值介于10.95~14.68之间。在0—10 cm土层中, 不同经营强度下雷竹林的土壤质量指数大小顺序为: 粗放经营(0.42) > 中度经营(0.36) > 强度经营(0.31), 土壤质量指数随土层加深而降低。[结论] 强酸性土壤环境不利于雷竹的生长, 中度经营林分土壤持水能力及水源涵养能力较好, 随着经营强度的加强土壤肥力越低, 不利于土壤质量的维持。

**关键词:** 经营强度; 土壤理化性质; 化学计量比; 土壤质量指数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)05-0294-11

中图分类号: S714.8

**文献参数:** 高雨, 曹迁, 陈蕾如, 等. 不同经营强度对雷竹林土壤理化性质及土壤质量的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 294-304. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.032; Gao Yu, Cao Qian, Chen Leiru, et al. Effects of different management intensities on soil physicochemical properties and soil quality in *Phyllostachys praecox* plantations [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 294-304.

## Effects of Different Management Intensities on Soil Physicochemical Properties and Soil Quality in *Phyllostachys Praecox* Plantations

Gao Yu<sup>1,2</sup>, Cao Qian<sup>3</sup>, Chen Leiru<sup>1,2</sup>, Zhang Zhili<sup>1,2</sup>, Zhang Aiting<sup>1,2</sup>, Xu Xiaoniu<sup>1,2</sup>

(1. Anhui Provincial Key Laboratory of Forest Resources & Silviculture, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China; 2. School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China; 3. Xinhua Forestry Technology Extension Station, Huangshan District, Huangshan City, Anhui Province, Huangshan, Anhui 245718, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of different management intensities on soil physicochemical properties and soil quality were analyzed to provide a scientific basis for the scientific management and nutrient management of *Phyllostachys praecox* forests. [Methods] Based on the analysis of soil physicochemical properties in *P. praecox* plantations under various management intensities in Huangshan District, Anhui Province, a minimum dataset was established through principal component analysis, and the soil quality in *P. praecox* plantations under different management intensities was analyzed. [Results] Significant differences were observed in the soil physicochemical properties under different management intensities. The bulk density was significantly lower in mid-intensity management than in high-intensity and extensive management in the 0—

收稿日期: 2024-03-28

修回日期: 2024-07-20

资助项目: 国家“十三五”重点研发计划项目“竹林立体复合高值化经营技术”(2018YFD0600105); 安徽省中央引导地方科技发展专项(202007d06020010)

第一作者: 高雨(1997—), 男(汉族), 安徽省亳州市人, 硕士研究生, 研究方向为森林培育。Email: gy17856006193@163.com。

通信作者: 徐小牛(1961—), 男(汉族), 安徽省庐江县人, 博士, 教授, 主要从事森林培育等方面的研究。Email: xn Xu2007@ahau.edu.cn。

10 cm soil layer. The soil water contents in mid- and high-intensity management were significantly lower than those in extensive management. In the 0—10 cm soil layer, the value of soil pH value was ranked in the order of high-intensity management (4.12) > extensive management (4.01) > mid-intensity management (3.97). The soil organic carbon (24.82 g/kg) and total nitrogen (1.67 g/kg) in mid-intensity management were significantly higher than those in extensive management (18.64, 1.35 g/kg) and high-intensity management (17.39, 1.25 g/kg). The soil total phosphorus (0.53, 0.49 g/kg) was significantly higher in mid- and high-intensity management than in extensive management (0.27 g/kg). The ranges of C/P (30.99—53.40) and N/P (2.77—3.60) in mid- and high-intensity were lower than those in extensive management [(64.82—78.96) and (5.20—5.56)], and the average value of soil C/N in three different management intensities ranged from 10.95 to 14.68. In the 0—10 cm soil layer, the soil quality indices in the different management intensities were ranked in the order of extensive management (0.42) > mid-intensity management (0.36) > high-intensity management (0.31), where the soil quality index decreased with the deepening of the soil layer. [Conclusion] A strong acidic soil environment was determined not to be conducive to the growth of bamboo. Soil water holding capacity and water conservation capacity of mid-intensity management were determined to be better. Soil fertility was observed to be lower with the strengthening of management intensity, which is not conducive to the maintenance of soil quality.

**Keywords:** management intensity; soil physical and chemical properties; stoichiometric ratio; soil quality index

雷竹(*Phyllostachys praecox*)作为优良的笋用竹种,在我国亚热带地区广泛栽培,具有易栽培、成林快、产量高、笋味鲜美等特点<sup>[1]</sup>,在安徽长江以南地区黄山市、宣城市、安庆市均有较大规模种植,目前栽培面积不断扩大,雷竹笋产业已成为当地社会发展、实现乡村振兴的支柱性产业。安徽黄山市黄山区新华乡现有雷竹林约 866.67 hm<sup>2</sup>,年产笋量约 3.50×10<sup>6</sup> kg,产值超过 5 000 万元,包括加工、销售等全产业链在内年产值逾亿元。然而,雷竹的高产栽培需要良好的土壤环境作为基础。土壤质量是土壤多个功能指标的综合体现,是揭示土壤动态条件最敏感的指标<sup>[2]</sup>,对于植被恢复和维持及提高土壤肥力具有重要意义<sup>[3]</sup>。土壤肥力状况、土壤质量的优劣程度可通过土壤质量评价实现<sup>[4]</sup>。因此,探究不同经营强度下雷竹林土壤理化性质和土壤质量,对于指导高产栽培和土壤管理具有重要的实践和科学意义。现有的研究主要集中在雷竹适宜生长的土壤类型、施肥和覆盖等提高雷笋产量的经营措施等方面。研究结果表明,雷竹适宜生长在微酸性至中性、土体深厚、疏松、肥沃、排水良好而湿坡度平缓的砂质土壤中。目前国内外常用的土壤质量评价方法复杂且多样化,主要分为定性与定量评价两大类<sup>[5]</sup>。张同娟等<sup>[6]</sup>分别采用灰色关联度法和主成分分析法以启东市为例评估了长江河口地区土壤肥力质量,综合评价后得出两种分析方法相关性很好且结果较为一致;李颖等<sup>[7]</sup>利用主成分分析法对浙江长兴不同覆盖时间毛竹林土壤质量进行了肥力评价,得出 1~2 a 的短期覆盖经

营有利于提高土壤质量,而 3 a 连续覆盖能加剧土壤酸化、土壤质量明显下降。因此,本研究通过分析不同经营强度雷竹林土壤含水量、有机碳、总氮、总磷等理化性质,运用主成分分析和 Norm 值方法建立土壤质量评价的最小数据集,对研究区不同经营强度下林分土壤质量进行评价探讨,为雷竹林科学经营尤其是养分管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地位于安徽省黄山市黄山区新华乡,东经 118°05',北纬 30°45',属亚热带季风湿润气候。年平均气温为 15.6 °C,近 10 a 平均降水量为 1 553 mm。调查区土壤类型主要是红黄壤和红壤。地带性森林植被为常绿阔叶林,植被类型丰富,其优势树种有甜槠(*Castanopsis eyrei*)、苦槠(*Castanopsis sclerophylla*)、青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)等。还有大面积的马尾松(*Pinus massoniana*)林、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林、毛竹(*Phyllostachys edulis*)和雷竹林、茶(*Camellia sinensis*)园等。

### 1.2 样品采集与测定方法

于 2023 年 4 月留笋采收后,在黄山区新华乡赐田村、董家湾村、曹村村和大保村选取 3 种不同经营类型强度种植的雷竹林开展试验,不同经营强度划分标准详见图 1 和表 1。3 种不同雷竹林的经营年限均在 8~10 a,土壤采集在两天内完成并带回实验室处理。

