

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.01.010

引用格式:王守兴,阿的哈则,欧立鹏,等.三江源区人工草地建植对土壤-微生物化学计量特征的影响[J].草地学报,2026,34(1):98-106

WANG Shou-xing, A di -Ha-ze, OU Li-peng, et al. Effects of Artificial Grassland Establishment on Soil-Microbial Stoichiometric Characteristics in the Three-River-Source Region[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(1):98-106

三江源区人工草地建植对土壤-微生物化学计量特征的影响

王守兴^{1,2}, 阿的哈则^{3,4*}, 欧立鹏^{1,2}, 李成先^{1,2}, 宁晓春^{1,2}, 王雁鹤^{1,2},
魏代军^{1,2}, 杨明新^{1,2}, 谷强^{1,2}, 张中华³, 周华坤³

(1. 中国地质调查局西宁自然资源综合调查中心, 青海 西宁 810000; 2. 黄河源水资源与生态系统过程野外科学观测研究站, 青海 玛多 813500; 3. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海省恢复生态学重点实验室, 青海 西宁 810000; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:土壤-微生物生物量化学计量特征可有效表征生态系统养分循环效率,但不同人工草地恢复模式对其影响机制尚不明确。本研究以三江源区建植3年的上繁草(SF)、下繁草(XF)及上繁草+下繁草(SFXF)人工草地为研究对象,并以重度退化高寒草地(CK)为对照,采集0~10 cm土层样品,测定土壤有机碳、全氮、全磷及微生物量碳、氮、磷含量,分析其化学计量比与微生物熵的变化。研究表明,三种人工草地建植模式均提高了土壤有机碳、微生物量氮和磷含量。SF处理增加了土壤全氮含量,而XF处理则降低了全氮含量,并使全磷含量减少了50.42%。微生物量氮在SF和XF处理分别增加了24.36%和35.59%。SFXF处理使微生物熵碳降低了78.40%,而XF处理提高了微生物熵氮49.61%,SFXF处理则降低了微生物熵氮11.33%。三种人工草地建植后,土壤微生物化学计量不平衡性(Cimb:Nimb、Cimb:Pimb和Nimb:Pimb)均上升,其中SFXF处理的增幅最大。冗余分析表明,土壤氮磷比和碳磷比是调控微生物熵变化的关键因子。综上,SFXF混播模式对土壤-微生物系统碳氮磷循环的影响最为显著,在实际管理中建议适当增加氮素供给以优化植物生长并提升土壤质量。

关键词:人工草地;微生物生物量;化学计量比;微生物熵;化学计量不平衡性

中图分类号:S812.2

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)01-0098-09

Effects of Artificial Grassland Establishment on Soil-Microbial Stoichiometric Characteristics in the Three-River-Source Region

WANG Shou-xing^{1,2}, A di -Ha-ze^{3,4*}, OU Li-peng^{1,2}, LI Cheng-xian^{1,2}, NING Xiao-chun^{1,2},
WANG Yan-he^{1,2}, WEI Dai-jun^{1,2}, YANG Ming-xin^{1,2}, GU Qiang^{1,2}, ZHANG Zhong-hua³, ZHOU Hua-kun³

(1. Xining Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Xining, Qinghai Province 810000, China; 2. Yellow River Source Water Resources and Ecological System Process Field Scientific Observation Research Station, Maduo, Qinghai Province 813500, China; 3. Qinghai Provincial Key Laboratory of Cold Regions Restoration Ecology, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai Province 810008, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Soil-microbial biomass stoichiometric characteristics serve as a robust indicator of ecosystem nutrient cycling efficiency, yet the mechanisms by which different artificial grassland restoration modes influence these traits remain unclear. This study investigated 3-year-old artificial grasslands dominated by tall-grass species (SF), short-grass species (XF), and a mixed planting of tall- and short-grass species (SFXF) in the Three-

收稿日期:2025-02-10;修回日期:2025-08-22

基金项目:中国地质调查局项目(DD20220959, DD20230094);中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心科技创新基金(KC20240013);国家自然科学基金联合基金项目(U21A20186);国家自然科学基金面上项目(32371684)资助

作者简介:王守兴(1991-),男,汉族,青海湟中人,工程师,本科,主要从事生态学研究方向研究,E-mail:wangshx717@163.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail: 2548414897@qq.com

River-Source Region, with severely degraded alpine grassland (CK) as the control. Soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), microbial biomass carbon (MBC), nitrogen (MBN), and phosphorus (MBP) in the 0-10 cm layer were measured to analyze their stoichiometric ratios and microbial quotients. The impacts of different restoration modes on soil-microbial stoichiometric balance were further elucidated. The results demonstrated that all three artificial grassland establishment modes significantly enhanced SOC, MBN, and MBP contents. Specifically, the SF treatment increased soil TN, whereas the XF treatment reduced TN and decreased TP by 50.42%. MBN increased by 24.36% and 35.59% under SF and XF treatments, respectively. The SFXF treatment decreased the microbial C-quotient by 78.40%, while the XF treatment elevated the microbial N-quotient by 49.61%, and the SFXF treatment reduced it by 11.33%. After restoration, the stoichiometric imbalances in soil-microbial biomass (Cimb:Nimb, Cimb:Pimb, and Nimb:Pimb) increased across all treatments, with the most pronounced escalation observed in the SFXF treatment. Redundancy analysis (RDA) revealed that soil N:P and C:P ratios were key drivers of microbial quotient variations. In conclusion, the SFXF mixed planting exerted the most substantial influence on soil-microbial C-N-P cycling. For practical management, supplemental nitrogen fertilization is recommended to optimize plant growth and improve soil quality.

