

网络出版时间:2024-10-11 11:00 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2025.04.008
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1390.S.20241010.1119.009

不同径级侧柏古树根系、土壤和微生物 生物量生态化学计量特征

蔡怡俊,李雅静,刘金良,尹代皓,赵忠

(西北农林科技大学 林学院,陕西 杨凌 712100)

【摘要】【目的】研究不同径级侧柏古树根系、土壤和微生物生物量碳(C)、氮(N)、磷(P)含量及其生态化学计量比的变化特征,探究根系-土壤-微生物系统的内稳性,为古树健康管理提供科学依据。【方法】以陕西省黄帝陵景区内 5 种径级(20~40,41~60,61~80,81~100 和 >100 cm)侧柏古树为研究对象,测定不同径级侧柏古树根系、土壤和微生物生物量 C、N、P 含量,计算根系、土壤和微生物生物量 C、N、P 生态化学计量比,并分析以上指标间的相关性及内稳性特征。【结果】(1)随着径级增大,侧柏古树根系有机碳(ROC)、根系全氮(RTN)含量及根系 C:P、N:P 均呈增加趋势,根系全磷(RTP)含量呈降低趋势,并当径级>80 cm 时显著降低;根系 C:N 无显著变化。随着径级的增大,土壤有机碳(SOC)、土壤全氮(STN)含量呈增大趋势,而土壤 C:P 呈先减小后增加的趋势;土壤全磷(STP)含量呈先增加后减小的趋势,且在径级>40 cm 后基本达到动态平衡。不同径级侧柏古树间的土壤微生物生物量碳(MBC)含量有显著差异,而土壤微生物生物量氮和磷(MBN、MBP)含量无显著差异,MBC、MBN、MBP 含量均随着径级的增大呈先增加后减小趋势,均在径级 81~100 cm 处达到最大值;随着径级的增大,MBN:MBP 显著下降,MBC:MBN 和 MBC:MBP 均无显著变化。(2)SOC 与 ROC、RTN、RTP 以及 MBP 呈显著或极显著相关,STN 与 RTN 呈显著正相关,STP 与 MBN、MBP 呈显著正相关;土壤 C:N 与土壤 N:P 以及 MBC:MBP 呈极显著相关,而土壤 C:P 与土壤 N:P、根系 N:P 和 MBC:MBN 均呈显著正相关。(3)内稳态特征分析结果显示,MBP 属于敏感态指标,根系 C:P、MBC 均属于弱敏感态指标。【结论】黄帝陵景区不同径级侧柏古树根系与土壤和微生物生物量群落间 C、N、P 含量及其生态化学计量比存在较大差异,侧柏生长受 P 限制作用明显,因此在黄帝陵景区侧柏古树健康管理过程中要注重 P 的供给,尤以大径级侧柏古树为主。

【关键词】 侧柏古树;根系;微生物生物量;生态化学计量特征;内稳性特征

【中图分类号】 S791.38

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2025)04-0080-09

Ecological stoichiometric characteristics of roots, soil and microbial biomass of different diameter classes of ancient *Platycladus orientalis*

CAI Yijun, LI Yajing, LIU Jinliang, YIN Daihao, ZHAO Zhong

(College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract:【Objective】 This study aimed to examine the differences of carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P) contents, and ecological stoichiometric characteristics of roots, soil and microbial biomass of different diameter classes of *Platycladus orientalis* ancient trees and to explore the internal stability of root-soil-microbial system, so as to provide scientific basis for the health management of ancient trees.【Method】 The contents of C, N and P in roots, soil and microbial biomass of five different diameter classes (20–40, 41–60, 61–80, 81–100 and >100 cm) of *Platycladus orientalis* ancient trees in the Huangdi

【收稿日期】 2024-01-03

【基金项目】 国家重点研发计划项目(2022YFF1300405)

【作者简介】 蔡怡俊(1998—),女,安徽阜阳人,在读硕士,主要从事古树名木研究。E-mail:caiyijun000@126.com

【通信作者】 赵忠(1958—),男,甘肃宁县人,教授,博士生导师,主要从事古树名木研究。E-mail:zhaozh@nwafu.edu.cn

Mausoleum, Shaanxi Province, were determined to analyze their stoichiometric characteristics, interrelationships and internal stability characteristics. 【Result】 (1) With the increase of diameter class, the contents of root organic carbon (ROC), root total nitrogen (RTN) contents and root C : P, N : P showed an increasing trend. In contrast, the content of root total phosphorus (RTP) content showed a decreasing trend, and significantly decreased when the diameter class was >80 cm. However, the root C : N ratio had no significant change. With the increase of diameter class, soil organic carbon (SOC) and soil total nitrogen (STN) both increased, the soil C : P ratio initially decreased and then increased, while soil total phosphorus (STP) content initially increased and then decreased, ultimately reaching a dynamic equilibrium when diameter class >40 cm. The contents of soil microbial biomass carbon (MBC) were significantly different among different diameter classes, whereas the contents of soil microbial biomass nitrogen (MBN) and phosphorus (MBP) did not show significant differences. The contents of MBC, MBN and MBP all initially increased and then decreased as the diameter class increased, and reached the maximum value at 81—100 cm diameter class. As the diameter class increased, the ratio of MBN : MBP decreased significantly, while the ratios of MBC : MBN and MBC : MBP remained relatively unchanged. (2) SOC was significantly correlated with ROC, RTN, RTP and MBP, STN was significantly positively correlated with RTN, and STP was significantly positively correlated with MBN and MBP. Soil C : N was significantly correlated with soil N : P and MBC : MBP, while soil C : P was significantly positively correlated with soil N : P, root N : P and MBC : MBN. (3) The results of homeostasis analysis showed that MBP was a sensitive state index, while root C : P and MBC were weak sensitive state indexes. 【Conclusion】 The C, N and P contents, and stoichiometric ratios of the roots, soil and microbial communities of different diameter classes of *Platycladus orientalis* in the Huangdi Mausoleum scenic area exhibited significant differences, and the growth of *Platycladus orientalis* was evidently limited by P. Therefore, attention should be given to the supply of P in the health management process of the ancient trees of *Platycladus orientalis* in the Huangdi Mausoleum scenic area, particularly for those belonging to the larger diameter classes.