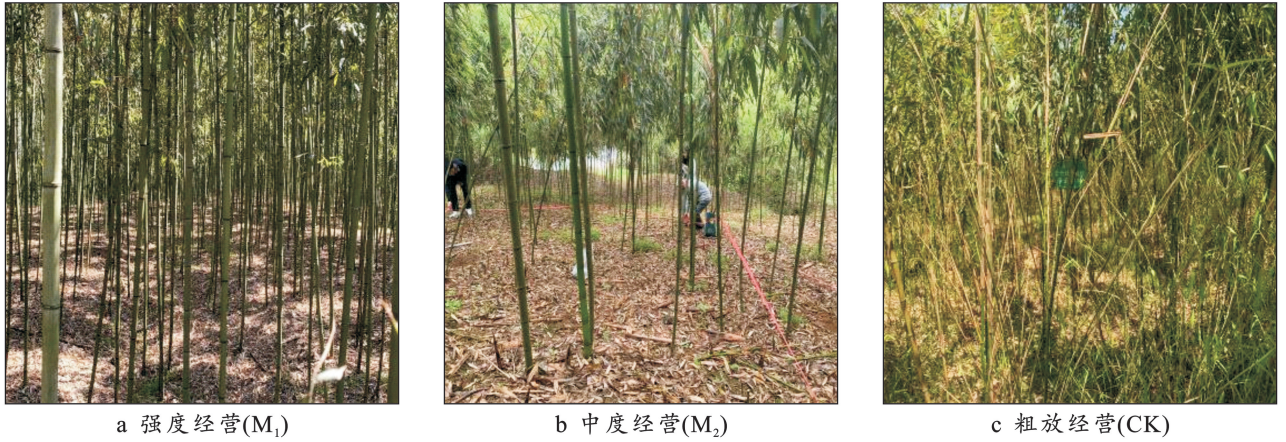


图 1 不同经营强度雷竹试验林状况

Fig.1 Experimental stands of *P. praecox* with different management intensities

表 1 雷竹试验林不同经营强度划分标准

Table 1 Classification criteria of management types of *P. praecox* forest for bamboo shoots

林分类型	立竹密度(D)/(根·hm <sup>-2</sup> )	经营措施
强度经营	$D > 15\ 000$	立竹结构合理,适度钩梢,沟施基肥,必要时松土除草、除笋
中度经营	$10\ 500 < D \leq 15\ 000$	立竹结构偏低,强度钩梢,地表撒施基肥后浅松土
粗放经营	$D \leq 10\ 500$	长期疏于管理,老竹和小径竹株偏多,林地荒芜,杂草丛生,裸鞭常见

按照立竹密度标准选择 3 种不同经营类型的代表性林分,设置 20 m×20 m 的样地,共设置 18 块样地。调查立竹生长情况及立竹密度,每个样地随机选取 3 个小样方,用土钻在每个小样方按“S”形钻取土样,取样深度分为 0—10 cm,10—30 cm,把各土层重复土样均匀混合成 1 份,每个样地取 7 个土样,共计 126 份土样。所采集的土样用自封袋保存,编号后带回实验室,一部分装入灭菌保鲜袋中放入 4 ℃ 冰箱内保存,用于测定土壤速效养分及微生物生物量碳氮等测定;另一部分在实验室内风干,随后压碎,过 0.25 mm 的筛子后密封保存,用于土壤理化性质的测定。土壤理化性质测定指标包括:土壤 pH 值、电导率(EC)、土壤容重(BD)、土壤含水量(SWC)、土壤有机碳(SOC)、可溶性有机碳(DOC)、可溶性有机氮(DON)、微生物生物量氮(MBN)和碳(MBC)等,测定方法详见刘雅洁等<sup>[8]</sup>的方法。土壤铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)含量采用 1 mol/L KCl 溶液浸提土样、全磷(TP)使用硝酸:高氯酸=3:1 高温消煮法提取,连续流动注射分析仪(Alliance-Futura, France)测定,钾(K)、镁(Mg)使用硝酸:高氯酸=3:1 高温消煮法提取,滤液利用原子吸收光谱仪(atomic absorption spectrometer PinAAcle D900, PerkinElmer, USA)测定。

### 1.3 土壤质量评价方法

土壤质量是土壤物理特性、化学特性和生物特性

的综合反映<sup>[9]</sup>,可通过选取相应的物理、化学、生物指标进行度量。近年来研究<sup>[10-11]</sup>显示,最小数据集具有易于量化、可操作性强和结果准确等优点且已被应用于多种用途的土壤质量评价,如森林经营措施管理、不同植被类型恢复及中药材质量评价等各个方面。李鑫等<sup>[12]</sup>在研究土壤质量评价指标体系构建及评价方法中查阅收集了国内外 415 个城市关于土壤最小数据的筛选、土地品质评估技术等领域的资料,综合分析得出土壤有机质选择频率最大,其次是土壤全氮、酸碱度、土壤速效磷等指标。土壤质量评价指标众多,指标的选择要以有效性、敏感性、实用性、通用性为原则。本研究根据上述原则,综合参考已有相关土壤质量评价指标体系,结合研究区域的实际状况及数据的可获得性,选取土壤含水量、pH 值、EC 值、有机碳、全氮、全磷、全钾、全镁、可溶性有机碳、可溶性有机氮、铵态氮、硝态氮、微生物生物量碳和微生物生物量氮等指标作为土壤质量评价的指标。将上述 14 个指标作为全量数据集(total data set, TDS)进行主成分分析(PCA),筛选出影响土壤质量的最小数据集(MDS),并采用土壤质量指数(SQI)来评价不同经营强度对土壤性质的影响。

1.3.1 最小数据集的确定 通过主成分分析,将特征值 $\geq 1$ 的主成分中因子荷载绝对值 $\geq 0.5$ 的土壤指标分为一组,若某指标同时在两个主成分中的因子荷载值都 $\geq 0.5$ ,则该土壤指标应归并到与其他土壤指标相

关性较低的那一组<sup>[13]</sup>;若某指标的所有载荷均 $<0.5$ ,则该指标应归并到载荷值最高的一组。同时,计算各指标的 Norm 值(矢量常模值),Norm 值反映了指标在主成分分析中的综合载荷程度,即在高维空间中的长度。Norm 值越高表示该指标在所有主成分的综合载荷越大,包含的信息也就越丰富。选择每组中 Norm 值在最高 Norm 值 10%范围内的指标。最后,当一组中保留多个指标时,需要进一步进行 Pearson 相关性分析,若相关性低( $r < 0.6$ ),则各指标均纳入 MDS;若相关性高( $r \geq 0.6$ ),则 Norm 值最高的指标纳入 MDS。Norm 值计算公式<sup>[14]</sup>为:

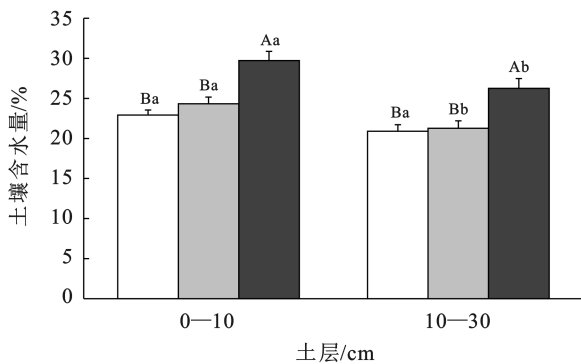
$$N_{ik} = \sqrt{\sum_{i=1}^k (u_{ik}^2 \cdot \lambda_k)} \quad (1)$$