Key words: Artificial grassland; Microbial biomass; Stoichiometric ratio; Microbial quotient; Stoichiometric imbalance

土壤微生物是驱动养分循环与转化过程的关键生物群落,其生物量(Soil microbial biomass, SMB)可作为评估土壤养分库容量和供应潜力的重要生物学指标^[1-2]。研究表明,SMB的动态变化与土壤有机质分解动力学、微生物代谢活性及生态系统初级生产力之间存在显著的定量关系^[3-5]。在土壤-植物系统养分循环过程中,微生物群落通过其同化-矿化作用的动态平衡调控着养分迁移转化的关键路径。土壤微生物生物量的化学计量特征作为重要的调控因子,直接决定了土壤有机质的周转效率及养分生物有效性^[2]。人工草地建植会改变土壤微环境,包括土壤理化性质(如pH值、水分、温度)、生物因子(如群落组成、根系分泌物、凋落物输入)及其交互作用,进而影响土壤微生物群落结构与功能,最终调控土壤微生物生物量的动态变化^[6]。研究表明,人工草地土壤微生物量碳、氮和磷可能呈现增加、降低或稳定的趋势,其变化规律取决于草地类型、管理措施及环境条件的协同作用^[7-8]。已有研究通过对6种草地生态系统土壤微生物生态化学计量特征的分析,发现退化草地经人工建植后,土壤微生物量碳、氮和磷均呈现增加趋势,同时,不同人工草地类型中微生物生物量化学计量比具有显著差异,其动态变化呈现明显的时空异质性^[9]。因此,人工草地建植类型是影响土壤微生物生物量及其化学计量特征的关键因素,且其影响效应具有显著的草地类型依赖性和时空尺度特异性。

土壤微生物生物量化学计量比是表征土壤肥力的关键指标,能够有效指示土壤养分供应状况及

微生物生长的限制性元素^[9-11]。尽管土壤微生物通常维持相对稳定的碳氮磷比值,但该比值的波动往往与微生物群落结构的演替存在显著关联^[12-13]。土壤养分有效性的变化会影响微生物碳氮磷比值及其与土壤养分的耦合关系。微生物代谢活动依赖于底物类型及其有效性,其中微生物熵作为重要参数,可用于量化微生物能量分配策略和资源利用效率。研究表明,微生物熵的动态变化受土壤有机质数量和质量的三重调控,进而影响土壤养分的微循环过程^[14-15]。微生物熵不仅适用于土壤退化程度的评估,更是表征生态系统恢复动态的关键生物学指标^[16]。然而,目前关于植被恢复过程中土壤微生物熵变化规律的研究仍存在较大争议^[17]。因此,研究人工草地建植过程中微生物生物量及其化学计量特征的演变规律,并阐明其与微生物熵的互作机制具有重要科学意义。

三江源地区位于青藏高原腹地,是长江、黄河和澜沧江的发源地。作为典型的生态脆弱区,该区域不仅具有重要的生物多样性保护价值,更是全球气候变化响应的关键敏感区^[18]。近年来,在气候变化和人类活动的双重作用下,高寒草地退化现象日益严重。为应对这一生态问题,人工草地建植已成为三江源退化草地生态修复的重要措施^[19]。现有研究多集中于人工草地对植被生产力、物种多样性及土壤养分的影响,而对土壤微生物群落特征及其化学计量学特性的研究相对匮乏。因此,研究退化草地在人工植被恢复过程中微生物生物量的影响因素,以及土壤微生物化学计量特征与微生物熵的

耦合关系具有重要的科学意义。本研究选取三江源地区三种人工草地及退化草地为研究对象,采集0~10 cm表层土壤样品。通过测定土壤有机碳、全氮和全磷含量,以及微生物生物量碳、氮和磷含量,计算土壤-微生物碳氮磷化学计量比和微生物熵,并对比分析各处理间的差异特征,旨在解决以下问题:(1)不同类型人工草地建植过程中微生物生物量及微生物熵的演变规律;(2)人工草地建植下微生物生物量的响应差异,以及微生物熵与碳氮磷化学计量特征的互作关系。研究成果将为三江源地区人工草地建植提供理论依据,并深化对该区域土壤碳氮磷生物地球化学循环过程的理解。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海省果洛藏族自治州玛沁县军牧场,毗邻三江源高寒草甸生态观测站,地理位置为((34°42'~34°45'N,100°21'~100°23'E),海拔约为3730 m。该地区属于典型的大陆高寒季风气候,日照充足,年均日照时数在2113至2607 h之间。该地全年无绝对无霜期,年平均气温约为0.7℃,年降水量在423~565 mm之间,降水主要集中于5—8月的植物生长季节,雨热同季。土壤主要为高寒草甸土。区域内常见的植物物种包括垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、冷地早熟禾(*Poa araratica*)、细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)、雪白委陵菜(*Potentilla chinensis*)、黄帚橐吾(*Ligularia virgaurea*)和青海刺参(*Morina kokonorica*)等。

1.2 试验设计

本研究于2021年5月在青海果洛军牧场黑土滩退化草地展开。基于植物生长型和生态学特征,设置三种人工草地建植模式:上繁草型(SF)、下繁草型(XF)及其上繁草下下繁草(SFXF),并以黑土滩为对照(CK)。试验采用随机区组设计,各处理设3次重复。小区面积为3 m×6 m,间距2 m。SF处理选用垂穗披碱草和同德短芒披碱草(*Elymus breviaristatus*)组合,播种量2.25 g·m⁻²;XF处理由冷地早熟禾、中华羊茅和星星草(*Puccinellia tenuiflora*)组成,播种量0.7 g·m⁻²;SFXF处理则混合上述五种草种,其中上繁草1.80 g·m⁻²,下繁草0.30 g·m⁻²。

1.3 土壤样品采集、处理和测定

于2023年8月中旬,完成了植物调查后。在每个样方内,对角线设置5个采样点,使用内径5 cm的土钻采集0~10 cm深度的土壤样品。采集的样品经充分混匀后,装入无菌自封袋中。立即置于4℃冷藏箱保存并运送至实验室。样品经预处理(剔除可见石砾、植物根系及残体)后过2 mm筛,分为两部分进行处理:新鲜样品用于测定土壤微生物生物量碳(MBC)、氮(MBN)和磷(MBP);风干样品用于测定土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)。SOC测定采用重铬酸钾氧化-外加热法;TN和TP含量使用全自动间断化学分析仪测定;MBC、MBN和MBP采用氯仿熏蒸-K₂SO₄提取法测定^[20]。

1.4 数据分析

参考Moosshsmmer等^[21]和周正虎和王传宽^[9]的研究方法,采用元素质量比表征土壤及其微生物生物量的化学计量特征。具体计算指标如下:

