

DOI: 10.11766/trxb202504070161

CSTR: 32215.14.trxb202504070161

蒲中禹, 黄宇晨, 田莎莎, 王长庭, 刘丹, 柳杨. 降水变化对高寒草甸土壤微生物生物量及其化学计量比的影响[J]. 土壤学报, 2025, PU Zhongyu, HUANG Yuchen, TIAN Shasha, WANG Changting, LIU Dan, LIU Yang. Effects of Precipitation Change on Soil Microbial Biomass and Their Stoichiometric Ratios in an Alpine Meadow[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025.

降水变化对高寒草甸土壤微生物生物量及其化学计量比的影响*

蒲中禹^{1,2}, 黄宇晨^{1,2}, 田莎莎^{1,2}, 王长庭^{1,2,3,4}, 刘丹^{1,2,3,4}, 柳杨^{1,2,3,4†}

(1. 西南民族大学草地资源学院, 成都 610041; 2. 西南民族大学青藏高原研究院, 成都 610041; 3. 西南民族大学青藏高原高寒草地生态保护与利用四川林业草原重点实验室, 成都 610041; 4. 西南民族大学四川若尔盖高寒湿地生态系统国家野外科学观测研究站, 成都 610041)

摘要: 为揭示高寒草甸土壤微生物生物量及其化学计量比对降水变化的响应机制, 本研究在四川省红原县高寒草甸开展模拟降水变化野外控制试验, 设置降水量减少 90% (0.1P)、减少 50% (0.5P)、减少 30% (0.7P)、对照 (1P) 及增加 50% (1.5P) 5 个处理, 测定土壤微生物生物量碳 (MBC)、氮 (MBN)、磷 (MBP) 含量及土壤理化性质指标。结果表明: 1) 土壤 MBC 和 MBN 随降水量的增加而增加, 而土壤 MBP 对降水变化的响应不明显; 2) 土壤 MBC:MBN 和 MBC:MBP 也随降水量的增加而增加, 但降水变化对 MBN:MBP 影响不明显; 3) 相关分析结果显示, 土壤 MBC、MBN 和 MBP 与土壤含水量 (SWC) 呈显著正相关, MBC 和 MBN 与 NO_3^- -N 呈显著正相关, 与 DOC 呈显著负相关, MBC:MBP 和 MBN:MBP 与土壤 C:N 呈显著正相关; 4) 多元线性回归分析结果显示, SWC、DOC、TP、土壤 C:N 和 N:P 分别对土壤微生物生物量及其化学计量比具有显著效应。综上, 土壤水分与土壤养分协同驱动降水变化下高寒草甸土壤微生物生物量及其化学计量比的动态响应。研究成果为气候变化背景下高寒生态系统管理提供了微生物学视角的理论依据。

关键词: 降水变化; 高寒草甸; 土壤微生物生物量; 化学计量比; 青藏高原

中图分类号: S812.2 文献标志码: A

Effects of Precipitation Change on Soil Microbial Biomass and Their Stoichiometric Ratios in an Alpine Meadow

PU Zhongyu^{1,2}, HUANG Yuchen^{1,2}, TIAN Shasha^{1,2}, WANG Changting^{1,2,3,4}, LIU Dan^{1,2,3,4}, LIU Yang^{1,2,3,4†}

(1. College of Grassland Resources, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China; 2. Institute of Qinghai-Tibetan Plateau, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China; 3. Sichuan Provincial Forest and Grassland Key Laboratory of Alpine Grassland Conservation

* 国家自然科学基金项目 (32201357)、四川省科技计划项目 (2025ZNSFSC1029)、西南民族大学青藏高原研究科技创新团队项目 (2024CXTD01) 和西南民族大学“双一流”项目 (CX2023023) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 32201357), Sichuan Science and Technology Project (No. 2025ZNSFSC1029), the Scientific and Technological Innovation Team for Qinghai-Tibetan Plateau Research in Southwest Minzu University (No. 2024CXTD01), and Southwest Minzu University Double World-Class Project (No. CX2023023).

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: liuyang903@126.com

作者简介: 蒲中禹 (1999—), 男, 四川达州人, 硕士研究生, 主要从事土壤生态学研究。E-mail: 837590008@qq.com

收稿日期: 2025-04-07; 收到修改稿日期: 2025-05-30; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2025- -

and Utilization of Tibetan Plateau, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China; 4. Sichuan Zoige Alpine Wetland Ecosystem National Observation and Research Station, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China)