式中: $N_{ik}$ 为第*i*个指标在特征值 $\geq 1$ 的前*k*个主成分上的综合荷载; $U_{ik}$ 为*i*个指标在第*k*个主成分上的荷载; $\lambda_k$ 为第*k*个主成分的特征值。

1.3.2 土壤质量指数的计算 本试验共有 14 个土壤理化性质指标,但各指标之间的单位不一致,无法直接进行比较,所以将入选最小数据集的指标进行标准化,通常使用隶属函数将各项指标转换成 0~1 之间的数值。隶属函数的公式为:

$$f(x) = 0.9 \times \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} + 0.1 \quad (2)$$

式中: $f(x)$ 为隶属度值; $x$ 为指标的测定值; $x_{\min}$ , $x_{\max}$ 分别表示测定指标中的最小值与最大值。



注:不同大写字母表示同一土层不同林分之间差异显著,不同小写字母表示同一林分不同土层之间差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

图2 不同经营强度雷竹林土壤含水量及容重的变化

Fig.2 Changes of soil water content and bulk density in *P. praecox* stands with different management intensities

## 2.2 不同经营强度雷竹林的化学性质

2.2.1 土壤 pH 值,电导率(EC) 3 种林分土壤 pH 均值为 3.97~4.27(图 3),均为强酸性。0—10 cm 表层土的 pH 值大小顺序为: $M_1(4.12) > CK(4.01) > M_2(3.97)$ ,土壤 pH 值随着经营强度的减弱而先降后升;土壤 EC 大小顺序为: $M_2(61.8 \mu S/cm) > M_1(59.1 \mu S/cm) > CK(42.0 \mu S/cm)$ ,随着经营强度的减弱而先升后降。

最小数据集中每个指标的公因子方差占总公因子方差的比例代表每个指标的权重,权重表征每个指标的重要性,权重与土壤质量成正比的关系,指标的权重越大,则表明指标对土壤质量的影响越大。土壤质量指数(SQI)能够对土壤性质进行综合、定量评价<sup>[15]</sup>,该指数越大表明土壤质量越好。将最小数据集的指标标准化和加权化后,SQI 的计算公式为:

$$SQI = \sum_{i=1}^n (W_i \cdot Q_i) \quad (3)$$

式中:SQI 为土壤质量指数; $W_i$ 为最小数据集中第*i*个指标的权重; $Q_i$ 为第*i*指标的隶属度值。

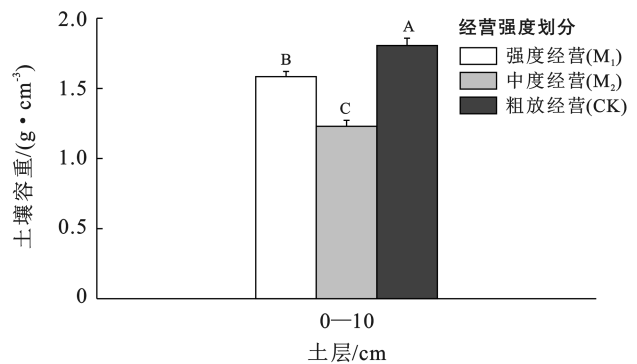
### 1.4 数据处理

土壤理化性质指标的计算统计在 Excel 2019 软件中完成,利用 R 4.1.2 软件进行各土壤理化性质指标相关性分析,土壤理化性质指标的主成分分析则是在 SPSS 22.0 软件中完成,运用 Origin 2021 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同经营强度雷竹林的物理性质

由图 2 可以看出,在 0—10 cm 土层中,土壤 SWC 随着经营强度的减弱而升高,大小顺序为: $CK(29.72\%) > M_2(24.32\%) > M_1(22.93\%)$ ;土壤容重随着经营强度的减弱而先降后升,大小顺序为: $CK(1.81 g/cm^3) > M_1(1.47 g/cm^3) > M_2(1.44 g/cm^3)$ 。



2.2.2 土壤  $NH_4^+-N$ ,  $NO_3^- -N$  含量 在 0—10 cm 土层中,不同经营雷竹林下土壤  $NH_4^+-N$  大小顺序为: $M_2(4.04 mg/kg) > M_1(2.25 mg/kg) > CK(1.53 mg/kg)$ ,随着经营强度的减弱而先升后降(图 4),且中度经营和粗放经营具有显著差异;土壤  $NO_3^- -N$  大小顺序为: $M_1(1.32 mg/kg) > CK(0.82 mg/kg) > M_2(0.65 mg/kg)$ ,随着经营强度的减弱而先降后升。

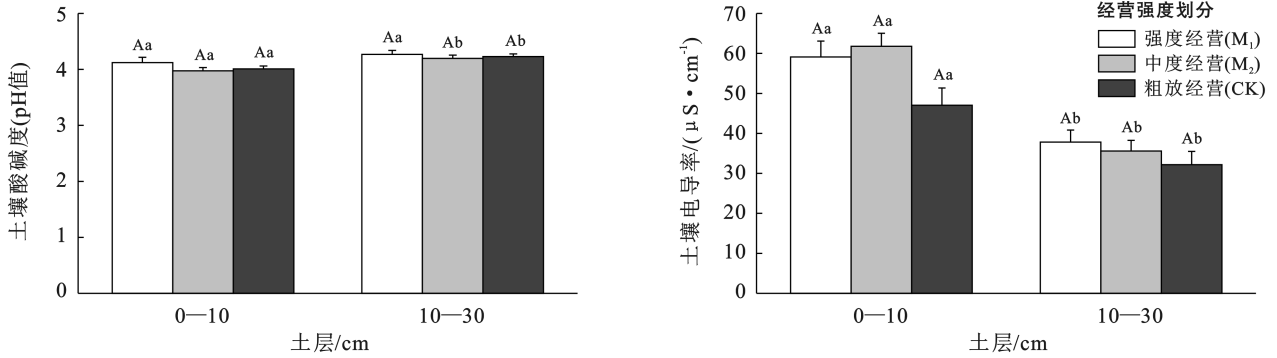
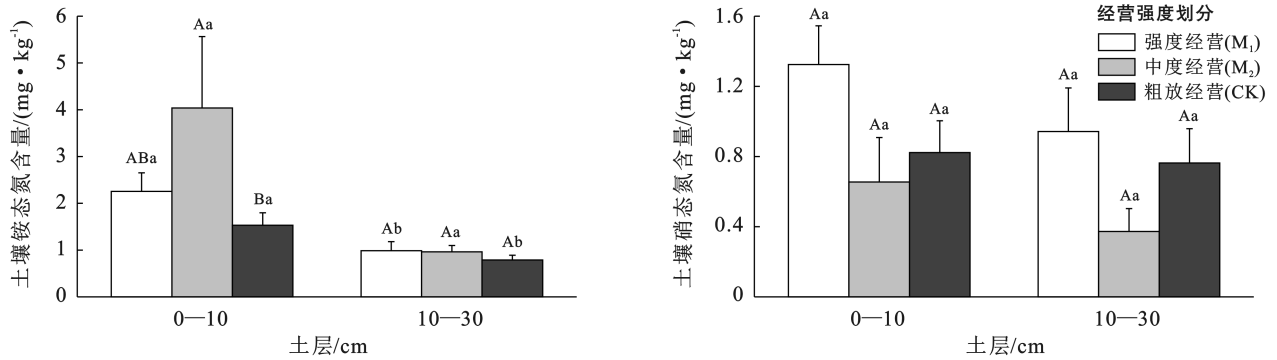


