

煤矸石煤泥配施对风沙土壤肥力及微生物生物量化学计量特征的影响^①

王力恒, 赵雪淞*

(辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

摘要: 在科尔沁沙地土壤中添加不同质量比的煤矸石和煤泥, 以紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)为供试植物进行盆栽试验, 测定土壤化学性质和微生物生物量碳(MBC)、氮(MBN)、磷(MBP)含量, 计算土壤综合肥力指数(IFI)、微生物生物量化学计量比、土壤微生物熵(qmb)及其化学计量不平衡性, 通过相关性分析和冗余分析探究煤矸石和煤泥添加条件下风沙土壤中微生物动态与土壤养分代谢之间的关系。结果表明, 与不添加煤矸石和煤泥(CK)相比, 煤矸石和煤泥配施处理土壤 IFI、MBC、MBN、MBP 均显著提高, 其中 10% 煤矸石配施 15% 的煤泥配施处理最高, 较 CK 分别显著提升了 28.13%、173.44%、112.09% 和 404.35%; 土壤微生物熵碳(qmbc)、土壤微生物熵氮(qmbn)、土壤微生物熵磷(qmbp)较 CK 也显著升高。不同处理间土壤微生物化学计量比和土壤-微生物化学计量不平衡性的变化有显著差异。相关性分析表明, MBC、MBN、MBP 与 qmb 和 IFI 均表现出显著或极显著正相关。冗余分析表明, qmb 受土壤-微生物生物量化学计量比及其化学计量不平衡性的影响, 其中土壤氮磷化学计量不平衡性(N/Pimb)、土壤碳氮比(SOC/TN)是影响 qmb 的主要因子, 分别解释了土壤 qmb 的 42.5%($F=20.7$, $P=0.002$)和 38.0%($F=52.7$, $P=0.002$), 是驱动土壤微生物熵的关键因子。煤矸石和煤泥的添加导致土壤微生物与资源化学组分之间差异性显著改变, 进而提升土壤肥力。

关键词: 煤矸石; 煤泥; 土壤综合肥力指数; 微生物生物量; 微生物熵

中图分类号: S153 **文献标志码:** A

Effects of Combined Application of Coal Gangue and Coal Slurry on Fertility and Microbial Biomass Stoichiometry Characteristics in Sandy Soil

WANG Liheng, ZHAO Xuesong*

(College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: In the pot experiment, coal gangue and coal slurry were added with different mass ratios to the soil collected from Horqin Sandy Land, and alfalfa (*Medicago sativa* L.) was used as the tested plant. Soil chemical properties, the contents of microbial biomass carbon (MBC), nitrogen (MBN), and phosphorus (MBP) were measured, and soil integrated fertility index (IFI), microbial stoichiometric ratios, microbial entropy (qmb) and its stoichiometric imbalance were calculated. The relationship between microbial dynamics and soil nutrient metabolism was explored through correlation analysis and redundancy analysis. The results showed that compared with the treatment without adding coal gangue and coal slurry (CK), soil IFI, MBC, MBN, and MBP all were significantly increased under the combined application of coal gangue and coal slurry. Among them, the treatment with 10% coal gangue and 15% coal slurry had the highest IFI, MBC, MBN, and MBP, increased by 28.13%, 173.44%, 112.09%, and 404.35%, respectively compared with CK; soil microbial entropy carbon(qmbc), soil microbial entropy nitrogen(qmbn), and soil microbial entropy phosphorus(qmbp)qmbp were also significantly increased compared to CK. There were significant differences in the changes of soil microbial stoichiometry ratios and soil microbial stoichiometry imbalance between different treatments. Correlation analysis showed that MBC, MBN, and MBP were significantly ($P<0.05$) or extremely significantly ($P<0.01$) positively correlated with qmb and soil IFI. Redundancy analysis showed that qmb was influenced by soil microbial stoichiometric ratios and its stoichiometric imbalance, with soil nitrogen phosphorus imbalance ratio (N/Pimb) and soil carbon

①基金项目: 辽宁省教育厅科研项目(LJKZ0328, JYTMS20230806)资助。

* 通信作者(zhaoxs210@163.com)

作者简介: 王力恒(1999—), 男, 辽宁抚顺人, 硕士研究生, 主要从事生态修复理论与技术研究。E-mail: wanglh9706@163.com

nitrogen ratio (SOC/TN) being the main factors affecting qmb, explained 42.5% ($F=20.7, P=0.002$) and 38.0% ($F=52.7, P=0.002$) of soil qmb, respectively, and being key factors drove soil microbial entropy. In conclusion, the combined application of coal gangue and coal slurry can significantly change in the differences between soil microorganisms and resource chemical components, thus improving soil fertility.