Key words: *Platycladus orientalis* ancient trees; root system; microbial biomass; ecological stoichiometry characteristics; internal stability characteristics

碳(C)、氮(N)、磷(P)循环和互作关系在维持植物生长以及根系微生物稳定中发挥着重要作用。生态化学计量比是C、N、P三者之间的比值,反映了植物器官的内稳性及元素在不同器官中的分配和相互关系,根据其值大小可以判断限制性元素和养分利用效率的高低^[1]。生态化学计量比的大小受到内因(个体大小、年龄、生长阶段等)与外因(土壤养分供给、光照、水分等)的共同影响^[2]。由于植物各器官功能分化及生理过程需求不同,会导致各器官的生态化学计量比存在差异^[3]。对于古树而言,其在不同生长阶段具有不同的C同化能力、养分吸收速率和凋落物归还能力,这会导致古树根系与土壤及微生物的C、N、P含量发生变化,进而对古树根系与土壤和微生物的C、N、P生态化学计量比产生影响^[4]。研究古树的根系与土壤和微生物生物量C、N、P生态化学计量特征,可以增加对古树生态系统生物地球化学循环的认识,这对古树健康的科学管理具有

深远意义。

随着生态化学计量学的迅速发展,尤其是对C、N、P含量间的平衡关系及揭示养分限制方面的研究较多^[5-8]。关于古树生态化学计量特征的研究十分有限,其对古树健康状况的影响及机制尚不清楚,极大限制了对古树健康的科学管理。本研究以陕西黄帝陵景区不同径级侧柏(*Platycladus orientalis*)古树为对象,测定不同径级侧柏古树根系与土壤和微生物生物量的C、N、P含量及其生态化学计量比,分析树木生长与环境之间的耦合关系,为古树健康管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市黄陵县黄帝陵景区(109°16′06″E, 35°35′13″N),景区内生长有世界上面积最大的侧柏古树群。该区域属于中温带大陆性

季风气候,为黄土高原沟壑区,土壤以黄土和褐土为主,土壤 pH 7~9。年平均气温 9.4 °C,年平均最高气温 36.5 °C,年平均最低气温 -21.4 °C,年均降水量 568.8 mm,海拔 740~1 762 m,年日照时数 2 528.4 h^[9]。

1.2 样品采集与处理

2022 年 6 月,按照侧柏古树的胸径,将其分为 20~40,41~60,61~80,81~100 和 >100 cm 5 个径级,在每个径级下各选 5 株健康侧柏古树作为采样对象。使用根钻($\Phi=10$ cm)在离树体 1.5 m 处,分东南西北 4 个方位钻取 0~20 cm 土层土样和细根(直径<2 mm)样品。将不同方位采集的土样混匀后装入无菌袋中,与细根样一放入装有冰袋的保温箱中带回实验室。

在实验室内,去除带回土样中的植物残体、石砾等杂质后,将土样分为 2 份:一份土样过孔径 2 mm 筛后保存于 4 °C 冰箱,用于土壤微生物生物量 C、N、P 含量的测定;另一份土样进行风干,过孔径 2 和 0.15 mm 筛后,用于土壤 C、N、P 含量的测定。细根经烘干、研磨和过孔径 2 mm 筛后,用于根系 C、N、P 含量的测定。

1.3 测定指标与方法

采用重铬酸钾容量法测定植物根系有机碳(root organic carbon, ROC)含量,采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 法测定根系全氮(root total nitrogen, RTN)含量,采用钼锑抗比色法测定根系全磷(root total phosphorus, RTP)含量。采用重铬酸钾-浓硫酸消煮法测定土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)含量,采用凯氏定氮法测定土壤全氮(soil total nitrogen, STN)含量,采用 $HClO_4-H_2SO_4$ 消解-钼锑抗显色法测定土壤全磷(soil total phosphorus, STP)含量。采用氯仿熏蒸浸提法测定土壤微生物生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)和微生物生物量氮(microbial biomass nitrogen, MBN)含量,采用 $NaHCO_3$ 浸提-钼锑抗比色法测定土壤微生物生物量磷(microbial biomass phosphorus, MBP)含

量^[10-12]。土壤 C:N、C:P、N:P 分别为 SOC 与 STN、SOC 与 STP、STN 与 STP 含量的比值,根系 C:N、C:P、N:P 分别为 ROC 与 RTN、ROC 与 RTP、RTN 与 RTP 含量的比值。

1.4 数据分析

依据 STERNER 等^[13]提出的内稳性模型,计算内稳性指数(homeostasis index, H):

$$H = \lg x / (\lg y - \lg c)$$

式中: x 为土壤 C、N、P 含量及其生态化学计量比, y 为植物根系和微生物生物量 C、N、P 的含量及其生态化学计量比, c 为拟合常数。

当方程拟合不显著时($P>0.1$),被定义为绝对稳态。当方程拟合显著时($P<0.1$),根据 H 的绝对值,将其划分为 4 种等级: $H \geq 4$,绝对稳态指标; $2 < H < 4$,弱稳态指标; $1.33 < H \leq 2$,弱敏感态指标; $H \leq 1.33$,敏感态指标^[14]。

采用 Excel 2019 和 SPSS 28.0 软件进行数据整理与统计分析,通过单因素(one-way ANOVA)和新复极差法(duncan's new multiple range test DMRT)进行方差分析和多重比较;采用 Pearson's 法进行相关性分析,并用 Origin 2023 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同径级侧柏古树根系与土壤和微生物生物量 C、N、P 含量的变化特征

表 1 显示,不同径级侧柏古树 ROC、RTN、RTP 和 SOC、STP 以及 MBC 含量差异均达显著水平($P<0.05$)。其中 ROC、RTN 含量均随着侧柏古树径级的增加而增大,RTP 含量则随着侧柏古树径级的增加而减小。

表 1 显示,SOC 含量随着侧柏古树径级的增加而增大,在径级 >100 cm 时达到最大值,较其他径级增加了 43.8%~162.5%;STP 含量随着侧柏古树径级的增加呈先增加后减小的趋势。虽然不同径级侧柏古树间 STN 含量无显著差异,但 STN 含量随着侧柏古树径级的增加呈增大趋势。

