北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

马尾松人工林林隙大小对土壤理化性质的影响及土壤质量评价

李坚锋 黄正优 欧阳勋志 潘萍 彭泽宇

Effects of forest gap size on soil physicochemical properties and soil quality in *Pinus massoniana* plantations

Li Jianfeng, Huang Zhengyou, Ouyang Xunzhi, Pan Ping, Peng Zeyu

引用本文:
李坚锋, 黄正优, 欧阳勋志, 潘萍, 彭泽宇. 马尾松人工林林隙大小对土壤理化性质的影响及土壤质量评价[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(8):25–39. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260024
Li Jianfeng, Huang Zhengyou, Ouyang Xunzhi, Pan Ping, Peng Zeyu. Effects of forest gap size on soil physicochemical properties and soil quality in *Pinus massoniana* plantations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(8):25–39. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260024

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260024

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

马尾松人工林混交改造下根系菌丝微生物互作对土壤磷转化的调控机制

Regulatory mechanism of root–mycelial–microorganism interactions on soil phosphorus transformation of *Pinus massoniana* plantation under mixed renovation

北京林业大学学报, 2025, 47(3): 83–94. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240322

间伐强度对干热河谷香椿人工林生长及土壤性状的影响

Effects of thinning intensity on stand growth and soil properties of *Toona sinensis* plantations in dry–hot valleys

北京林业大学学报, 2026, 48(5): 72–81. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250507

西南喀斯特地区不同龄组马尾松人工林枯落物碳氮磷化学计量特征及其影响因子

Litter carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometric characteristics and their influencing factors of *Pinus massoniana* plantation with different age groups in karst region of southwestern China

北京林业大学学报, 2024, 46(2): 87–94. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220052

林隙大小对天山云杉幼树更新的影响

Effects of gap size on regeneration of saplings in *Picea schrenkiana* in Xinjiang of northwestern China

北京林业大学学报, 2023, 45(11): 23–32. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230116

杉木人工林阔叶化改造对土壤团聚体酶活性与化学计量比的影响

Effects of broad–leaved transformation of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations on soil aggregate enzyme activities and stoichiometric ratios

北京林业大学学报, 2026, 48(5): 60–71. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250380

山西太岳山油松林土壤质量与有机碳稳定性随林龄的演变特征

Evolutionary characteristics of soil quality and organic carbon stability with forest stand age for *Pinus tabuliformis* forests in the Taiyue Mountain of Shanxi Province, northern China

北京林业大学学报, 2022, 44(10): 112–119. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220320

DOI:10.12171/j.1000−1522.20260024

马尾松人工林林隙大小对土壤理化性质的影响及土壤质量评价

李坚锋[1]　黄正优[2]　欧阳勋志[1]　潘　萍[1]　彭泽宇[1]
（1. 江西农业大学林学院，江西 南昌 330045；2. 江西省兴国县林业局，江西 兴国 342400）

摘要:【目的】探讨林隙大小对土壤质量的影响，以期为优化土壤养分管理和促进森林更新提供科学依据。**【方法】**以江西省兴国县受松材线虫病干扰形成的马尾松人工林林隙为研究对象，按径高比将林隙大小从低到高划分为Ⅰ～Ⅴ 5 个等级并在相邻郁闭林分设置对照，根据边缘木冠幅将林隙内部划为中心区、过渡区和边缘区，分析表层（0～10 cm）和亚表层（10～20 cm）土壤理化性质及其化学计量比在不同等级林隙间的差异以及两者间的关系，并计算土壤质量指数进行综合评价。**【结果】**（1）Ⅴ级林隙表层和亚表层土壤含水量显著高于Ⅱ级、Ⅲ级和Ⅳ级林隙，且Ⅱ级林隙非毛管孔隙度在表层显著高于Ⅰ级林隙而在亚表层则显著高于Ⅴ级林隙（$P < 0.05$）。（2）Ⅳ级林隙的表层和亚表层土壤全磷含量以及亚表层土壤全钾含量均显著高于Ⅴ级林隙，且Ⅱ～Ⅴ级林隙表层土壤全钾含量显著低于对照（$P < 0.05$）。（3）边缘区和过渡区的表层土壤 C∶P 和 N∶P 值显著高于中心区，且Ⅳ级林隙亚表层土壤 C∶N 值和表层土壤 N∶P 值显著高于对照（$P < 0.05$）。（4）随林隙大小等级升高，土壤碳氮磷化学计量比与土壤理化性质之间显著相关的指标组合数量总体呈先减后增趋势。（5）林隙表层和亚表层土壤质量指数范围分别为 0.37～0.45 和 0.27～0.36，不同等级林隙间的土壤质量指数无显著差异（$P > 0.05$）。**【结论】**Ⅳ级林隙在改善土壤磷钾含量方面表现相对较优，是研究区马尾松人工林土壤养分优化的较适宜林隙尺度。

关键词：林隙大小；土壤理化性质；化学计量比；土壤质量；马尾松人工林
中图分类号：S791.247　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2026)08−0025−15
引文格式：李坚锋，黄正优，欧阳勋志，等. 马尾松人工林林隙大小对土壤理化性质的影响及土壤质量评价［J］. 北京林业大学学报，2026，48(8)：25−39. Li Jianfeng, Huang Zhengyou, Ouyang Xunzhi, et al. Effects of forest gap size on soil physicochemical properties and soil quality in *Pinus massoniana* plantations［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(8): 25−39.

Effects of forest gap size on soil physicochemical properties and soil quality in *Pinus massoniana* plantations

Li Jianfeng[1]　Huang Zhengyou[2]　Ouyang Xunzhi[1]　Pan Ping[1]　Peng Zeyu[1]
(1. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, Jiangxi, China;
2. Forestry Bureau of Xingguo County, Jiangxi Province, Xingguo 342400, Jiangxi, China)

Abstract:［**Objective**］Investigating the effects of forest gap size on soil quality provides a scientific basis for optimizing soil nutrient management and promoting forest regeneration.［**Method**］This study examined forest gaps formed by pine wood nematode disturbance in *Pinus massoniana* plantations in Xingguo County, Jiangxi Province, China. Gaps were classified into five classes (Ⅰ−Ⅴ, small to large) based on diameter-to-height ratio, with adjacent closed-canopy stands as controls. According to the crown width of edge trees,

收稿日期: 2026−01−16　**修回日期:** 2026−04−25
基金项目: 国家自然科学基金项目（32260392、32360389），江西省林业局科技创新项目（创新项目 [2025]22 号）。
第一作者: 李坚锋。主要研究方向：森林资源管理与监测。Email: leeljf0229@163.com　地址：330045 江西省南昌市昌北经济技术开发区志敏大道 1101 号。
责任作者: 潘萍，讲师。主要研究方向：森林资源管理与监测、森林可持续经营。Email: panping@jxau.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

each gap was further divided into a central zone, a transitional zone, and an edge zone. We analyzed physicochemical properties and stoichiometric ratios in surface (0−10 cm) and subsurface (10−20 cm) soils for differences among gap classes and interrelationships, and calculated the soil quality index for comprehensive evaluation. [**Result**] (1) Soil water content in both the surface and sub-surface layers of Class Ⅴ gaps was significantly higher than that in Class Ⅱ, Ⅲ, and Ⅳ gaps ($P < 0.05$). Non-capillary porosity in Class II gaps was significantly higher than in Class Ⅰ gaps in the surface layer and significantly higher than in Class Ⅴ gaps in the sub-surface layer ($P < 0.05$). (2) Total phosphorus content in both layers of Class Ⅳ gaps was significantly higher than in Class Ⅴ gaps, and total potassium content in the sub-surface layer of Class Ⅳ gaps was significantly higher than in Class V gaps ($P < 0.05$). Total potassium content in the surface layer of Class Ⅱ ~ Ⅴ gaps was significantly lower than in the control ($P < 0.05$). (3) In the surface layer, C∶P and N∶P ratios in the edge and transition zones were significantly higher than in the central zone ($P < 0.05$). In ClassⅣ gaps, the sub-surface C∶N ratio and surface N∶P ratio were significantly higher than in the control ($P < 0.05$). (4) As gap size class increased, the overall number of significantly correlated index combinations between soil C, N, and P stoichiometric ratios and soil physical and chemical properties showed a decreasing trend. (5) Soil quality index values in the surface and sub-surface layers of the gaps ranged from 0.37 ~ 0.45 and 0.27 ~ 0.36, respectively. There were no significant differences in soil quality index among different gap size classes ($P > 0.05$). [**Conclusion**] Class Ⅳ gaps performed relatively better in improving soil phosphorus and potassium content, and represent a more suitable gap scale for optimizing soil nutrients in *P. massoniana* plantations in the study area.