图 3 不同经营强度雷竹林土壤 pH 值和电导率的变化

Fig.3 Changes of soil pH value and electrical conductivity in *P. praecox* stands with different management intensities图 4 不同经营强度雷竹林土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的变化Fig.4 Changes of soil  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  in *P. praecox* stands with different management intensities

2.2.3 土壤 DOC, DON 含量 在 0—10 cm 土层中, 不同雷竹林下土壤 DOC 大小顺序为: CK (88.21  $\text{mg}/\text{kg}$ ) > M<sub>1</sub> (75.41  $\text{mg}/\text{kg}$ ) > M<sub>2</sub> (70.45  $\text{mg}/\text{kg}$ ), 随着经营强度的减弱而先降后升(图 5); 土壤 DON

大小顺序为: M<sub>1</sub> (10.40  $\text{mg}/\text{kg}$ ) > CK (10.00  $\text{mg}/\text{kg}$ ) > M<sub>2</sub> (7.96  $\text{mg}/\text{kg}$ ), 随着经营强度的减弱而先降后升。除此之外, 不同经营强度下雷竹林土壤 DOC, DON 均随土层深度增加而降低。

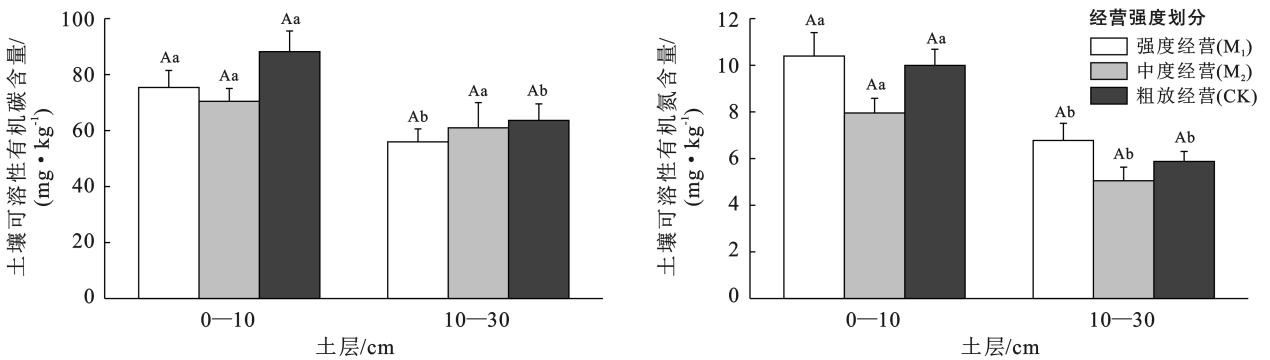


图 5 不同经营强度雷竹林土壤 DOC, DON 的变化

Fig.5 Changes of soil DOC and DON in *P. praecox* stands with different management intensities

2.2.4 土壤 K, Mg 含量 在 0—10 cm 土层中, 不同经营雷竹林下土壤 K 大小分别为: CK (2.73  $\text{mg}/\text{kg}$ ) > M<sub>2</sub> (2.39  $\text{mg}/\text{kg}$ ) > M<sub>1</sub> (1.70  $\text{mg}/\text{kg}$ ), 随着经营强度的减弱而逐步升高(图 6); 土壤 Mg 大小顺序为: M<sub>2</sub> (2.73  $\text{mg}/\text{kg}$ ) > M<sub>1</sub> (2.44  $\text{mg}/\text{kg}$ ) > CK (2.12  $\text{mg}/\text{kg}$ ), 随着经营强度的减弱而升高。

2.2.5 土壤 MBC, MBN 含量 在 0—10 cm 土层中, 不同经营雷竹林下土壤 MBC 大小顺序为: CK (409.66  $\text{mg}/\text{kg}$ ) > M<sub>2</sub> (327.73  $\text{mg}/\text{kg}$ ) > M<sub>1</sub> (290.01  $\text{mg}/\text{kg}$ ), 随着经营强度的减弱而升高(图 7); 土壤 MBN 大小顺序为: CK (36.04  $\text{mg}/\text{kg}$ ) > M<sub>2</sub> (34.52  $\text{mg}/\text{kg}$ ) > M<sub>1</sub> (21.18  $\text{mg}/\text{kg}$ ), 随着经营强度的减弱而升高。

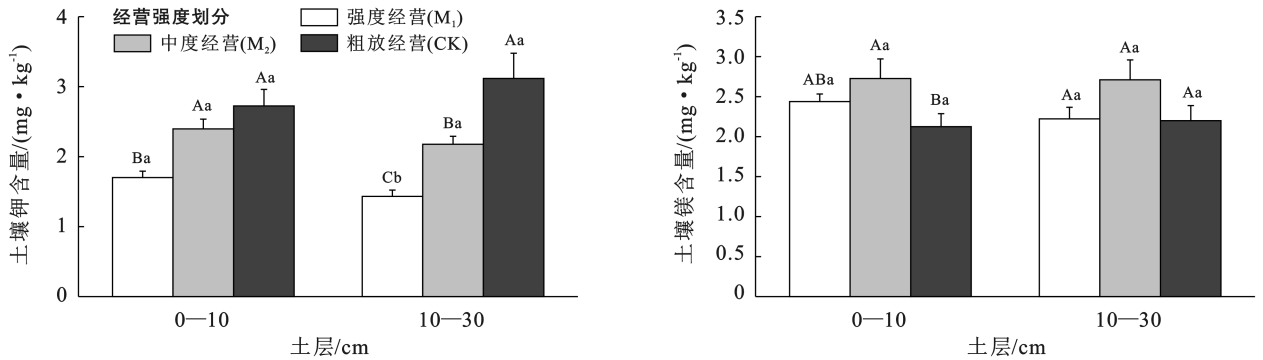


图 6 不同经营强度雷竹林土壤 K, Mg 的变化

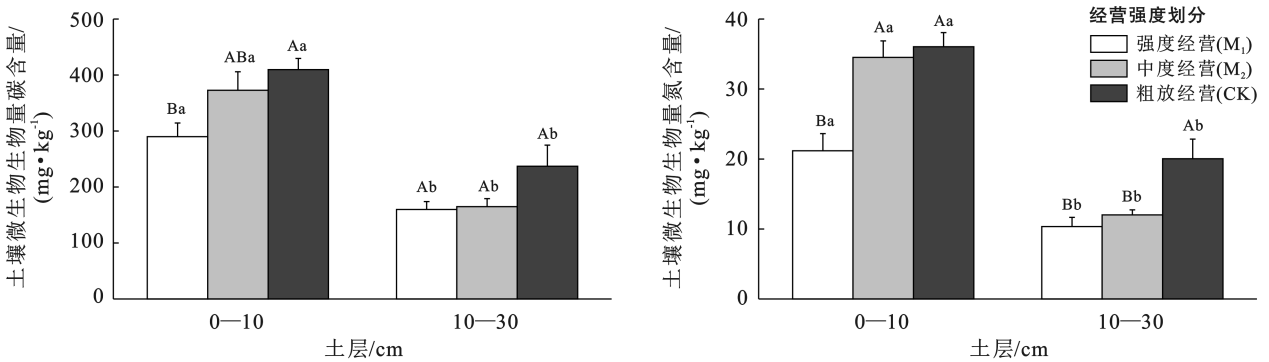
Fig.6 Changes of soil K and Mg in *P. praecox* stands with different management intensities