土壤元素计量比:

$$\text{碳磷比}(C_{\text{soil}}:P_{\text{soil}})=\text{土壤有机碳含量/全磷含量} \quad (1-2)$$

$$\text{氮磷比}(N_{\text{soil}}:P_{\text{soil}})=\text{全氮含量/全磷含量} \quad (1-3)$$

微生物生物量计量比:

$$\text{微生物碳氮比}(C_{\text{mic}}:N_{\text{mic}})=\text{微生物生物量碳/微生物生物量氮} \quad (1-4)$$

$$\text{微生物碳磷比}(C_{\text{mic}}:P_{\text{mic}})=\text{微生物生物量碳/微生物生物量磷} \quad (1-5)$$

$$\text{微生物氮磷比}(N_{\text{mic}}:P_{\text{mic}})=\text{微生物生物量氮/微生物生物量磷} \quad (1-6)$$

微生物熵指标:

$$q\text{MBC}(\%)=(C_{\text{mic}}/C_{\text{soil}})\times 100 \quad (1-7)$$

$$q\text{MBN}(\%)=(N_{\text{mic}}/N_{\text{soil}})\times 100 \quad (1-8)$$

$$q\text{MBP}(\%)=(P_{\text{mic}}/P_{\text{soil}})\times 100 \quad (1-9)$$

微生物化学计量不平衡性指数:

$$C_{\text{imb}}:N_{\text{imb}}=(C_{\text{mic}}:N_{\text{mic}})/(C_{\text{soil}}:N_{\text{soil}}) \quad (1-10)$$

$$C_{\text{imb}}:P_{\text{imb}}=(C_{\text{mic}}:P_{\text{mic}})/(C_{\text{soil}}:P_{\text{soil}}) \quad (1-11)$$

$$N_{\text{imb}}:P_{\text{imb}}=(N_{\text{mic}}:P_{\text{mic}})/(N_{\text{soil}}:P_{\text{soil}}) \quad (1-12)$$

本研究采用SPSS 16.0软件进行统计分析,通过单因素方差分析(One-way ANOVA)和邓肯(Duncan)多重比较检验($P<0.05$)评估不同恢复模式与退化草地的差异显著性,所有数据均以均值±标准误形式呈现;采用Pearson相关分析和探究土

壤碳氮磷含量与微生物生物量及其计量比的相关性;运用冗余分析以解析微生物熵与土壤-微生物计量特征的关系。利用Origin2025完成可视化。

2 结果与分析

2.1 土壤碳、氮、磷含量及其化学计量

三种人工草地建植后土壤SOC含量均呈现增加趋势,其中SF、XF和SFXF处理分别较CK提高14.54%、38.65%和76.95%,且SFXF处理的增幅达到显著水平($P<0.05$,图1a);人工草地建植对TN含量的影响相对较小,但呈现差异化特征。其

中,SF处理使TN含量提高17.82%,而XF处理则降低19.64%(图1b;SF和SFXF处理的TP含量与CK相比变化较小,而XF处理则导致TP含量大幅下降50.42%(图1c)。

人工草地建植显著改变了土壤碳氮磷化学计量比(图1)。所有处理均使 $C_{\text{soil}}:N_{\text{soil}}$ 比值呈现上升趋势,其中SFXF处理显著上升82.25%($P<0.05$)。 $C_{\text{soil}}:P_{\text{soil}}$ 比值在SF、XF和SFXF处理中分别上升21.16%、64.74%和82.23%,其中XF和SFXF处理的增幅达到显著水平($P<0.05$)。 $N_{\text{soil}}:P_{\text{soil}}$ 比值在SF和XF处理中分别提高26.87%和31.30%,但差异未达显著水平。

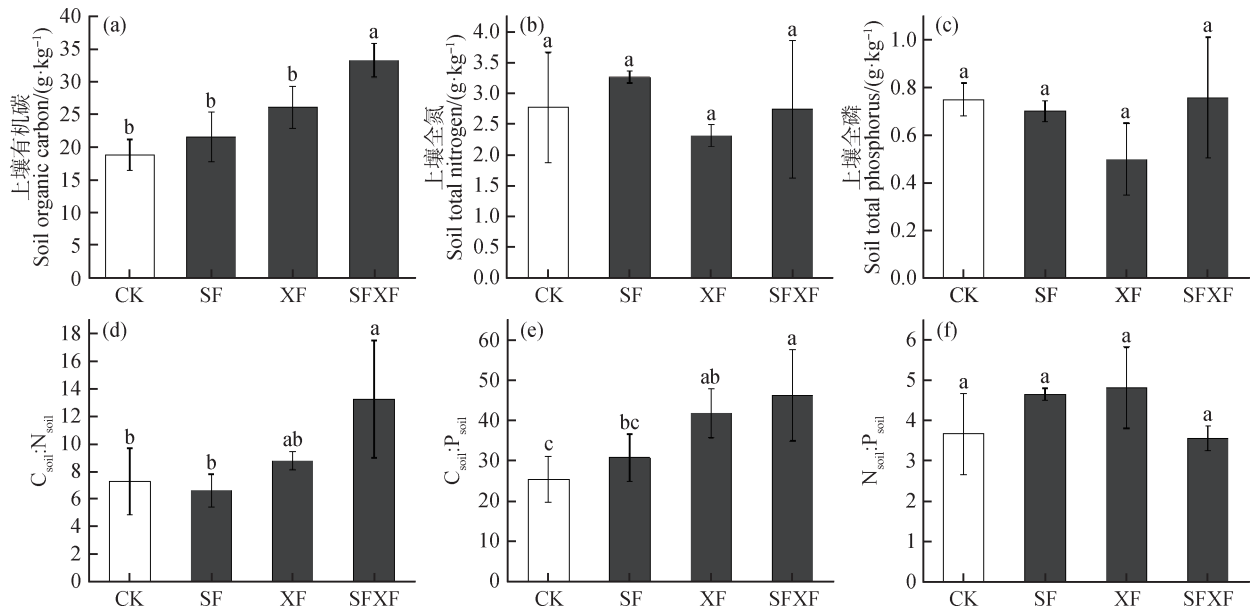


图1 人工草地建植过程中土壤碳、氮、磷含量及其化学计量变化特征

Fig. 1 Characteristics of soil C, N and P contents and their stoichiometric changes during the establishment of artificial grasslands
注:CK,退化草地(对照);SF,上繁草;XF,下繁草;SFXF,上繁草+下繁草; $C_{\text{soil}}:N_{\text{soil}}$,土壤碳氮比; $C_{\text{soil}}:P_{\text{soil}}$,土壤碳磷比; $N_{\text{soil}}:P_{\text{soil}}$,土壤氮磷比。不同小写表示不同处理之间差异显著性($P<0.05$),下同