表 1 不同径级侧柏古树根系、土壤和微生物生物量 C、N、P 含量

Table 1 Root, soil and microbial biomass C, N, P contents of different diameter classes of *Platycladus orientalis* ancient trees

| 径级/cm Diameter classes | ROC/(g·kg ⁻¹) | RTN/(g·kg ⁻¹) | RTP/(g·kg ⁻¹) | SOC/(g·kg ⁻¹) | STN/(g·kg ⁻¹) |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 20~40 | 522.71±7.40 d | 20.33±0.14 c | 0.48±0.06 a | 8.90±0.75 d | 1.55±0.41 |
| 41~60 | 533.93±15.71 d | 21.43±0.22 c | 0.45±0.03 a | 11.91±0.19 c | 2.49±0.61 |
| 61~80 | 647.91±21.93 c | 22.05±0.48 c | 0.44±0.03 a | 13.63±0.91 c | 2.61±0.94 |
| 81~100 | 726.45±28.66 b | 24.63±1.01 b | 0.32±0.04 b | 16.25±1.19 b | 3.38±1.70 |
| >100 | 821.74±12.73 a | 33.52±1.61 a | 0.26±0.03 b | 23.36±0.79 a | 4.35±0.84 |

表 1(续) Table 1(continued)

| 径级/cm Diameter classes | STP/(g · kg ⁻¹) | MBC/(mg · kg ⁻¹) | MBN/(mg · kg ⁻¹) | MBP/(mg · kg ⁻¹) |
|---------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 20~40 | 0.23±0.04 b | 202.49±26.65 c | 21.21±4.72 | 5.82±1.35 |
| 41~60 | 0.46±0.04 a | 307.35±27.45 b | 23.23±3.22 | 13.25±1.35 |
| 61~80 | 0.49±0.05 a | 313.85±13.24 b | 28.36±4.45 | 17.89±5.89 |
| 81~100 | 0.43±0.02 a | 510.29±29.42 a | 30.84±3.73 | 20.34±5.91 |
| >100 | 0.41±0.01 a | 311.71±19.10 b | 24.24±2.19 | 18.73±2.09 |

注:ROC. 根系有机碳;RTN. 根系全氮;RTP. 根系全磷;SOC. 土壤有机碳;STN. 土壤全氮;STP. 土壤全磷;MBC. 微生物生物量碳;MBN. 微生物生物量氮;MBP. 微生物生物量磷。同列数据后标不同小写字母代表不同径级间差异显著($P<0.05$)。下表同。

Note:ROC. Root organic carbon;RTN. Root total nitrogen;RTP. Root total phosphorus;SOC. Soil organic carbon;STN. Soil total nitrogen;STP. Soil total phosphorus;MBC. Microbial biomass carbon;MBN. Microbial biomass nitrogen;MBP. Microbial biomass phosphorus. Different lowercase letters after the same column of data represent significant differences between different diameter classes ($P<0.05$). The same below.

表 1 显示,土壤 MBC 含量随着侧柏古树径级的增加呈先增加后减小的趋势,且在径级为 81~100 cm 时达到最大值,较其他径级显著增加了 62.6%~152.0%;不同径级间土壤 MBN 和 MBP 含量均无显著差异,但与 MBC 含量的变化趋势相同。

2.2 不同径级侧柏古树根系与土壤和微生物生物量 C、N、P 生态化学计量比的变化特征

由图 1 可知,不同径级侧柏古树根系 C:P 和 N:P 差异均达极显著水平($P<0.01$),根系 C:N

差异不显著($P>0.05$)。根系 C:P 及 N:P 均随着径级的增大呈增加趋势,在径级>100 cm 时达到最大值,分别为 3 230.63 和 132.36。根系 C:P 及 N:P 与 RTP 含量的变化趋势则相反。

不同径级侧柏古树间的土壤 C:P 有显著差异($P<0.05$),土壤 C:N 和 N:P 差异均不显著。随着径级的增大,土壤 C:P 和 N:P 呈先减小后增加的趋势,与 STP 含量的变化趋势相反,在径级>100 cm 时均达到最大值,较其他径级增加了 34.2%~120.0%(图 1)。

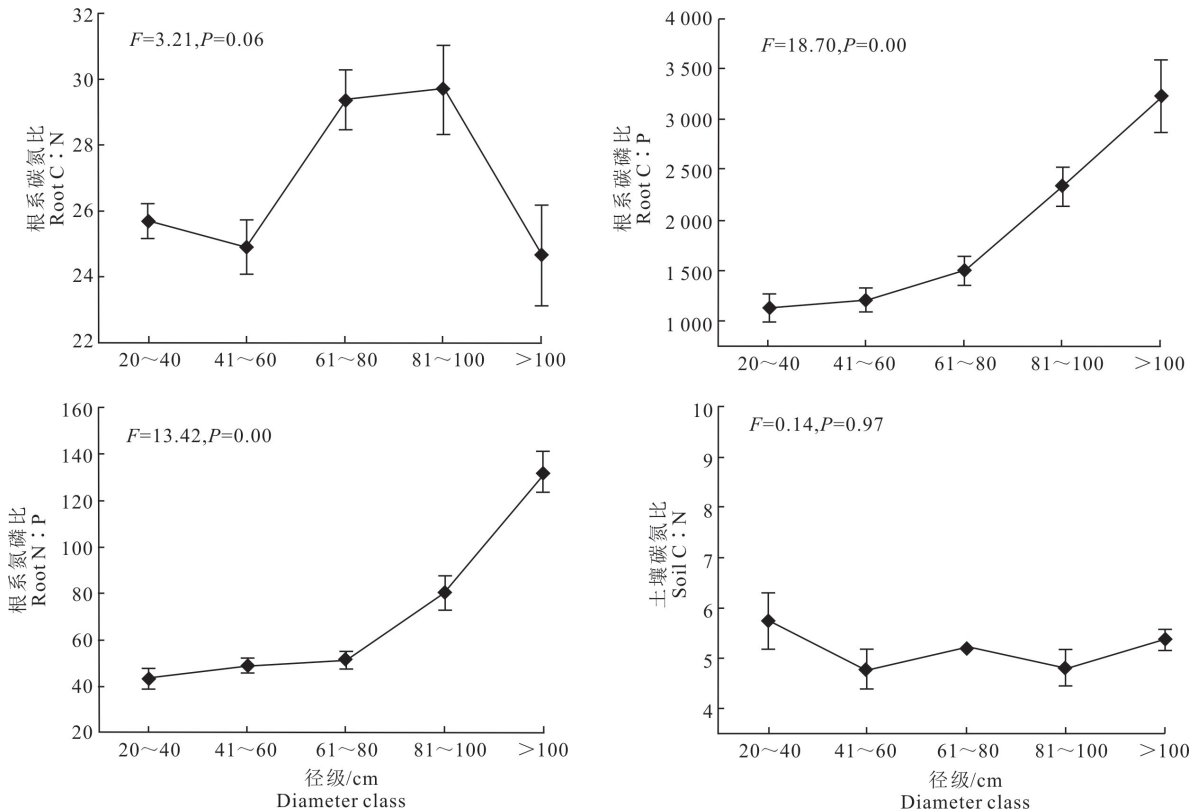


图 1 不同径级侧柏古树根系和土壤 C、N、P 的生态化学计量比

Fig. 1 Ecological stoichiometric ratios of C, N and P in roots and soil of different diameter classes of *Platycladus orientalis* ancient trees