图 7 不同经营强度雷竹林土壤微生物氮碳 (MBC, MBN) 的变化

Fig.7 Changes of soil MBC and MBN in *P. praecox* stands with different management intensities

2.2.6 土壤碳氮磷及其化学计量比 除了 N/P 外, 不同经营强度雷竹林土壤 C-N-P 含量及其化学计量比均随土层深度增加而降低, 且不同土层间存在显著差异(图 8)。在 0—10 cm 土层中, 不同雷竹林分土壤 SOC 随着经营强度的减弱而先升后降, 大小顺序为: M<sub>2</sub> (24.82 g/kg) > CK (18.64 g/kg) > M<sub>1</sub> (17.39 g/kg); 土壤 TN 随着经营强度的减弱而先升后降, 大小顺序为: M<sub>2</sub> (1.67 g/kg) > CK (1.35 g/kg) > M<sub>1</sub> (1.25 g/kg); 土壤 TP 随着经营强度的减弱而先升后降, 其顺序为: M<sub>2</sub> (0.53 g/kg) > M<sub>1</sub> (0.49 g/kg) > CK (0.27 g/kg); 土壤 SOC/TN 值随着经营强度的减弱而先升后降, 大小顺序为: M<sub>2</sub> (14.68) > CK (13.86) > M<sub>1</sub> (13.41); 土壤 SOC/TP 值、TN/TP 值随着经营强度的减弱而逐步升高, 其大小顺序为: CK (78.96) > M<sub>2</sub> (53.40) > M<sub>1</sub> (37.29), CK (5.56) > M<sub>2</sub> (3.60) > M<sub>1</sub> (2.77)。

### 2.3 不同经营强度雷竹林的土壤质量变化

本试验共选取 14 项土壤理化性质, 将各个指标通过 KMO 检验 (0.662) 和 Bartlett 检验 ( $p < 0.01$ ), 结果表明土壤各项理化性质指标均适合进行主成分分析。由表 2 知, 特征值  $\geq 1$  的主成分有 4 个, 特征值分别为 4.816, 2.899, 1.534 和 1.286, 这 4 个主成分积

累贡献率为 75.25%, 所以, 建立土壤质量评价的最小数据集 (MDS) 采用前 4 个主成分。第一主成分 PC<sub>1</sub> 解释的方差比例可以达到 34.40%, PC<sub>2</sub>, PC<sub>3</sub>, PC<sub>4</sub> 分别为 20.71%, 10.95% 和 9.17%。主成分 1 总共包含 8 个指标, 分别为 TN, SOC, EC, DON, pH 值, TP, MBC, DOC; 主成分 2 总共包含 5 个指标, 分别为 MBN, MBC, Mg, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, TP; 主成分 3 仅包含一个指标 DOC; 主成分 4 总共包含 2 个指标, 分别为 K, Mg。在 PC<sub>1</sub> 这些指标中, TN 的 Norm 值最高, 为 1.921。此外, SOC 和 DON 与最高 Norm 值相差 10% 以内。由表 3 可知, 土壤 TN 与 SOC ( $r = 0.951$ ,  $p < 0.01$ )、DON ( $r = 0.422$ ,  $p < 0.01$ ) 均有极显著正相关关系, 但土壤 TN 与 DON 的相关系数为  $r = 0.422 < 0.60$ , 所以 PC<sub>1</sub> 中 TN 和 DON 均入选 MDS。同样, 在 PC<sub>2</sub> 中, MBC 的 Norm 值最高, 为 1.737, Mg 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的 Norm 值与最高 Norm 值相差均超过了 10%, MBN 与最高 Norm 值相差 10% 以内, 但 MBN 与 MBC 的相关系数为  $r = 0.852 > 0.60$ , 因此选取 Norm 值高的 MBC 入选 MDS。在 PC<sub>3</sub> 中, 只有 DOC 的绝对因子载荷值  $\geq 0.50$ , 其 Norm 值为 1.617, 因此 DOC 入选 MDS。在 PC<sub>4</sub> 中, 仅剩 K 的绝对因子载荷值  $\geq 0.50$ , 其 Norm 值为 1.105, 因此 K 进入 MDS。

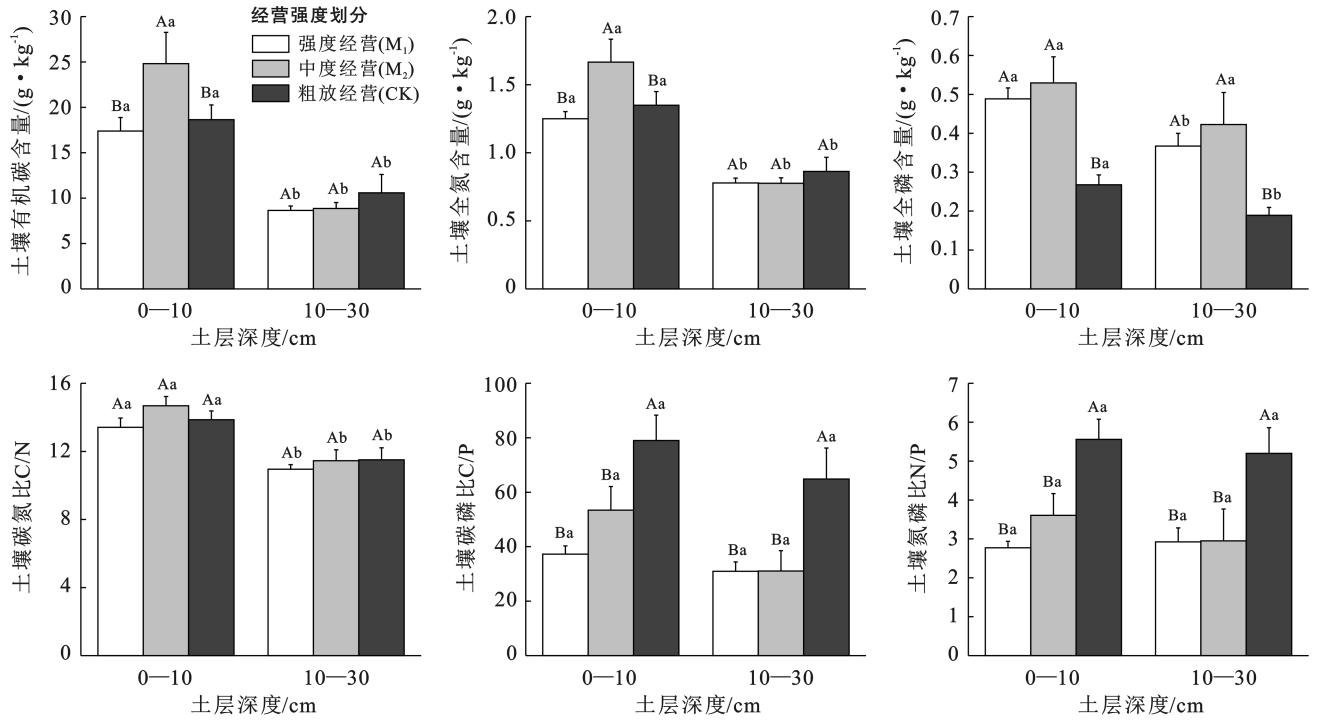


图 8 不同经营强度雷竹林土壤 C-N-P 及化学计量比的变化

Fig.8 Changes of soil C, N, P and their stoichiometric ratios in *P. praecox* stands with different management intensities

表 2 土壤质量指标在各主成分上的载荷值及 Norm 值

Table 2 Loading and Norm values of soil quality parameters on each principal component