Abstract: 【Objective】 The increase in global CO₂ concentration and climate warming has accelerated changes in the global water cycle and led to changes in global precipitation patterns. The Qinghai-Tibetan Plateau (QTP) is highly sensitive to global climate change, and its precipitation patterns have also shifted in response to the global precipitation pattern. Soil microorganisms constitute an important part of the underground ecosystem and play key roles in the soil carbon and nutrient cycle. An in-depth understanding of the response of soil microorganisms to precipitation changes is vital for analyzing the internal mechanism of the impact of global climate change on ecosystem carbon and nutrient cycles. However, it is still unclear how precipitation changes affect soil microbial biomass carbon (MBC), nitrogen (MBN), phosphorus (MBP), and their stoichiometric ratios in the alpine grassland ecosystem of the QTP. Therefore, the current study aims to investigate the response mechanisms of soil microbial biomass and their stoichiometric ratios to precipitation changes in an alpine meadow of the QTP. 【Method】 A field manipulation experiment simulating precipitation variations was conducted in an alpine meadow of Hongyuan County, Sichuan Province. Five precipitation gradient treatments were established: a 90% decrease in precipitation (0.1P), a 50% decrease in precipitation (0.5P), a 30% decrease in precipitation (0.7P), a control (1P), and a 50% increase in precipitation (1.5P). Rhizosphere soil was collected in each precipitation gradient treatment. Soil MBC, MBN, and MBP content were determined by the chloroform fumigation method. Soil microbial biomass stoichiometric ratios were calculated by the soil MBC, MBN, and MBP content. At the same time, soil physicochemical properties, including soil water content (SWC), soil pH, soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), dissolved organic carbon (DOC), ammonium nitrogen (NH₄⁺-N), nitrate nitrogen (NO₃⁻-N), and available phosphorus (AP) were also determined. 【Result】 The results showed that: (1) Soil MBC and MBN contents were increased with the increase of precipitation; however, MBP was not changed along the precipitation gradient. Compared with the control (1P), soil MBC and MBN content were significantly reduced in the 0.1P treatment; (2) Soil MBC : MBN and MBC : MBP showed an increasing trend with the increase of precipitation. The 0.1P treatment significantly reduced the MBC : MBP ratio when compared with control; (3) Pearson correlation analysis showed that soil MBC, MBN, and MBP content were significantly positively correlated with SWC, and the MBC and MBN content were also significantly positively correlated with NO₃⁻-N and negatively correlated with DOC. The MBC : MBP and MBN : MBP were significantly positively correlated with soil C : N; (4) Multiple linear regression analysis showed that DOC had a significant negative effect on MBC and MBN, while TP and soil N : P had significant positive effects on MBC and MBN. SWC showed a significant positive effect on MBN and MBP, while the soil C : N showed a significant negative effect on MBP. Soil DOC and SWC had significant negative effects on MBC : MBN, and soil C : N had significant positive effects on MBC : MBP and MBN : MBP. 【Conclusion】 Our study demonstrates that soil moisture and soil nutrients drive the dynamic response of soil microbial biomass to precipitation changes in the alpine grassland ecosystem of the Qinghai-Tibetan Plateau. By understanding the response mechanism of soil microbial biomass to precipitation changes, we can better predict and respond to the potential impacts of climate change on alpine ecosystems, and develop more effective ecological protection and management strategies to maintain the balance and sustainable development of alpine ecosystems. Therefore, this study provides a microbiological theoretical basis for the management of alpine ecosystems in the context of climate change.

Key words: Precipitation change; Alpine meadow; Soil microbial biomass; Stoichiometric ratio; Qinghai-Tibetan Plateau

全球 CO₂ 浓度上升和气候变暖加速了全球水循环过程, 导致了全球降水格局变化^[1]。主要表现为全球陆地地区极端降水事件的频率和强度显著上升, 以及大气湿度和降水强度的整体增加^[2]。青藏高原是世界上海拔最高的高原, 对全球气候变化极为敏感^[3]。研究表明, 青藏高原的年平均降水量在

1979—2016 年期间呈增加趋势, 且降水变化存在明显的季节差异, 其中夏季降水增加最为显著^[4]。降水变化对陆地生态系统可产生一系列影响, 例如, 降水量变化直接影响土壤含水量, 进而影响土壤养分的有效性与运转特性, 并最终影响整个地下生态系统的生物地球化学循环过程^[5]。土壤微生物是地下生态系统重要的组成部分, 在土壤碳、氮、磷循环过程起着重要的调控作用^[6]。深入了解土壤微生物对降水变化的响应, 有利于解析全球气候变化对生态系统碳、氮、磷循环影响的内在机制, 对于全球气候变化背景下生物地球化学模型的构建起着重要作用。

土壤微生物生物量是除了活的植物体外体积小于 $5 \times 10^3 \mu\text{m}^3$ 的生物总量, 主要包括微生物生物量碳 (Microbial biomass carbon, MBC)、微生物生物量氮 (Microbial biomass nitrogen, MBN) 和微生物生物量磷 (Microbial biomass phosphorus, MBP), 是表征土壤微生物活性的重要指标^[7-8]。土壤微生物生物量与土壤中碳、氮、磷等元素循环密切相关。土壤微生物在吸收和转化土壤养分的同时, 通过代谢作用将碳、氮、磷等元素返回土壤, 将植物不能直接利用的大分子有机物分解成简单无机物, 供给植物吸收^[9]。因此, 土壤微生物既是驱动养分转化的媒介, 也是植物吸收养分的重要来源^[10]。研究表明, 土壤微生物生物量一般与降水量呈正相关, 降水量减少通常会降低土壤 MBC、MBN 含量, 因为干旱限制土壤有效水分, 降低物质迁移, 减少分解者的底物供应^[11]。随着降水量增加, 土壤底物有效性增强, 土壤 MBC、MBN 含量也随之增加^[11]。与之相反, 有学者在亚热带森林生态系统中的研究发现, 降水增加会减少土壤微生物生物量, 而降水减少反而会增加土壤微生物生物量^[12]。另有学者在我国吉林松嫩草原的研究发现, 降水量对土壤 MBC 无明显影响^[13]。可见, 目前降水变化对土壤微生物生物量的影响还存在一定的不确定性, 并且研究结果因生态系统的类型而异。而在青藏高原高寒草甸生态系统中, 降水变化如何影响高寒草甸土壤微生物生物量及其化学计量比尚不清楚。

本研究以青藏高原高寒草甸生态系统为研究对象, 通过野外模拟降水变化控制试验, 采集土壤样品并测定土壤微生物生物量碳、氮、磷以及土壤理化性质等指标, 探讨降水变化对青藏高原高寒草甸土壤微生物生物量及其化学计量比的影响。研究可为深入理解高寒草甸生态系统中土壤碳、氮、磷循环的微生物驱动机制提供新的视角, 并为气候变化背景下高寒草甸生态系统的科学管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验样地

本实验研究地点位于四川省阿坝州红原县的西南民族大学国家若尔盖高寒湿地生态站 ($32^\circ 83' \text{N}$, $102^\circ 59' \text{E}$), 地处青藏高原东部, 海拔高度约 3 500 m。该地区气候特征为温带大陆性高原气候, 生长季长达 6 个月, 集中在每年 4 月中旬—10 月中旬。年均气温 1.5°C , 年均降水量为 759 mm^[14]。植被类型为典型的矮嵩草草甸, 物种多样性高, 平均盖度约为 60%~80%。土壤类型为亚高山草甸土, 土壤发育差, 土层浅薄, 土壤有机质含量高, 而土壤氮、磷含量低^[15]。