Key words: forest gap size; soil physicochemical properties; stoichiometric ratios; soil quality; *Pinus massoniana* plantations

林隙是指由于林冠层乔木死亡或被移除等原因，导致林冠层出现不连续空隙的现象，是森林生态系统中普遍存在且重要的小尺度干扰类型之一[1]。林隙的形成不仅改变林内光照辐射、降水截留及温湿度等微气候条件，还影响地表凋落物输入与分解过程，进而改变土壤理化性质[2]。土壤作为森林生态系统的核心组分，其质量状况决定了森林生产力和生态系统的恢复韧性。探讨林隙对土壤质量的影响，有助于揭示小尺度干扰下土壤生态过程的变化，为优化土壤养分管理、促进森林更新和实现可持续经营提供科学依据。

林隙大小常被视为反映环境异质性和资源有效性的关键指标[3]。相比于采用林隙面积进行大小分级，林隙径高比（林隙直径与边缘木平均高的比值）考虑了太阳辐射对林隙环境的影响，能够更准确反映林隙相对于周围林分的开敞程度[4]。同时，对于林冠层高度相对整齐的人工林，径高比更能客观表征林隙大小对微环境的干扰强度[5−6]。马尾松（*Pinus massoniana*）是我国亚热带地区典型的乡土针叶树种，也是造林与生态修复的重要先锋树种。近年来，受松材线虫病等自然灾害影响，马尾松人工林中的林隙干扰现象较为常见[7]。研究表明，林隙大小显著改变了马尾松人工林土壤理化性质[8−9]，但受研究区域、林隙年龄等因素的影响，土壤理化性质对林隙大小的响应规律在不同研究中并不一致。土壤生态化学计量比作为衡量元素动态平衡的重要指标[10]，其与林隙大小之间的关系也尚不明晰[11]。土壤质量是多种土壤因子的综合反映，其中基于最小数据集构建的土壤质量指数能够有效减少指标之间的信息冗余，因而被广泛应用[12]。然而，以往林隙土壤研究多侧重于分析单个土壤指标随林隙大小的变化趋势，缺乏对土壤质量的综合评价，难以全面量化林隙干扰带来的整体效应。

江西省兴国县曾是水土流失较为严重的地区，马尾松因适应性强而被广泛用于人工植被恢复[13]。由松材线虫病诱发形成的林隙干扰已成为该区域马尾松人工林植被更新的重要驱动力。因此，本文以兴国县受松材线虫病干扰形成的马尾松人工林林隙为研究对象，基于径高比分析不同大小等级林隙的土壤理化性质及碳氮磷化学计量比，并构建土壤质量评价模型，以期为赣南及类似生态区受损马尾松人工林的土壤养分管理和林隙更新调控提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

兴国县（26°03′ ~ 26°44′N，115°01′ ~ 115°52′E）地处江西省中南部，面积 3 215 km^2。地貌以低山、丘陵为主，土壤类型主要为红壤。属于亚热带季风

湿润气候，雨量充沛，四季分明，年均气温 18.8 ℃，年均降水量 1 515.6 mm，年均无霜期 284 d。森林覆盖率为 72.2%，主要植被类型有常绿阔叶林、马尾松林和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林等。

1.2　研究方法

1.2.1　样地设置与调查

在样地设置前，对研究区进行充分踏查发现，马尾松人工林林隙的形成主要归因于松材线虫病导致的树木折干与枯倒，且林隙形状多为近椭圆形。此外，根据林隙内生长的马尾松年龄、枯木腐烂程度等进行林隙年龄估测时发现，研究区内多数林隙的年龄在 10 年左右。因此，研究团队于 2023 年 7—8 月在主要分布区设置并调查了 40 个林隙样地，其中林隙的形状均为近椭圆形且年龄在 10 年左右。

本研究采用扩展林隙概念，即林隙指由边缘木树干所围成的多边形[14]。由于林隙边缘木高度对林隙的发展及其环境因子影响较大，因此采用林隙长短轴长度的平均值(D)与边缘木平均高度(H)的比值即径高比(D/H)来表示林隙大小。其中，林隙长轴指边缘木穿过林隙中心的最大直线距离，短轴则是垂直于长轴且同样穿过林隙中心的直线距离。在所设置的 40 个林隙样地中，林隙径高比均值为 1.14，最小值和最大值分别为 0.55 和 2.40。综合考虑前人对林隙径高比的划分依据[5]和样地径高比实际情况，采用上限排外法将本研究的林隙划分为 5 个等级：Ⅰ级($0.5 \leqslant D/H < 0.75$，小林隙)、Ⅱ级($0.75 \leqslant D/H < 1.0$，中等偏小林隙)、Ⅲ级($1.0 \leqslant D/H < 1.25$，中等林隙)、Ⅳ级($1.25 \leqslant D/H < 1.50$，中等偏大林隙)和Ⅴ级($D/H \geqslant 1.50$，大林隙)，各等级林隙的样地数分别为 8、8、11、6 和 7。通过方差分析和卡方检验可知，不同大小等级林隙样地在海拔、坡度、坡位和坡向上的差异均不显著($P > 0.05$)，表明各等级林隙样地的立地条件较为一致。

在每个林隙样地内共布设 9 个 2 m × 2 m 的小样方进行因子调查。其中，在林隙中心(即中心区)设 1 个小样方，在边缘区设 4 个小样方，此处的边缘区是指边缘木冠幅(朝林隙中心)的垂直投影区域。在林隙长轴与短轴方向上离边缘一半处(即过渡区)设 4 个小样方。此外，在每个林隙边缘外约 10 m 处还布设了 4 个 10 m × 10 m 的郁闭林分作为对照，并在对照样方中分别设 5 个 2 m × 2 m 的小样方。样方布设示意图见图 1。以林隙中心点代表样地的地理位置，调查林隙及对照的植被和立地因子。

1.2.2　土壤取样与测定

在每个小样方内采用五点取样法对土壤进行分层取样，取样层次为表层(0 ~ 10 cm)和亚表层(10 ~ 20 cm)。用环刀采集土壤样品并用铝盒取约 10 g 土壤，用于测定土壤物理性质。在每个小样方内将同一土层 5 个点位采集的土壤样品充分混合后，按四分法取约 1 kg 土壤样品放至自封袋，用于测定土壤化学性质。土壤样品测定方法：采用烘干法测定土壤含水量，利用环刀法测定土壤容重、持水量和孔隙度。pH 值采用电位法测定，有机质采用重铬酸钾氧化−外加热法测定(下文有机碳由有机质换算得到)，全氮采用硫酸消化−凯氏定氮法测定，全磷采用酸溶−钼锑抗比色法测定，全钾采用氢氧化钠熔融−火焰光度法测定，碱解氮采用碱解扩散法测定，有效磷采用氟化铵盐酸比色法测定，速效钾采用醋酸铵提取−火焰光度法测定[15]。

1.2.3　土壤质量评价方法

(1)最小数据集的建立。采用主成分分析法提取特征值≥1 的主成分，并将因子载荷≥0.5 的指标划分为同一组。若某指标在多个主成分中的载荷均≥0.5，则根据指标间相关性分析结果，将其归入相关

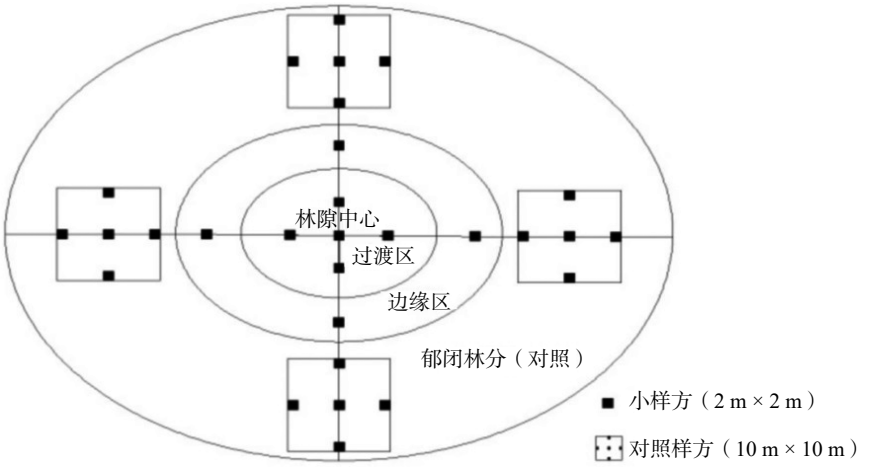


图 1　样方布设示意图

Fig. 1　Schematic diagram of sample layout

性较低的组别。随后，在各组内筛选 Norm 值不低于该组最高 Norm 值 90% 的指标作为候选。若组内指标间存在显著相关性（$r > 0.5$），则仅保留 Norm 值最高的指标纳入最小数据集；若组内指标相关性不显著，则将这些指标全部纳入最小数据集。Norm 值的计算公式如下[16]。

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

式中：N_{ik} 表示第 i 个指标在特征值≥1 的前 k 个主成分上的累积载荷，u_{ik} 为第 i 个变量在第 k 个主成分上的因子载荷，λ_k 表示第 k 个主成分的特征值。

（2）土壤质量指数计算。根据指标特性选取适宜的隶属函数进行标准化，其中土壤容重采用反 S 型隶数函数，其余土壤理化指标均采用 S 型隶数函数，其计算公式如下[17]。

S 型隶属函数：

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \geqslant b \\ \dfrac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 0, & x \leqslant a \end{cases} \tag{2}$$

反 S 型隶属函数：

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \leqslant a \\ \dfrac{x-b}{a-b}, & a < x < b \\ 0, & x \geqslant b \end{cases} \tag{3}$$

式中：$f(x)$表示隶属函数，x 表示土壤指标实测值，a、b 分别表示土壤指标的最小值和最大值。

将土壤各指标的隶属度值与权重进行加权求和，得到土壤质量指数，其计算公式如下。

$$\mathrm{SQI} = \sum_{i=1}^{n}(F_i W_i) \tag{4}$$

式中：n 为土壤指标个数，F_i 表示第 i 个指标的隶属度值，W_i 表示第 i 个指标的权重（即主成分分析中第 i 个指标公因子方差与总方差的比值）。

1.3 数据分析

在 SPSS 25.0 软件中，采用双因素方差分析法（Two-way ANOVA）探究林隙大小与林隙内部位置对土壤指标的影响，采用 Tukey 事后检验进行组间多重比较。采用配对样本 t 检验对林隙与对照之间的土壤指标差异进行分析。在 R 4.4.2 软件中，通过 Correlation 程序包进行 Pearson 相关性分析。在 Excel 2010 和 Origin 2024 软件中完成图表的绘制。