Note:CK, degraded grassland (control); SF, top-farming grass; XF, bottom-farming grass; SFXF, top-farming grass+bottom-farming grass;
 $C_{\text{soil}}:N_{\text{soil}}$, soil carbon/nitrogen ratio; $C_{\text{soil}}:P_{\text{soil}}$, soil carbon/phosphorus ratio; $N_{\text{soil}}:P_{\text{soil}}$, soil nitrogen/phosphorus ratio. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$), the same as below

2.2 土壤微生物生物量及其化学计量特征

3种人工草地的MBC含量均高于CK(图2a),分别提高了9.69%、13.66%和2.40%。MBN含量在SF和XF处理中分别提高了24.36%和35.59%,而在SFXF中则降低了13.16%(图2b)。3种人工草地建植下,MBP含量显著提高($P<0.05$),分别提高了76.18%、114.12%和228.88%(图2c)。

SF和XF处理下 $C_{\text{mic}}:N_{\text{mic}}$ 分别降低了15.76%和21.68%,SFXF处理则上升了8.08%(图2d)。3种人工草地的 $C_{\text{mic}}:P_{\text{mic}}$ 分别降低了63.27%、93.61%和217.45%(图2e)。人工草地建植同样降低了 $N_{\text{mic}}:P_{\text{mic}}$,相较于CK,SF、XF和SFXF处理的 $N_{\text{mic}}:P_{\text{mic}}$ 分别显著降低了40.23%、57.34%和256.46%,其中在SFXF处理中最为显著(图2f)。

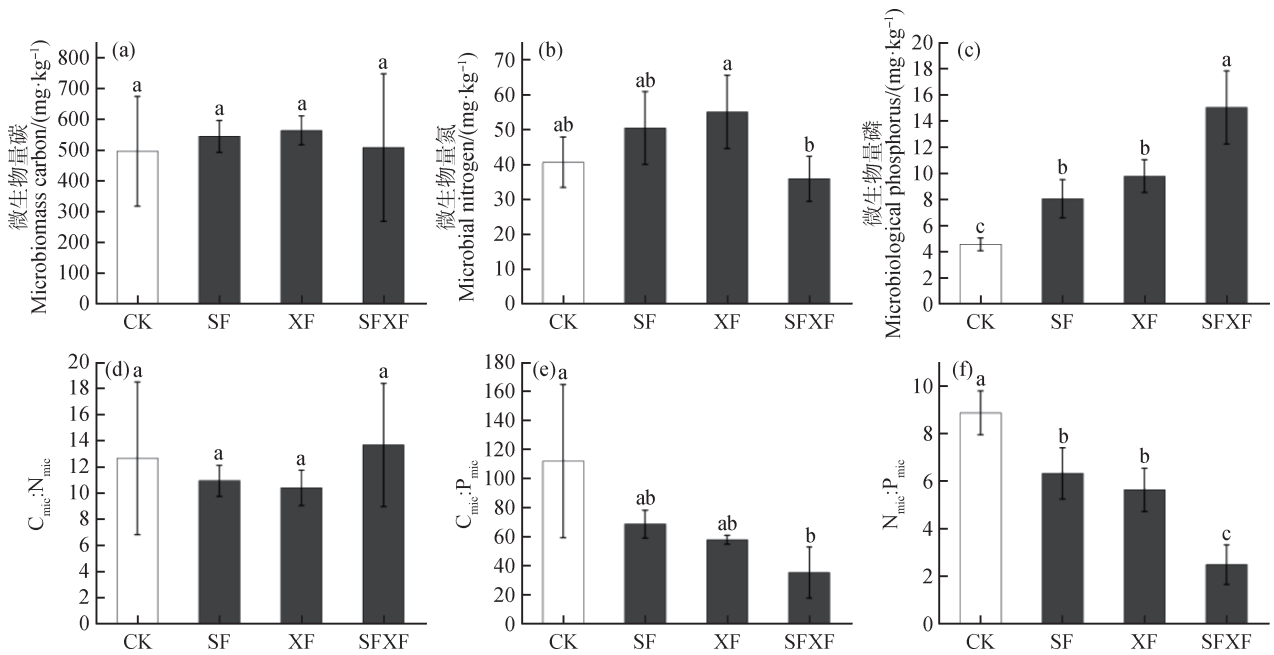


图2 人工草地建植过程中土壤微生物量碳、氮、磷及其化学计量的变化特征

Fig. 2 Characteristics of changes in soil microbiomass carbon, nitrogen, phosphorus and their stoichiometry during artificial grassland establishment

注: $C_{mic}:N_{mic}$, 微生物量碳氮比; $C_{mic}:P_{mic}$, 微生物量碳磷比; $N_{mic}:P_{mic}$, 微生物量氮磷比

Note: $C_{mic}:N_{mic}$, microbial carbon to nitrogen mass ratio; $C_{mic}:P_{mic}$, microbial carbon to phosphorus mass ratio; $N_{mic}:P_{mic}$, microbial nitrogen to phosphorus mass ratio

2.3 土壤微生物熵和微生物化学计量不平衡性特征

人工草地建植显著改变了土壤微生物量化学计量特征。SF和XF处理下qMBC变化幅度较小,而SFXF处理则降低了78.40%(图3a)。qMBN在XF处理中提高了49.61%,但在SFXF处理中降低了11.33%(图3b)。三种处理均提高了qMBP,增幅分别为85.80%(SF)、227.76%(XF)和240.21%(SFXF),其中XF和SFXF处理的差异达到显著水平($P < 0.05$,图3c)。

所有处理均使 $C_{imb}:N_{imb}$ 、 $C_{imb}:P_{imb}$ 和 $N_{imb}:P_{imb}$ 值上升。具体而言,XF和SFXF处理使 $C_{imb}:N_{imb}$ 分别提高了21.91%和54.59%(图3d); $C_{imb}:P_{imb}$ 在SF、XF和SFXF处理中分别增加76.58%、176.39%和574.55%,其中SFXF处理的增幅最为显著($P < 0.05$,图3e); $N_{imb}:P_{imb}$ 值在三种处理中分别上升81.87%(SF)、107.93%(XF)和280.22%(SFXF,图3f)。