1.2 试验设计

野外模拟降水变化试验样地始建于 2015 年 5 月, 并持续至今。试验装置主要通过装置 V 型遮雨槽以实现截留降水、增加降水的控制, V 型遮雨槽截留的雨水通过引流器和集雨槽汇入雨量采集器, 被截留的雨水通过人工浇水的方式渗入土壤, 以实现增加降水的目的。整个实验装置是利用雨水在自然重力作用下从高处向低处流动的原理, 实现对自然降水增加和减少的自动控制。各降水处理样地间设置相隔 2 m 的过渡带以避免相互干扰, 遮雨装置四周用雪花铁皮深埋到土壤 40 cm 以阻止土壤中水分的横向流动。根据当地的降水特征, 在研究区内采用完全随机区组设计, 设置 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的样方, 分为 5 个模拟降水梯度的处理: 降水量减少 90% (0.1P)、降水量减少 50% (0.5P)、降

水量减少 30% (0.7P)、对照 (1P) 以及降水量增加 50% (1.5P), 每种处理 6 个重复, 共 30 个样方。

1.3 样品采集

本实验在 2022 年 8 月中旬 (植物生长旺季) 进行土壤样品的采集工作。在每个降水处理的样方中随机选取 1 个 20 cm×20 cm 的小样方, 先调查小样方的植物群落组成, 再用草皮铲将小样方中的所有植物连根铲出, 抖掉松散的土壤, 收集紧密粘附在植物根系上的土壤作为根际土壤样品。共采集 30 个根际土壤样品 (5 处理×6 重复=30 个)。

1.4 土壤理化性质的测定

土壤含水量 (SWC) 采用烘干法测定; 土壤 pH 用电极法测定; 土壤有机碳 (SOC) 采用重铬酸钾-分光光度法测定; 土壤全氮 (TN) 采用靛酚蓝比色法测定; 土壤全磷 (TP) 采用钼锑抗比色法测定^[16]。土壤铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 和硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 用 1 mol·L⁻¹ KCl 溶液浸提后, 分光光度计测定^[16]。土壤可溶性有机碳 (DOC) 用 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 溶液提取, TOC 分析仪测定。土壤有效磷 (AP) 采用 Bray-1 溶液 (0.03 mol·L⁻¹ NH₄F-0.025 mol·L⁻¹ HCl) 浸提, 孔雀石绿法比色测定^[17]。

1.5 土壤微生物生物量的测定

土壤微生物生物量采用氯仿熏蒸-浸提法, 微生物生物量碳 (MBC) 和微生物生物量氮 (MBN) 用 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 溶液浸提, 微生物生物量磷 (MBP) 用 Bray-1 溶液 (0.03 mol·L⁻¹ NH₄F-0.025 mol·L⁻¹ HCl) 浸提^[18-19]。氯仿熏蒸具体操作如下: 称取 10 g 新鲜土样于烧杯中, 同时准备 2~3 个盛有无乙醇氯仿的烧杯 (烧杯中加入少量沸石防止爆沸), 将装有土样和氯仿的烧杯分别放入真空干燥器内, 另外放置一个装有 NaOH 溶液的烧杯以吸收熏蒸期间释放出来的 CO₂。用凡士林将真空干燥器密封, 抽真空至氯仿沸腾后保持 3~5 min, 关闭真空干燥器阀门, 于 25 °C 黑暗条件下熏蒸 24 h。熏蒸结束后打开真空干燥器, 取出装有氯仿的烧杯, 再反复抽气 2~3 次去除多余氯仿。另外称取等量的土样一份, 不用氯仿熏蒸, 其他操作与熏蒸土壤一样, 作为对照土壤。另外, 微生物生物量磷还需设置一组加磷组 (添加磷标准溶液) 的土样用于计算回收率。将各烧杯中的土壤全部转移到离心管中, 加入浸提液并在往复振荡机上振荡 1 h 后离心过滤, 得到待测液。MBC、MBN 的待测液用 TOC 分析仪测定。MBP 的待测液用孔雀石绿法比色测定^[17]。MBC、MBN、MBP 计算公式如下:

$$\text{MBC} = \Delta E_C / K_C \quad (1)$$

$$\text{MBN} = \Delta E_N / K_N \quad (2)$$

$$\text{MBP} = \Delta E_P / K_P / K_b \quad (3)$$

式中: ΔE_C 为熏蒸组与未熏蒸组 TOC 含量之差; K_C 代表 MBC 浸提系数 (0.45); ΔE_N 表示熏蒸组与未熏蒸组 TDN 含量之差; K_N 代表 MBN 浸提系数 (0.54); ΔE_P 表示熏蒸组与未熏蒸组土壤无机 P 含量之差; K_P 代表 MBP 浸提系数 (0.40); K_b 表示添加磷标液后的磷回收率。

土壤微生物化学计量比的计算:

$$\text{土壤微生物量碳氮比 (MBC:MBN)} = \text{MBC/MBN} \quad (4)$$

$$\text{土壤微生物量碳磷比 (MBC:MBP)} = \text{MBC/MBP} \quad (5)$$

$$\text{土壤微生物量氮磷比 (MBN:MBP)} = \text{MBN/MBP} \quad (6)$$

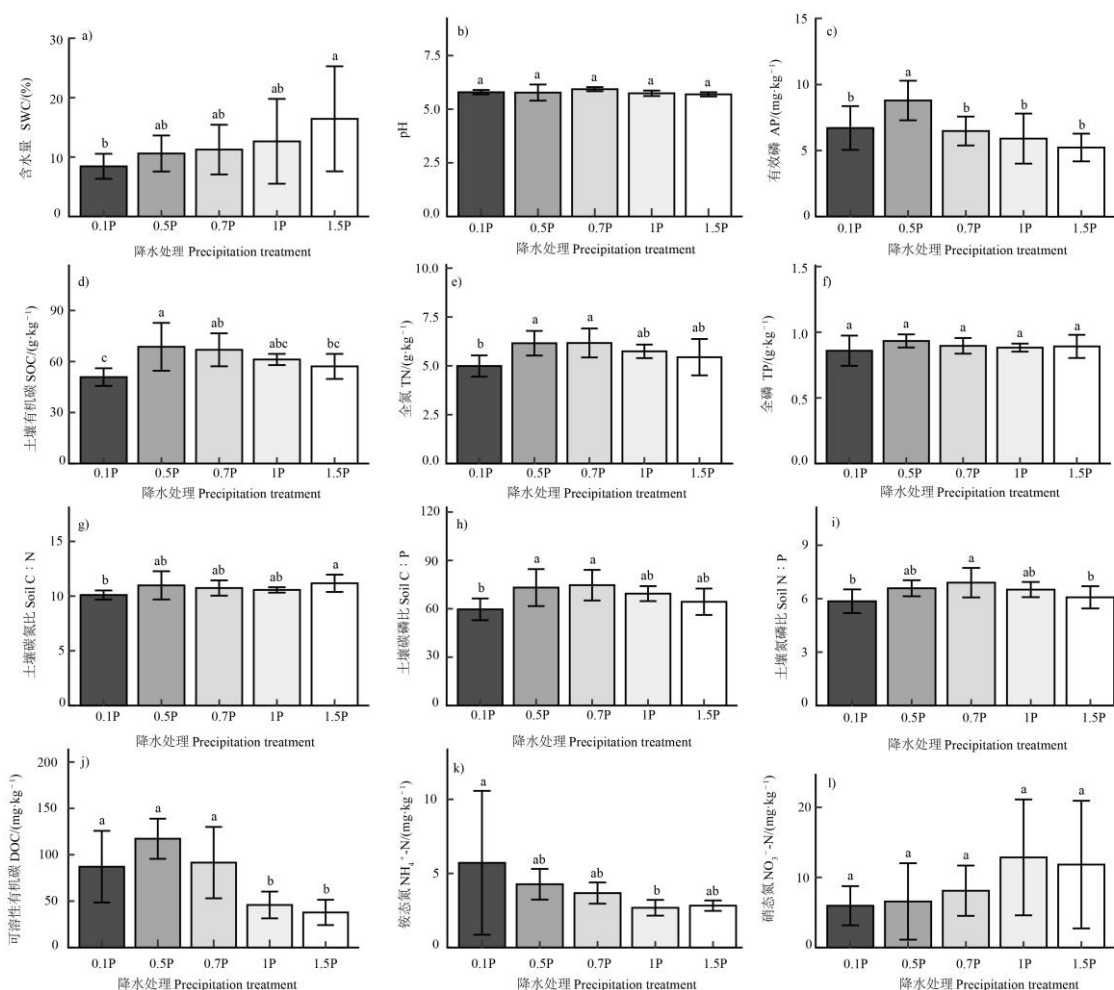
1.6 数据分析

采用单因素方差分析 (One-Way ANOVA) 来检验降水变化对土壤理化性质、土壤微生物生物量及其化学计量比的影响, 多重比较选用 Duncan 检验。采用 Pearson 相关分析来探讨土壤微生物生物量及其化学计量比与土壤理化性质间的相关关系。使用多元线性回归分析 (Multiple linear regression analysis) 对影响土壤微生物生物量及其化学计量比的因子进行效应值分析, 用 “car” 包进行多重共线性筛选, 用 “MASS” 包函数 stepAIC 进行变量筛选直到模型最优。所有分析和图的绘制均在 R 4.4.0 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

土壤含水量 (SWC) 表现出随降水量增加而增加的趋势 (图 1a)。与对照 (1P) 相比, SWC 在 0.1P、0.5P、0.7P 处理下分别下降了 33.22%、16.14%、10.92%, 而在 1.5P 处理增加了 30% (图 1a)。与 1P 相比, AP 含量在 0.5P 处理显著增加了 48.73% ($P<0.05$, 图 1c)。DOC 含量相较于 1P 在 0.1P、0.5P、0.7P 处理分别显著增加了 89.93%、155.59%、99.46% ($P<0.05$, 图 1j)。0.1P 处理下土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著高于对照 (1P), 且增加了 113% ($P<0.05$, 图 1k)。降水变化对土壤 pH、TP、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的影响均不显著 ($P>0.05$, 图 1)。



注: 0.1P, 0.5P, 0.7P, 1P, 1.5P 分别代表处理降水量减少 90%、降水量减少 50%、降水量减少 30%、对照以及降水量增加 50%。不同小写字母表示不同降水处理之间存在显著差异 ($P<0.05$), 值为均值 $\pm$ 标准差 ($n=6$), 下同。Note: 0.1P, 0.5P, 0.7P, 1P, 1.5P represent the treatment precipitation decreased by 90%, precipitation decreased by 50%, precipitation decreased by 30%, control and precipitation increased by 50%, respectively. Different lowercase letters indicate the significant difference among the different precipitation treatments ($P<0.05$). Values are means $\pm$ standard deviation ($n=6$). The same below.

图 1 不同降水处理下高寒草甸土壤理化性质特征

Fig. 1 Soil physicochemical properties under different precipitation treatments in an alpine meadow

2.2 土壤微生物生物量及其计量比

降水变化显著影响了土壤 MBC 和 MBN 含量 ($P<0.05$, 图 2a, 图 2b), 表现为随降水量增加土壤 MBC、MBN 呈现增加的趋势。与对照 (1P) 相比, 土壤 MBC 在 0.1P、0.5P 处理分别显著减少了 29.14%、17.63% ($P<0.05$, 图 2a), 土壤 MBN 在 0.1P 处理显著减少了 39.88% ($P<0.05$, 图 2b)。土壤 MBC:MBN 和 MBC:MBP 同样表现为随降水量增加而增加的趋势, MBC:MBN 在 0.1P、0.5P 和 0.7P 处理下显著低于 1.5P ($P<0.05$, 图 2d), MBC:MBP 相较于对照 (1P) 在 0.1P 处理显著降低了 38.89% ($P<0.05$, 图 2e)。降水变化对土壤 MBP 和 MBN:MBP 的影响均不显著 ($P>0.05$, 图 2c, 2f)。