指标	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	Norm 值
TN	0.813	0.376	0.248	0.032	1.921
SOC	0.785	0.400	0.224	-0.004	1.873
EC	0.734	-0.242	0.182	-0.324	1.718
DON	0.729	-0.214	-0.465	-0.216	1.756
pH 值	-0.647	0.451	0.344	-0.144	1.677
$NH_4^+-N$	0.488	-0.245	0.207	-0.386	1.256
SWC	0.485	0.392	-0.328	0.344	1.377
MBN	0.360	0.803	0.258	-0.022	1.611
MBC	0.545	0.734	0.121	-0.047	1.737
TP	0.513	-0.576	0.443	0.092	1.594
Mg	0.384	-0.550	0.406	0.515	1.477
$NO_3^- -N$	0.480	-0.508	0.057	-0.215	1.386
DOC	0.632	0.009	-0.667	-0.074	1.617
K	0.333	-0.027	-0.115	0.719	1.105
特征值	4.816	2.899	1.534	1.286	
累计方差贡献率/%	34.401	55.110	66.064	75.250	

注:EC 为电导率; BD 为土壤容重; SWC 为土壤含水量; SOC 为土壤有机碳; DOC 为可溶性有机碳; DON 为可溶性有机氮; MBN, MBC 分别为微生物生物量氮碳。下同。

经过筛选,最终 MBC, K, TN, DOC 和 DON 被选入最小数据集,对这 5 个指标重新进行主成分分析,由表 4 可知各项指标的公因子方差,利用隶属函数将各项指标的数值转换成 0—1,最后根据 SQI 公式进行计算,结果见图 9 所示,在 0—10 cm 土层中,3 种不同经营强度林分的 SQI 大小顺序为:CK(0.50) > M<sub>2</sub>(0.45) > M<sub>1</sub>(0.37)。

### 3 讨论

#### 3.1 不同经营强度对土壤理化性质的影响

强度经营下雷竹林土壤水分含量相对较低,这可能是因为雷竹生长需要大量的水分供应。强度经营下雷竹林具有较高的立竹密度和分支强度,这会导致植物对土壤水分的需求增加。

土壤容重是影响土壤疏松程度和通气透水能力的重要因素,与植被密度、凋落物组成和分解程度、根系的生长发育密切相关<sup>[16-19]</sup>,粗放经营下雷竹林土壤

容重、含水量相对较高,这可能与粗放经营的林分立竹密度低、林下杂草盖度高有关,一定程度上降低了水分蒸散和消耗。

表 3 不同经营强度土壤理化性质之间的相关性

Table 3 Pearson correlations between soil physicochemical properties in different management intensities

指标	SWC	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	DOC	DON	MBC	MBN	TP	K	Mg	pH	EC	TN	SOC
SWC	1													
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.057	1												
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	0.096	0.425**	1											
DOC	0.369**	0.155	0.140	1										
DON	0.292**	0.272**	0.415**	0.796**	1									
MBC	0.421**	0.111	-0.057	0.308**	0.183	1								
MBN	0.417**	0.152	-0.122	-0.027	0.058	0.852	1							
TP	-0.095	0.332**	0.386**	0.085	0.307**	-0.074	-0.218*	1						
K	0.283**	0.025	0.096	0.198**	0.109	0.138	0.134	0.029	1					
Mg	0.023	0.181	0.341**	-0.010	0.158	-0.147	-0.215*	0.751**	0.368**	1				
pH 值	-0.314**	0.382**	-0.460**	-0.578**	0.581**	-0.003	0.162	-0.487**	-0.332**	-0.362**	1			
EC	0.013	0.506**	0.575**	0.337**	0.571**	0.255**	0.141	0.472**	0.180	0.270**	-0.409**	1		
TN	0.467**	0.252**	0.141	0.354**	0.422**	0.656**	0.557**	0.347**	0.173	0.211**	-0.256**	0.499**	1	
SOC	0.390**	0.186	0.087	0.403**	0.424**	0.690**	0.528**	0.329**	0.129	0.177	-0.218*	0.479**	0.951**	1

注: \* 表示  $p < 0.05$  水平相关性显著; \*\* 表示  $p < 0.01$  水平相关性显著。

表 4 TDS 与 MDS 土壤质量指标的公因子方差与权重

Table 4 Community and weights of soil quality indicators for MDS and TDS

指标	总数据集 TDS		最小数据集 MDS	
	公因子方差	权重	公因子方差	权重
SWC	0.649	0.056		
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.717	0.062		
MBC	0.855	0.074	0.834	0.236
MBN	0.915	0.079		
K	0.789	0.068	0.124	0.035
Mg	0.893	0.077		
pH 值	0.769	0.067		
SOC	0.928	0.080		
TN	0.912	0.079	0.794	0.224
TP	0.900	0.078		
DOC	0.892	0.077	0.882	0.249
DON	0.880	0.076	0.905	0.256
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	0.693	0.060		
EC	0.751	0.065		

本研究中 3 种不同经营强度措施下的土壤 pH 均值介于 3.97~4.27 之间,低于雷竹林适宜生长 5.5~7.0<sup>[20]</sup>,这可能与雷竹林的经营管理手段有关,不合理的施肥方式可能加剧了土壤酸化。此外,还与该地区的酸性花岗岩母质及其发育的红壤特性有关,加之调查地区年降雨量高,林地淋溶强烈,会导致土壤盐基离子大量淋失,而致酸离子富集,引发土壤严重酸化。3 种雷竹林微生物量碳氮随经营强度的加强而减少,研究表明酸性土壤环境对微生物活性有抑制作用,这可能导致土壤中微生物数量减少和微生物群

落结构的改变。酸性环境对微生物的生存和代谢活动有抑制作用,从而降低了植物残体的分解速率。尽管土壤有机质含量可能有所增加,但由于酸性环境下微生物的活性减弱,有机质很难被有效分解和利用<sup>[21]</sup>。该结果表明,在雷竹林经营中需加强土壤管理和 pH 值调控,避免过度酸化对土壤生态系统的负面影响。

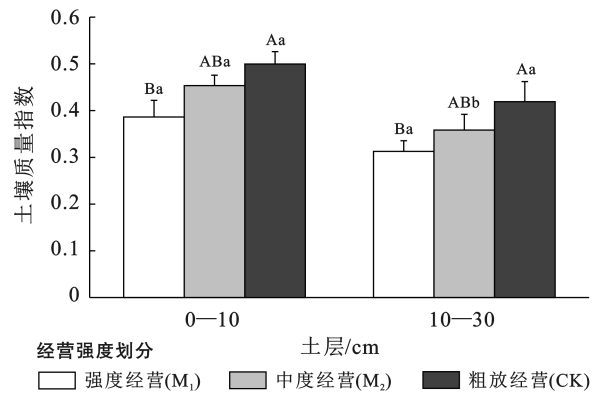


图 9 不同经营强度雷竹林土壤质量指数的变化  
Fig.9 Changes of soil quality indices in *P. praecox* stands with different management intensities

C 是组成植物体干物质最主要的元素,N,P 是植物生长的主要限制性养分,3 者在生态系统物质和能量循环以及多元素平衡过程中共同发挥着重要作用<sup>[22-23]</sup>。强度经营雷竹林的土壤有机碳和全氮含量显著低于中度经营雷竹林,说明高强度人为干扰可能使土壤稳定性下降,不利于土壤碳、氮的积累。中、强度经营雷竹林的全磷含量显著高于粗放经营雷竹林,