Key words: Coal gangue; Coal slurry; Soil integrated fertility index (IFI); Microbial biomass; Microbial entropy

作为世界三大化石能源之一的煤炭在中国能源领域占主导地位。煤矸石是采煤、洗煤过程中产生的固体废弃物,占原煤产量的 15%~30%,预计到 2025 年我国煤矸石产量将达到 8.00 亿吨,急需处理^[1-2]。煤泥泛指煤粉含水形成的半固体,是煤炭洗选加工的副产品,每洗选 1 吨煤约产生 20%~30% 的煤泥^[3]。煤矸石具有“三害”——侵占土地、污染环境和安全隐患^[4]。煤泥具有高水分、高黏性、高持水性和低热值等不利于工业应用和运输的特点,造成环境污染的同时也浪费了资源^[3, 5]。煤矸石和煤泥的绿色资源化利用问题已成为国家重点研究课题^[6]。

煤矸石和煤泥中的主要矿物是石英和黏土类矿物。不同矿物赋存比例与煤矸石和煤泥类型相关。黏土岩类煤矸石和煤泥含有相当高比例的高岭石、伊利石等黏土矿物,具有较大比表面积、良好的吸附性、阳离子交换性、膨胀性等特点,有利于重塑土壤结构^[3-6];同时,富含营养元素和有机质,具有制备植生基质的物质基础,可利用其作为土壤改良材料^[4]。但是,不同来源的煤矸石和煤泥矿物组成、粒度、持水性、化学组成等均有差异,导致二者单独施加或复配时的土壤改良效果不同。李依临等^[7]用煤矸石、煤泥、风化煤配施牛粪对风沙土改良,发现复配对提高紫花苜蓿产量和土壤养分积累的效果要优于单独添加。白宏伟等^[8]用煤基固废材料(煤泥、煤矸石、风化煤)配施无机化肥制成煤基复混肥,施入土壤后对氮磷钾养分的释放有显著的延缓效果,有利于减少养分流失、提高植物对肥料的利用效率、促进植物生长发育。赵才毅等^[9]发现煤泥、煤矸石、风化煤 3 种煤基物质不同配比的施用均对盐碱土不良理化性状有改良效果。上述研究表明,煤矸石和煤泥复配具有良好的土壤生态修复效果,可以通过改变土壤物理和化学性质,如土壤孔隙度、土壤 pH 和土壤营养元素含量等,显著影响土壤微生物动态与土壤养分代谢,进而影响土壤质量,但是目前关于煤矸石和煤泥配施修复沙化土壤的研究一般只停留在土壤物理化学性质分析上,关于煤矸石和煤泥配施条件下沙化土壤的微生物生物量化学计量特征研究鲜见报道。