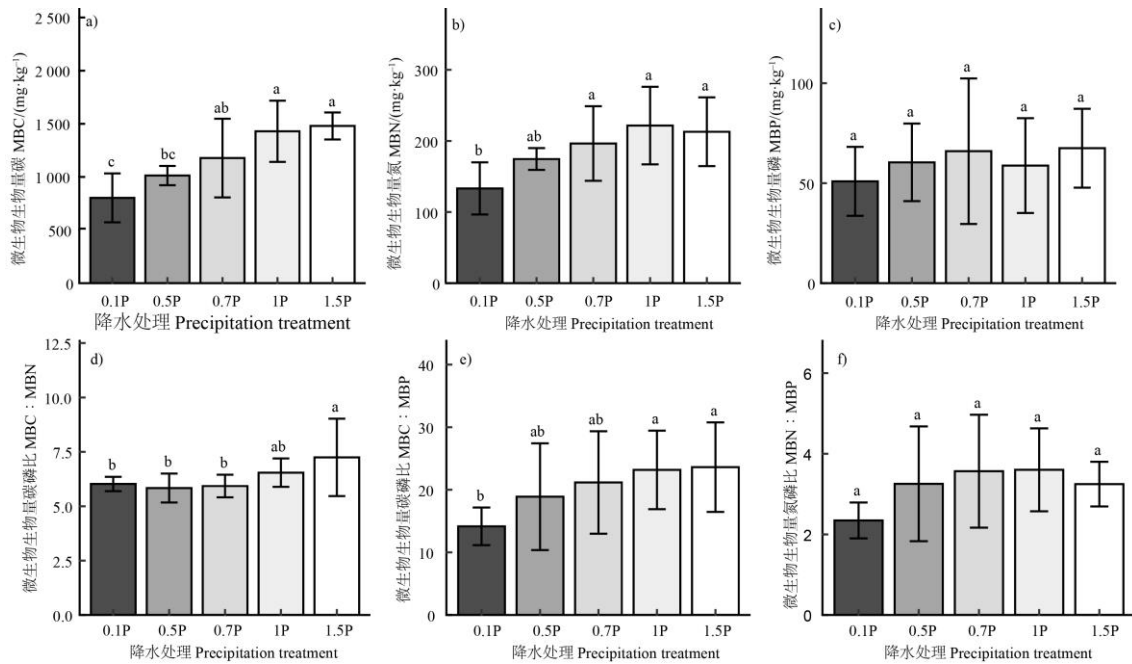
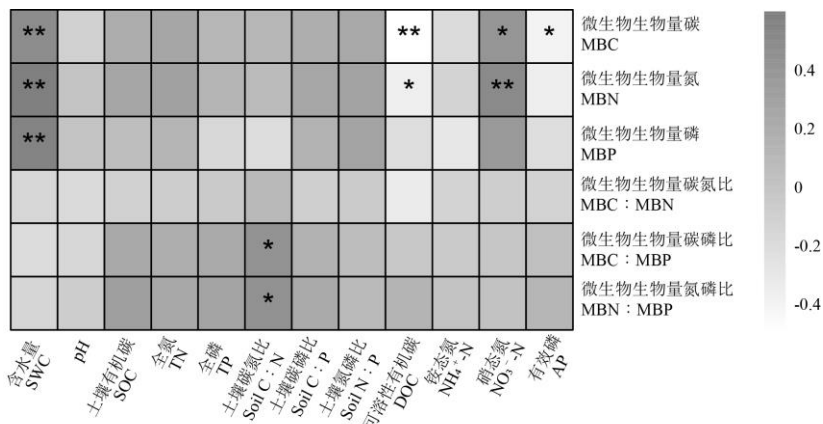


图 2 不同降水处理下高寒草甸土壤微生物生物量及其化学计量比

Fig.2 Soil microbial biomass and their stoichiometric ratios under different precipitation treatments in an alpine meadow

2.3 土壤微生物生物量及其化学计量比与土壤理化性质的相关性

相关分析结果显示, 土壤 MBC、MBN、MBP 与 SWC 呈显著正相关; MBC、MBN 与 NO_3^- -N 呈显著正相关, 与 DOC 呈显著负相关; MBC 还与 AP 呈显著负相关 ($P<0.05$, 图 3)。土壤 MBC:MBP、MBN:MBP 与土壤 C:N 呈显著正相关 ($P<0.05$, 图 3)。



注: *, ** 分别代表 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 的显著水平, 下同。Note: *, ** indicate significant levels at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively. The same below.

图3 土壤微生物生物量及其化学计量比与土壤理化之间的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis between soil microbial biomass and their stoichiometric ratios and soil physicochemical properties

2.4 土壤理化性质对微生物生物量及其化学计量比的多元线性回归

多元线性回归分析结果显示,在降水变化下,土壤 DOC 对 MBC 和 MBN 有显著的负效应,而 TP 和土壤 N:P 对 MBC 和 MBN 有显著的正效应 ($P<0.05$,图 4a,图 4b)。SWC 对 MBN 和 MBP 有显著的正效应 ($P<0.05$,图 4b,图 4c),土壤 C:N 对 MBP 有显著的负效应 ($P<0.05$,图 4c)。SWC 和 DOC 对 MBC:MBN 有显著负效应 ($P<0.05$,图 4d)。土壤 C:N 和 SWC 则分别对 MBC:MBP 有显著的正、负效应 ($P<0.05$,图 4e)。土壤 C:N 对 MBN:MBP 有显著的正效应 ($P<0.05$,图 4f)。