2.4 土壤碳氮磷和土壤-微生物生物量化学计量之间的相互作用

根据Pearson相关分析结果表明(图4),土壤有

机碳与微生物生物量磷、土壤碳氮比及微生物氮磷失衡比呈极显著正相关($P < 0.01$),而与微生物碳磷比呈极显著负相关($P < 0.01$);全氮与全磷、微生物生物量碳呈极显著正相关($P < 0.01$),但与土壤碳氮比和微生物碳氮失衡比呈显著负相关($P < 0.05$);微生物生物量碳与全氮及微生物碳氮比呈显著正相关($P < 0.05$);微生物生物量磷与有机碳、微生物碳氮失衡比及土壤碳氮比呈显著正相关($P < 0.05$),而与微生物碳氮比呈显著负相关($P < 0.05$)。

2.5 土壤微生物熵与土壤-微生物化学计量不平衡性的冗余分析

冗余分析结果显示,土壤-微生物化学计量特征能显著解释微生物熵的变异规律(累计解释率85.95%,第一轴61.84%,第二轴24.11%)。各微生物熵指标与化学计量特征呈现显著相关性(图5):qMBC与 $N_{soil}:P_{soil}$ 、 $N_{mic}:P_{mic}$ 呈正相关,与 $C_{soil}:P_{soil}$ 、 $C_{soil}:N_{soil}$ 呈负相关;qMBN与 $N_{soil}:P_{soil}$ 、 $C_{soil}:N_{soil}$ 呈正相关,与 $C_{mic}:P_{mic}$ 呈负相关;qMBP则与 $C_{soil}:P_{soil}$ 、 $N_{soil}:P_{soil}$ 呈正相关,与 $C_{mic}:N_{mic}$ 、 $N_{mic}:P_{mic}$ 呈负相关。

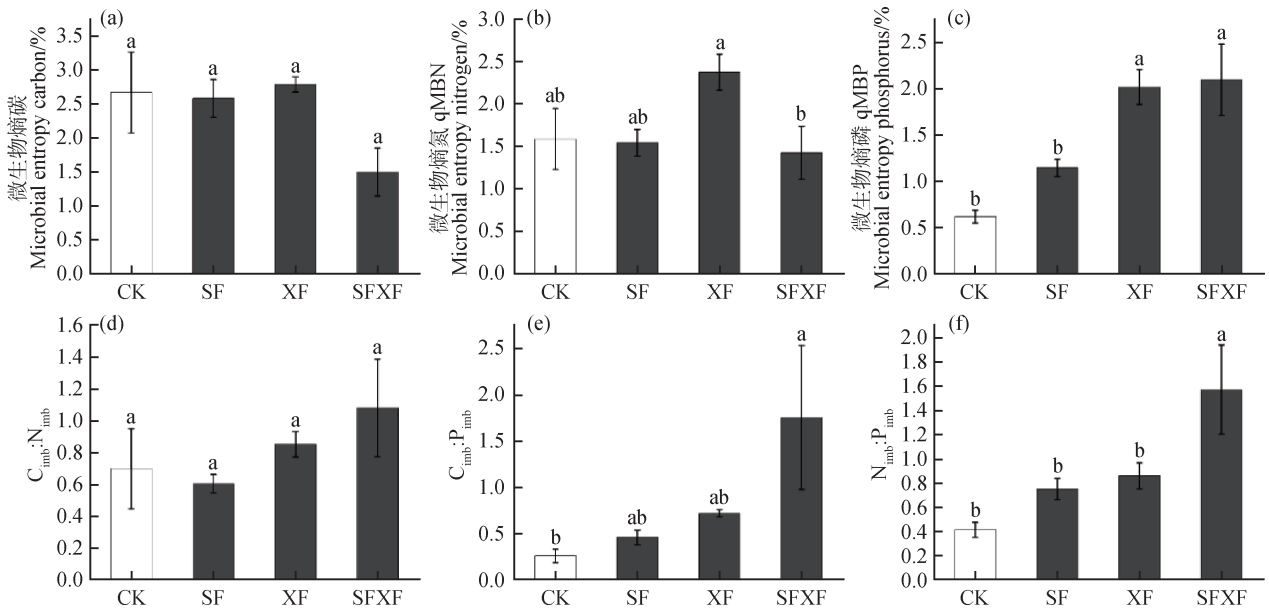


图3 人工草地建植过程中土壤微生物熵和微生物化学计量不平衡性的变化特征

Fig. 3 Characteristics of changes in soil microbial entropy and microbial stoichiometric disequilibrium in the process of artificial grassland establishment

注: $C_{imb}:N_{imb}$, 微生物生物量碳氮化学计量不平衡性; $C_{imb}:P_{imb}$, 微生物生物量碳磷化学计量不平衡性; $N_{imb}:P_{imb}$, 微生物生物量氮磷化学计量不平衡性

Note: $C_{imb}:N_{imb}$, microbial biomass carbon and nitrogen stoichiometric imbalance; $C_{imb}:P_{imb}$, microbial biomass carbon and phosphorus stoichiometric imbalance; $N_{imb}:P_{imb}$, microbial biomass nitrogen and phosphorus stoichiometric imbalance

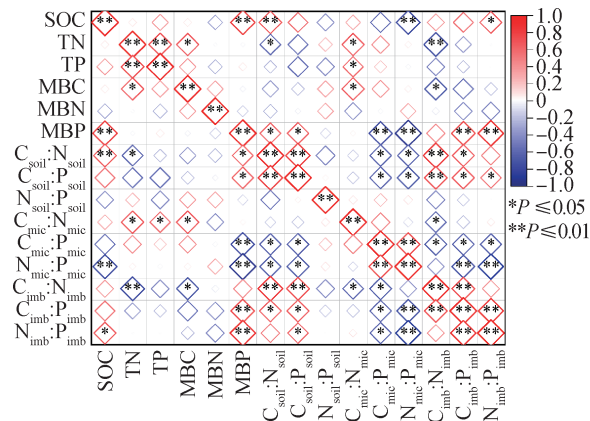


图4 土壤碳氮磷和土壤-微生物生物量化学计量之间的相互关系

Fig. 4 Correlation between soil carbon, nitrogen, phosphorus and soil-microbial biomass stoichiometry