沙化土壤的改良效果可以用土壤综合肥力指数

(IFI)来表达^[10-11]。此外土壤微生物生物量(MB)作为土壤有机质的一部分,其含量占比虽小,却是土壤 C、N 和 P 循环的关键调节因子^[12-13]。土壤微生物熵(qmb)、氮(qmbn)、磷(qmbp)是土壤微生物生物量碳(MBC)、氮(MBN)、磷(MBP)占土壤有机碳、全氮、全磷的百分比,主要用于反映一个资源单位可以支撑的微生物生物量,可以被视为基质质量和数量、土壤生物多样性和土壤特性的综合衡量标准^[14-15]。因此,土壤微生物熵可以作为不同处理措施下土壤质量的有效评价指标。土壤微生物化学计量不平衡性可以评价微生物与资源化成分的差异性,有利于明确土壤与养分动态平衡状态^[16]。总之,土壤微生物生物量化学计量特征研究为土壤生态修复中微生物动态与土壤养分代谢之间的关联提供了“桥梁”^[12-13, 17]。本研究在风沙地土壤中添加不同质量比的煤矸石和煤泥进行盆栽实验,以紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)为供试植物,分析煤矸石和煤泥配施条件下风沙土壤肥力、土壤微生物生物量及其化学计量比和土壤微生物熵及其化学计量不平衡性的变化,分析煤矸石和煤泥添加条件下风沙土壤中微生物动态与土壤养分代谢之间的关联,为煤矸石和煤泥的资源化利用以及风沙土壤改良提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试土壤于 2023 年春季取自辽宁省农科院沙地治理与利用研究所章古台林场林地边缘(42°67'N, 122°57'E)100 m² 范围内,采用五点取样法取 0~20 cm 表层土,带回实验室挑出砂砾和植物根系等杂质,阴干后进行盆栽实验。供试土壤的基本性质为: pH 6.47, 有机碳(SOC)4.13 g/kg, 全氮(TN)0.13 g/kg, 全磷(TP)0.26 g/kg, 全钾(TK)21.60 g/kg。

供试煤矸石为辽宁沈阳红阳三矿采矸,由石英、高岭石、赤铁矿、钾霞石、磷酸铝石等矿物组成,经颚式破碎机破碎为 5 mm 以下备用,其基础性质为: pH 8.13、SOC 5.61 g/kg、TN 0.94 g/kg、TP 0.42 g/kg、TK 29.81 g/kg,其他矿质元素含量见表 1。

供试煤泥取自山西塔山选煤厂,为螺旋分选机分

选出的 0.5~1.5 mm 粒级粗煤泥, 主要由石英和高岭石矿物组成, 阴干后立即使用, 该选煤厂主选工艺为重介质分选。煤泥基础性质为: pH 7.49、SOC 5.69 g/kg、TN 1.82 g/kg、TP 0.31 g/kg、TK 2.95 g/kg,

其他矿质元素含量见表 1。

供试植物紫花苜蓿(中苜一号)种子采购于沐阳县绿彤园林工程有限公司, 供试化肥购置于广东省珠海市广东品牌农资批发厂。

表 1 煤矸石和煤泥的化学元素组成(%)
Table 1 Chemical elemental compositions of tested coal gangue and coal slurry

名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Ga ₂ O ₃	CaO	TiO ₂
煤矸石	57.70	25.88	0.25	1.32	4.95	2.14	0.01	2.73	0.93
煤泥	40.39	31.67	0.12	0.21	2.46	13.14	0.03	6.60	3.74
名称	MnO	ThO ₂	SeO ₂	Rb ₂ O	SrO	Y ₂ O ₃	ZrO ₂	Nb ₂ O ₅	BaO
煤矸石	0.11	0	0	0.02	0.04	0.01	0.03	0.01	0.05
煤泥	0.04	0.02	0.01	0	0.26	0.02	0.20	0.01	0

1.2 试验设计

采用盆栽试验, 在风沙土中添加不同比例(土壤总重的质量比)的煤矸石和煤泥, 煤矸石和煤泥的添加量参考前人报道^[7]确定。实验共计 10 个处理(见表 2), 每个处理重复 3 次。在本研究的煤矸石和煤泥添加量条件下, 供试土壤中的重金属含量均符合国标 GB15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》要求。所有处理均施入等量无机肥: 尿素 75 kg/hm², 磷酸二铵 90 kg/hm², 硫酸钾 105 kg/hm²^[18]。

表 2 试验处理
Table 2 Experiment treatments

处理	煤矸石 (%)	煤泥 (%)	处理	煤矸石 (%)	煤泥 (%)
CK	0	0	T5	10	10
T1	5	5	T6	15	10
T2	10	5	T7	5	15
T3	15	5	T8	10	15
T4	5	10	T9	15	15