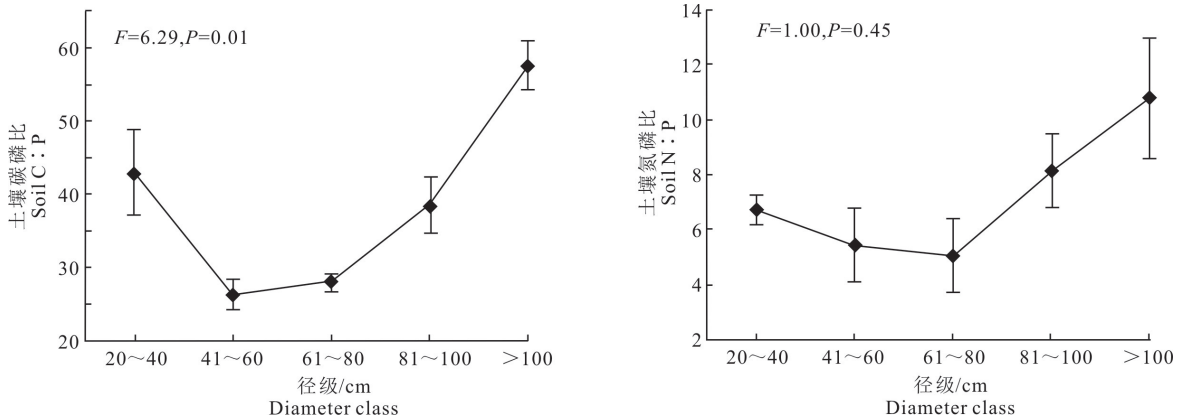


图 1 不同径级侧柏古树根系和土壤 C、N、P 的生态化学计量比(续)

Fig. 1 Ecological stoichiometric ratios of C, N and P in roots and soil of different diameter classes of *Platycladus orientalis* ancient trees (continued)

由图 2 可以看出,不同径级侧柏古树间的土壤 MBN : MBP 差异显著 ($P < 0.05$), 土壤 MBC : MBN 和 MBC : MBP 均无显著差异。MBN : MBP

随着径级增大呈减小趋势,在径级为 20~40 cm 时最大(3.74),明显高于其他径级。

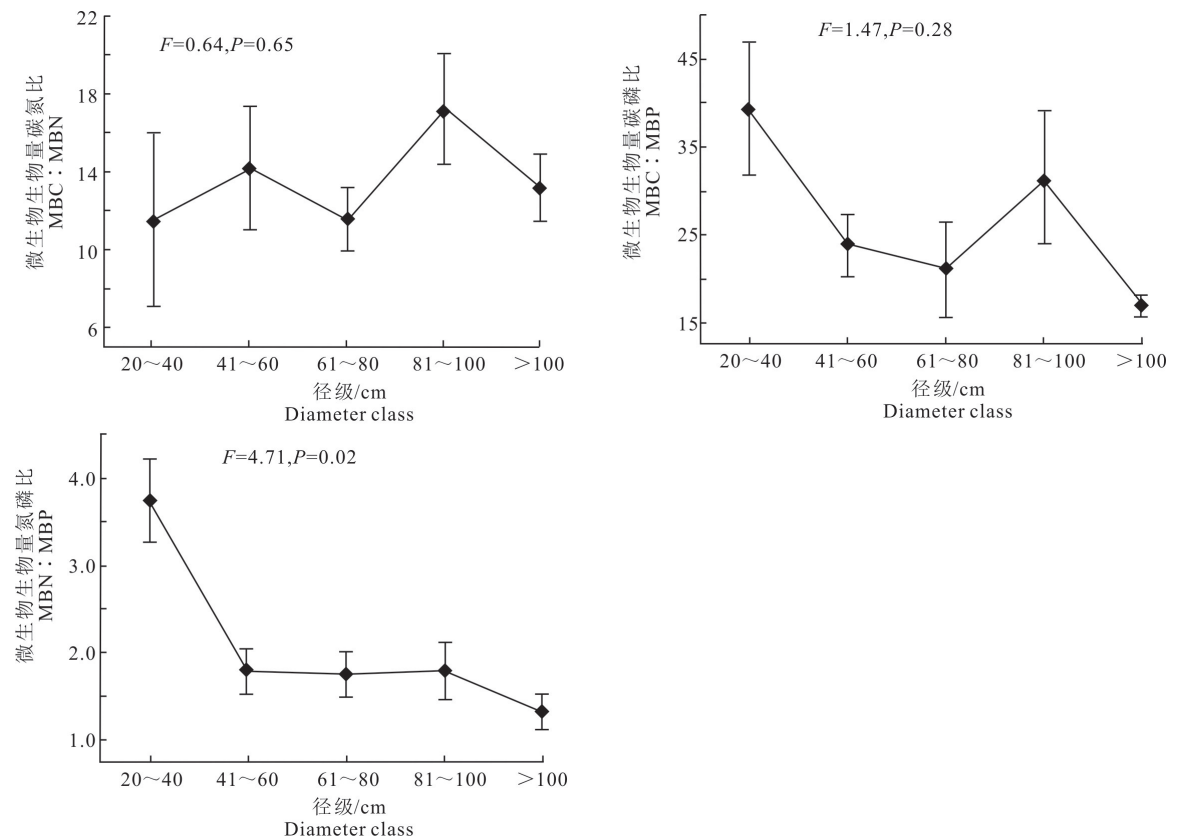


图 2 不同径级侧柏古树土壤微生物生物量 C、N、P 的生态化学计量比

Fig. 2 Microbial biomass C, N, P stoichiometric characteristics of different diameter classes of *Platycladus orientalis* ancient trees