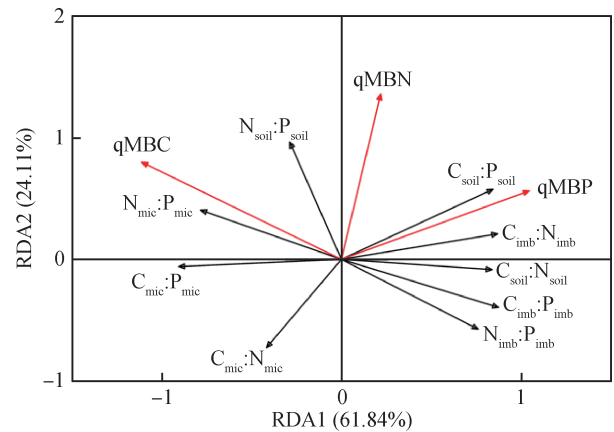


图5 土壤微生物熵和土壤-微生物 C:N:P 化学计量的 RDA 排序图

Fig. 5 RDA ordering of soil microbial entropy and soil-microbial C:N:P stoichiometry

注: $qMBC$, 微生物熵碳; $qMBN$, 微生物熵氮; $qMBP$, 微生物熵磷
Note: $qMBC$, Microbial entropy carbon; $qMBN$, microbial entropy nitrogen; $qMBP$, microbial entropy phosphorus

3 讨论

3.1 人工草地建植对土壤碳、氮、磷含量及其化学计量特征的影响

人工草地建植显著改变了土壤有机碳、全氮和全磷含量,从而引起土壤 C:N:P 化学计量比的重构^[22]。土壤碳氮比作为表征土壤有机质分解动态

的关键指标,其比值变化能够有效指示微生物对有机底物的利用效率。具体而言,高的碳氮比表明有机质矿化速率降低,土壤质量退化;而较低的比值则指示更高效的有机质周转和更好的土壤肥力状况^[23]。本研究中,人工草地建植促进了土壤有机碳

的积累,但土壤全氮含量表现出明显的时空异质性。这种差异性响应导致建植后土壤碳氮比呈现上升趋势。三种人工草地类型的土壤碳氮比变化范围为6.61~13.23,略低于青藏高原地区土壤碳氮比^[24]。这种差异可能源于人工草地建植过程中土壤有机碳累积速率与全氮的动态不平衡,以及植物群落演替和根系碳氮输入的时间异步性^[25]。这些因素共同影响了微生物群落组成的改变,进而导致了土壤有机质分解、矿化及利用效率的不同。

土壤碳磷比是衡量土壤微生物磷矿化速率以及植物从土壤中吸收固定磷的重要指标^[26]。已有研究指出,当碳磷比较低时,有利于微生物分解土壤有机质,增加有效磷含量,从而缓解磷限制^[27];也有研究认为,碳磷比较高则说明土壤微生物对有效磷的利用更倾向于同化,可能导致土壤微生物与地上植被之间出现竞争性吸收,从而提升土壤的磷固持能力^[28]。本研究结果显示,随着草地混播种类的增加,SFXF人工草地的碳磷比值达到最高,同时碳氮比也在SFXF中最高。这表明,与其他人工草地和退化草地相比,该区域土壤磷限制更为显著,有机磷矿化率较低,微生物分解受到磷限制的影响较大。

3.2 人工草地建植对微生物量碳、氮、磷含量及其化学计量特征的影响

人工草地建植通过改变植物群落特征,进而影响土壤底物可利用性、微生物群落结构及土壤酶活性等多方面因素,使土壤微生物生物量在时空上呈现动态变化^[29]。研究结果显示,建植后土壤微生物量碳、氮、磷含量普遍提升,其中XF人工草地的增幅尤为显著。这种差异主要源于不同人工草地类型的植被特征,XF人工草地以矮生禾草为主,其凋落物量少且分解速率快;而SF和SFXF人工草地以高大禾草为主,凋落物更难分解且分解速率缓慢,导致养分释放效率存在显著差异。XF人工草地的枯落物分解产物更易被微生物利用,为微生物群落提供了更丰富的养分来源,从而促进其生长繁殖,这可能是其微生物量碳、氮、磷含量较高的主要原因^[30]。此外,人工草地建植初期,地上植物对养分的需求较低,减轻了土壤微生物与植物间的养分竞争。同时,土壤中残留根系分解及枯落物的快速降解为微生物提供了充足的营养支持,有利于维持微生物群落的生长繁殖^[31]。此外,微生物量化学计量

比是反映微生物群落结构变化的重要指标^[32]。

不同人工草地在物种组成、种群数量、生物量以及枯落物和根系的质量等方面存在显著差异^[33],这些差异直接影响土壤微生物群落的种类组成和结构特征,进而导致微生物生物量呈现不同的变化趋势,最终影响土壤微生物生物量的化学计量特征。本研究发现,人工草地建植降低了微生物量碳氮比、微生物量碳磷比和微生物量氮磷比,这一现象可能与建植过程中选择的优势草种(垂穗披碱草、中华羊茅和冷地早熟禾)密切相关。不同草种产生的地表枯落物和根系分泌物在数量和质量上存在差异,这些差异通过影响土壤微生物活性,最终改变了微生物生物量的动态变化^[34]。前人研究表明,当微生物量碳氮比值处于3~6范围内时,土壤微生物群落以细菌为主;而当比值较高时,则以真菌占优势^[35]。本研究区,各人工草地的微生物量碳氮比值介于10.94~13.68之间,明显高于全球平均水平(8.2)^[36],表明研究区土壤微生物群落呈现明显的真菌优势特征。此外,研究区微生物量氮磷比的平均值低于全球普遍水平(6.9),表明该地区草地微生物群落可能正面临磷元素的限制。