2 结果与分析

2.1 不同大小林隙土壤理化性质及碳氮磷化学计量比

2.1.1 土壤物理性质

双因素方差分析结果（表 1）表明，在表层土壤中，林隙大小对土壤含水量、毛管持水量和非毛管孔隙度影响显著（$P < 0.05$）；在亚表层土壤中，林隙大小对土壤含水量具有极显著影响（$P < 0.01$），对土壤容重和非毛管孔隙度具有显著影响（$P < 0.05$）。然而，林隙大小对土壤最大持水量、田间持水量、毛管孔隙度和总孔隙度均无显著影响（$P > 0.05$）。此外，林隙内部位置及其与林隙大小的交互作用对两个土层所有土壤物理指标均未表现出显著影响（$P > 0.05$）。

对受林隙大小影响显著的土壤物理性质作进一步多重比较分析，由图 2 可知，对于土壤含水量，在表层Ⅰ级和Ⅴ级林隙均显著高于Ⅱ级、Ⅲ级和Ⅳ级林隙（$P < 0.05$），在亚表层Ⅴ级林隙显著高于Ⅱ级、Ⅲ级和Ⅳ级林隙（$P < 0.05$）。对于土壤非毛管孔隙度，在表层Ⅲ级和Ⅱ级林隙均显著高于Ⅰ级林隙（$P < 0.05$），在亚表层Ⅳ级和Ⅱ级林隙均显著高于Ⅴ级林隙（$P < 0.05$）。此外，Ⅲ级和Ⅴ级林隙的亚表层土壤容重显著高于Ⅰ级林隙（$P < 0.05$），且Ⅰ级、Ⅳ级和Ⅴ级林隙的表层毛管持水量显著高于Ⅲ级林隙（$P < 0.05$）。

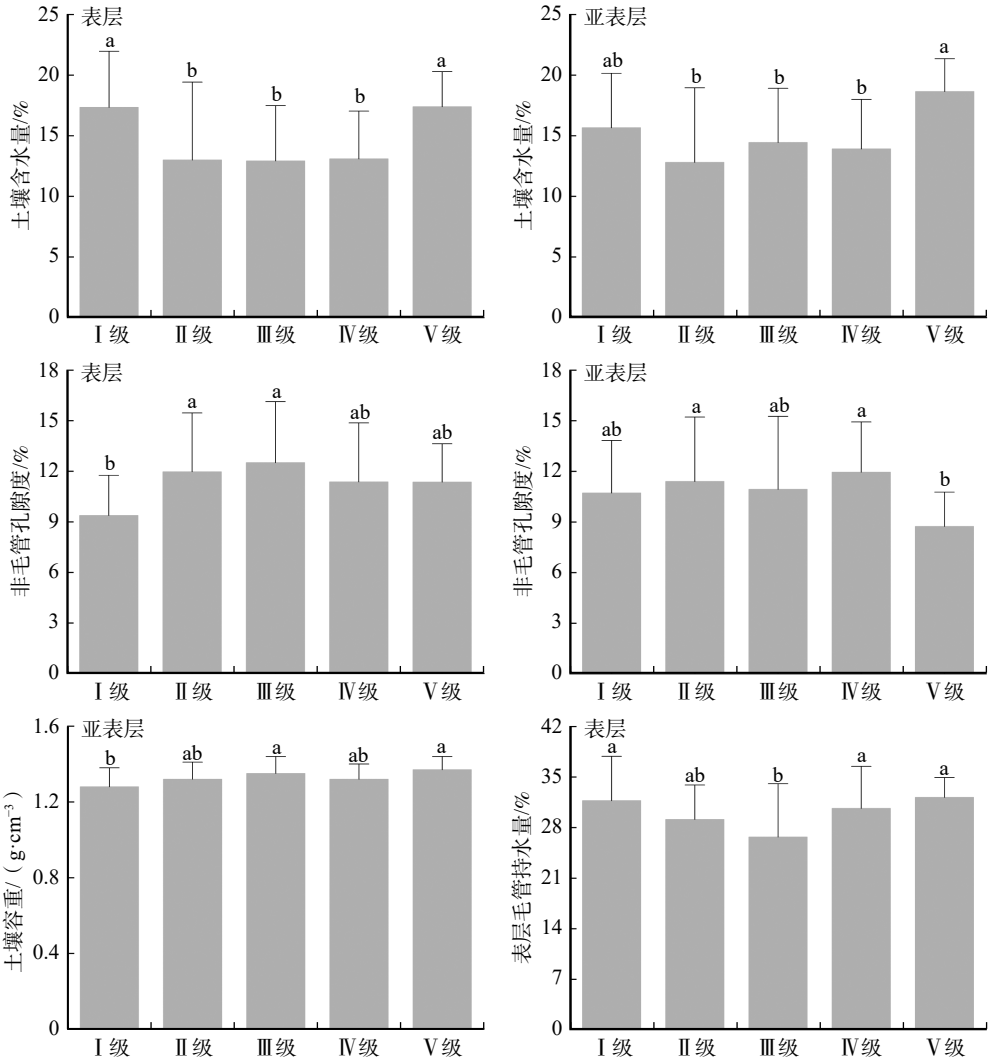
将各等级林隙土壤物理性质与对照进行配对样本 t 检验，结果如图 3 所示。除Ⅰ级林隙的亚表层

表 1 土壤物理性质的双因素方差分析（F 值）

Tab. 1 Two-way ANOVA(F value) of soil physical properties

土层	变异来源	土壤容重	土壤含水量	最大持水量	毛管持水量	田间持水量	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	总孔隙度
表层	林隙大小	1.51	4.72*	1.83	3.44*	2.28	2.24	3.11*	0.89
	林隙内部位置	0.08	0.02	0.16	0.08	0.05	0.11	0.05	0.19
	林隙大小 × 林隙内部位置	0.12	0.02	0.06	0.01	0.01	0.02	0.18	0.10
亚表层	林隙大小	2.58*	3.40**	0.43	1.08	0.89	0.66	2.13*	0.83
	林隙内部位置	0.13	0.03	0.04	0.03	0.05	0.01	0.01	0.02
	林隙大小 × 林隙内部位置	0.13	0.14	0.14	0.11	0.10	0.13	0.05	0.16

注：*表示$P < 0.05$，**表示$P < 0.01$。下同。



表层、亚表层分别指 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm 土层。不同小写字母表示不同大小等级林隙间存在显著性差异（$P < 0.05$）。下同。

图 2　土壤物理性质的多重比较结果

Fig. 2　Multiple comparison results of soil physical properties

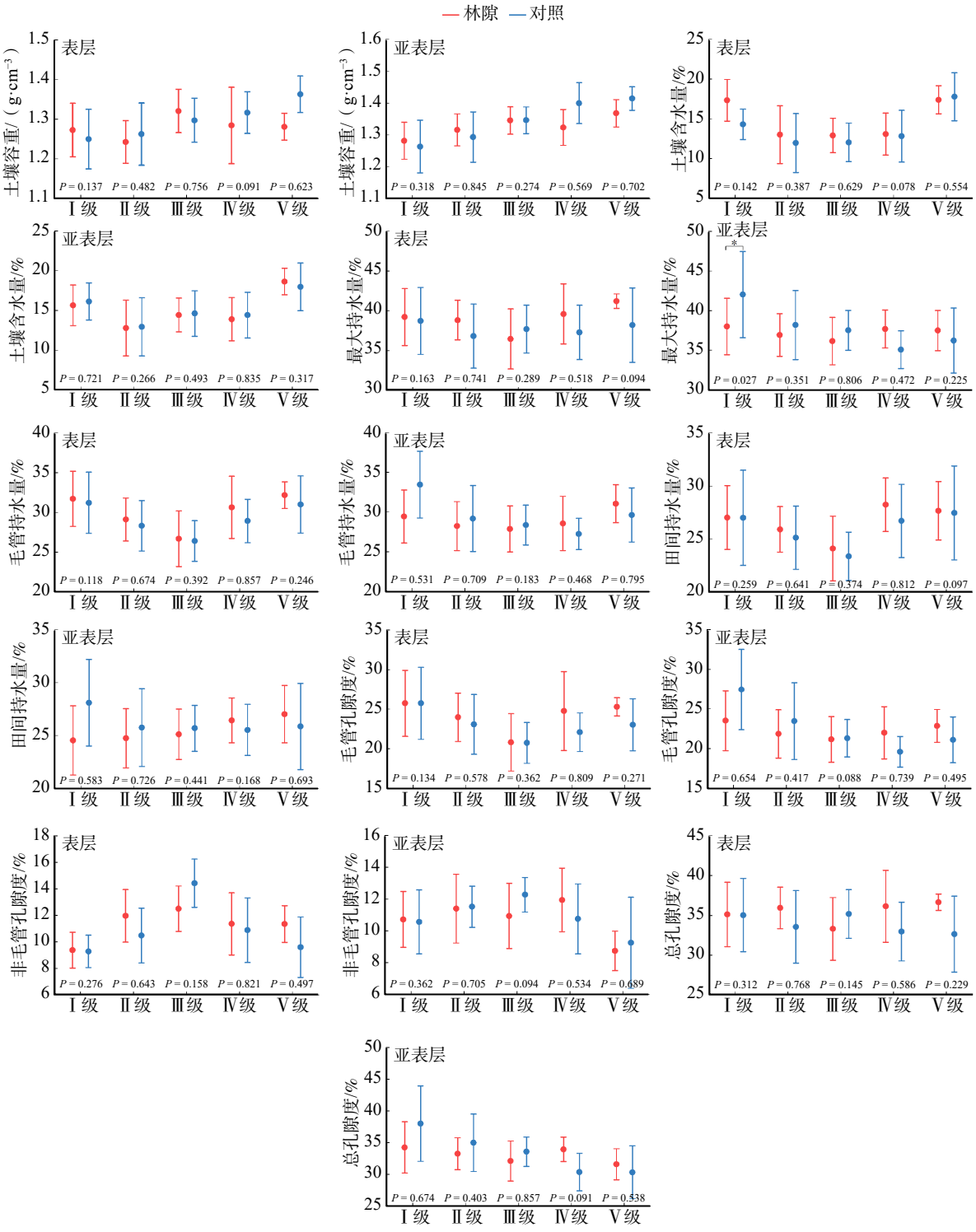
土壤最大持水量显著低于对照外($P < 0.05$)，其余土壤物理性质指标在林隙与对照间的差异均不显著($P > 0.05$)。