2.3 侧柏古树根系与土壤和微生物生物量 C、N、P 含量及其生态化学计量比的相关性分析

由表 2 可知,侧柏古树 SOC 与 STN、ROC、RTN 呈极显著正相关,与 RTP 呈极显著负相关,与

MBP 呈显著正相关。STN 与 RTN 呈显著正相关。STP 与 MBN、MBP 呈显著正相关。

表 3 表明,土壤 C : N 与土壤 N : P 呈极显著负相关,与 MBC : MBP 呈极显著正相关。土壤

C : P 与土壤 N : P、根系 C : P、根系 N : P 和 N : P 呈极显著正相关。MBC : MBP 与 MBN : MBC : MBN 均呈显著正相关。根系 C : P 与根系 MBP 呈显著正相关。

表 2 侧柏古树根系与土壤和微生物生物量 C、N、P 含量的相关性

Table 2 Correlation analysis of C, N and P contents in ancient *Platycladus orientalis* roots, soil and microbial biomass

| 指标 Index | SOC | STN | STP | ROC | RTN | RTP | MBC | MBN | MBP |
|----------|---------|-------|-------|---------|---------|--------|------|--------|------|
| SOC | 1.00 | | | | | | | | |
| STN | 0.66** | 1.00 | | | | | | | |
| STP | 0.33 | 0.32 | 1.00 | | | | | | |
| ROC | 0.90** | 0.51 | 0.32 | 1.00 | | | | | |
| RTN | 0.93** | 0.58* | 0.15 | 0.82** | 1.00 | | | | |
| RTP | -0.73** | -0.35 | -0.32 | -0.81** | -0.76** | 1.00 | | | |
| MBC | 0.38 | 0.34 | 0.37 | 0.48 | 0.16 | -0.33 | 1.00 | | |
| MBN | 0.14 | 0.15 | 0.56* | 0.25 | 0.09 | -0.52 | 0.25 | 1.00 | |
| MBP | 0.52* | 0.49 | 0.62* | 0.50 | 0.43 | -0.54* | 0.45 | 0.69** | 1.00 |

注: * 表示显著相关($P < 0.05$); ** 表示极显著相关($P < 0.01$)。下表同。

Note: * indicates a significant correlation ($P < 0.05$); ** indicates a very significant correlation ($P < 0.01$). The same as in the following tables.

表 3 侧柏古树根系与土壤和微生物生物量 C、N、P 生态化学计量比的相关性

Table 3 Correlation analysis of C, N and P stoichiometry in ancient *Platycladus orientalis* roots, soil, microbial biomass

| 指标 Index | 土壤 C : N Soil C : N | 土壤 C : P Soil C : P | 土壤 N : P Soil N : P | 根系 C : N Root C : N | 根系 C : P Root C : P | 根 N : P Root N : P | MBC : MBN | MBC : MBP | MBN : MBP |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|
| 土壤 C : N Soil C : N | 1.00 | | | | | | | | |
| 土壤 C : P Soil C : P | 0.11 | 1.00 | | | | | | | |
| 土壤 N : P Soil N : P | -0.68** | 0.53* | 1.00 | | | | | | |
| 根系 C : N Root C : N | 0.39 | -0.35 | -0.28 | 1.00 | | | | | |
| 根系 C : P Root C : P | 0.05 | 0.56* | 0.35 | -0.04 | 1.00 | | | | |
| 根系 N : P Root N : P | -0.07 | 0.62* | 0.42 | -0.28 | 0.97** | 1.00 | | | |
| MBC : MBN | 0.21 | 0.29* | 0.23 | 0.16 | -0.04 | -0.10 | 1.00 | | |
| MBC : MBP | 0.56** | 0.19 | -0.26 | 0.23 | -0.38 | -0.42 | 0.47 | 1.00 | |
| MBN : MBP | 0.22 | -0.05 | -0.28 | 0.05 | -0.41 | -0.40 | -0.33 | 0.61* | 1.00 |

2.4 侧柏古树根系与土壤和微生物生物量 C、N、P 含量及其生态化学计量比的内稳性特征

表 4 显示,不同径级侧柏古树中,STN 与 RTN、MBN、STP 与 RTP,土壤 C : N 与根系 C : N、MBC : MBN,土壤 C : P 与 MBC : MBP 以及土壤 N : P 与根系 N : P、MBN : MBP 之间内稳性模型模拟结果均不显著($P > 0.1$),由此可知,RTN、MBN、RTP、根系 C : N、MBC : MBN、MBC :

MBP、根系 N : P、MBN : MBP 均为绝对稳态指标;SOC 与 ROC、MBC、STP 与 MBP 以及土壤 C : P 与根系 C : P 之间的内稳性模型模拟结果显著($P < 0.1$),其中 ROC 的内稳性指数为 2.09,属弱稳态指标;MBC、MBP 的内稳性指数分别为 1.91,0.83,属弱敏感态和敏感态指标;而生态化学计量中仅根系 C : P 的内稳性指数为 1.80,为弱敏感态指标。

表 4 侧柏古树根系与土壤和微生物生物量 C、N、P 生态化学计量比的内稳性特征

Table 4 Internal stability characteristics of root, soil and microbial biomass C, N, P stoichiometry of

Platycladus orientalis ancient trees

| 变量 Variable | | 内稳性指数(H) Homeostasis index | R^2 | P | 等级 Class |
|-------------|-----|----------------------------|-------|-------|------------------------------|
| x | y | | | | |
| SOC | ROC | 2.09 | 0.799 | 0.000 | 弱稳态 Less stable state |
| SOC | MBC | 1.91 | 0.323 | 0.027 | 弱敏感态 Weakly sensitive state |
| STN | RTN | 11.76 | 0.350 | 0.200 | 绝对稳态 Absolutely steady state |
| STN | MBN | -13.44 | 0.071 | 0.336 | 绝对稳态 Absolutely steady state |

表 4(续) Table 4(continued)

| 变量 Variable | | 内稳性指数(H) Homeostasis index | R^2 | P | 等级 Class |
|---------------------|---------------------|-------------------------------|-------|-------|------------------------------|
| x | y | | | | |
| STP | RTP | -1.44 | 0.109 | 0.231 | 绝对稳态 Absolutely steady state |
| STP | MBP | 0.83 | 0.631 | 0.000 | 敏感态 Sensitive state |
| 土壤 C : N Soil C : N | 根系 C : N Root C : N | -2.03 | 0.082 | 0.300 | 绝对稳态 Absolutely steady state |
| 土壤 C : N Soil C : N | MBC : MBN | 6.21 | 0.036 | 0.497 | 绝对稳态 Absolutely steady state |
| 土壤 C : P Soil C : P | 根系 C : P Root C : P | 1.80 | 0.203 | 0.091 | 弱敏感态 Weakly sensitive state |
| 土壤 C : P Soil C : P | MBC : MBP | 8.10 | 0.032 | 0.521 | 绝对稳态 Absolutely steady state |
| 土壤 N : P Soil N : P | 根系 N : P Root N : P | 2.56 | 0.127 | 0.192 | 绝对稳态 Absolutely steady state |
| 土壤 N : P Soil N : P | MBN : MBP | -3.32 | 0.111 | 0.225 | 绝对稳态 Absolutely steady state |