1.3 测定方法

化学指标测定参考文献[19], 土壤微生物生物量碳(MBC)、氮(MBN)、磷(MBP)采用氯仿熏蒸-浸提法测定^[20]。

1.4 数据计算

$$\text{土壤微生物熵碳(qmbc)} = \text{MBC}/\text{SOC} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{土壤微生物熵氮(qmbn)} = \text{MBN}/\text{TN} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{土壤微生物熵磷(qmbp)} = \text{MBP}/\text{TP} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{碳氮化学计量不平衡性}(C/N_{\text{imb}}) = (\text{SOC}/\text{TN})/(\text{MBC}/\text{MBN}) \quad (4)$$

$$\text{碳磷化学计量不平衡性}(C/P_{\text{imb}}) = (\text{SOC}/\text{TP})/(\text{MBC}/\text{MBP}) \quad (5)$$

$$\text{氮磷化学计量不平衡性}(N/P_{\text{imb}}) = (\text{TN}/\text{TP})/(\text{MBN}/\text{MBP}) \quad (6)$$

土壤综合肥力指数计算方法参考文献[21]: 采用

修正的内梅罗公式计算土壤综合肥力指数。其中分肥力指标分别为土壤 pH、有机碳(SOC)、全氮(TN)、碱解氮(AN)、全磷(TP)、有效磷(AP)、全钾(TK)、速效钾(AK), 进而得到最终的土壤综合肥力指数。

$$IFI_i = \begin{cases} x/x_a & x \leq x_a \\ 1 + (x - x_a)/(x_c - x_a) & x_a < x \leq x_c \\ 2 + (x - x_c)/(x_p - x_c) & x_c < x \leq x_p \\ 3 & x > x_p \end{cases} \quad (7)$$

$$IFI = \sqrt{\frac{(\text{IFI}_{\text{平均}})^2 + (\text{IFI}_{\text{最小}})^2}{2}} \times \left(\frac{n-1}{n}\right) \quad (8)$$

式中: IFI_i为分肥力系数; x为该属性测定值; x_a为分级标准下限, x_p为分级标准上限, x_c为介于分级标准上、下限之间, x_a、x_c、x_p参考第二次全国土壤普查推荐的土壤肥力分级标准^[22]; IFI为土壤综合肥力评价指数; IFI_{平均}为各属性分肥力均值; IFI_{最小}为土壤各属性分肥力最小值; n为评价指标个数。

1.5 数据处理

不同处理间采用单因素方差分析(one-way ANOVA)及 LSD 多重比较(P<0.05)比较不同添加量下的土壤化学性质、肥力、土壤微生物生物量及化学计量比的差异显著性; 利用 Excel 2019 对数据进行整理, SPSS 26.0 对数据进行统计分析。使用 Origin 2024 和 Canoco 5.0 进行相关性和冗余分析(RDA)。

2 结果与分析

2.1 煤矸石和煤泥配施下土壤养分及综合肥力指数的变化

由表 3 可知, 与 CK 相比, 煤矸石和煤泥配施各处理下土壤综合肥力指数(IFI)显著提高, 其中改良后 T1 处理的 IFI 最低, T8 处理的 IFI 最高, 较 CK 显著提高了 28.13%, T9 较 T8 的 IFI 有所下降。此外, T8 处理土壤 pH 以及 TN、AN、TP、TK、AK 含量

均为最高,与 CK 相比分别提高了 8.79%、43.11%、49.10%、27.17%、73.68%。上述结果说明,施加煤矸石和煤泥能够显著提高沙地土壤肥力,在煤矸石和煤泥配施量较低(T1)时,土壤肥力改良效果较差,随着煤矸石和煤泥配施量的增加土壤肥力随之增加,但施加量过高(T9)土壤肥力反而下降,其中 10%煤矸石和 15%煤泥配施(T8)的效果最佳。T6 处理(15%煤