2.1.2　土壤化学性质

双因素方差分析结果(表 2)表明，在表层和亚表层土壤中，林隙大小对土壤全磷和速效钾含量表现出极显著影响($P < 0.01$)，对土壤全钾含量具有显著影响($P < 0.05$)，且表层和亚表层土壤有效磷含量分别受到林隙大小的显著($P < 0.05$)和极显著($P < 0.01$)影响。然而，林隙大小对土壤 pH 值、有机质、全氮和碱解氮含量均无显著影响($P > 0.05$)。此外，林隙内部位置及其与林隙大小的交互作用对两个土层土壤所有化学指标均未表现出显著影响($P > 0.05$)。

对受林隙大小影响显著的土壤化学性质作进一步多重比较(图 4)。对于全磷含量，Ⅳ级林隙在两个土层中均显著高于Ⅱ级、Ⅲ级和Ⅴ级($P < 0.05$)。对于全钾含量，在表层Ⅲ级林隙显著高于Ⅴ级林隙($P < 0.05$)，在亚表层Ⅲ级和Ⅳ级林隙均显著高于Ⅴ级林隙($P < 0.05$)。对于有效磷含量，在表层Ⅰ级和Ⅳ级林隙显著高于Ⅴ级林隙($P < 0.05$)，在亚表层Ⅰ级和Ⅳ级林隙均显著高于Ⅱ级、Ⅲ级和Ⅴ级林隙($P < 0.05$)。对于速效钾含量，Ⅴ级林隙在两个土层中均显著高于其他等级林隙($P < 0.05$)。

各等级林隙土壤化学性质与对照的配对检验结果如图 5 所示。Ⅰ级林隙表层 pH 值显著低于对照($P < 0.05$)，而Ⅱ级林隙亚表层 pH 值和Ⅳ级林隙亚表层有机质含量则显著高于对照($P < 0.05$)。在土壤全量养分方面，Ⅲ级林隙亚表层全氮、Ⅰ级林隙亚表层全磷、Ⅱ ~ Ⅴ级林隙表层全钾以及Ⅲ级和Ⅴ级林隙亚表层全钾含量均显著低于对照($P < 0.05$)。对于土壤速效养分，Ⅰ级林隙表层碱解氮、Ⅲ级和Ⅳ级林隙表层有效磷含量显著低于对照($P < 0.05$)，而Ⅳ级林隙亚表层有效磷、Ⅴ级林隙表层和亚表层速效钾



实心圆圈表示平均值, 垂直线表示标准误。*表示某一大小等级林隙与相应的对照间存在显著性差异（$P<0.05$）。下同。

图 3 各等级林隙与对照的土壤物理性质配对检验结果

Fig. 3 Paired tests of soil physical properties among different forest gap sizes and the control

含量显著高于对照($P<0.05$)。

2.1.3 土壤碳氮磷化学计量比

双因素方差分析结果(表 3)表明，林隙内部位置对表层土壤 C∶P 和 N∶P 值具有显著影响($P<0.05$)，但对亚表层 C∶P 和 N∶P 值以及两个土层的 C∶N 值均无显著影响($P>0.05$)。林隙大小及其与林隙内部位置的交互作用对两个土层 C∶N、C∶P 和 N∶P 值均无显著影响($P>0.05$)。

对受林隙内部位置影响显著的土壤 C∶P 和 N∶P 作进一步多重比较分析，由图 6 可知，表层土壤 C∶P 和 N∶P 值在林隙内呈现中心区向边缘区增大的趋势，其中边缘区和过渡区均显著大于中心区($P<0.05$)。

各等级林隙与对照土壤碳氮磷化学计量比的配

表 2　土壤化学性质的双因素方差分析（*F* 值）

Tab. 2　Two-way ANOVA(*F* value) of soil chemical properties

土层	变异来源	pH	有机质	全氮	全磷	全钾	碱解氮	有效磷	速效钾
表层	林隙大小	1.21	0.94	1.06	4.82**	2.36*	1.69	2.41*	9.71**
	林隙内部位置	1.60	0.18	0.31	0.65	0.03	1.79	1.35	0.23
	林隙大小 × 林隙内部位置	0.11	0.08	0.07	0.26	0.02	0.25	0.17	0.61
亚表层	林隙大小	2.15	0.99	1.34	5.01**	2.69*	2.19	3.56**	5.86**
	林隙内部位置	0.86	0.07	0.14	0.07	0.01	1.34	0.35	0.18
	林隙大小 × 林隙内部位置	0.30	0.12	0.16	0.08	0.01	0.68	0.15	0.75

