

李玉倩,王旭洋,林宏东,等.海拔对马衔山生态系统土壤-微生物碳氮磷计量特征的影响[J].中国沙漠,2025,45(1):151-161.

海拔对马衔山生态系统土壤-微生物 碳氮磷计量特征的影响

李玉倩^{1,2},王旭洋^{1,2},林宏东³,牟晓明^{1,2},
刘伟媛⁴,连杰^{1,2},李玉强^{1,2}

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院 奈曼沙漠化研究站,甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院大学,北京 100049; 3.甘肃兴隆山国家级自然保护区管护中心,甘肃 榆中 730100; 4.奈曼旗大柳树国有治沙林场,内蒙古 奈曼旗 028300)

摘要:为探究山地生态系统土壤-微生物碳氮磷生态化学计量特征沿海拔梯度的变化规律及其影响因素,选择马衔山沿海拔梯度的高山草原、亚高山灌丛、高山灌丛、高山草甸作为研究对象,通过测定0~20、20~40 cm层次土壤碳氮磷、微生物生物量碳氮磷和其他理化指标,分析马衔山不同海拔区域景观土壤碳氮磷、微生物生物量碳氮磷及其生态化学计量变化特征和影响因素。结果表明:(1)土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)含量均沿海拔升高呈显著增加趋势,且随土壤深度增加显著降低,表层土壤(0~20 cm)微生物生物量碳(MBC)含量沿海拔显著增加,微生物生物量磷(MBP)含量沿海拔呈先降低后增加的趋势,深层土壤(20~40 cm)MBC含量沿海拔呈现先降低后升高的变化趋势,在亚高山灌丛达到最小值,MBP含量随海拔升高呈先上升后下降的变化趋势,并在亚高山灌丛达到最大值;(2)土壤C:P、C:N均沿海拔呈现先增加后减小的趋势,且最大值均出现在高山灌丛(36.16和11.88),表层土壤MBN:MBP随海拔升高呈先增加后减小的变化趋势,在亚高山灌丛出现最大值(9.16),MBC:MBN整体沿海拔显著增加,深层土壤MBC:MBP随海拔升高呈先减小后增加的变化趋势,在亚高山灌丛出现最小值(8.40);(3)土壤pH、电导率、地下生物量等与土壤-微生物碳氮磷及生态化学计量显著相关,pH是土壤微生物生物量碳氮磷及其化学计量海拔分布格局的关键驱动因素。

关键词:海拔梯度;马衔山;土壤微生物生物量;生态化学计量

文章编号:1000-694X(2025)01-151-11

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00089

中图分类号:S154

文献标志码:A

0 引言

土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)是陆地生态系统最基本的营养元素,也是植物赖以生存的必需条件,进而影响着植物功能性状、功能多样性与生态系统功能。生态化学计量学以元素组成来揭示生物化学和生态学之间的联系,可以更加深入探究生物之间元素循环的内在机理以及生态系统组分之间的联系^[1-4]。因此,研究土壤系统C、N、P含量及其生态化学计量特征规律,可以认识C、N、P在生态系统中的循环、平衡机制及其对植物群落结构和功能的影

响。土壤微生物量是指土壤中体积小于 $5.0\times 10^3\mu\text{m}^3$ 活的微生物总量,但不包括活的植物体,它是活的土壤有机质部分^[5]。土壤微生物量可以反映土壤矿化能力和土壤活力^[6],直接影响微生物驱动的物质循环过程,并调控土壤肥力形成、植物生长以及群落演替^[7-9]。山地生态系统是全球范围内对气候变化最敏感的陆地生态系统,约占全球陆地面积的24%^[10],面临着生态环境破坏、生物多样性减少等一系列生态环境问题^[11]。山地生态系统中的气候、植被和土壤性质等环境因子沿海拔梯度在短距离内变化显著^[12],土壤性质和气候条件的空间异质性

收稿日期:2024-08-28;改回日期:2024-09-24

资助项目:甘肃省自然科学基金项目(22JR5RA076);中国科学院青年创新促进会项目(2023449)

作者简介:李玉倩(2001—),女,甘肃兰州人,硕士研究生,主要研究方向为土壤生态化学计量。E-mail:liyuqian0730@163.com

通信作者:王旭洋(E-mail:xuyangwang@lzb.ac.cn)

也导致土壤生态化学计量和土壤微生物生物量及其垂直分布发生巨大变化^[13]。海拔导致相对短的地理距离内气候、土壤和生物等环境因素剧烈变化,从而影响生物地球化学循环过程。因此,在山地生态系统中研究土壤-微生物碳氮磷生态化学计量特征沿海拔梯度的变化规律及其影响因素,对于揭示山地生态系统土壤养分循环对环境变化的响应机制具有重要意义。

国内外学者就土壤理化性质沿海拔梯度的变化进行了深入、广泛的研究。陈顺治^[14]发现,关帝山不同土层土壤总碳(TC)、全氮(TN)和全磷(TP)含量的分布特征均表现为沿着海拔上升而不断增加,显著正相关;刘倩等^[15]研究表明,武功山山地草甸土壤C、N、P含量随海拔升高先增加后降低,土壤TP含量变异较小,土壤C:N随海拔升高没有显著变化,土壤C:P、N:P随海拔升高先升高后下降;宁朋等^[16]对贡嘎山的研究表明,贡嘎山各海拔土壤腐殖化能力和固碳能力相对偏弱,最低海拔2 800 m处土壤养分含量和含水量最为丰富,然而相较于其他海拔P元素更为缺乏;秦岭太白山地区土层深度和总土壤有机碳密度(SOCD)随着海拔梯度的增加呈现出减少的趋势,但是单位土层深度上的土壤有机碳密度(SOCD)却呈现出增加的趋势。随着海拔增加,土壤整体的TC、TN含量呈上升趋势,而TP含量无明显变化,随海拔的增加C:N与C:P表现出相似的变化趋势,N:P随海拔增加先升高后下降^[17-19];此外,Nottingham等^[20]对不同海拔热带土壤的研究表明,C:P与N:P具有较高的空间变异特征,C:N、C:P及N:P均随海拔的升高呈现逐渐上升的趋势。近年来,关于土壤微生物生物量沿海拔梯度的分布格局的研究也不断增多。贾培龙等^[21]以黄土高原东西森林带作为研究区域,发现土壤微生物生物量C、N、P含量随经度整体呈先减少后增加的趋势,土壤微生物生物量C:P呈先增后减的变化趋势;贺兰山土壤微生物量碳、氮随海拔高度升高而增加^[22],Arunachalam等^[23]在印度东北部丘陵地区的研究以及从静等^[24]在神农架自然保护区的研究也取得了同样的结果。陈婕妮等^[25]在武夷山进行研究不仅发现土壤微生物量碳、氮随海拔高度升高而增加,还得出武夷山土壤微生物生物量及其生态化学计量特征的主要影响因素是土壤有机碳的含量。Manral等^[26]以印度喜马拉雅中部温