矸石和 10%煤泥配施)IFI 显著低于 T8 处理(10%煤矸石和 15%煤泥配施),说明在煤矸石和煤泥添加总量相同时,煤泥的土壤改良作用更大。

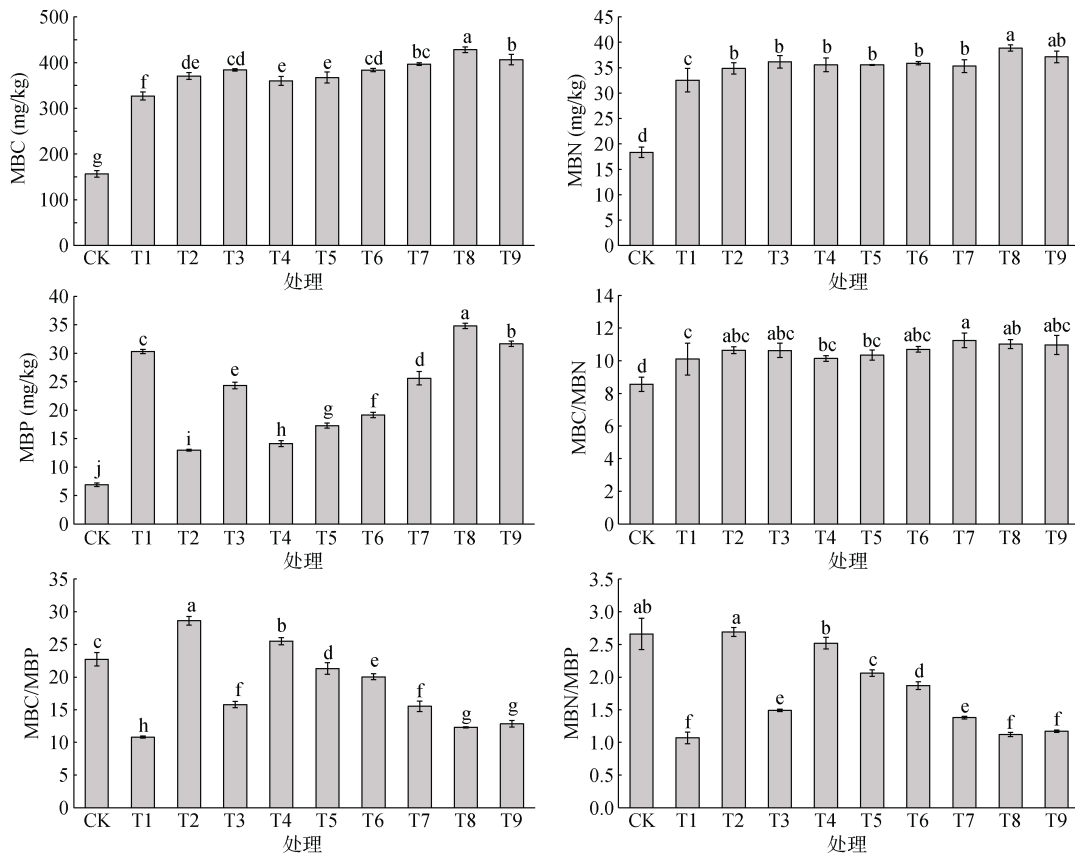
2.2 煤矸石和煤泥配施下土壤微生物生物量及其化学计量比的变化

如图 1 所示,与 CK 相比,煤矸石和煤泥配施各处理下土壤 MBC、MBN、MBP 含量均显著提高

表 3 土壤化学性质和综合肥力指数
Table 3 Soil chemical properties and integrated fertility index (IFI)