3.3 人工草地建植对土壤微生物熵的影响

土壤微生物量熵与土壤碳、氮、磷含量及其不平衡状态指标间存在显著相关性^[37]。这种关联性源于土壤微生物的生长繁殖和代谢过程需要土壤碳、氮和磷等多种养分的均衡供应。本研究发现,在表征土壤-微生物平衡状态的指标体系中,微生物碳磷比、微生物碳氮比以及微生物氮磷比三者之间存在显著的正相关关系。冗余分析显示,土壤氮磷比和碳磷比是调控微生物量熵变化的关键驱动因子。这一发现不仅证实了人工草地生态系统中土壤微生物的生长繁殖主要受氮磷元素协同作用的调控,同时反映了土壤-微生物系统化学计量平衡的动态特征,体现了微生物群落对养分波动的适应性响应机制,并与草地生态系统养分循环的调节过程密切相关^[38]。基于生长速率理论,微生物快速生长时需要大量合成蛋白酶和核糖体RNA,这将导致土壤氮磷比值降低^[39]。本研究发现,微生物碳氮比与氮磷比、微生物熵氮呈显著负相关;土壤碳磷比、氮磷比及其化学计量失衡指数与微生物熵磷呈正相关。这些结果表明,当微生物碳氮比和氮磷比较高时,其生长将受到氮磷限制,进而降低对这两种元素的分解能力,

最终导致土壤碳磷和氮磷比值下降。综合来看,人工草地建植显著影响微生物熵氮,表明研究区生态系统主要受氮限制^[9]。在全球气候变化和氮沉降加剧的背景下,人工草地的生态功能可能面临挑战,特别是地上植被与地下元素循环的平衡关系及其化学计量特征将发生显著改变。因此,未来研究应重点揭示植物-凋落物-土壤系统的元素耦合机制及其季节动态,同时深入解析全球变化因子(如增温和氮沉降)对生态系统化学计量特征的复合效应。

4 结论

三种人工草地建植模式均提高了土壤有机碳含量,但对全氮和全磷含量的影响相对较小。人工草地建立后,土壤微生物量碳、氮、磷均显著增加,其中SFXF草地的微生物量磷增幅尤为明显。土壤C:N:P化学计量比呈现上升趋势,而微生物量C:N:P比值则表现出相反的变化趋势。这种土壤与微生物生物量化学计量特征的差异,为评价人工草地土壤质量变化提供了重要指标。研究还发现,该区域生态系统可能受到氮素限制,因此建议在人工草地管理中适当增加氮素或氮磷养分的供应,以促进植被生长和生态系统恢复。

参考文献

- [1] KWABIAH A B, PALM C A, STOSKOPF N C, et al. Response of soil microbial biomass dynamics to quality of plant materials with emphasis on P availability[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(2): 207-216
- [2] ZHOU X, SUN H, PUMPANEN J, et al. The impact of wild-fire on microbial C:N:P stoichiometry and the fungal-to-bacterial ratio in permafrost soil[J]. *Biogeochemistry*, 2019, 142(1): 1-17[LinkOut]
- [3] MALÝ S, FIALA P, REININGER D, et al. The relationships among microbial parameters and the rate of organic matter mineralization in forest soils, as influenced by forest type[J]. *Pedobiologia*, 2014, 57(4/5/6): 235-244
- [4] KASCHUK G, ALBERTON O, HUNGRIA M. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(1): 1-13
- [5] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J]. *生态学报*, 2005, 25(3): 513-519
WANG Q K, WANG S L, FENG Z W, et al. Active soil organic matter and its relationship with soil quality[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 513-519
- [6] 于皓, 刘悦, 邓晔, 等. 天然高寒草地转变为混播人工草地对土壤微生物群落特征的影响[J]. *环境科学*, 2023, 44(5): 2928-2935
YU H, LIU Y, DENG Y, et al. Effects of the transformation from natural alpine grassland to mixed artificial grassland on the characteristics of soil microbial community[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(5): 2928-2935
- [7] 李双雄, 姚拓, 王理德, 等. 祁连山东段退化高寒草地修复过程中土壤微生物生物量变化[J]. *草地学报*, 2023, 31(12): 3668-3675
LI S X, YAO T, WANG L D, et al. Changes of soil microbial biomass during the restoration of the degraded alpine grasslands in eastern Qilian Mountains[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(12): 3668-3675
- [8] 阿的哈则, 常涛, 苏洪烨, 等. 单播和混播禾草对土壤理化性质和微生物生物量的影响[J]. *草地学报*, 2024, 32(7): 2072-2080
A D, CHANG T, SU H Y, et al. Effects of monoculture and mixed-sown grasses on soil physicochemical properties and microbial biomass[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(7): 2072-2080
- [9] 周正虎, 王传宽. 生态系统演替过程中土壤与微生物碳氮磷化学计量关系的变化[J]. *植物生态学报*, 2016, 40(12): 1257-1266
ZHOU Z H, WANG C K. Changes of the relationships between soil and microbes in carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry during ecosystem succession[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40(12): 1257-1266
- [10] CHEN J, SEVEN J, ZILLA T, et al. Microbial C: N: P stoichiometry and turnover depend on nutrients availability in soil: a ¹⁴C, ¹⁵N and ³³P triple labelling study[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 131: 206-216
- [11] 蒋帅, 王庆贵. 北方森林土壤微生物化学计量不平衡响应机制研究进展[J]. *土壤科学*, 2021(2): 45-53
JIANG S, WANG Q G. Response mechanism of soil microbial stoichiometry imbalance in a boreal forest: a review[J]. *Hans Journal of Soil Science*, 2021(2): 45-53
- [12] 胡宗达, 刘世荣, 刘兴良, 等. 川西亚高山天然次生林不同演替阶段土壤-微生物生物量及其化学计量特征[J]. *生态学报*, 2021, 41(12): 4900-4912
HU Z D, LIU S R, LIU X L, et al. Soil and soil microbial biomass contents and C:N:P stoichiometry at different succession stages of natural secondary forest in sub-alpine area of western Sichuan, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(12): 4900-4912
- [13] 纪娇娇, 郑蔚, 杨智杰, 等. 亚热带森林转换对土壤微生物呼吸及其熵值的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(3): 800-807
JI J J, ZHENG W, YANG Z J, et al. Effects of subtropical forest conversion on soil microbial respiration and its entropy[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(3): 800-807
- [14] 胡斯乐, 董立国, 白晓雄, 等. 黄土丘陵区典型土地利用类型土壤-微生物量及其生态化学计量特征[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(3): 298-305
HU S L, DONG L G, BAI X X, et al. Soil microbial biomass and ecological stoichiometric characteristics of typical land use types in Loess Hilly Region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3): 298-305
- [15] BANNING N C, GRANT C D, JONES D L, et al. Recovery of soil organic matter, organic matter turnover and nitrogen cycling in a post-mining forest rehabilitation chronosequence[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(8): 2021-2031
- [16] ANDERSON T H. Microbial eco-physiological indicators to