带混交林为研究对象,发现微生物生物量C、N、P随海拔升高而显著降低($P<0.01$)。虽然围绕不同陆地生态系统及不同地理尺度土壤生态化学计量的研究日益增加,但相比之下,目前关于土壤微生物和土壤生态化学计量沿环境梯度的分布格局及影响因素尚无定论^[27]。因此,土壤-微生物化学计量沿着海拔的垂直分布格局及其潜在驱动机制还有待进一步深入研究。

马衔山地处兴隆山南侧,是甘肃省榆中县与临洮县交界之分水岭,并且作为陇右黄土高原最高峰,地势高耸、气候严寒,不同海拔水热差异显著,植被变化明显。从山顶到山底存在明显且完整的气候及植被垂直带谱。目前针对马衔山土壤-微生物碳氮磷生态化学计量特征沿海拔梯度的变化规律及其影响因素的研究还是空白。因此,本研究选取马衔山沿海拔梯度(2 600~3 670 m)的典型植被景观类型作为研究对象,通过调查并测定不同海拔景观的土壤C、N、P含量及微生物生物量碳(MBC)、微生物生物量氮(MBN)、微生物生物量磷(MBP),分析不同海拔区域土壤C:N:P和土壤微生物生物量C:N:P生态化学计量变化特征,探讨环境因子对土壤微生物生物量的影响及作用机理,以期马衔山未来生态系统保护提供理论依据,同时也为山地生态系统土壤养分循环及土壤-微生物化学计量对环境变化的响应提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

马衔山位于兰州市区以南约40 km处,主峰海拔3 670.3 m^[28],是陇右黄土高原最高峰。马衔山属于东部季风区和西部干旱区之间,具有高原和季风气候的双重特点^[29],马衔山山顶平均气温为-2.0~-2.2 °C,多年平均降水量为494 mm^[30]。研究区内植被类型多样,垂直分布明显^[31],依次为高山草原(2 600~2 900 m)、亚高山灌丛(2 900~3 100 m)、高山灌丛(3 300 m)、高山草甸(3 500 m)、荒漠草原和多年冻土区冻胀草丘(3 600 m)。

1.2 样地选取和土壤采集

于2023年8月初在马衔山海拔2 600~3 670 m的一处坡度和坡向基本一致的区域设置研究样地,

沿海拔选取 4 个典型植被带,分别为海拔 3 500~3 670 m 处的高山草甸、海拔 3 100~3 500 m 处的高山灌丛、2 900~3 100 m 处的亚高山灌丛、2 600~2 900 m 处的高山草原(表 1)。各植被带沿海拔梯度随机选取坡度一致的朝阳坡面分别布设 6 个 1 m×1 m 的草本样方。每个小样方内用直径为 4 cm 的土钻采用“五点法”分 0~20、20~40 cm 取土样,每一样地获得 12 个样品,4 个植被带共获得 48 个土壤样品。土壤样品过 2 mm 筛后分成 2 份,一份放入 4 ℃

保存,用于测定土壤微生物量 C、N、P 含量;另一份土壤样品自然风干后用于测定土壤 C、N、P 含量及机械组成(ST)、pH 值、电导率(EC)等。同时相应在每个样方中用土钻容重取样器分层(0~20、20~40 cm)取原状土,测定不同土层土壤容重(UBD);以及收割植物地上生物量和使用根钻获取植物地下生物量(UB),地下根用水清洗并剔除杂质后与相应地上部分在 65 ℃的烘箱中烘干至恒重,测量并记录其干重。

表 1 各样地基本情况
Table 1 The basic information of different sites

样地名称	海拔/m	植被类型	优势植物
AM	3 500~3 670	高山草甸	高原嵩草(<i>Carex coninux</i>),矮嵩草(<i>Kobresia humilis</i>)
AS	3 100~3 500	高山灌丛	金露梅(<i>Potentilla fruticose</i>),多裂委陵菜(<i>Potentilla multifida</i>),马先蒿(<i>Pedicularis ikomai</i>)
SS	2 900~3 100	亚高山灌丛	沙棘(<i>Hippophae rhamnoides</i>),杜鹃(<i>Rhododendron simsii</i>),坡柳(<i>Salix myrtilleacea</i>)
AG	2 600~2 900	高山草原	野蒿(<i>Erigeron annuus</i>),西北针茅(<i>Stipa sareptana</i>),冰草(<i>Agropyron cristatum</i>)

1.3 土壤理化性质及微生物生物量测定方法

统一将 TDR 350 便携式土壤水分温度电导率速测仪(美国)的探针(20 cm)插入采样点 0~20 cm 和 20~40 cm 土层,待读数稳定之后读取土壤温度;用铝盒烘干法测定土壤含水量;在烘箱 105 ℃下烘干 24 小时后测定 EMB;土壤 pH 值采用 pH 计测定(土:水=1:2.5);使用电导率仪测定土壤 EC(土:水=1:5);土壤有机碳含量(SOC)采用重铬酸钾硫酸氧化-外加热法测定;土壤 TN 含量用凯氏定氮法测定;土壤 TP 含量采用钼锑抗比色法测定^[32]。

MBC 和 MBN 采用氯仿(CHCl₃)熏蒸浸提(FE)法测定。对于每个样品,在 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄(土壤:溶液=1:4)中提取一个子样品。第二个子样品在真空中用氯仿熏蒸 24 小时后用 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 浸提。用 multi N/C 3000 分析仪测定提取液中的 C 和 N 浓度。使用 MBC 和 MBN 的相应转换系数 0.45 和 0.54,乘以熏蒸和非熏蒸提取液元素浓度之间的差异,计算土壤微生物 C、N 含量。土壤微生物生物量磷(MBP)的测定方法中熏蒸程序与 MBC 和 MBN 相同,因此熏蒸和未熏蒸的样品都用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃(土壤:溶液=1:20)浸提,并使用钼蓝比色法分析提取液以确定磷浓度。使用 MBP 的相应转换系数 0.40,乘以熏蒸和非熏蒸提取液元素浓度之间的差异,以确定 MBP^[27]。

1.4 数据处理与统计分析

本研究使用 Excel 2019 进行数据预处理,利用 SPSS 软件进行数据统计分析,有关图件制作使用 Origin 2021,图中数据为平均值±标准差。使用单因素方差分析对不同海拔土壤基本理化性质、土壤碳氮磷生态化学计量特征及土壤微生物生物量碳氮磷生态化学计量特征的差异进行分析。用方差膨胀系数(VIF)检验多重共线性,并使用逐步回归方法剔除共线性因子,在 Excel 中对 UB、SBD、土壤水分含量(SMC)、pH、EC 进行了 Log 转换,其余因子使用原始数据,然后用 Canoco 5 软件进行冗余分析(Redundancy analysis, RDA)及绘图,用 R 软件(4.2.3)进行相关性分析及相关性热图绘制,探究土壤-微生物生物量 C、N、P 化学计量的影响因素。