指标	pH	SOC(g/kg)	TN(g/kg)	AN(mg/kg)	TP(g/kg)	AP(mg/kg)	TK(g/kg)	AK(mg/kg)	IFI
CK	6.67±0.02d	3.96±0.03g	0.19±0.01d	52.59±3.29e	0.25±0.03f	33.20±0.46f	22.23±0.21e	49.85±0.00e	0.87±0.01f
T1	7.10±0.02bc	5.17±0.01f	0.27±0.01b	67.40±4.38bc	0.30±0.01cde	56.14±0.47a	23.56±0.63d	56.55±5.76de	0.98±0.01e
T2	7.03±0.05c	8.10±0.01b	0.34±0.01a	64.16±4.35cd	0.28±0.00e	51.26±0.55c	24.89±0.55bc	66.52±5.76c	1.07±0.02b
T3	7.17±0.13ab	5.11±0.01f	0.28±0.03b	57.90±4.20de	0.28±0.00e	56.32±0.49a	25.49±0.75b	69.79±0.00bc	1.01±0.01d
T4	7.15±0.01abc	8.10±0.02b	0.20±0.02cd	57.31±3.71de	0.30±0.01de	51.39±0.60c	25.61±0.42b	53.30±5.77e	1.01±0.01d
T5	7.04±0.01bc	7.42±0.03d	0.34±0.01a	59.42±3.87de	0.32±0.01bcd	42.81±1.04e	42.81±1.04bcd	76.54±5.76b	1.07±0.01b
T6	7.08±0.09bc	7.40±0.09d	0.22±0.03c	57.33±4.04de	0.34±0.00ab	45.20±1.44d	27.79±0.55a	76.36±5.75b	1.04±0.01c
T7	7.17±0.07ab	7.00±0.03e	0.25±0.02b	66.94±4.44bc	0.30±0.04cde	42.26±0.59e	24.04±0.21cd	53.31±5.77e	1.01±0.02d
T8	7.26±0.07a	7.54±0.05c	0.32±0.01a	75.27±1.60a	0.37±0.03a	52.95±0.48b	28.27±0.72a	86.58±5.77a	1.12±0.01a
T9	7.13±0.07bc	8.47±0.05a	0.26±0.01b	71.57±3.57ab	0.33±0.01bc	50.82±0.56c	25.25±1.11bc	63.18±5.76cd	1.06±0.01b

注:同列数据小写字母不同表示处理间差异显著($P<0.05$)。SOC,土壤有机碳;TN,全氮;AN,碱解氮;TP,全磷;AP,有效磷;TK,全钾;AK,速效钾;IFI,土壤综合肥力指数。下同。



(图中小写字母不同表示处理间差异显著($P<0.05$)。MBC: 微生物生物量碳; MBN: 微生物生物量氮; MBP: 微生物生物量磷; MBC/MBN: 微生物生物量碳氮比; MBC/MBP: 微生物生物量碳磷比; MBN/MBP: 微生物生物量氮磷比。下同)

图 1 不同处理下土壤微生物生物量碳、氮、磷含量及其化学计量比
Fig. 1 MBC, MBN, MBP and their stoichiometric ratios under different treatments

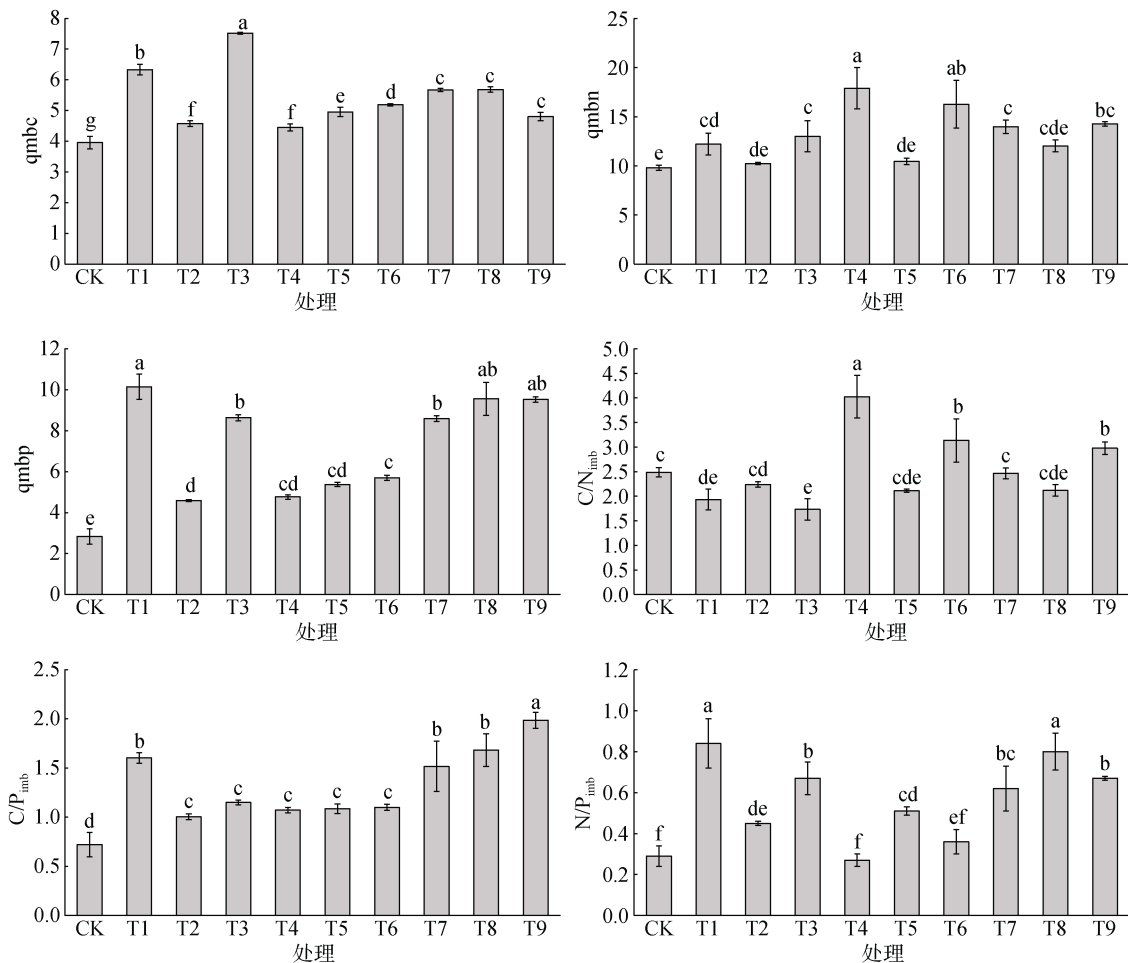
($P<0.05$), 其中 MBC 和 MBN 含量与各处理下土壤IFI 的变化规律一致, 改良后 T1 处理最低, 随配施量的增加出现先升后降的趋势。T8 处理土壤的 MBC、MBN、MBP 含量均为最高, 相比 CK 分别提高了 173.44%、112.09% 和 404.35%, 说明 10% 煤矸石配施 15% 的煤泥对风沙土壤改良效果最佳。