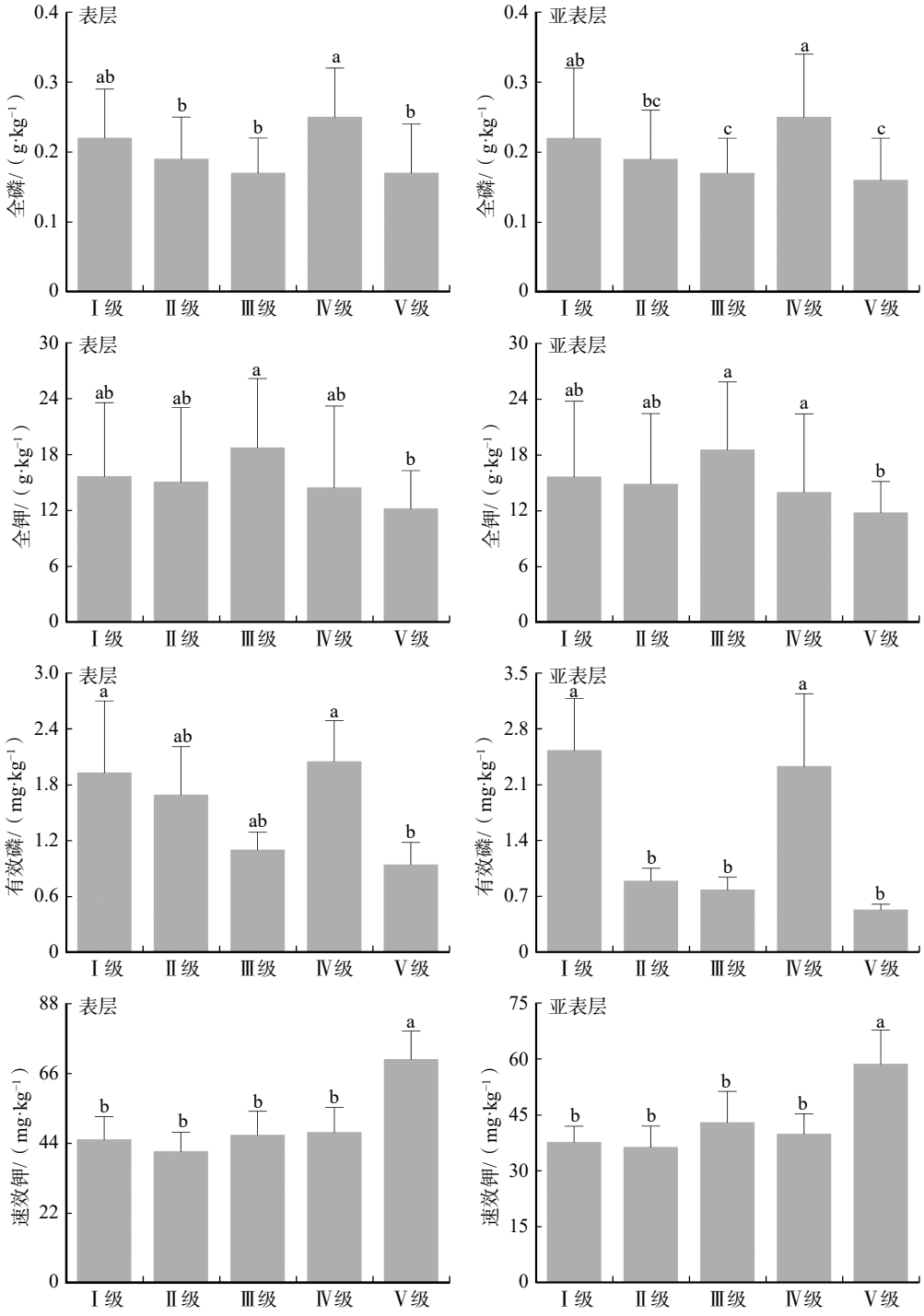


图 4　土壤化学性质的多重比较结果

Fig. 4　Multiple comparison results of soil chemical properties

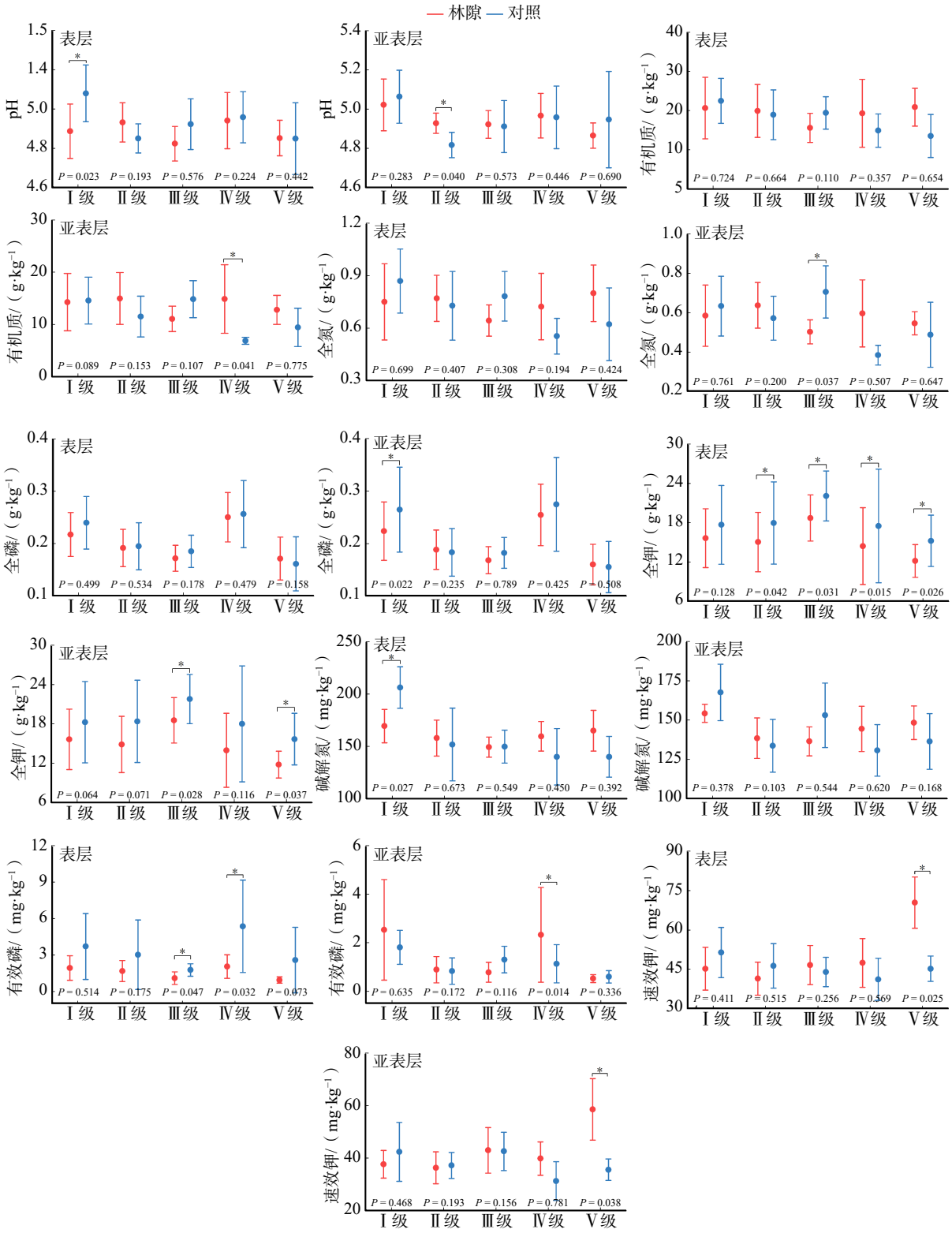


图 5 各等级林隙与对照的土壤化学性质配对检验结果

Fig. 5 Paired tests of soil chemical properties among different forest gap sizes and the control

对样本 t 检验结果见图 7。Ⅳ级林隙亚表层土壤的 C∶N 值和Ⅳ级林隙表层土壤 N∶P 值显著高于对照（$P < 0.05$），而Ⅲ级林隙亚表层土壤 N∶P 值则显著低于对照（$P < 0.05$）。

2.2 土壤碳氮磷化学计量比与土壤理化性质的关系

土壤碳氮磷化学计量比与土壤理化性质的相关性分析结果如图 8 所示。总体而言，随林隙大小等级升高，土壤碳氮磷化学计量比与理化性质之间的相关性强度呈先减后增趋势，其中Ⅰ级林隙内显著相关的变量组合数较多。此外，表层土壤 C∶N 值在Ⅰ级林隙与 pH 值呈显著负相关（$P < 0.05$），而在Ⅴ级林隙中则呈极显著正相关（$P < 0.01$）。

表 3　土壤碳氮磷化学计量比的双因素方差分析（*F* 值）

Tab. 3　Two-way ANOVA(*F* value) of stoichiometric ratios of soil carbon, nitrogen, and phosphorus

土层	变异来源	C∶N	C∶P	N∶P
表层	林隙大小	0.91	1.06	2.17
	林隙内部位置	1.89	3.34*	3.41*
	林隙大小 × 林隙内部位置	0.24	0.14	0.11
亚表层	林隙大小	0.46	0.49	1.21
	林隙内部位置	0.08	0.23	0.30
	林隙大小 × 林隙内部位置	0.10	0.09	0.11

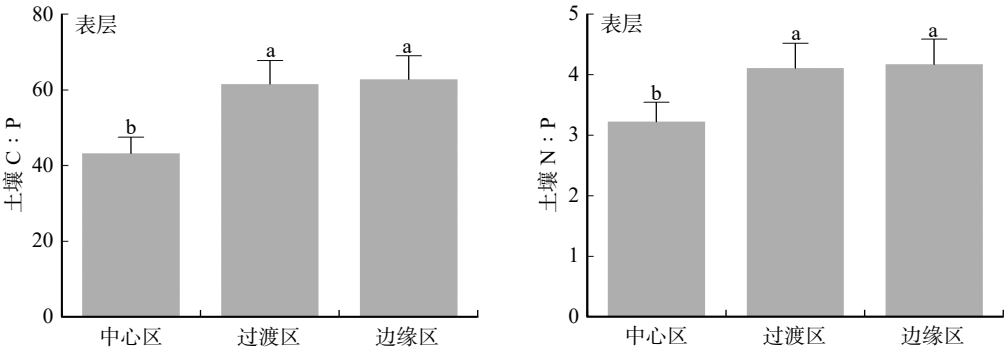


图 6　土壤碳氮磷化学计量比的多重比较结果

Fig. 6　Multiple comparison results of stoichiometric ratios of soil carbon, nitrogen, and phosphorus