2 结果与分析

2.1 不同海拔梯度土壤理化性质变化特征

土壤基本理化性质随海拔和土层不同而表现出不同的变化趋势(表 2)。随着海拔的升高和土层深度的增加,土壤温度均呈现下降趋势;表层土壤地下生物量随海拔的升高先降低后增加,深层土壤地下生物量则沿海拔呈增加趋势,并随着土壤深度

表 2 不同海拔植被条件下土壤基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of soil at different elevations

因子		高山草原 (AG)	亚高山灌丛 (SS)	高山灌丛 (AS)	高山草甸 (AM)
温度/°C	0~20 cm	29.37±6.30 ^a	22.88±1.09 ^b	20.07±2.44 ^b	18.30±4.90 ^b
	20~40 cm	29.25±6.30 ^a	22.67±1.01 ^b	19.78±2.51 ^b	17.75±4.53 ^b
地下生物量/g	0~20 cm	18.15±7.62 ^a	12.46±5.88 ^a	20.86±6.89 ^a	44.13±56.48 ^a
	20~40 cm	4.33±2.24 ^a	4.55±4.53 ^a	7.02±7.24 ^a	7.83±16.89 ^a
容重/(g·cm ⁻³)	0~20 cm	2.19±0.33 ^a	1.49±0.57 ^{bc}	1.16±0.16 ^c	1.83±0.36 ^{ab}
	20~40 cm	2.71±0.46 ^a	1.98±0.66 ^b	1.61±0.31 ^b	2.03±0.19 ^b
含水率/%	0~20 cm	9.37±4.48 ^b	36.12±24.91 ^a	48.76±13.92 ^a	51.54±6.74 ^a
	20~40 cm	6.86±1.11 ^c	26.54±16.10 ^b	40.39±9.38 ^{ab}	43.17±14.71 ^a
pH	0~20 cm	8.12±0.06 ^a	7.11±0.21 ^b	6.78±0.11 ^c	6.08±0.15 ^d
	20~40 cm	8.30±0.05 ^a	7.34±0.29 ^b	6.88±0.09 ^c	6.29±0.07 ^d
电导率/(S·m ⁻¹)	0~20 cm	115.42±5.22 ^a	83.42±17.53 ^b	93.80±14.27 ^b	114.92±17.88 ^a
	20~40 cm	126.98±12.65 ^a	73.82±13.58 ^b	72.18±14.25 ^b	63.87±12.18 ^b
砂粒(w/w)/%	0~20 cm	14.78±4.08 ^{ab}	8.10±1.92 ^b	8.62±3.81 ^b	18.22±10.50 ^a
	20~40 cm	14.32±4.86 ^a	6.53±2.28 ^b	8.73±4.88 ^b	8.20±4.92 ^b
黏粉粒(w/w)/%	0~20 cm	85.22±4.08 ^{ab}	91.90±1.92 ^a	91.38±3.81 ^a	81.78±10.50 ^b
	20~40 cm	85.68±4.86 ^b	93.47±2.28 ^a	91.27±4.88 ^{ab}	91.80±4.92 ^a

注:平均值±标准差, $n=6$ 。不同小写字母表示同一土层深度,不同海拔间差异显著 ($P<0.05$)。

的增加而增加;土壤含水率随着海拔的升高而逐渐增加,随深度的增加而减少;土壤容重随海拔的增加呈先减后增的趋势,在 AS 最低,随着土壤深度的增加,容重呈下降趋势;pH 整体随海拔的升高呈现下降趋势,随深度的增加而增加;表层土壤 (0~20 cm) EC 沿海拔升高先减后增,在 SS 最低,20~40 cm 土层的土壤 EC 沿海拔升高呈下降趋势;表层土壤机械组成中砂粒占比随着海拔的升高呈先减后增的趋势,并在 SS 处达到最小;而土壤机械组成中黏粉粒占比在表层土壤 (0~20 cm) 中沿海拔呈先增后减的趋势,土壤深度对土壤机械组成的影响无明显变化规律。