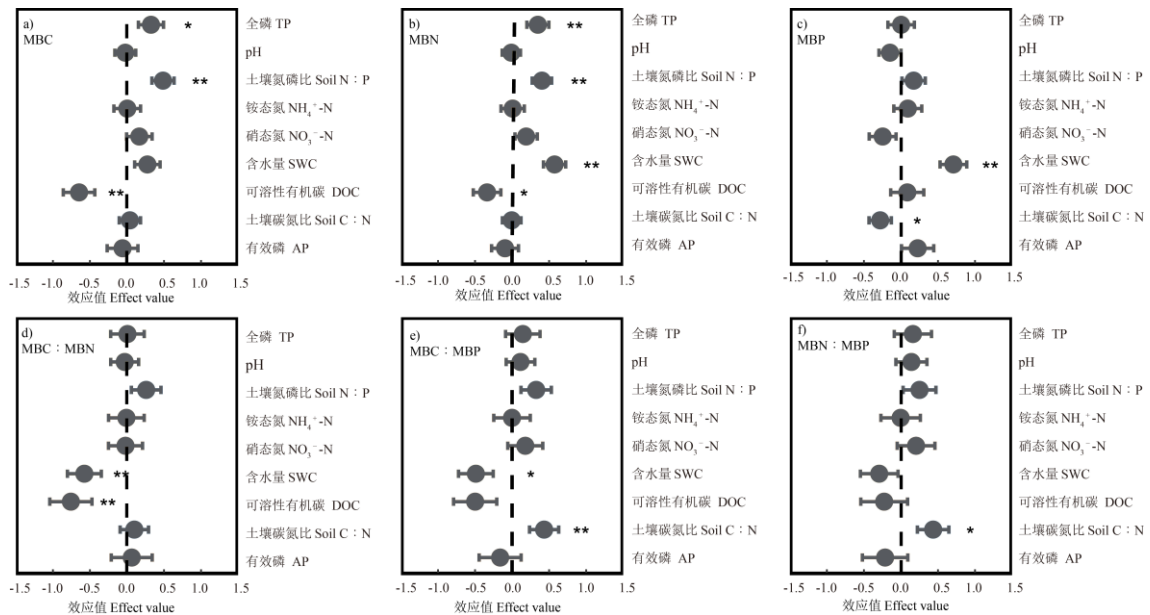


图4 土壤理化性质对微生物生物量及其化学计量比影响的多元线性回归分析

Fig. 4 Multiple linear regression analysis of the effects of soil physicochemical properties on microbial biomass and their stoichiometric ratios

3 讨论

3.1 降水变化对高寒草甸土壤微生物生物量的影响

本研究发现,土壤 MBC、MBN 含量随降水量的增加而增加,与 Ren 等^[20]对中国三类草原的研究结果类似,该研究发现降水增加会增加土壤微生物生物量,而干旱条件会抑制微生物生物量的积累。土壤水分是影响微生物活性和生长的关键因素之一,适量的水分可以维持微生物的代谢活动,促进其对营养物质的吸收和转化^[11]。本研究中土壤微生物生物量随降水增加的原因可能是因为本地区的高寒草甸生态系统自身可能受到水分的限制,降水增加则会缓解水分的限制,促进土壤微生物生长从而增加土壤微生物生物量;而降水减少则会限制土壤基质的扩散,加剧水分生理压力,从而抑制土壤微生物生长并降低土壤微生物生物量^[21]。本研究发现土壤含水量也随降水量的增加而增加,并且它与土壤 MBC、MBN 和 MBP 均呈显著的正相关 ($P<0.05$,图 3),说明土壤水分是调控本研究地土壤微生物生物量响应降水变化的重要因子。Ren 等^[20]的研究也表明,降水增加能够增加水分有效性,进而增加土壤微生物生物量,而重度干旱后水分有效性的降低会降低溶质的扩散能力,从

而抑制微生物的生长。然而,与本研究结果相反,吴华清等^[12]在亚热带森林生态系统中的研究发现,降水增加会导致土壤微生物生物量减少,而适度减少降水反而会增加土壤微生物生物量。该研究与本研究结果的差异可能与不同生态系统的气候特点有关。亚热带森林生态系统本身降雨量大、水分充沛,降水减少能够改善土壤通气性,从而促进微生物活动,但降水增加反而会加剧土壤养分的淋溶^[22]。此外,本研究还发现土壤 MBC、MBN 与土壤 NO_3^- -N 呈显著正相关,而与土壤 DOC 呈显著负相关 ($P<0.05$, 图 3),说明土壤有效养分也是调控本地区降水变化下土壤微生物生物量变化的重要因子。土壤 MBC、MBN 含量的增加直接反映了微生物对土壤养分的吸收和利用情况,土壤微生物可通过主动吸收和同化作用,将土壤中的这些养分元素转化为自身的组成部分,从而使 MBC、MBN 含量增加^[23]。土壤 DOC 随降水量增加而降低可以很好地佐证上述观点(图 1j)。本研究还发现,土壤 TP 和土壤 N:P 对 MBC、MBN 呈显著正效应 ($P<0.05$, 图 4a, 图 4b)。土壤 TP 可以为微生物提供更多的磷营养,满足微生物生长所需,同时土壤 TP 可被土壤中的磷酸酶分解为速效养分^[24],而该过程会使得微生物活性增强,微生物生物量增多。土壤 MBP 作为土壤磷库的重要组成部分,可以为植物提供大部分磷元素营养需求^[25]。本研究发现土壤 MBP 对降水变化无显著响应(图 2c),该现象可能受土壤水分、微生物营养状态和植物-微生物竞争的共同调控。Pearson 相关分析显示,MBP 与 SWC 呈显著正相关。SWC 增加可能通过促进磷扩散或磷酸酶活性来增加有效磷,促进 MBP 的积累^[26],但本研究中 MBP 的变化不显著,表明土壤中的有效磷或被植物竞争性吸收,从而限制了微生物对磷的吸收,导致 MBP 的响应不明显^[27]。