3 讨论

3.1 不同径级侧柏古树根系 C、N、P 及生态化学计量特征

根系是植物获取养分的重要器官,其营养元素的组成可以用于判断植物体的营养状况及对生存环境的适应能力^[15]。本研究中,黄帝陵景区不同径级侧柏古树 ROC、RTN 均随着径级的增大而增加,且 SOC、STN 含量与 ROC、RTN 之间存在显著正相关性,表明根系的营养元素主要来源于土壤,根系与土壤 C、N 含量之间存在高度关联性^[16]。本研究中, RTP 含量随着侧柏古树径级的增大而减小,在径级 >80 cm 时 RTP 含量显著降低。这可能是径级增大侧柏古树对 P 含量的需求增大所致,尽管在径级 >80 cm 时土壤中的 P 元素含量无显著变化,但仍然无法满足植物对 P 的需求,致使 RTP 含量随着径级增大而降低。

植物 C : N 和 C : P 既代表了植物对 C 的同化能力,也代表着不同植物固定 C 效率的高低,其与植物的养分利用率呈正相关^[17]。本研究中,根系 C : P 在大径级 (>80 cm) 侧柏古树群落中显著升高,并在径级 >100 cm 时达到最大值,揭示了当径级 >80 cm 时,侧柏古树在 C、P 元素分配水平上出现了严重的失衡现象。此外, N、P 是限制植物生长的主要营养元素, N : P 被广泛用于判断植物个体或生态系统 N、P 养分限制格局^[18]。有研究表明,当植物 N : P < 14 时,植物受 N 限制; N : P > 16 时,植物生长受 P 限制^[19]。在本研究中,各径级侧柏古树根系 N : P 为 43.4~132.4,且根系 N : P 随着径级的增加而增大,表明根系生长主要受 P 元素限制,且径级越大, P 元素的限制作用越明显。其原因可能是由于 STP 主要来源于其母质的风化及动植物残体的归还量,且 STP 含量取决于有机物的积累和微生物分解作用的相对强度,植物径级越大,凋落物归还量越少,从而导致 STP 含量供给不足,植

物生长受 P 限制显著^[20-21]。RTP 与 SOC 含量呈极显著负相关,说明 SOC 含量较高时, RTP 值较低,表明植物生长可能受 P 限制越明显,因此在不同径级侧柏古树健康管理过程中要注重 P 素的供给。

3.2 不同径级侧柏古树土壤 C、N、P 及生态化学计量特征

土壤中的 C、N、P 及生态化学计量比受多种因素的影响,包括气候、土壤种类、地形地貌和植被类型等自然环境因素和土地利用方式等人为因素的干扰^[22]。本研究中, SOC 含量随侧柏古树径级增加而增大, STP 含量随着径级的增大呈先增加后降低趋势,在径级 >40 cm 后基本达到动态平衡,可能是当径级大于 40 cm 时,侧柏古树的 STP 含量达到阈值。土壤 C、N、P 化学计量特征可以反映土壤对植物或微生物生长及繁殖的促进或限制程度^[23]。有研究表明,生态系统中土壤 C、N 含量的积累和消耗过程相对稳定,故土壤 C : N 变化不显著。本研究中,黄帝陵景区不同径级侧柏古树间土壤 C : N 无显著差异,这与前人的研究结论^[24]一致。本研究中,土壤 C : P 随着侧柏古树径级的增加呈先减小后增加的趋势,并在径级 >100 cm 时达到最高,且与其他径级间总体差异明显,说明侧柏古树径级越大, P 对其限制越明显。

3.3 不同径级侧柏古树土壤微生物生物量 C、N、P 及生态化学计量特征

土壤微生物作为调控土壤元素源和库的重要因子,易受林木生长发育的影响,其生物量也会受到林木个体的影响^[18]。本研究中,土壤 MBC 含量总体在不同径级侧柏古树间存在显著差异 ($P < 0.05$),土壤 MBN 和 MBP 含量差异均不显著,但三者均随侧柏古树径级的增大呈现先增加后减小的趋势。微生物的基本结构是由 C 元素构成,因此侧柏古树径级的增大将会对土壤 MBC 产生影响。有研究表明,植物内稳性在受到外界影响时会发生变化,可通过调整自身养分元素平衡使之处于一种相对稳定的

状态^[25]。本研究中,土壤 MBC : MBN、MBC : MBP 分别为 11.45~17.23 和 16.85~39.25,且在各径级间均无显著差异,这可能与该区域土壤微生物群落结构较稳定有关^[26]。

3.4 黄帝陵景区侧柏古树内稳性特征

土壤是植物与微生物赖以生存的环境,植物根系和土壤微生物可以通过生理、生化以及生态过程适应周围环境变化,并且能够保持自身稳定而不受外界环境影响^[27]。本研究中,侧柏古树 RTN、RTP 和根系 C : N、N : P 均为绝对稳态指标,说明上述指标并不受周围环境变化的影响;但 ROC 属于弱稳态指标,受 SOC 含量的影响较大;而其根系 C : P 则为弱敏感态指标。这与海旭莹等^[28]的研究结果一致。

微生物作为土壤中十分活跃的有机体,其生物量 C、N、P 受到土壤资源影响的同时,亦可通过代谢、调节胞外酶活性等过程适应外界环境变化而保持其自身 C、N、P 特征的稳定性^[29]。本研究中,土壤 MBN、MBC : MBN、MBC : MBP 和 MBN : MBP 均为绝对稳态指标,说明土壤微生物群落具有保持自身化学元素组成相对稳定的能力。但 MBC 属于弱敏感态指标,MBP 为敏感态指标,这与邓健等^[30]的研究结果一致。这可能是由于随着侧柏古树径级的增大,影响了表层土壤 C 库的积累^[31]。此外,微生物的基本结构是由 C 元素构成,导致土壤 MBC 易随着 SOC 含量的增加而增大,从而使 MBC 处于弱敏感态。

4 结 论

1)不同径级侧柏古树根系与土壤和微生物生物量 C、N、P 含量及其生态化学计量比有明显差异。随着侧柏古树径级的增大,ROC、RTN、STN 和 SOC 含量以及根系 C : P、N : P 均呈上升趋势,而土壤 C : P、N : P 先减小后增加,STP、MBC、MBN、MBP 含量先增加后减小,RTP 和 MBN : MBP 呈下降趋势。大径级(>80 cm)侧柏古树根系生长明显受到 P 元素的限制,应注重 P 的供给。

2)根系 C : P、MBC 和 MBP 均属于敏感态或弱敏感态指标,对不同径级侧柏古树下土壤养分的变化较为敏感,其余指标则相对稳定。

[参考文献]

[1] 盘金文,郭其强,孙学广,等.不同林龄马尾松人工林碳、氮、磷、钾养分含量及其生态化学计量特征[J].植物营养与肥料学

报,2020,26(4):746-756.