这意味着中、强度经营提高了土壤磷供给能力。

土壤化学计量比可用于判断土壤质量的指标,预测养分利用效率变化趋势。土壤 C/N 可反映有机质来源、分解状态及其对土壤肥力的潜在贡献<sup>[24]</sup>。一般情况下,C/N 与有机质分解速率之间存在负相关关系,C/N 比较低时,表示土壤中氮的相对含量较高。本研究中,不同经营雷竹林土壤 C/N 均值在 10.95~14.68 之间,与世界土壤(14.3)和中国土壤(11.9)C/N 均值接近<sup>[25]</sup>。C/P 用于反映土壤磷矿化能力<sup>[26]</sup>,是衡量土壤有机物质矿化释放磷的能力的重要指标。较低的 C/P 比表示土壤磷更易转化而被植物吸收和利用,即土壤磷有效性较高。N/P 的高低从很大程度上反映出土壤与植物间的养分供需状态<sup>[27]</sup>,可确定土壤养分限制阈值<sup>[28]</sup>。本研究中、强度经营下土壤 C/P (30.99~53.40),N/P(2.77~3.60)均低于粗放经营,说明中、高强度经营的雷竹林土壤磷的有效性较高,有利于雷竹的吸收和利用,促其生长及发笋。在粗放经营条件下,土壤 C/P 值(64.82~78.96)高于中国土壤 C/P 均值(61)<sup>[26]</sup>,会导致微生物在分解有机质的过程中存在磷限制,影响养分的释放。与此同时,中、高强度经营条件下土壤 N/P 在 2.77~3.36,低于全国土壤 N/P 的平均水平(5.20)<sup>[29]</sup>;而粗放经营土壤 N/P 在 5.20~5.56。说明中、高强度经营雷竹林可能存在 N 限制,N 素供应不足将影响雷竹生长,降低经营效益。这些结果表明在雷竹林经营中需要注意土壤 C-N-P 元素的平衡,合理施肥和养分管理,以提高土壤质量和雷竹林的生长效果。在中、高强度经营条件下,适当调控土壤 C/P 和 N/P,以改善土壤养分供应状况,促进雷竹生长发育,提高经营效益。

### 3.2 不同经营强度对土壤质量的影响

利用 PCA 选择进入 MDS 的指标,最终 MBC,K,TN,DOC 和 DON 进入 MDS。微生物对有机质的分解和养分循环起着关键的作用,MBC 可以反映土壤中微生物的数量和活性水平,从而间接反映土壤的肥力和有机质分解速率<sup>[30]</sup>。K 是植物生长必需的矿质元素之一,K 具有提升植物光合速率、激活酶活性、抗倒伏以及运转和存储光合碳水化合物化合物等功能<sup>[31]</sup>。TN 是植物生长的关键限制性养分之一,对于植物的生长和发育具有重要作用。TN 含量可反映土壤中氮的供应状况,对评估土壤肥力和植物对氮的吸收利用具有重要意义。DOC,DON 是土壤中可溶性有机物质的代表,反映土壤有机物的分解和养分释放的程度,在一定程度上可指示土壤质量和养分供应能力。本研究中,不同经营强度土壤质量不同,粗放经营土壤质量最好,中度经营的土壤质量次之,强度经营的

雷竹林土壤质量相对较差。随着经营强度的加强,土壤的肥力越低,与倪惠菁等<sup>[32]</sup>的研究结果一致,可能是不合理施肥和频繁经营干扰,导致土壤养分流失,不利于土壤质量的维持,高强度经营模式可能对雷竹林生产力水平产生不利影响。

## 4 结论

(1) 中度经营林分土壤持水能力及水源涵养能力较好。粗放经营林分土壤容重、含水量相对较高。

(2) 不同经营强度的雷竹林土壤均呈强酸性,需加强土壤管理和 pH 调控,避免过度酸化对土壤生态系统的负面影响,促进可持续经营。

(3) 中、高强度经营下雷竹林可能存在 N 限制,通过合理施肥和养分管理,维持土壤 C-N-P 元素的平衡。

(4) 不同经营强度雷竹林土壤质量评价最小数据集包含 MBC,K,TN,DOC 和 DON,其权重分别为 0.236,0.035,0.224,0.249 以及 0.256,与粗放经营相比,高强度经营雷竹林降低了土壤质量指数。TDS-SQI 与 MDS-SQI 线性回归分析表明,利用 MDS 对不同经营强度雷竹林土壤质量评价是合理的。通过土壤质量指数评价,可以看出高强度经营雷竹林土壤质量相对较差,说明频繁垦复并不利于土壤质量的维持,这可能会对竹林生产力的维持产生负面影响,要避免过度追求高竹笋产量带来的经营效益。

## 参考文献 (References)

- [1] 郭子武,陈双林,杨清平,等.雷竹林土壤和叶片 N、P 化学计量特征对林地覆盖的响应[J].生态学报,2012,32(20):6361-6368.  
Guo Ziwu, Chen Shuanglin, Yang Qingping, et al. Responses of N and P stoichiometry on mulching management in the stand of *Phyllostachys praecox* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012,32(20):6361-6368.
- [2] 王启兰,王溪,曹广民,等.青海省海北州典型高寒草甸土壤质量评价[J].应用生态学报,2011,22(6):1416-1422.  
Wang Qilan, Wang Xi, Cao Guangmin, et al. Soil quality assessment of alpine meadow in Haibei State of Qinghai Province [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011,22(6):1416-1422.
- [3] Zhang Jing, Li Pengzhan. Using soil microorganism to construct a new index of soil quality evaluation [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020,440(5):052023.
- [4] 刘世梁,傅伯杰,刘国华,等.我国土壤质量及其评价研究的进展[J].土壤通报,2006,37(1):137-143.  
Liu Shiliang, Fu Bojie, Liu Guohua, et al. Research