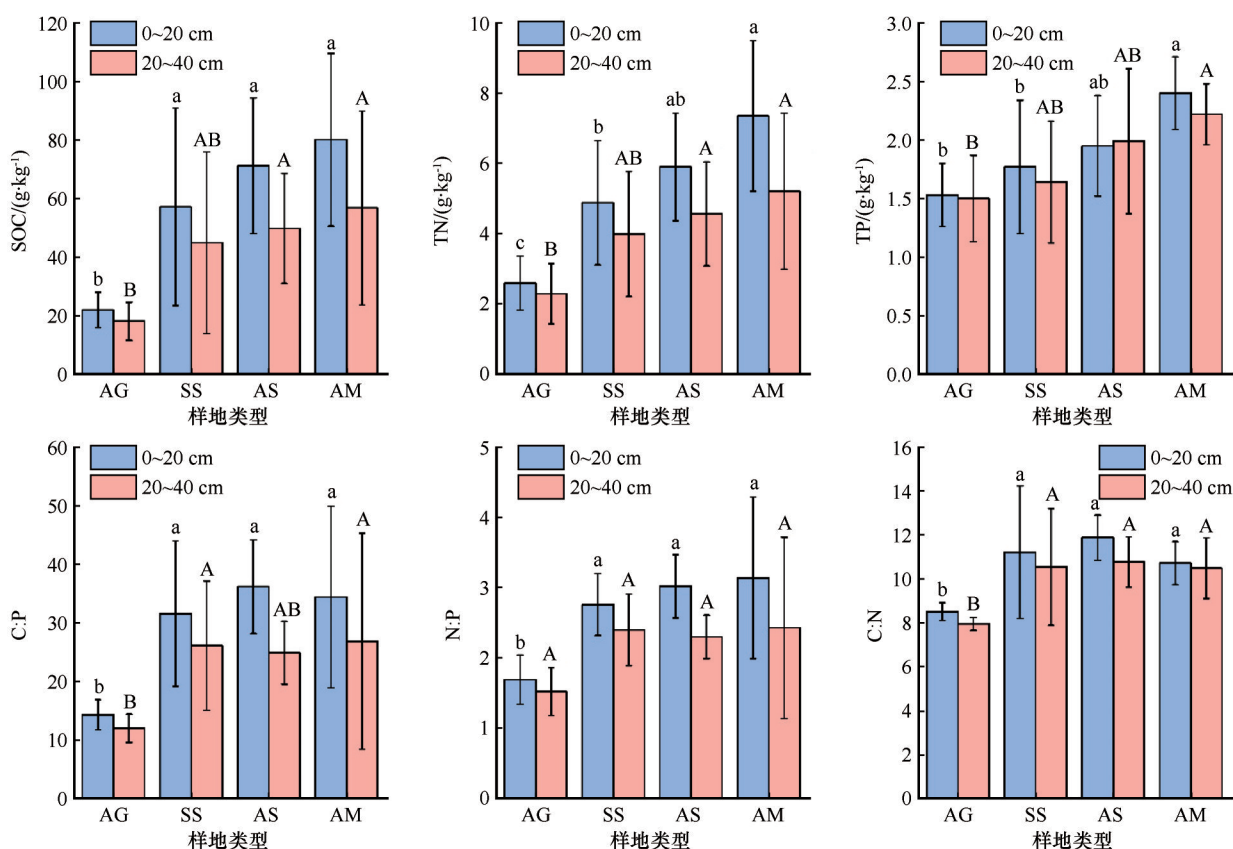
2.2 土壤 C、N、P 化学计量沿海拔梯度的变化特征

不同海拔土壤碳、氮、磷含量呈现不同的变化趋势。SOC、TN、TP 的含量均沿海拔呈现上升趋势,而随着深度增加逐渐降低 (图 1)。表层土壤 (0~20 cm) SOC 含量为 21.95~80.11 g·kg⁻¹, AG 的 SOC 含量显著低于 AM、AS、SS ($P<0.05$); TN 含量为 2.59~7.35 g·kg⁻¹, 随海拔升高, 0~20 cm 土层中 TN 含量呈显著增加趋势, AM (7.35 g·kg⁻¹) > AS (5.90

g·kg⁻¹) > SS (4.88 g·kg⁻¹) > AG (2.59 g·kg⁻¹); TP 含量为 1.53~2.40 g·kg⁻¹, 样地 AM 的 TP 含量显著高于 SS 和 AG。20~40 cm 土层中, SOC、TN、TP 含量分别为 18.09~56.78 g·kg⁻¹、2.29~5.21 g·kg⁻¹、1.50~2.20 g·kg⁻¹, 且样地 AG 的 SOC、TN、TP 含量均显著低于 AM 和 AS。土壤养分化学计量比在不同海拔存在差异, 表层土壤 (0~20 cm) N:P 随海拔的增加而增加, 而 C:P、C:N 均沿海拔的增加呈现先增加后减小的趋势, 且最大值均出现在 AS 处; 20~40 cm 土层中, C:N 随海拔的增加呈先增后减的趋势, 且在 AS 处达到最大值, 而海拔对 C:P、N:P 的影响无明显规律。土壤 C:P、N:P 和 C:N 在 4 个样地中均随土壤深度的增加而减小。

2.3 土壤微生物生物量 C、N、P 化学计量特征沿海拔梯度的变化特征

不同土壤深度 MBC、MBN、MBP 对海拔变化的响应不同。0~20 cm 土层中, MBC 含量沿海拔逐渐升高, MBN 含量随着海拔的升高呈下降趋势, MBP 含量沿海拔呈现先降低后升高的趋势 (图 2); 海拔对 MBC:MBP 的影响无明显规律, MBN:MBP 随海



注：平均值±标准差， $n=6$ 。不同大小写字母表示同一土层深度，不同海拔间差异显著($P<0.05$)。AG-高山草原(2 600~2 900 m)；SS-亚高山灌丛(2 900~3 100 m)；AS-高山灌丛(3 100~3 500 m)；AM-高山草甸(3 500~3 670 m)

图1 不同海拔下土壤碳、氮、磷含量及其比值

Fig.1 Soil carbon, nitrogen and phosphorus contents and their ratios at different altitudes

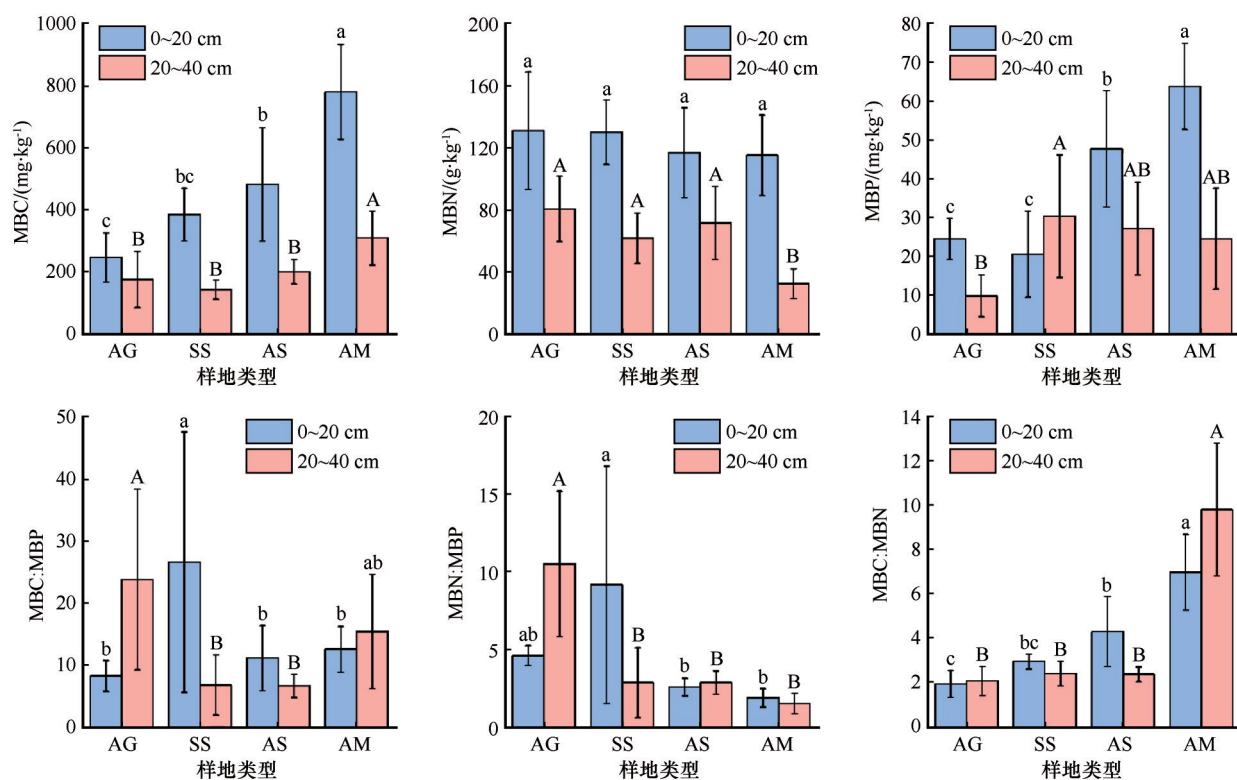
拔升高呈先增加后减小的变化趋势，在样地 SS 达到最大值，并显著高于其他海拔土壤，MBC:MBN 整体沿海拔逐渐增加且变化差异显著($P<0.05$)。20~40 cm 土层中，MBC 含量沿海拔升高呈现先降低后升高的变化趋势，在样地 SS 达到最小值，海拔对 MBN 含量的影响无明显规律，MBP 含量随海拔升高呈先上升后下降的变化趋势，并在样地 SS 达到最大值；MBC:MBP 随海拔升高呈先减小后增大的变化趋势，在样地 SS 达到最小值，MBN:MBP 和 MBC:MBN 沿海拔无明显变化规律。