PAN J W, GUO Q Q, SUN X G, et al. Contents and stoichiometric characteristics of C, N, P and K under different stand ages of *Pinus massoniana* plantations [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(4): 746-756.

[2] LUO G W, XUE C, JIANG Q, et al. Soil carbon, nitrogen, and phosphorus cycling microbial populations and their resistance to global change depend on soil C : N : P stoichiometry [J]. mSystems, 2020, 5(3): e00162-20.

[3] MINDEN V, KLEYER M. Internal and external regulation of plant organ stoichiometry [J]. Plant Biology, 2014, 16(5): 897-907.

[4] 张安才.古侧柏与行道树银杏立地土壤微生物及作用强度研究[D].山东泰安:山东农业大学,2009.

ZHANG A C. Edaphon and function intensity of ancient *Platycladus orientalis* and roadside trees *Ginkgo Biloba* setting up in the soil research [D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2009.

[5] PANG Y, TIAN J, ZHAO X, et al. The linkages of plant, litter and soil C : N : P stoichiometry and nutrient stock in different secondary mixed forest types in the Qinling Mountains, China [J]. Peer J, 2020, 8: e9274.

[6] 谢杨阳,刘旭阳,金强,等.福州东湖湿地不同生境土壤碳氮磷及其生态化学计量比特征[J].中国水土保持科学,2023,21(4):79-90.

XIE Y Y, LIU X Y, JIN Q, et al. Characteristics of soil carbon, nitrogen, phosphorus and their ecological stoichiometric ratios in different habitats of East Lake Wetland, Fuzhou [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023, 21(4): 79-90.

[7] 王东丽,于百和,赵晓亮,等.风沙黄土区排土场不同植被类型下土壤生态化学计量特征[J].水土保持研究,2024,31(1):61-69.

WANG D L, YU B H, ZHAO X L, et al. Soil ecological stoichiometric characteristics under different vegetation types of Open-Pit Dump in Sandy Loess Region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 61-69.

[8] 于宗恺,刘小伟,朵莹,等.黄土高原退耕草地演替过程中土壤及微生物碳氮磷化学计量关系时空变化[J].中国草地学报,2023,45(8):118-128.

YU Z K, LIU X W, DUO Y, et al. Temporal and spatial variations of soil and microbial carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric relationships during the succession of rehabilitated grassland on the Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(8): 118-128.

[9] 刘梦颖.黄帝陵古侧柏根细根特性研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2018.

LIU M Y. Study on the fine roots characteristics of the ancient *Platycladus orientalis* in the mausoleum of the yellow emperor [D]. Yangling, Shanxi: Northwest A&F University, 2018.

[10] BARROS L, CABRITA L, BOAS M V, et al. Chemical, biochemical and electrochemical assays to evaluate phytochemi-

- cals and antioxidant activity of wild plants [J]. Food Chemistry, 2011, 127(4): 1600-1608.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [12] MARTIN J K, CORRELL R L. Measurement of microbial biomass phosphorus in rhizosphere soil [J]. Plant Soil, 1989, 113: 213-221.
- [13] STERNER R W, ELSER J J. Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere [M]. New Jersey: Princeton University Press, 2002.
- [14] YU Q, WILCOX K, PIERRE K L, et al. Stoichiometric homeostasis predicts plant species dominance, temporal stability, and responses to global change [J]. Ecology, 2015, 96(9): 2328-2335.
- [15] 侯晓娟, 李志, 崔诚, 等. 武功山芒根系垂直分布及其与土壤养分的关系 [J]. 草业科学, 2017, 34(12): 2428-2436.
HOU X J, LI Z, CUI C, et al. Vertical distribution characteristics of *Miscanthus sinensis* roots and its relationship to soil nutrients in the Wugong Mountains [J]. Pratacultural Science, 2017, 34(12): 2428-2436.
- [16] 杨振安, 宋双飞, 李靖, 等. 不同林龄华北落叶松人工林根系特征和氮磷养分研究 [J]. 西北植物学报, 2014, 34(7): 1432-1442.
YANG Z A, SONG S F, LI J, et al. A study on root characteristics and nutrients of different aged *Larix principis-ruprechtii* Mayr. plantations [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2014, 34(7): 1432-1442.
- [17] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 等. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C、N、P 化学计量特征 [J]. 生态学报, 2010, 30(23): 6581-6590.
LIU W D, SU J R, LI S F, et al. Stoichiometry study of C, N and P in plant and soil at different successional stages of monsoon evergreen broad-leaved forest in Pu'er, Yunnan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(23): 6581-6590.
- [18] 胡培雷, 王克林, 曾昭霞, 等. 喀斯特石漠化地区不同退耕年限下桂牧 1 号杂交象草植物-土壤-微生物生态化学计量特征 [J]. 生态学报, 2017, 37(3): 896-905.
HU P L, WANG K L, ZENG Z X, et al. Ecological stoichiometric characteristics of plants, soil, and microbes of *Pennisetum purpureum* cv. Guimu-1 pastures at different rehabilitation ages in a Karst rocky desertification region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): 896-905.
- [19] TESSIER J T, RAYANL D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation [J]. Journal of Applied Ecology, 2003, 40(3): 523-534.
- [20] 俞月凤, 何铁光, 曾成城, 等. 喀斯特区不同退化程度植被群落植物-凋落物-土壤-微生物生态化学计量特征 [J]. 生态学报, 2022, 42(3): 935-946.
YU Y F, HE T G, ZENG C C, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in plants, litter, soil, and microbes in degraded vegetation communities in a Karst Area of southwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(3): 935-946.
- [21] 马玉珠, 钟全林, 靳冰洁, 等. 中国植物细根碳、氮、磷化学计量的空间变化及其影响因子 [J]. 植物生态学报, 2015, 39(2): 159-166.
MA Y Z, ZHONG Q L, JIN B J, et al. Spatial changes and influencing factors of fine root carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of plants in China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(2): 159-166.
- [22] 钟建军, 李林, 魏识广, 等. 漓江流域喀斯特森林土壤碳氮磷储量分布特征及其影响因素 [J]. 水土保持学报, 2023, 37(6): 180-186, 193.
ZHONG J J, LI L, WEI S G, et al. Distribution characteristics and influencing factors of soil carbon, nitrogen and phosphorus storage in Karst forest in the Lijiang River Basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(6): 180-186, 193.
- [23] 俞月凤, 彭晚霞, 宋同清, 等. 喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤 C、N、P 化学计量特征 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 947-954.
YU Y F, PENG W X, SONG T Q, et al. Stoichiometric characteristics of plant and soil C, N and P in different forest types in depressions between Karst hills, southwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(4): 947-954.
- [24] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: a synthesis of observational data [J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1): 139-151.
- [25] 贾国梅, 何立, 程虎, 等. 三峡库区不同植被土壤微生物量碳氮磷生态化学计量特征 [J]. 水土保持研究, 2016, 23(4): 23-27.
JIA G M, HE L, CHENG H, et al. Ecological stoichiometry characteristics of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus under different vegetation covers in Three Gorges Reservoir Area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(4): 23-27.
- [26] 郑笑影, 王东丽, 赵晓亮, 等. 菌剂配施有机肥下植物-土壤-微生物生态化学计量特征及内稳性: 以内蒙古区排土场中药复垦模式为例 [J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 352-362.
ZHENG X Y, WANG D L, ZHAO X L, et al. Ecotoxicological characteristics and internal stability of plant-soil-microbial ecosystem under organic fertilizer application with fungicides: an example of traditional Chinese medicine reclamation model in a mining site in Inner Mongolia [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 352-362.