3.2 降水变化对高寒草甸土壤微生物化学计量比的影响

本研究发现,土壤 MBC:MBN 随降水量增加而增加(图 2d),这与一项全球 meta 分析的研究结果类似,该研究发现降水量增加会增加土壤 MBC:MBN,其原因可能是潮湿条件刺激了微生物更大的代谢活动^[28]。从碳氮角度看,微生物在生长过程中会摄取更多的碳来构建细胞结构,如细胞壁、细胞膜等,同时也会摄取氮用于合成细胞内的含氮物质。这种协同作用使得 MBC 和 MBN 都相应增加,从而导致 MBC:MBN 发生有利于碳增加的改变^[29-30]。当 MBC:MBN 较高时,表明微生物分解有机碳的速度相对较快,而氮的矿化速度则相对缓慢^[31]。本研究发现 SWC 和 DOC 均对 MBC:MBN 具有显著的负效应 ($P<0.05$, 图 4d),其原因可能是降水量增加促进 DOC 的快速分解,而微生物在分解有机物质时会优先利用碳源来获取能量,但微生物的氮挖掘策略则会导致对 MBN 的影响滞后^[32]。土壤 MBC:MBP 通常表征土壤微生物对土壤磷元素有效性的调节能力。当 MBC:MBP 比值较高时,表明土壤微生物生长可能受磷元素限制;当 MBC:MBP 比值较低时,表明土壤微生物具有较大的周转释放磷的潜力^[10]。本研究发现土壤 MBC:MBP 随降水量增加而增加 ($P<0.05$, 图 2e),说明降水量增加可能会导致土壤微生物受磷的限制加剧。此外,本研究还发现土壤 C:N 对 MBC:MBP 有显著的正效应 ($P<0.05$, 图 4e),且降水量增加促进了土壤 C:N 的增加(图 1)。土壤 C:N 升高,表明碳相对充足,氮相对不足,而在这样的土壤环境中,微生物为了适应这种养分限制,可能优先分配有限的氮资源,并相对减少对磷的投资,导致其生物量中磷的相对含量降低,从而使 MBC:MBP 升高^[33]。土壤 MBN:MBP 可以反映土壤微生物对氮和磷的相对需求情况,若 MBN:MBP 增加,则说明微生物对磷的需求大于对氮的需求,反之亦然^[10]。然而,本研究发现降水变化后土壤 MBN:MBP 保持稳定,说明降水变化下本地区土壤微生物对氮磷的需求达到平衡。同样有研究表明,降水量增加并没有显著改变 MBN:MBP,说明土壤微生物群落对磷的利用具有较强的稳态调节能力,即使在环境变化下,MBN:MBP 也能保持相对稳定^[34]。但由于高寒草甸生态系统以其平均气温低、昼夜温差大、湿度差异显著等气候特点,塑造了独特的土壤环境,这可能导致其微生物化学计量特征区别于其他气候区域的生态系统。在高温高湿生态系统,如热带雨林或亚热带常绿阔叶林中,微生物的代谢速率通常较高,有机质分解和养分周转迅速,这些区域的土壤微生物可能面临更强的氮或磷限制,MBC:MBN 和 MBC:MBP 可能相对较低^[35]。而荒漠生态系统以极

度干旱为主要特征,微生物群落必须具备极强的抗旱能力,荒漠微生物可能通过休眠、形成孢子或合成渗透调节物质来应对水分胁迫,这可能影响其细胞内碳、氮、磷的分配,从而导致荒漠生态系统中微生物碳、氮、磷的比值相对较窄,使微生物在养分限制环境中具有较强的稳态性^[36]。

4 结论

本研究发现土壤微生物生物量碳氮含量随降水量增加而增加,且与土壤水分和养分密切相关,说明土壤水分和土壤养分协同调控了高寒草甸土壤微生物生物量对降水变化的响应。本研究还发现土壤 MBC:MBN 和 MBC:MBP 也随降水量增加而增加,它们的变化主要与土壤水分和土壤 C:N 密切相关。考虑到土壤微生物生物量易受到土壤理化属性、植被特征以及温度和降水等气候因素的综合影响,高寒草甸土壤微生物生物量及其化学计量比对降水变化响应机理的深入研究和确切回答仍需进一步长期系统地监测研究。

参考文献 (References)

- [1] Chou C A, Lan C W. Changes in the annual range of precipitation under global warming[J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(1): 222-235.
- [2] IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)] [R]. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023: 35-115.
- [3] Huang J P, Zhou X J, Wu G X, et al. Global climate impacts of land-surface and atmospheric processes over the Tibetan Plateau[J]. *Reviews of Geophysics*, 2023, 61(3): e2022RG000771.
- [4] Xu J W, Gao Y H, Peng B F, et al. Change characteristics of precipitation and its cause during 1979-2016 over the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2020, 39(2): 234-244. [许建伟, 高艳红, 彭保发, 等. 1979—2016 年青藏高原降水的变化特征及成因分析[J]. *高原气象*, 2020, 39(2): 234-244.]
- [5] Zhang J R, Zhang L Y, Liu F, et al. Research progress in effect of rainfall on soil microbe in arid and semi-arid area[J]. *World Forestry Research*, 2014, 27(4): 6-12. [张静茹, 张雷一, 刘方, 等. 降雨对于干旱半干旱地区土壤微生物影响研究进展[J]. *世界林业研究*, 2014, 27(4): 6-12.]
- [6] Cao W J, Chen Y, Li Y Q, et al. Soil microbial C: N: P stoichiometry across environmental transects in China's typical ecologically fragile regions[J]. *Geoderma*, 2025, 460: 117454.
- [7] Ma Z Y, Sun Y C, Shi Z Y, et al. The influence of mycorrhizal types on the soil microbial biomass carbon and its distribution[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(6): 1839-1849. [马振一, 孙艺春, 石兆勇, 等. 菌根类型对土壤微生物生物量碳含量及其分布的影响[J]. *土壤学报*, 2025, 62(6): 1839-1849.]
- [8] Hu C J, Liu G H, Wu Y Q. A review of soil microbial biomass and diversity measurements[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(6): 1161-1167. [胡婵娟, 刘国华, 吴雅琼. 土壤微生物生物量及多样性测定方法评述[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(6): 1161-1167.]
- [9] Spohn M. Element cycling as driven by stoichiometric homeostasis of soil microorganisms[J]. *Basic and Applied Ecology*, 2016, 17(6): 471-478.
- [10] Chen G L, Yuan J H, Wang S Q, et al. Soil and microbial C: N: P stoichiometries play vital roles in regulating P transformation in agricultural ecosystems: A review[J]. *Pedosphere*, 2024, 34(1): 44-51.
- [11] Xu S, Geng W X, Sayer E J, et al. Soil microbial biomass and community responses to experimental precipitation change: A meta-analysis[J]. *Soil Ecology Letters*, 2020, 2(2): 93-103.
- [12] Wu H Q, Chen X M, Lin M Z, et al. Effects of the soil microbial community structure to changes in precipitation in the south subtropical monsoon forest[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(4): 583-590. [吴华清, 陈小梅, 林媚珍, 等. 降水处理对亚热带季风林土壤微生物群落结构的影响[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(4): 583-590.]