MBC、MBN 含量在 4 个样地中均随土层深度增加而减少，MBP 在 SS 随土层深度增加而增加，在其他 3 个样地中随土层深度增加而减少；MBC:MBP 和 MBC:MBN 均在样地 AG、AM 中沿土层深度增加，在样地 SS、AS 中沿土层深度下降，MBN:MBP 在样地 AG 和 AS 中随着土层深度的增加而升高，在样地 SS 和 AM 中随着土层深度的增加而降低。

2.4 土壤-微生物生物量 C、N、P 化学计量的影响因素

0~20 cm 土层中，MBC、MBP、MBC:MBN 与 UB、SMC、SOC、TN、TP、C:P、N:P 显著正相关，与 ST、pH 显著负相关(图 3)；MBC:MBP 与 EC 显著负相关。20~40 cm 土层中，MBC、MBC:MBN 与 UB、SMC、SOC、TN、C:N、N:P 显著正相关，与 pH 显著负相关；除 pH 外，MBC:MBN 还与 ST 和 EC 显著负相关；MBN 与 ST、pH、EC 显著正相关。

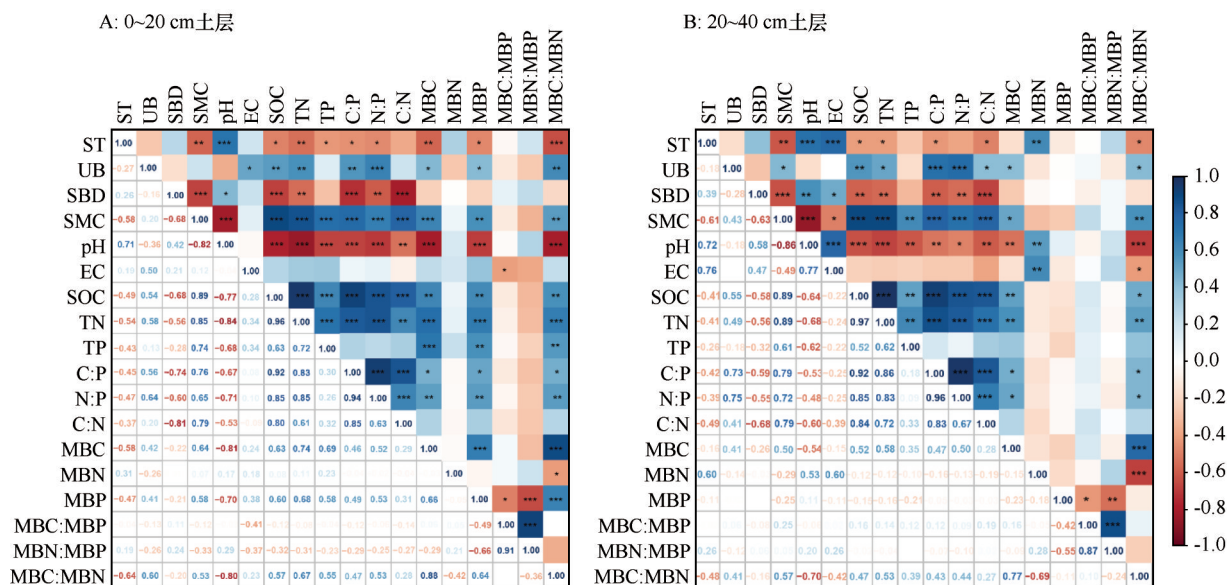
以 MBC、MBN、MBP 及其化学计量比为响应变量，SOC、TN、TP 及其化学计量比、环境因子(UB、SBD、SMC、pH、EC)为解释变量分别对 0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层进行冗余分析(图 4)，结果表明，0~20 cm 土层中第一轴解释了变量的 34.66%，第二轴解释了变量的 14.81%，累计解释量达到 49.47%。其中 pH、TN、EC 与 MBC、MBN、MBP 及其化学计量比极显著相关($P<0.01$)，分别解释了 MBC、MBN、MBP 及其化学计量比的 31.3%、12.3%、7.6%。20~40 cm 土层中第一轴解释了变量的 29.28%，第二轴



注: 平均值±标准差, $n=6$ 。不同大小写字母表示同一土层深度, 不同海拔间差异显著 ($P<0.05$)。AG-高山草原 (2 600~2 900 m)、SS-亚高山灌丛 (2 900~3 100 m)、AS-高山灌丛 (3 100~3 500 m)、AM-高山草甸 (3 500~3 670 m)

图2 不同海拔下土壤微生物生物量碳、氮、磷含量及其比值

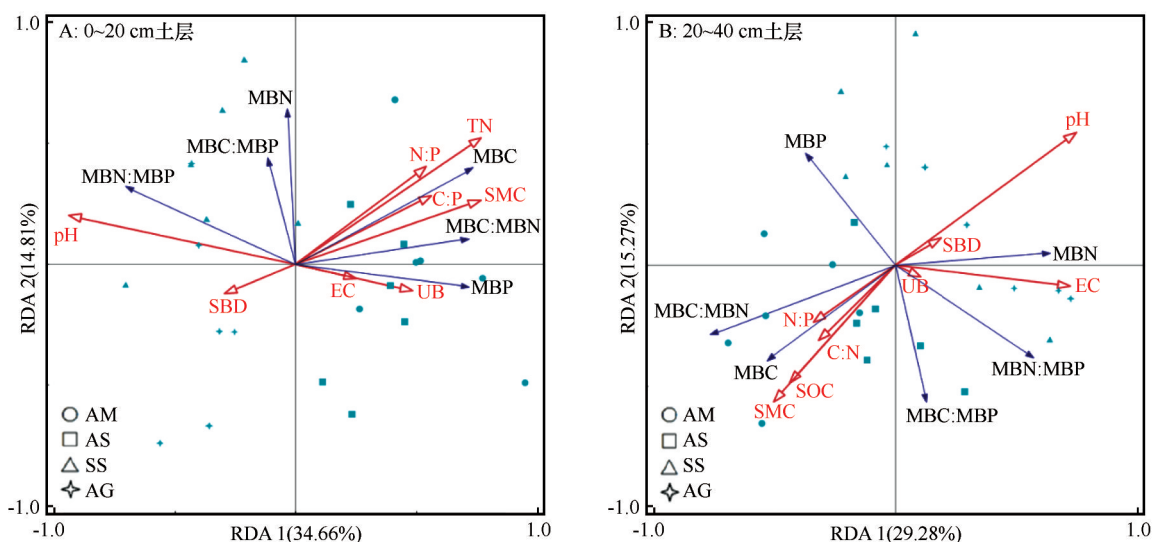
Fig.2 Contents and ratios of carbon, nitrogen and phosphorus in soil microbial biomass at different altitudes