- review of quantitative evaluation of soil quality in China [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(1): 137-143.
- [5] 杨东伟,徐秋桐,章明奎.水田改雷竹林后土壤发生学性质和土壤类型的演变[J].土壤通报,2014,45(4):777-782.  
Yang Dongwei, Xu Qiutong, Zhang Mingkui. Evolution of genetic characteristics and types of soils transformed into Lei bamboo forest from paddy fields [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(4): 777-782.
- [6] 张同娟,杨劲松,刘广明,等.长江河口地区土壤肥力质量综合评价研究:以启东市为例[J].土壤通报,2011,42(3):513-517.  
Zhang Tongjuan, Yang Jinsong, Liu Guangming, et al. Evaluation of soil quality in Yangtze River estuary area: A case study of Qidong City [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(3): 513-517.
- [7] 李颖,朱炜,徐新泉,等.利用主成分分析对不同覆盖时间毛竹林土壤质量进行评价:以浙江长兴毛竹林为例[J].东北林业大学学报,2024,52(1):85-91.  
Li Ying, Zhu Wei, Xu Xinquan, et al. Evaluation of soil quality in different mulched times of phyllostachys edulis forest by principal component analysis: A case of *Phyllostachys edulis* forest in Zhejiang Changxing [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024, 52(1): 85-91.
- [8] 刘雅洁,王亮,樊伟,等.海拔对杉木人工林土壤活性有机碳组分的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2021,49(8):59-69.  
Liu Yajie, Wang Liang, Fan Wei, et al. Effects of altitude on soil active organic carbon components in *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2021, 49(8): 59-69.
- [9] 蒋丛泽,受娜,高玮,等.青藏高原东北缘不同土地利用类型土壤质量综合评价[J].应用生态学报,2022,33(12):3279-3286.  
Jiang Congze, Shou Na, Gao Wei, et al. Comprehensive evaluation of soil quality of different land use types on the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(12): 3279-3286.
- [10] 刘鑫,王一博,杨文静.青藏高原植被退化背景下土壤质量评价方法研究[J].兰州大学学报(自然科学版),2020,56(2):143-153.  
Liu Xin, Wang Yibo, Yang Wenjing. Study on soil quality evaluation methods under the background of vegetation degradation in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2020, 56(2): 143-153.
- [11] 胡优琼,姜金香,黄安玲,等.贵州及其周边地区朱砂根、红凉伞质量评价[J].中成药,2024,46(2):383-390.  
Hu Youqiong, Jiang Jinxiang, Huang Anling, et al. Quality evaluation of *Ardisia crenata* and *Ardisia crenata* var. *bicolor* from Guizhou and its surrounding regions [J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2024, 46(2): 383-390.
- [12] 李鑫,张文菊,邹磊,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 Xin, Zhang Wenju, Wu Lei, et al. Advance in indicator screening and methodologies of soil quality evaluation [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(14): 3043-3056.
- [13] 张光亮,白军红,郗敏,等.黄河三角洲湿地土壤质量综合评价[J].湿地科学,2015,13(6):744-751.  
Zhang Guangliang, Bai Junhong, Xi Min, et al. Comprehensive assessment of soil quality of wetlands in the Yellow River delta [J]. Wetland Science, 2015, 13(6): 744-751.
- [14] 刘鑫,王一博,吕明侠,等.基于主成分分析的青藏高原多年冻土区高寒草地土壤质量评价[J].冰川冻土,2018,40(3):469-479.  
Liu Xin, Wang Yibo, Lv Mingxia, et al. Soil quality assessment of alpine grassland in permafrost regions of Tibetan Plateau based on principal component analysis [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(3): 469-479.
- [15] 巩杰,陈利顶,傅伯杰,等.黄土丘陵区小流域土地利用和植被恢复对土壤质量的影响[J].应用生态学报,2004,15(12):2292-2296.  
Gong Jie, Chen Liding, Fu Bojie, et al. Effects of land use and vegetation restoration on soil quality in a small catchment of the Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(12): 2292-2296.
- [16] Keller T, Håkansson I. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content [J]. Geoderma, 2010, 154(3/4): 398-406.
- [17] 姜沛沛,曹扬,陈云明,等.不同林龄油松(*Pinus tabulaeformis*)人工林植物、凋落物与土壤C、N、P化学计量特征[J].生态学报,2016,36(19):6188-6197.  
Jiang Peipei, Cao Yang, Chen Yunming, et al. Variation of C, N, and P stoichiometry in plant tissue, litter, and soil during stand development in *Pinus tabulaeformis* plantation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19): 6188-6197.
- [18] 李鹏,陈璇,杨章旗,等.不同密度马尾松人工林枯落物输入对土壤理化性质的影响[J].水土保持学报,2022,

- 36(2):368-377.
- Li Peng, Chen Xuan, Yang Zhangqi, et al. Effects of litter input on soil physical and chemical properties of *Pinus massoniana* plantations with different densities [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2):368-377.
- [19] 陈昭旭, 高聚林, 于晓芳, 等. 不同耕作及秸秆还田方式对土壤物理性质及作物产量的影响[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2022, 43(6):21-27.
- Chen Zhaoxu, Gao Julin, Yu Xiaofang, et al. Effects of different tillage and straw returning methods on soil physical properties and crop yield [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2022, 43(6):21-27.
- [20] 徐祖祥, 祝小祥, 徐进, 等. 临安雷竹林施肥现状及问题的分析[J]. 农学学报, 2015, 5(5):53-56.
- Xu Zuxiang, Zhu Xiaoxiang, Xu Jin, et al. The status and problem analysis of fertilization in the bamboo forest in Lin'an [J]. Journal of Agriculture, 2015, 5(5):53-56.
- [21] Ye Chenglong, Chen Dima, Hall S J, et al. Reconciling multiple impacts of nitrogen enrichment on soil carbon: Plant, microbial and geochemical controls [J]. Ecology Letters, 2018, 21(8):1162-1173.
- [22] 郭洁芸, 王雅歆, 李建龙. 氮添加对中国陆地生态系统植物—土壤碳动态的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(12):4823-4833.
- Guo Jieyun, Wang Yaxin, Li Jianlong. Effects of nitrogen addition on plant-soil carbon dynamics in terrestrial ecosystems of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12):4823-4833.
- [23] 陈婕妮, 石思雨, 钟羨芳, 等. 武夷山不同海拔土壤微生物生物量碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2023:1-8.
- Chen Jieni, Shi Siyu, Zhong Xianfang, et al. Soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus contents and their ecological stoichiometric characteristics along an elevations gradient in the Wuyi Mountain [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023:1-8.
- [24] 刘冬, 张剑, 包雅兰, 等. 水分对敦煌阳关湿地芦苇叶片与土壤 C、N、P 生态化学计量特征的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(11):3804-3812.
- Liu Dong, Zhang Jian, Bao Yalan, et al. Effects of soil moisture on *Phragmites australis* leaves and soil C, N and P ecological stoichiometric characteristics in Yangguanwetland, Dunhuang [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(11):3804-3812.
- [25] Bui E N, Henderson B L. C : N : P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors [J]. Plant and Soil, 2013, 373(1):553-568.
- [26] Wang Linjiao, Wang Pan, Sheng Maoyin, et al. Ecological stoichiometry and environmental influencing factors of soil nutrients in the karst rocky desertification ecosystem, Southwest China [J]. Global Ecology and Conservation, 2018, 16:e00449.
- [27] Cui Hu, Ou Yang, Wang Lixia, et al. Dynamic changes in microbial communities and nutrient stoichiometry associated with soil aggregate structure in restored wetlands [J]. Catena, 2021, 197:104984.
- [28] 赵文东, 李凯, 朱传晟, 等. 闽南山地树种转换对土壤碳氮磷及化学计量的影响[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(2):299-310.
- Zhao Wendong, Li Kai, Zhu Chuansheng, et al. Effects of tree species transformation on soil carbon, nitrogen, phosphorus and stoichiometry in mountainous areas of Southern Fujian [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2022, 44(2):299-310.
- [29] 田雨, 庄莹, 曹义, 等. 雾灵山低山区土地利用类型对土壤理化性质的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6):41-44.
- Tian Yu, Zhuang Ying, Cao Yi, et al. Effects of land uses on soil physical and chemical properties in hilly areas of Wuling Mountain [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(6):41-44.
- [30] 苏浩浩, 黄桥明, 邓翠, 等. 退化马尾松林恢复过程中芒萁覆盖对土壤微生物生物量碳氮及其周转的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(3):336-344.
- Su Haohao, Huang Qiaoming, Deng Cui, et al. Effects of dicranopteris dichotoma covered on soil microbial biomass carbon and nitrogen and their turnover during restoration of degraded *Pinus massoniana* forest [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(3):336-344.
- [31] Barbosa E R M, Tomlinson K W, Carvalheiro L G, et al. Short-term effect of nutrient availability and rainfall distribution on biomass production and leaf nutrient content of savanna tree species [J]. PLoS One, 2014, 9(3):e92619.
- [32] 倪惠菁. 经营强度对毛竹细根生长及土壤微环境的影响研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2021.
- Ni Huijing. Effect of management intensities on fine root growth and soil microenvironment of *Phyllostachys edulis* forests [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2021.