- asses soil quality[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2003, 98(1/2/3): 285-293
- [17] 范跃新, 杨玉盛, 杨智杰, 等. 中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段土壤活性有机碳含量及季节动态[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5751-5759
- FAN Y X, YANG Y S, YANG Z J, et al. Seasonal dynamics and content of soil labile organic carbon of mid-subtropical evergreen broadleaved forest during natural succession [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5751-5759
- [18] 冯起, 白光祖, 李宗省, 等. 加快构建西北地区生态保护新格局[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(10): 1457-1470
- FENG Q, BAI G Z, LI Z X, et al. Accelerate construction of new pattern of ecological protection in northwest China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(10): 1457-1470
- [19] MIEHE G, SCHLEUSS P M, SEEGER E, et al. The *Kobresia pygmaea* ecosystem of the Tibetan Highlands - Origin, functioning and degradation of the world's largest pastoral alpine ecosystem: *Kobresia* pastures of Tibet [J]. Science of the Total Environment, 2019, 648: 754-771
- [20] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 50-110
- WU J S, LIN Q M, HUANG Q Y, et al. Methods for Measuring Soil Microbial Biomass and Their Applications [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 50-110
- [21] MOOSHAMMER M, WANEK W, ZECHMEISTER-BOLTENSTERN S, et al. Stoichiometric imbalances between terrestrial decomposer communities and their resources: mechanisms and implications of microbial adaptations to their resources[J]. Frontiers in Microbiology, 2014(5): 22
- [22] 董利军, 李金花, 陈珊, 等. 若尔盖湿地高寒草甸退化过程中土壤有机碳含量变化及成因分析[J]. 植物生态学报, 2021, 45(5): 507-515
- DONG L J, LI J H, CHEN S, et al. Changes in soil organic carbon content and their causes during the degradation of alpine meadows in Zoigê Wetland [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(5): 507-515
- [23] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947
- WANG S Q, YU G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3937-3947
- [24] MA R T, HU F N, LIU J F, et al. Shifts in soil nutrient concentrations and C: N: P stoichiometry during long-term natural vegetation restoration [J]. PeerJ, 2020, 8: e8382
- [25] YANG Y H, LUO Y Q. Carbon: nitrogen stoichiometry in forest ecosystems during stand development [J]. Global Ecology and Biogeography, 2011, 20(2): 354-361
- [26] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4674-4682
- ZHU Q L, XING X Y, ZHANG H, et al. Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hillygully region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(15): 4674-4682
- [27] WANG W, SARDANS J, ZENG C, et al. Responses of soil nutrient concentrations and stoichiometry to different human land uses in a subtropical tidal wetland [J]. Geoderma, 2014, 232: 459-470
- [28] 罗达, 刘顺, 史作民, 等. 川西亚高山不同林龄云杉人工林土壤微生物群落结构[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 519-527
- LUO D, LIU S, SHI Z M, et al. Soil microbial community structure in *Picea asperata* plantations with different ages in sub-alpine of western Sichuan, Southwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(2): 519-527
- [29] BAUHUS J, PARÉ D, COUÉ T L. Effects of tree species, stand age and soil type on soil microbial biomass and its activity in a southern boreal forest [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1998, 30(8/9): 1077-1089
- [30] KAISER C, FUCHSLUEGER L, KORANDA M, et al. Plants control the seasonal dynamics of microbial N cycling in a beech forest soil by belowground C allocation [J]. Ecology, 2011, 92(5): 1036-1051
- [31] 于方明, 刘华, 刘可慧, 等. 川西亚高山暗针叶林恢复初期土壤酶活性研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(1): 64-68
- YU F M, LIU H, LIU K H, et al. Changes of soil enzyme activities in the early period restoration of subalpine coniferous forests in western Sichuan, China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(1): 64-68
- [32] 湛贤, 刘洋, 唐实玉, 等. 川西亚高山森林凋落物不同分解阶段基质质量特征[J]. 西北植物学报, 2017, 37(3): 586-594
- CHEN X, LIU Y, TANG S Y, et al. Characteristics of substrate quality variation at different litter decomposition stages in subalpine forest of western Sichuan [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2017, 37(3): 586-594
- [33] LIU X F, LIN T C, VADEBONCOEUR M A, et al. Root litter inputs exert greater influence over soil C than does above-ground litter in a subtropical natural forest [J]. Plant and Soil, 2019, 444(1): 489-499
- [34] CLEVELAND C C, LIPTZIN D. C: N: P stoichiometry in soil: is there a "redfield ratio" for the microbial biomass? [J]. Biogeochemistry, 2007, 85(3): 235-252
- [35] ZHOU Z H, WANG C K. Reviews and syntheses: soil resources and climate jointly drive variations in microbial biomass carbon and nitrogen in China's forest ecosystems [J]. Biogeosciences, 2015, 12(22): 6751-6760
- [36] RONDINA A B L, TONON B C, LESCANO L E A M, et al. Plants of distinct successional stages have different strategies for nutrient acquisition in an Atlantic rain forest ecosystem [J]. International Journal of Plant Sciences, 2019, 180(3): 186-199
- [37] LI J W, LIU Y L, HAI X Y, et al. Dynamics of soil microbial C: N: P stoichiometry and its driving mechanisms following natural vegetation restoration after farmland abandonment [J]. Science of The Total Environment, 2019, 693: 133613
- [38] 王宝荣, 杨佳佳, 安韶山, 等. 黄土丘陵区植被与地形特征对土壤和土壤微生物生物量生态化学计量特征的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 247-259
- WANG B R, YANG J J, AN S S, et al. Effects of vegetation and topography features on ecological stoichiometry of soil and soil microbial biomass in the hilly-gully region of the Loess Plateau, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(1): 247-259
- [39] 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