注: *, 在 0.05 水平差异显著; **, 在 0.01 水平差异显著; ***, 在 0.001 水平差异显著; ST、UB、SBD、SMC、pH、EC、SOC、TN、C:P、N:P、C:N、MBC、MBN、MBP、MBC:MBN、MBN:MBP、MBC:MBN 分别代表土壤质地、地下生物量、土壤容重、土壤含水率、土壤 pH 值、电导率、有机碳、总氮、碳磷比、氮磷比、碳氮比、微生物生物量碳、微生物生物量氮、微生物生物量磷、微生物量碳氮比、微生物量碳磷比、微生物量氮磷比

图3 微生物生物量碳、氮、磷及其化学计量比与土壤和非生物因素的相关性

Fig.3 Correlation analysis of microbial biomass carbon, nitrogen, phosphorus and their stoichiometric ratios with soil and abiotic factors



注:图中蓝线箭头为响应变量(微生物生物量碳、氮、磷及其生态化学计量特征),红线箭头为解释变量(环境因子)。UB、SBD、SMC、pH、EC、SOC、TN、C:P、N:P、C:N、MBC、MBN、MBP、MBC:MBN、MBC:MBP、MBN:MBP分别代表地下生物量、土壤容重、土壤含水率、土壤pH值、电导率、有机碳、总氮、碳磷比、氮磷比、碳氮比、微生物生物量碳、微生物生物量氮、微生物生物量磷、微生物量碳氮比、微生物量碳磷比、微生物量氮磷比。AG-高山草原(2 600~2 900 m);SS-亚高山灌丛(2 900~3 100 m);AS-高山灌丛(3 100~3 500 m);AM-高山草甸(3 500~3 670 m)

图4 微生物生物量碳、氮、磷及其化学计量比与土壤和非生物因素的冗余分析

Fig.4 Redundancy analysis of microbial biomass C, N, P and their stoichiometric ratios with soil and abiotic factors

解释了变量的15.27%,累计解释量达到44.55%。其中pH、EC、SOC与MBC、MBN、MBP及其化学计量比极显著相关($P<0.01$),分别解释了MBC、MBN、MBP及其化学计量比的20.9%、8.7%、12%。

3 讨论

3.1 土壤-微生物碳氮磷生态化学计量特征沿海拔梯度的变化规律

生态系统中植物营养主要来源于土壤养分,土壤养分又受到土壤性质和水热条件的影响,而各种环境因子沿海拔存在一定的空间变异性^[19,33]。本研究表明,马街山不同土层土壤SOC和TN的含量均沿海拔升高呈现上升趋势,这与Bhople等^[34]在阿尔卑斯山脉的研究结果相同,可能是由于温度随海拔升高而降低,高海拔有机物的循环受到低温限制^[35]。同时,温度降低也会导致土壤微生物活性下降,有机质分解变慢,增加土壤养分的积累^[36]。土壤TP主要受到土壤母质影响,来源相对固定,因而变异相对较小^[37]。本研究区域的土壤养分均随土层深度的增加而降低,与朱秋莲等^[37]的研究结果一致。这是由于植被凋落物及有机质分解的影响,不同土层存在较大空间变异性。本研究所得C:P、

C:N均沿海拔呈现先增加后减小的趋势,且最大值均出现在AS,与黄伟佳等^[33]在南岭山地的研究结果相同,这是因为高山灌丛植被凋落物较难分解,向土壤归还的磷元素较少。同时,这也表明在中海拔(3 100~3 500 m)N和P可能会限制土壤有机质分解和营养物质循环。

土壤微生物生物量受到土壤养分和植被类型等因素影响,其中SOC是关键因素^[38]。本研究的结果也显示表层土壤MBC、MBP海拔分布特征与SOC、TN基本一致,即沿海拔呈上升趋势。这也进一步说明了土壤有机质对微生物生长发育的重要作用。柳杨等^[39]在鼎湖山的研究表明,土壤MBC和MBN随海拔升高逐渐降低,与本研究结果相反,可能与海拔跨度和研究区地理位置有关。本研究区域属于中国东部季风区和西部干旱区之间,而鼎湖山地处热带和亚热带的过渡区,并且本研究选取海拔梯度为2 600~3 670 m,而柳杨等^[39]选取的海拔梯度为100~600 m,跨度较小可能无法产生显著性差异。除土壤有机质含量外,土壤温度、水分及pH等环境因子也可以影响土壤微生物群落组成、微生物活性等因素,从而改变微生物量化学计量比。马街山表层土壤MBN:MBP沿海拔呈先增后减趋势,在SS取得最大值,说明海拔超过3 100 m后微生物

对P的限制作用减弱;MBC:MBN沿海拔逐渐增加,表明在海拔2 600~2 900 m土壤氮素利用率较高,随海拔增加利用率减小,与赵盼盼等^[40]在戴云山黄山松林的研究结果一致。本研究中,不同海拔表层土壤MBC:MBN、MBN:MBP的平均值分别为4.04、4.55,远低于中国陆地生态系统土壤MBC:MBN、MBN:MBP平均值(13.7和9.23),说明该研究区土壤有效氮和有效磷含量低^[41]。

3.2 马衔山土壤-微生物碳氮磷生态化学计量特征的影响因素

本研究区域,马衔山沿山体垂直带4种典型植被类型的表层土壤SOC、TN、MBC、MBP含量分别为21.95~80.11 g·kg⁻¹、2.59~7.35 g·kg⁻¹、246.26~780.26 mg·kg⁻¹、20.56~63.86 mg·kg⁻¹,空间变异性较大,海拔的变化引起区域内水热条件的变化,导致植被类型和微生物群落构成发生改变,并对土壤-微生物碳氮磷的空间分布格局产生影响,这与很多研究结果一致^[42-43]。本研究结果还表明,随着海拔的升高和土层深度的增加,土壤温度均呈现下降趋势,土壤含水率沿海拔升高逐渐增加,随深度的增加而减少。由于表层土壤通气性和水热条件良好,并且植被凋落物和动植物残体等为表层土壤微生物提供了丰富的底物来源^[33],所以土壤养分及微生物生物量主要聚集在土壤表层。