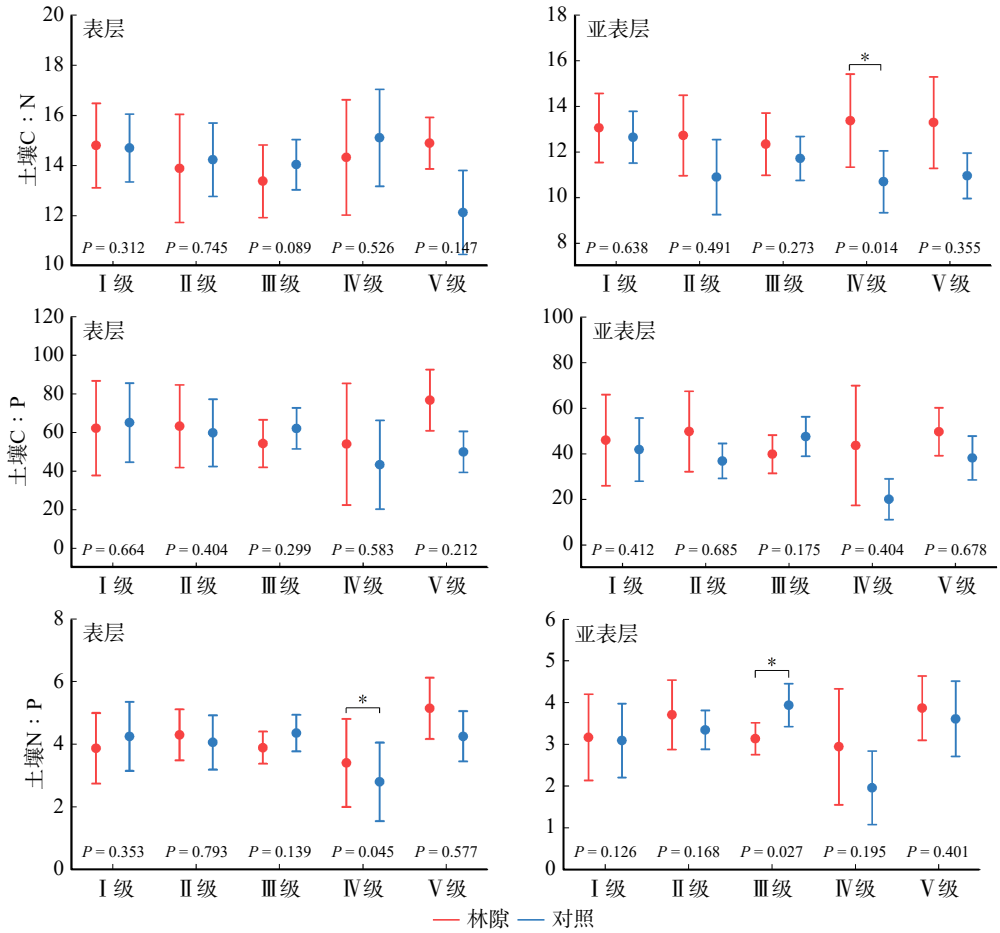
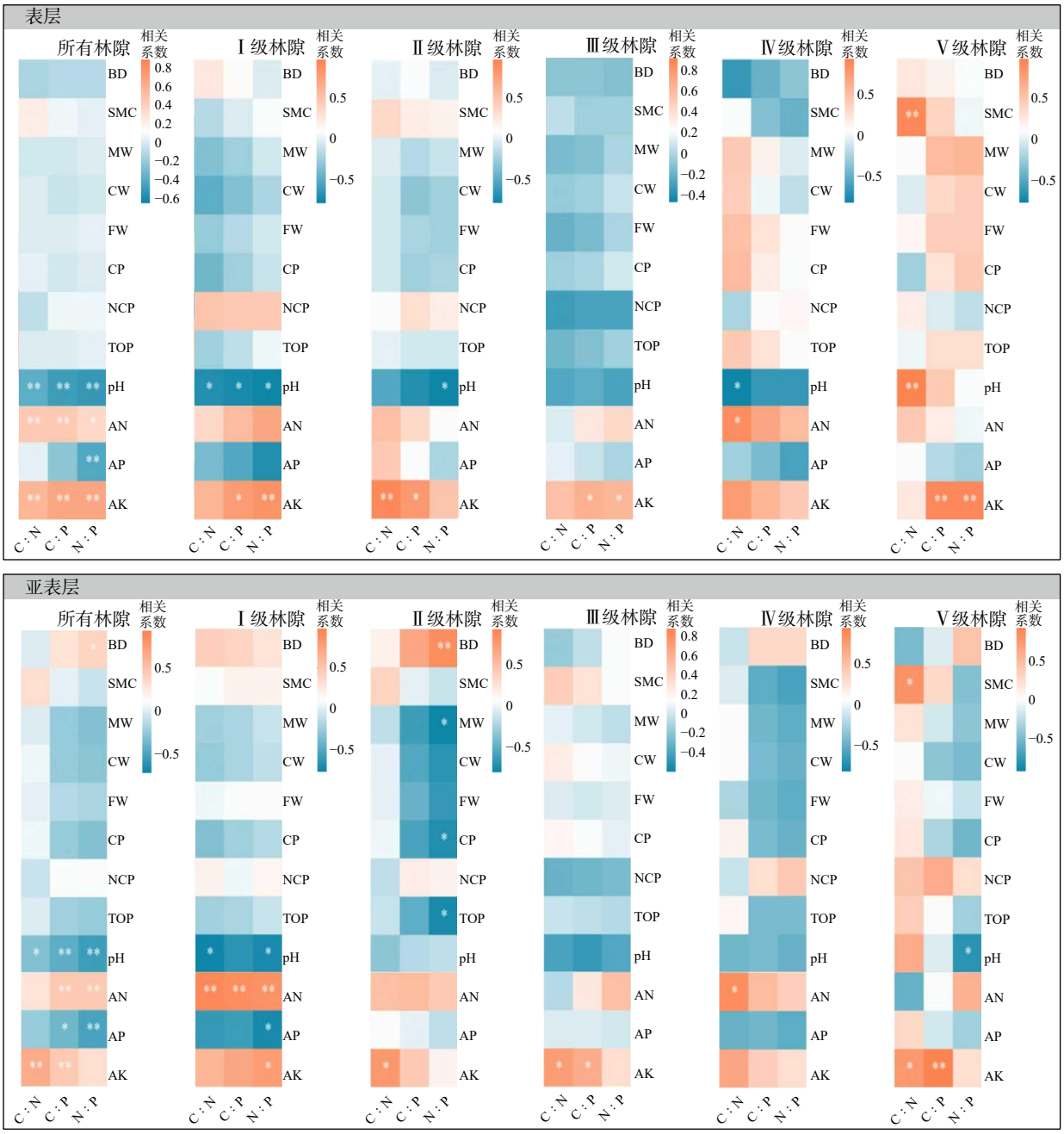


图 7　各等级林隙与对照的土壤碳氮磷化学计量比配对检验结果

Fig. 7　Paired tests of stoichiometric ratios of soil carbon, nitrogen, and phosphorus among different forest gap sizes and the control



BD. 土壤容重, SMC. 土壤含水量, MW. 最大持水量, CW. 毛管持水量, FW. 田间持水量, CP. 毛管孔隙度, NCP. 非毛管孔隙度, TOP. 总孔隙度, OM. 有机质, AN. 碱解氮, AP. 有效磷, AK. 速效钾。*表示相关性显著（$P < 0.05$）, **表示相关性极显著（$P < 0.01$）。下同。

图 8 土壤碳氮磷化学计量比与土壤理化性质的相关性

Fig. 8 Correlation between soil carbon nitrogen phosphorus stoichiometry and soil physicochemical properties

2.3 林隙土壤质量评价

2.3.1 最小数据集指标筛选

KMO 和巴特利特检验显示：KMO = 0.65 > 0.5 且显著性小于 0.001，表明本研究数据可进行主成分分析。由表 4 可知，特征值 ⩾ 1 的前 4 个主成分方差贡献率分别为 34.96%、19.67%、12.50% 和 11.08%，累计贡献率达到了 78.21%，可解释原始指标的大部分信息。根据各指标的因子载荷值（表 4）和相关性（图 9）将其划分为 3 个组别，由公式（1）计算得到各指标的 Norm 值。第 1、2 和 3 组进入最小数据集的指标分别为毛管孔隙度、全氮和非毛管孔隙度，将上述 3 个指标作为最终的最小数据集指标用于计算土壤质量指数。

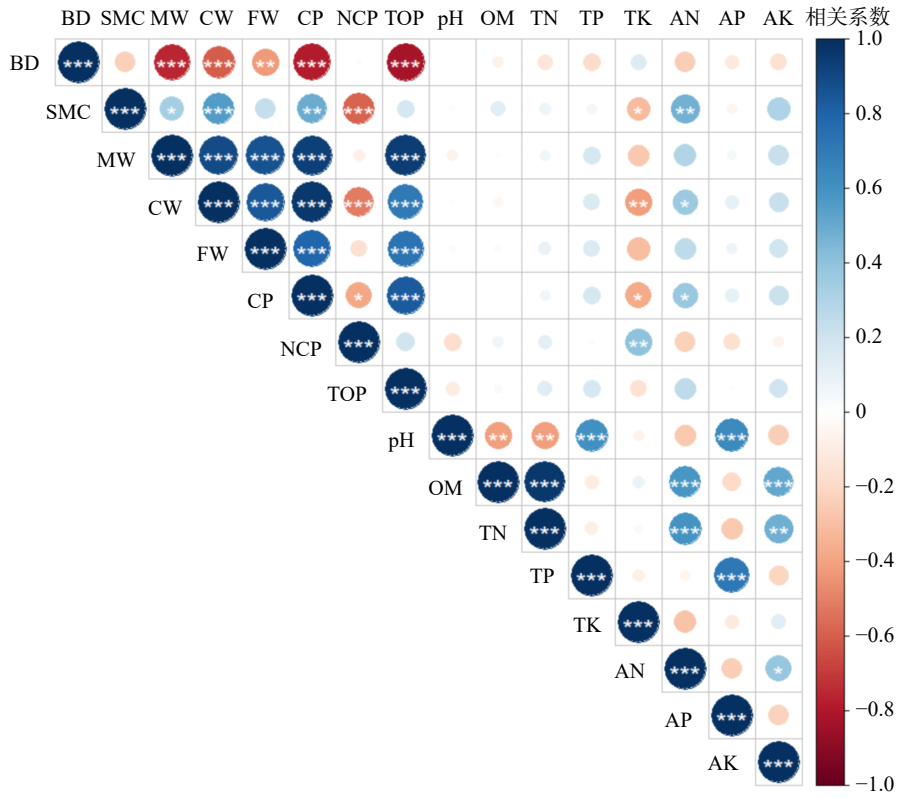
2.3.2 土壤质量指数

基于最小数据集构建的土壤质量指数如图 10 所示，林隙表层和亚表层土壤质量指数分别介于 0.37 ~ 0.45 和 0.27 ~ 0.36 之间，其中Ⅴ级林隙表层和Ⅱ级林隙亚表层的土壤质量指数相对较高。双因素方差分析结果表明，土层对土壤质量指数存在极显著影响（$P < 0.01$），而林隙大小及其与土层的交互

表 4　土壤质量指标主成分分析结果及 Norm 值

Tab. 4　Results of principal component analysis of soil quality indicators and their Norm values

指标	主成分				Norm值	分组	公因子方差	权重
	PC1	PC2	PC3	PC4				
土壤容重	−0.76	0.05	0.37	−0.11	1.88	1	–	–
土壤含水量	0.51	0.02	0.61	−0.17	1.50	1	–	–
最大持水量	0.94	−0.13	−0.27	−0.06	2.28	1	–	–
毛管持水量	0.93	−0.21	0.16	−0.17	2.25	1	–	–
田间持水量	0.84	−0.14	−0.08	−0.08	2.01	1	–	–
毛管孔隙度	0.97	−0.16	−0.01	−0.08	2.31	1	0.73	0.31
非毛管孔隙度	−0.21	0.21	−0.83	0.23	1.36	3	0.71	0.30
总孔隙度	0.86	−0.05	−0.48	0.05	2.15	1	–	–
pH	−0.14	−0.66	0.19	0.42	1.36	2	–	–
有机质	0.20	0.82	0.13	0.44	1.65	2	–	–
全氮	0.25	0.81	0.09	0.44	1.66	2	0.91	0.39
全磷	0.15	−0.52	0.07	0.72	1.37	2	–	–
全钾	−0.35	0.22	−0.56	0.13	1.22	3	–	–
碱解氮	0.40	0.52	0.41	0.27	1.49	2	–	–
有效磷	0.04	−0.57	0.13	0.67	1.36	2	–	–
速效钾	0.38	0.57	0.07	0.06	1.36	2	–	–
特征值	5.59	3.15	2.00	1.77				
方差贡献率/%	34.96	19.67	12.50	11.08				
累计贡献率/%	34.96	54.63	67.13	78.21				