- [13] Yang X C, Zhu K, Loik M E, et al. Differential responses of soil bacteria and fungi to altered precipitation in a meadow steppe[J]. *Geoderma*, 2021, 384: 114812.
- [14] Song X Y, Wang C T, Liu D, et al. Variation of root traits and its influences on soil organic carbon stability in response to altered precipitation in an alpine meadow[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 939: 173632.
- [15] Zi H B, Chen Y, Hu L, et al. Effects of nitrogen addition on root dynamics in an alpine meadow, Northwestern Sichuan[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(1): 38-49. [字洪标, 陈焱, 胡雷, 等. 氮肥添加对川西北高寒草甸植物群落根系动态的影响[J]. *植物生态学报*, 2018, 42(1): 38-49.]
- [16] Liu G S. Soil physical and chemical analysis and description of soil profiles[M]. Beijing: Standards Press of China, 1996. [刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.]
- [17] Van Veldhoven P P, Mannaerts G P. Inorganic and organic phosphate measurements in the nanomolar range[J]. *Analytical Biochemistry*, 1987, 161(1): 45-48.
- [18] Brookes P C, Landman A, Pruden G, et al. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, 17(6): 837-842.
- [19] Wu J, He Z L, Wei W X, et al. Quantifying microbial biomass phosphorus in acid soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 32(6): 500-507.
- [20] Ren C J, Zhao F Z, Shi Z, et al. Differential responses of soil microbial biomass and carbon-degrading enzyme activities to altered precipitation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 115: 1-10.
- [21] Yan G Y, Xing Y J, Lü X T, et al. Effects of artificial nitrogen addition and reduction in precipitation on soil CO₂ and CH₄ effluxes and composition of the microbial biomass in a temperate forest[J]. *European Journal of Soil Science*, 2019, 70(6): 1197-1211.
- [22] Liu Y, Liu X J, Song Y T, et al. Effects of nitrogen deposition and precipitation pattern change on soil microbial communities in a southern subtropical forest[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2023, 29(3): 617-623. [刘岳, 刘旭军, 宋雨婷, 等. 氮沉降和降水格局变化对南亚热带森林土壤微生物群落的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2023, 29(3): 617-623.]
- [23] Tang Z H, Fan Y S, Liao Y F, et al. Characteristics of soil carbon and nitrogen and microbial biomass carbon and nitrogen in artificial *Robinia pseudoacacia* forest in Loess Plateau[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2024(5): 55-58. [唐志红, 范以撒, 廖永峰, 等. 黄土高原人工刺槐林土壤碳氮和微生物生物量碳氮特征[J]. *中国水土保持*, 2024(5): 55-58.]
- [24] Luo Y, Su D R, Lv S H, et al. Characteristics and correlation analyses of soil nutrients and enzyme activities in the riparian zone of Hui river wetland[J]. *Soils*, 2017, 49(1): 203-207. [罗琰, 苏德荣, 吕世海, 等. 辉河湿地河岸带土壤养分与酶活性特征及相关性研究[J]. *土壤*, 2017, 49(1): 203-207.]
- [25] Achat D L, Morel C, Bakker M R, et al. Assessing turnover of microbial biomass phosphorus: Combination of an isotopic dilution method with a mass balance model[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(12): 2231-2240.
- [26] Li J W, Deng L, Peñuelas J, et al. C: N: P stoichiometry of plants, soils, and microorganisms: Response to altered precipitation[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(24): 7051-7071.
- [27] Wang C Q, Dippold M A, Guggenberger G, et al. The wetter the better? Preferences in plant-microbial competition for phosphorus sources in rice cultivation under contrasting irrigation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2024, 191: 109339.
- [28] Abbasi A O, Salazar A, Oh Y, et al. Reviews and syntheses: Soil responses to manipulated precipitation changes—an assessment of meta-analyses[J]. *Biogeosciences*, 2020, 17(14): 3859-3873.
- [29] Chen Y Q, Xu L Y, Wang Z W, et al. Stoichiometric characteristics of nutrient-microbial biomass-extracellular enzyme activity in different salt-affected soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(3): 811-824. [陈玉琪, 徐灵颖, 王志旺, 等. 不同盐渍化土壤养分-微生物生物量-胞外酶活的化学计量特征[J]. *土壤学报*, 2025, 62(3): 811-824.]
- [30] Mason-Jones K, Breidenbach A, Dyckmans J, et al. Intracellular carbon storage by microorganisms is an overlooked pathway of biomass growth[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 2240.
- [31] Eiland F, Klammer M, Lind A M, et al. Influence of initial C/N ratio on chemical and microbial composition during long term composting of straw[J]. *Microbial Ecology*, 2001, 41(3): 272-280.

- [32] Chen R R, Senbayram M, Blagodatsky S, et al. Soil C and N availability determine the priming effect: Microbial N mining and stoichiometric decomposition theories[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(7): 2356-2367.
- [33] Wang C J, Wang Q Q, Xu H, et al. Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry characteristics of bulk soil, organic matter, and soil microbial biomass under long-term fertilization in cropland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(11): 3848-3858. [王传杰, 王齐齐, 徐虎, 等. 长期施肥下农田土壤-有机质-微生物的碳氮磷化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2018, 38(11): 3848-3858.]
- [34] Su B Q, Shangguan Z P. Stoichiometric homeostasis in response to variable water and nutrient supply in a *Robinia pseudoacacia* plant-soil system[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2022, 15(5): 991-1006.
- [35] 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.
- [36] Xu X F, Thornton P E, Post W M. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22(6): 737-749.