- mildew [J]. *Plant Protection*, 2018, 44(1):166-169.
- [19] 赵玉梅. 三种重要疫霉菌 LFD-RPA 快速检测技术研究 [D]. 福州:福建农林大学, 2020.
ZHAO Y M. Rapid detection of three main *Phytophthora* spp. using lateral flow dipstick-recombinase polymerase amplification assay [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2020.
- [20] 于佳. 作物土传病害病原真菌和卵菌的三种分子检测方法研究 [D]. 南京:南京农业大学, 2019.
YU J. Study on three molecular detection methods of crop soilborne fungi and oomycetes [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.
- [21] 张涛. 酿酒葡萄霜霉病菌卵孢子形成、生活力和越冬量检测体系建立 [D]. 银川:宁夏大学, 2021.
ZHANG T. Oospore formation, viability and establishment of overwintering quantity detection system of wine grape downy mildew [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021.
- [22] AMMOUR M S, BOVE F, TOFFOLATTI S L, et al. A real-time PCR assay for the quantification of *Plasmopara viticola* oospores in grapevine leaves [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11:1202.
- [23] 申世凯, 曾婷, 乔兴华, 等. 柑橘衰退病毒 RT-RPA-LFD 可视化检测方法的建立及应用 [J]. *果树学报*, 2023, 40(12): 2652-2660.
SHEN S K, ZENG T, QIAO X H, et al. Establishment and application of RT-RPA-LFD visualization assay for rapid detection of citrus tristeza virus [J]. *Journal of Fruit Science*, 2023, 40(12):2652-2660.
- [24] 王姝然, 徐嘉楠, 范厚勇, 等. 嗜水气单胞菌 RPA-LFD 快速检测方法的建立 [J]. *水生生物学报*, 2024, 48(5):849-858.
WANG S R, XU J N, FAN H Y, et al. Establishment of a method for rapid detection of *Aeromonas hydrophila* by recombinase polymerase amplification (RPA) combined with lateral flow strips [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, 48(5):849-858.
- [25] 王帅, 杨艳歌, 吴占文, 等. 重组酶聚合酶扩增、重组酶介导等温扩增及酶促重组等温扩增技术在食源性致病菌快速检测中的研究进展 [J]. *食品科学*, 2023, 44(9):297-305.
WANG S, YANG Y G, WU Z W, et al. A review of the application of recombinase polymerase amplification, recombinase-aided amplification and enzymatic recombinase amplification in rapid detection of foodborne pathogens [J]. *Food Science*, 2023, 44(9):297-305.

(责任编辑:陈丽)

(上接第 88 页)

- [27] 胡风焯, 赵锐锋, 张丽华, 等. 黄河首曲湿地植物群落生产力、物种多样性及其与生境的关系 [J]. *生态学报*, 2023, 43(24): 10238-10249.
HU F Y, ZHAO Y F, ZHANG L H, et al. Productivity and species diversity of plant communities and their relationship with habitats in the wetland of first meander of Yellow River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(24):10238-10249.
- [28] 海旭莹, 董凌勃, 汪晓珍, 等. 黄土高原退耕还草地 C、N、P 生态化学计量特征对植物多样性的影响 [J]. *生态学报*, 2020, 40(23):8570-8581.
HAI X Y, DONG L B, WANG X Z, et al. Effects of carbon, nitrogen, and phosphorus ecological stoichiometry characteristics on plant diversity since returning farmland to grassland on the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(23):8570-8581.
- [29] LI Y T, YU Y H, SONG Y P. Stoichiometry of soil, microorganisms, and extracellular enzymes of *Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis* plantations for different allocations [J]. *Agronomy*, 2022, 12(7):1709.
- [30] 邓健, 张丹, 张伟, 等. 黄土丘陵区刺槐叶片-土壤-微生物碳氮磷化学计量学及其稳态性特征 [J]. *生态学报*, 2019, 39(15): 5527-5535.
DENG J, ZHANG D, ZHANG W, et al. Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry and homeostasis characteristics of leaves, soil, and microbial biomass of *Robinia pseudoacacia* forests in the Loess Hilly Region of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(15):5527-5535.
- [31] NOTTINGHAM A T, SCOTT J J, SALTONSTALL K, et al. Microbial diversity declines in warmed tropical soil and respiration rise exceed predictions as communities adapt [J]. *Nature Microbiology*, 2022, 7:1650-1660.

(责任编辑:李小平)