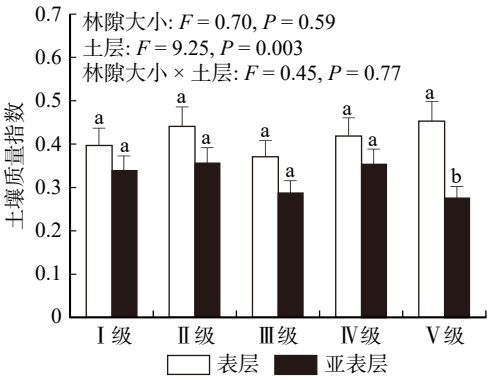


***表示在 $P < 0.001$水平上显著相关。

图 9　土壤理化性质相关性分析

Fig. 9　Correlation analysis of soil physicochemical properties

作用对土壤质量指数均未产生显著影响($P > 0.05$)。多重比较分析结果显示，对于Ⅴ级林隙，表层土壤质量指数极显著高于亚表层($P < 0.01$)。



不同小写字母表示同一等级林隙不同土层间存在显著性差异($P < 0.05$)。

图 10 各等级林隙的土壤质量指数

Fig. 10 Soil quality index of different gap classes

3 讨 论

3.1 林隙大小对土壤理化性质及碳氮磷化学计量比的影响

林隙形成后冠层郁闭度的降低会使地表直接暴露于降雨侵蚀之下，易导致表层土壤板结或孔隙度下降[18]。然而，本研究发现，不同等级林隙间的表层土壤容重、毛管孔隙度和总孔隙度均无显著差异，这与杨家慧等[19]的研究结果一致。土壤容重与孔隙度的稳定性可能与干扰方式差异有关。本研究中的林隙由松材线虫病引起的树木枯死和折断形成，属于被动式干扰，避免了传统采伐作业中重型机械对土壤的物理压实。此外，经过 10 年左右的植被演替，林隙内灌木与草本层根系的交织作用可能已有效重建表层土壤的团聚体结构，从而抵消了地表裸露带来的负面影响[20]。土壤水分指标则呈现不同规律。Ⅴ级林隙的土壤含水量显著高于Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级林隙，这一结果符合林隙水文过程的漏斗效应与雨量再分配理论。林隙大小增加导致冠层截留减少，穿透雨输入随之显著增加；同时，Ⅴ级林隙的中心区距边缘树木较远，处于根系吸水竞争较弱的区域，形成水分输入增加与蒸腾支出减少的双重效应，共同维持较高的土壤含水量[21−22]。

在土壤化学性质方面，本研究发现，Ⅳ级林隙有利于土壤全磷和有效磷积累。各等级林隙的光照强度和空气温度分别介于 21 169～24 592 lx 和 34.9 ℃～38.2 ℃ 之间，Ⅳ级林隙处于中间水平(23 053 lx 和 37.4 ℃)。可能的原因是Ⅳ级林隙营造了相对适宜的光照和温度条件，既能促进林下植被适度生长以增加含磷凋落物的输入，又能优化相关酶活性以高效矿化有机磷[23−24]。此外，Ⅴ级林隙的土壤速效钾含量显著高于其他等级林隙，而全钾含量显著较低，这一结果与前人研究[25−26]一致，即林隙干扰可降低部分全量养分含量，却提升速效养分水平，且效应强度随林隙大小增加而增强。这可能是因为Ⅴ级林隙中相对较多的病死松树残体可作为富钾重要补充来源之一[27]，同时林隙内喜阳先锋植物(如蕨类)通过吸收和归还循环进一步促进深层钾向表层有效态转化，从而导致土壤速效钾含量显著提高[28]。此外，在大林隙中林冠截留量大幅减少，降雨淋溶加剧，导致林隙内易迁移的全钾随水流失[29]。本研究中表层土壤全钾对林隙的出现具有较高敏感性，Ⅱ～Ⅴ级林隙的表层土壤全钾含量均显著低于对照。这可能是因为研究区属于南方红壤丘陵区，而红壤普遍存在酸性较强和养分缓冲能力偏弱等特征，因此林隙形成后林冠截留减弱，表层淋溶与细颗粒迁移增强，从而导致全钾含量显著下降[30−31]。

土壤碳氮磷化学计量比在揭示土壤养分限制格局、驱动植物群落演替以及调控生产力形成等方面具有重要意义[32]。本研究发现，各林隙大小等级间土壤 C∶N、C∶P 和 N∶P 值总体波动较小，表明林隙干扰不足以打破土壤元素计量结构的整体稳定性。相关性分析结果表明，表层土壤 C∶N 值与 pH 的相关性从Ⅰ级林隙的显著负相关转变为Ⅴ级林隙的极显著正相关。这可能是因为驱动土壤碳氮循环的主导因子发生了生境依赖性转换。在Ⅰ级林隙中，土壤酸度可能限制微生物矿化，pH 微小升高即可促进氮素矿化，从而降低土壤 C∶N 值；而在Ⅴ级林隙中，随着光照和温度增强，环境限制缓解，底物(碳源)可利用性或微生物群落结构变化可能成为新的主要驱动力[33−34]。

3.2 林隙大小对土壤质量的影响

当前围绕林隙土壤质量的研究较为缺乏，而对其展开研究可科学评估林隙干扰带来的整体效应，为土壤可持续管理提供参考。本研究通过分析林隙大小对土壤性质及质量的影响，有助于确定土壤养分优化的适宜林隙大小阈值。单一的土壤指标难以反映土壤综合质量，一般基于最小数据集构建土壤质量指数来评价土壤综合质量。本研究在构建最小数据集时只涉及土壤理化指标，没有土壤生物学指标，但不少研究表明，土壤生物学指标与土壤理化指标之间存在较好的相关性[35−36]。因此，进行土壤质量评价时仅考虑土壤理化指标，在一定程度上也能够反映土壤的综合质量。本研究得出，土壤质量指数在不同等级林隙间未表现出显著差异，一方面可能是因为林隙形成时间较短，林隙对土壤整体质量

的影响存在一定时滞性; 其次受指标筛选规则, 最小数据集保留了更多对林隙大小不敏感的土壤物理指标。与本研究结果不同, 王永康等[37]对福建马尾松林的研究发现, 不同林隙面积的土壤质量指数存在较大差异, 这可能主要与取样时间及分析方法等有关。

综上, Ⅳ级林隙在改善土壤磷钾含量方面表现相对较优, 是研究区马尾松人工林土壤养分优化的较适宜林隙尺度。因此, 在对马尾松人工林的近自然经营及松材线虫病迹地管理时, 可考虑将人为创建或已有的林隙优先控制在Ⅳ级, 同时在大林隙(Ⅴ级)可适量补充钾肥以改善土壤状况。本研究基于一次性取样和 0 ~ 20 cm 土层数据, 缺乏长期动态监测和深层土壤分析; 同时, 未直接测定土壤微生物生物量及胞外酶活性, 对钾素矿化机制的解释主要依赖土壤理化性质推断。未来研究可整合林隙微气候、凋落物输入、根系分布和土壤微生物过程的长期监测, 构建林下更新模型, 并探索更精细的林隙空间配置方案, 从而为南方马尾松人工林受松材线虫病危害后的林分恢复与可持续经营提供更有力的技术支撑。

4　结　　论

本文以江西兴国县马尾松人工林林隙为研究对象, 探讨了林隙大小对土壤理化性质及综合质量的影响。结果表明, 林隙大小显著影响了土壤毛管持水量和非毛管孔隙度等物理性质以及全磷和速效钾等化学性质, 且林隙内部位置显著影响了土壤 C∶P 和 N∶P 值。表层和亚表层土壤质量指数在不同等级林隙间的差异均不显著, 但在Ⅴ级林隙中表层土壤质量指数显著高于亚表层。Ⅳ级林隙在改善土壤磷钾含量方面表现相对较优, 是研究区马尾松人工林土壤养分优化的较适宜林隙尺度。本研究仅针对 0 ~ 20 cm 土层取样, 且未测定土壤微生物生物量等指标, 未来研究可结合土壤微生物、凋落物输入等因素开展更深层土壤长期动态监测, 为优化土壤养分管理和促进森林更新提供更全面的科学依据。

参　考　文　献

[1] 陈龙斌, 孙昆, 张旭, 等. 林隙干扰对森林生态系统的影响 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(2): 701−710.
Chen L B, Sun K, Zhang X, et al. Effects of forest gap disturbance on forest ecosystem [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(2): 701−710.

[2] Dun X J, Liu Y C, Lian F J, et al. The effects of forest gaps on the physical and ecological stoichiometric characteristics of soil in *Pinus densiflora* Sieb. and *Robinia pseudoacacia* L. forests [J]. Forests, 2024, 15(10): 1784.

[3] 陈仕友, 姜春前, 白彦锋, 等. 马尾松次生林林窗初期灌木层优势物种生态位研究 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(7): 27−35.
Chen S Y, Jiang C Q, Bai Y F, et al. Niche of dominant species in shrub layer of *Pinus massoniana* secondary forest at the initial stage of forest gap [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(7): 27−35.

[4] 符利勇, 唐守正, 刘应安. 关帝山天然次生针叶林林隙径高比 [J]. 生态学报, 2011, 31(5): 1260−1268.
Fu L Y, Tang S Z, Liu Y A. The forest gap diameter height ratio in a secondary coniferous forest of Guan Di Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(5): 1260−1268.

[5] Zhu J J, Zhang G Q, Wang G G, et al. On the size of forest gaps: Can their lower and upper limits be objectively defined? [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 213: 64−76.