土壤理化性质与水热条件等环境因子显著影响植物的生长发育状况,继而影响植被凋落物质量及养分的归还,导致不同海拔土壤微生物生物量差异显著。本研究的冗余分析结果表明,0~20 cm土层中对MBC、MBN、MBP及其化学计量比解释率最高的3个因素为pH、TN、EC,20~40 cm土层中解释率最高的3个因素为pH、SOC、EC。随着海拔的增加pH值和EC减小,MBC、MBP、MBC:MBN增加,MBC、MBP、MBC:MBN与pH、EC均负相关。李聪等^[9]在文山国家级自然保护区的研究也表明MBC含量与土壤pH值呈极显著负相关($P<0.01$),土壤pH和EC可以改变土壤养分有效性及植物、微生物对养分的利用,直接或间接影响了微生物生长发育及群落结构,从而对微生物生物量也产生影响^[44]。表层土壤MBC、MBP和MBC:MBN海拔分布特征与SOC、TN大致相同,这与Chen等^[27]在青藏高原高寒草地以及曾全超等^[45]在黄土高原不同乔木林的

研究结果一致,同时He等^[46]利用全世界73个海拔样带的59项研究进行对比也证明了这一结果。因为土壤有机质对微生物的生长发育有着至关重要的作用。

植物地下生物量可用于表征区域土壤养分状况,所以除土壤理化性质外,地下生物量的大小也会影响土壤-微生物碳氮磷生态化学计量,本研究的相关性分析结果表明表层土壤MBC、MBP、MBC:MBN与地下生物量显著正相关。此外,由于深层土壤地下生物量较少,所以生物量与生态化学计量没有很强的相关性。张路^[47]对青藏高原高寒草地土壤微生物群落结构的影响因素的研究结果也表明地下生物量对微生物多样性有显著影响,从而改变微生物碳氮磷生态化学计量。产生以上结果的原因可能是由于植物根系分泌物可为微生物提供生长发育和繁殖所需能源,因此根系分泌物可以通过改变微生物多样性、调节微生物代谢过程等影响土壤-微生物碳氮磷含量^[48]。

4 结论

可能由于高海拔有机物的循环受到低温限制,马衔山不同土层土壤SOC和TN的含量均沿海拔呈现上升趋势。土壤MBC、MBP与土壤SOC、TN显著正相关,对环境因子的响应具有一致性。马衔山不同土层土壤的C:P、C:N均沿海拔呈现先增加后减小的趋势,在中海拔(3 100~3 500 m)N和P可能会限制土壤有机质分解和营养物质循环。冗余分析和相关性分析结果表明,土壤pH、SOC、TN、EC、UB等对不同海拔梯度土壤微生物群落结构变化影响较大。MBC、MBN、MBP及其生态化学计量沿海拔梯度的变化是土壤养分和环境因子综合作用的结果。

参考文献:

- [1] Elser J J, Acharya K, Kyle M, et al. Growth rate-stoichiometry couplings in diverse biota [J]. *Ecology Letters*, 2003, 6: 936-943.
- [2] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems [J]. *Ecology Letters*, 2000, 3 (6): 540-550.
- [3] Michaels A F. The ratios of life [J]. *Science*, 2003, 300 (5621): 906-907.
- [4] 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.

- [5] Rogers B F, Tate R L. Temporal analysis of the soil microbial community along a top sequence in pineland soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33: 1389–1401.
- [6] 魏媛, 张金池, 喻理飞. 退化喀斯特植被恢复过程中土壤微生物量碳的变化[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2008, 32(5): 71–75.
- [7] 王慧颖, 徐明岗, 马想, 等. 长期施肥下我国农田土壤微生物及氨氧化菌研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2018(2): 1–12.
- [8] 王宁, 杨雪, 李世兰, 等. 不同海拔红松混交林土壤微生物量碳、氮的生长季动态[J]. *林业科学*, 2016, 52(1): 150–158.
- [9] 李聪, 吕晶花, 陆梅, 等. 文山国家级自然保护区不同海拔地带性植被的土壤微生物生物量碳氮分布特征[J]. *林业科学*, 2022, 58(3): 20–30.
- [10] Kou Y P, Li C N, Tu B, et al. The responses of ammonia-oxidizing microorganisms to different environmental factors determine their elevational distribution and assembly patterns[J]. *Microbial Ecology*, 2022, 86(1): 485–496.
- [11] Yang Y, Qiu K Y, Xie Y Z, et al. Geographical, climatic, and soil factors control the altitudinal pattern of rhizosphere microbial diversity and its driving effect on root zone soil multifunctionality in mountain ecosystems[J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 904: 166932.
- [12] McCain C M. Could temperature and water availability drive elevational species richness patterns? a global case study for bats[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2007, 16(1): 1–13.
- [13] Xu X F, Thornton Peter 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(5/6): 737–749.
- [14] 陈顺治. 关帝山华北落叶松林下植物多样性和土壤碳氮磷的海拔梯度格局[D]. 山西太谷: 山西农业大学, 2016.
- [15] 刘倩, 王书丽, 邓邦良, 等. 武功山山地草甸不同海拔凋落物-土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(5): 1535–1541.
- [16] 宁朋, 程小毛, 杨晓峰, 等. 贡嘎山不同海拔峨眉冷杉根际土壤化学性质及胞外酶活性[J]. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(5): 1138–1146.
- [17] 张彦军, 郁耀闯, 牛俊杰, 等. 秦岭太白山北坡土壤有机碳储量的海拔梯度格局[J]. *生态学报*, 2020, 40(2): 629–639.
- [18] 吴昊, 邹梦茹, 王思芊, 等. 秦岭松栎林土壤生态化学计量特征及其对海拔梯度的响应[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(12): 2323–2331.
- [19] 李丹维, 王紫泉, 田海霞, 等. 太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征[J]. *土壤学报*, 2017, 54(1): 160–170.
- [20] Nottingham A T, Turner B L, Whitaker J, et al. Soil microbial nutrient constraints along a tropical forest elevation gradient: a belowground test of a biogeochemical paradigm[J]. *Biogeosciences*, 2015, 12: 6071–6083.
- [21] 贾培龙, 安韶山, 李程程, 等. 黄土高原森林带土壤养分和微生物量及其生态化学计量变化特征[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(1): 315–321.
- [22] 刘秉儒. 贺兰山东坡典型植物群落土壤微生物量碳、氮海拔梯度的变化特征[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(4): 883–888.
- [23] Arunachalam A, Pandey H N. Ecosystem restoration of jhum fallows in northeast India: microbial C and N along altitudinal and successional gradients[J]. *Restoration Ecology*, 2003, 11(2): 168–173.
- [24] 丛静, 刘晓, 卢慧, 等. 神农架自然保护区土壤微生物生物量碳、氮海拔梯度的变化及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(12): 3381–3387.
- [25] 陈婕妮, 石思雨, 钟羨芳, 等. 武夷山不同海拔土壤微生物生物量碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征[J]. *生态学杂志*, 2023(3): 1–8.
- [26] Manral V, Bargali K, Bargali S S. Seasonal dynamics of soil microbial biomass C, N and P along an altitudinal gradient in Central Himalaya, India[J]. *Sustainability*, 2023, 15(2): 1651.
- [27] Chen Y L, Chen L Y, Peng Y F, et al. Linking microbial C:N:P stoichiometry to microbial community and abiotic factors along a 3500-km grassland transect on the Tibetan Plateau[J]. *Biogeography*, 2016, 25(12): 1416–1427.
- [28] 李树德. 兰州马街山发现多年冻土[J]. *冰川冻土*, 1986, 8(4): 409–410.
- [29] 董希成, 谢昌卫, 赵林, 等. 兰州马街山多年冻土区地表能量平衡特征分析[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(2): 320–326.
- [30] 谢昌卫, 赵林, 吴吉春, 等. 兰州马街山多年冻土特征及变化趋势分析[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(5): 883–890.
- [31] 孙国钧, 赵松岭. 甘肃省马街山地区植被特征分析[J]. *西北植物报*, 1995, 15(5): 115–120.
- [32] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [33] 黄伟佳, 刘春, 刘岳, 等. 南岭山地不同海拔土壤生态化学计量特征及影响因素[J]. *生态环境学报*, 2023, 32(1): 80–89.
- [34] Bhopale P, Djukic I, Keiblinger K, et al. Variations in soil and microbial biomass C, N and fungal biomass ergosterol along elevation and depth gradients in Alpine ecosystems[J]. *Geoderma*, 2019, 345: 93–103.
- [35] He X J, Hou E Q, Liu Y, et al. Altitudinal patterns and controls of plant and soil nutrient concentrations and stoichiometry in subtropical China[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 24261.
- [36] Zhang A L, Li X Y, Wu S X, et al. Spatial pattern of C:N:P stoichiometry characteristics of alpine grassland in the Altunshan Nature Reserve at North Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Catena*, 2021, 207: 105691.
- [37] 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.
- [38] 刘秉儒, 张秀珍, 胡天华, 等. 贺兰山不同海拔典型植被带土壤微生物多样性[J]. *生态学报*, 2013, 33(22): 7211–7220.
- [39] 柳杨, 何先进, 侯恩庆. 鼎湖山森林演替和海拔梯度上的土壤

- 微生物生物量碳氮变化[J].生态杂志,2017,36(2):287-294.
- [40] 赵盼盼,周嘉聪,林开森,等.海拔梯度变化对中亚热带黄山松土壤微生物生物量和群落结构的影响[J].生态学报,2019,39(6):2215-2225.
- [41] 李亚园.贺兰山不同海拔凋落物-土壤-微生物生态化学计量特征及其关系研究[D].银川:宁夏大学,2022.
- [42] 白丽丽,王文颖,德却拉姆,等.祁连山典型植被土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征的垂直变化[J].干旱区研究,2024,41(3):444-455.
- [43] 罗正明,刘晋仙,周妍英,等.亚高山草地土壤原生生物群落结构和多样性海拔分布格局[J].生态学报,2021,41(7):2783-2793.
- [44] 许森平,任成杰,张伟,等.土壤微生物生物量碳氮磷与土壤酶化学计量对气候变化的响应机制[J].应用生态学报,2018,29(7):2445-2454.
- [45] 曾全超,李鑫,董扬红,等.黄土高原不同乔木林土壤微生物量碳氮和溶解性碳氮的特征[J].生态学报,2015,35(11):3598-3605.
- [46] He X J, Hou E Q, Veen G F, et al. Soil microbial biomass increases along elevational gradients in the tropics and subtropics but not elsewhere[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2020, 29(2):345-354.
- [47] 张路.青藏高原高寒草地土壤微生物群落结构特征及影响因素[D].北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2022.
- [48] 尹华军,张子良,刘庆.森林根系分泌物生态学研究:问题与展望[J].植物生态学报,2018,42(11):1055-1070.

Effects of altitude gradient on soil microbial carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics in Maxian Mountain ecosystem

Li Yuqian^{1,2}, Wang Xuyang^{1,2}, Lin Hongdong³, Mou Xiaoming^{1,2},
Liu Weiyan⁴, Lian Jie^{1,2}, Li Yuqiang^{1,2}

(1. Naiman Desertification Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Management and Conservation Center of Xinglong Mountain National Nature Reserve, Yuzhong 730100, Gansu, China; 4. Naiman Banner Big Willow State-owned Sand Control Forest Farm, Naiman Banner 028300, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to investigate the changing patterns of soil microbial carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry in mountain ecosystems along the altitude gradient and the factors affecting them, we selected alpine grassland (AG), subalpine scrub (SS), alpine scrub (AS) and alpine meadow (AM) along the altitude gradient of the Maxian Mountains as the research objects, and analyzed the changes in the characteristics and factors affecting the ecological stoichiometry of the soil carbon, nitrogen and phosphorus, microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus and other physicochemical indicators at different altitudes in the landscape of Maxian Mountains. By measuring soil carbon, nitrogen and phosphorus, microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus and other physicochemical indicators at 0–20 cm and 20–40 cm levels, we analyzed the characteristics and influencing factors of soil carbon, nitrogen and phosphorus, microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus and their ecological stoichiometry in the landscape of Maxian Mountain at different altitudes. The results showed that: (1) soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) contents showed a significant increase along the altitude and decreased significantly with the increase of soil depth, the microbial biomass carbon (MBC) content of the surface soil (0–20 cm) increased significantly along the altitude, and microbial biomass phosphorus (MBP) content showed a decreasing and then increasing trend along altitude, and the content of MBC in deep soil (20–40 cm) decreased first and then increased along the altitude, and reached the minimum value in the subalpine shrub, and the MBP content increased first and then decreased with the elevation, and reached the maximum value in the subalpine shrub. (2) Soil C:P and C:N showed a trend of increasing and then decreasing along the elevation, and the maximum values appeared in the alpine scrub (36.16 and 11.88), and the maximum value appeared in the alpine scrub. Surface soil MBN:MBP showed an increasing and then decreasing trend with elevation, and the maximum value appeared in the subalpine scrub (9.16), MBC:MBN increased significantly along the elevation as a whole, and deep soil MBC:MBP showed a decreasing and then increasing trend with elevation, and the minimum value appeared in the subalpine scrub (8.40). (3) Soil pH, electrical conductivity and underground biomass were significantly correlated with soil-microbial carbon, nitrogen and phosphorus and ecological stoichiometry, and pH was a key driver of the elevation distribution pattern of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus and their stoichiometry. In conclusion, the changes of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus and its ecological stoichiometry along the altitude gradient are the result of the comprehensive effects of soil nutrients and environmental factors. This study is of great significance to reveal the response mechanism of soil nutrient cycling to environmental change in mountain ecosystems.

Key words: altitude gradient; Maxian Mountains; soil microbial biomass; ecological stoichiometry