[6] 张宇, 冯泳翰, 赵怡, 等. 华北落叶松人工林不同林隙径高比下冠层特征及其对幼苗幼树生长的影响 [J]. 生态学杂志, 2024, 43(7): 2046−2054.
Zhang Y, Feng Y H, Zhao Y, et al. Canopy characteristics under different gap diameter-height ratios of *Larix principis-rupprechtii* plantations and their effects on the growth of seedlings and saplings [J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(7): 2046−2054.

[7] 周岚, 巫大宇, 吕秋实, 等. 松材线虫侵染的马尾松人工林细根形态及生物量分异特征 [J]. 生态学报, 2022, 42(15): 6274−6286.
Zhou L, Wu D Y, Lü Q S, et al. Morphology and biomass differentiations of fine roots in *Pinus massoniana* plantation infected by *Bursaphelenchus xylophilus* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(15): 6274−6286.

[8] 曾洪, 吴雨茹, 钟欣艺, 等. 华西雨屏带马尾松人工林林窗大小对植物多样性与土壤理化性质的影响 [J]. 四川农业大学学报, 2023, 41(2): 185−192.
Zeng H, Wu Y R, Zhong X Y, et al. Effects of different gap sizes of *Pinus massoniana* plantation on plant diversity and soil physicochemical properties in the west China rain zone [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2023, 41(2): 185−192.

[9] Lyu Q, Liu J L, Liu J J, et al. Response of plant diversity and soil physicochemical properties to different gap sizes in a *Pinus massoniana* plantation [J]. PeerJ, 2021, 9: e12222.

[10] 马雅莉, 高荣, 刘喜东, 等. 白于山区不同植物群落土壤碳氮磷空间分布及化学计量特征 [J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(9): 116−125.
Ma Y L, Gao R, Liu X D, et al. Spatial distribution and stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in different plant communities in Baiyu Mountain areas [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023, 43(9): 116−125.

[11] 谢加琪, 张广奇, 李羽翎, 等. 茂兰喀斯特森林林窗内土壤碳氮磷及化学计量特征的影响因素研究 [J]. 西部林业科学, 2024,

53(2): 99−107.
Xie J Q, Zhang G Q, Li Y L, et al. Determinants of soil carbon, nitrogen phosphorus and stoichiometric characteristics in the Maolan karst forest gaps [J]. Journal of West China Forestry Science, 2024, 53(2): 99−107.

[12] Gan F L, Shi H L, Yan Y J, et al. Soil quality assessment of karst trough valley under different bedrock strata dip and land-use types, based on a minimum data set [J]. Catena, 2024, 241: 108048.

[13] 徐丽, 彭浩贤, 潘萍, 等. 江西省兴国县植被覆盖度及其空间格局变化 [J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(6): 1117−1126.
Xu L, Peng H X, Pan P, et al. Vegetation coverage and its spatial pattern changes in Xingguo County, Jiangxi Province [J]. Journal of Zhejiang A& F University, 2021, 38(6): 1117−1126.

[14] 罗桂生, 马履一, 贾忠奎, 等. 油松人工林不同大小林隙环境因子差异性比较 [J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(5): 86−94.
Luo G S, Ma L Y, Jia Z K, et al. Comparison of environmental factors differences in gaps with different size of *Pinus tabulaeformis* plantation [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(5): 86−94.

[15] 章家恩. 生态学常用实验研究方法与技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
Zhang J E. Common experimental research methods and technologies in ecology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.

[16] 卢澳邹, 张焕朝, 王会利, 等. 林下植被管理措施对尾巨桉人工林土壤质量的影响 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2026, 50(2): 215−224.
Lu A Z, Zhang H C, Wang H L, et al. Effects of understory vegetation management measures on soil quality of *Eucalyptus urophylla* × *grandis* plantation [J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 2026, 50(2): 215−224.

[17] 丁明净, 脱云飞, 郑阳, 等. 基于最小数据集栗子坪自然保护区不同林分类型土壤质量评价 [J]. 土壤通报, 2024, 55(5): 1215−1228.
Ding M J, Tuo Y F, Zheng Y, et al. Soil quality evaluation of different forest types in Liziping Nature Reserve based on the minimum data set [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(5): 1215−1228.

[18] Fischer-Bedtke C, Metzger J C, Demir G, et al. Throughfall spatial patterns translate into spatial patterns of soil moisture dynamics-empirical evidence [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2023, 27(15): 2899−2918.

[19] 杨家慧, 谭伟, 冯艳. 马尾松人工林土壤养分空间分布特征及其与地形因子的相关性分析 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2020, 40(4): 23−29.
Yang J H, Tan W, Feng Y. Spatial distribution characteristics of soil nutrients and the correlation with topographic factors in *Pinus massoniana* plantation [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2020, 40(4): 23−29.

[20] Yang Y F, Wei H, Lin L W, et al. Effect of vegetation restoration on soil humus and aggregate stability within the karst region of southwest China [J]. Forests, 2024, 15(2): 292.

[21] 汪水前. 南方水土流失区马尾松对降雨再分配的影响 [J]. 中国水土保持科学 (中英文), 2022, 20(2): 99−105.
Wang S Q. Effects of *Pinus massoniana* in soil erosion area in south China on rainfall redistribution [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022, 20(2): 99−105.

[22] Meijers E, Groenewoud R, de Vries J, et al. Canopy cover at the crown-scale best predicts spatial heterogeneity of soil moisture within a temperate Atlantic forest [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2025, 363: 110431.

[23] 蒋倩, 姚俊宇, 伍炫蓓, 等. 川西周公山柳杉人工林林窗大小对土壤理化性质和物种多样性的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(4): 326−332.
Jiang Q, Yao J Y, Wu X B, et al. Effects of size of gaps in *Cryptomeria fortunei* plantation on soil physicochemical properties and species diversity in Zhougong Mountain [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(4): 326−332.

[24] 王卓敏, 薛立. 林窗效应研究综述 [J]. 世界林业研究, 2016, 29(6): 48−53.
Wang Z M, Xue L. A review on effects of forest gap [J]. World Forestry Research, 2016, 29(6): 48−53.

[25] 陈会玲, 勾蒙蒙, 刘常富, 等. 鄂中丘陵区不同林龄马尾松人工林林下植物多样性与土壤理化性质关系 [J]. 生态环境学报, 2024, 33(10): 1525−1533.
Chen H L, Gou M M, Liu C F, et al. Relationship between understory plant diversity and soil physicochemical properties of different aged *Pinus massoniana* plantations in hilly region of central Hubei Province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2024, 33(10): 1525−1533.

[26] Tong R, Ji B Y, Wang G G, et al. Canopy gap impacts on soil organic carbon and nutrient dynamic: a meta-analysis [J]. Annals of Forest Science, 2024, 81(1): 12.

[27] Lasota J, Błońska E, Piaszczyk W, et al. How the deadwood of different tree species in various stages of decomposition affected nutrient dynamics? [J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18(8): 2759−2769.

[28] Lyu M K, Xie J S, Giardina C P, et al. Understory ferns alter soil carbon chemistry and increase carbon storage during reforestation with native pine on previously degraded sites [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 132: 80−92.

[29] 王雪琳, 刘金福, 何中声, 等. 格氏栲林窗土壤微生物群落功能多样性季节动态特征 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(7): 77−88.
Wang X L, Liu J F, He Z S, et al. Seasonal dynamics of functional diversity of soil microbial communities in *Castanopsis kawakamii*

forest gaps [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(7): 77−88.

[30] Yang J Y, Wei H, Zhang J E, et al. Land use and soil type exert strongly interactive impacts on the pH buffering capacity of acidic soils in south China [J]. Sustainability, 2022, 14(19): 12891.

[31] 周玲红, 黄晶, 王伯仁, 等. 南方酸化红壤钾素淋溶对施石灰的响应 [J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 457−467.
Zhou L H, Huang J, Wang B R, et al. Response of acidifing red soil to liming in potassium [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(2): 457−467.

[32] 余涵, 吴绍发, 蒋科毅, 等. 不同立地指数杉木人工林碳、氮、磷化学计量及养分重吸收特征 [J]. 生态学报, 2025, 45(19): 9606−9614.
Yu H, Wu S F, Jiang K Y, et al. Characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry and nutrient resorption in Chinese fir plantations under different site indexes [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(19): 9606−9614.

[33] 高子滢, 王海燕, 张亦凡. 土壤碳氮磷化学计量特征及其驱动因素 [J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(3): 645−656.
Gao Z Y, Wang H Y, Zhang Y F. Soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics and driving factors: a review [J]. Journal of Zhejiang A& F University, 2025, 42(3): 645−656.

[34] Cheng Y, Wang J, Mary B, et al. Soil pH has contrasting effects on gross and net nitrogen mineralizations in adjacent forest and grassland soils in central Alberta, Canada [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 57: 848−857.

[35] Chandra L R, Gupta S, Pande V, et al. Impact of forest vegetation on soil characteristics: a correlation between soil biological and physico-chemical properties [J]. Biotech, 2016, 6(2): 188.

[36] Židó J, Šumichrast L, Kucbel S, et al. The effect of stand structure on soil physico-chemical and biological properties in a primary Beech forest [J]. Forests, 2022, 13(9): 1344.

[37] 王永康, 邱静雯, 王瑞, 等. 不同林窗面积对马尾松林内微环境的影响及土壤质量评价 [J]. 中南林业科技大学学报, 2025, 45(5): 89−102.
Wang Y K, Qiu J W, Wang R, et al. Effects of different forest gap areas on the microenvironment of *Pinus massoniana* forest and soil quality evaluation [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2025, 45(5): 89−102.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　孙向阳）