各处理的 MBC/MBN 值均显著高于 CK, T7 处理 MBC/MBN 值最大, 较 CK 提高了 31.46%, 但 T7 处理与 T2、T3、T6、T8、T9 之间差异不显著。T2 和 T4 处理的 MBC/MBP 值与 CK 相比显著提高, 其中 T2 最高, 其余处理低于 CK。MBN/MBP 值最高出现在 T2 处理且与 CK 之间差异不显著, 其余处理的 MBN/MBP 值低于 CK。

2.3 煤矸石和煤泥配施下土壤微生物熵及化学计量不平衡性的变化

如图 2 所示, 煤矸石和煤泥配施可以显著改变土壤微生物熵值。各处理的 qmbc 均显著高于 CK,

其中 T3 处理的 qmbc 最大, 与 CK 相比提高了 90.21%。qmbn 最大值出现在 T4 处理, 与 CK 相比提高了 82.43%。qmbp 最大值出现在 T1 处理, 与 CK 相比提高了 257.89%。上述结果表明, 煤矸石和煤泥配施可以显著提高风沙土壤中有有机碳、全氮和全磷向微生物生物量碳、氮、磷的转化率, 其中 15% 煤矸石和 5% 煤泥配施(T3)处理下 MBC 的转化率最高; 5% 煤矸石 10% 煤泥(T4)处理下 MBN 的转化率最高; 5% 煤矸石和 5% 煤泥配施(T1)处理下 MBP 的转化率最高。煤矸石和煤泥的添加对土壤-微生物化学计量不平衡性影响显著。其中, T4、T6、T9 处理 C/N_{imb} 显著高于 CK, T1、T3 处理显著低于 CK, 其余处理与 CK 之间差异不显著。各处理 C/P_{imb} 值均显著高于 CK, 除 T4 和 T6 处理外其余处理 N/P_{imb} 均显著高于 CK。上述结果说明煤矸石和煤泥的添加量不同导致土壤微生物与资源化学组分之间差异性显著改变。



(qmbc: 微生物熵碳; qmbn: 微生物熵氮; qmbp: 微生物熵磷; C/N_{imb} : 碳氮化学计量不平衡性; C/P_{imb} : 碳磷化学计量不平衡性; N/P_{imb} : 氮磷化学计量不平衡性。下同)

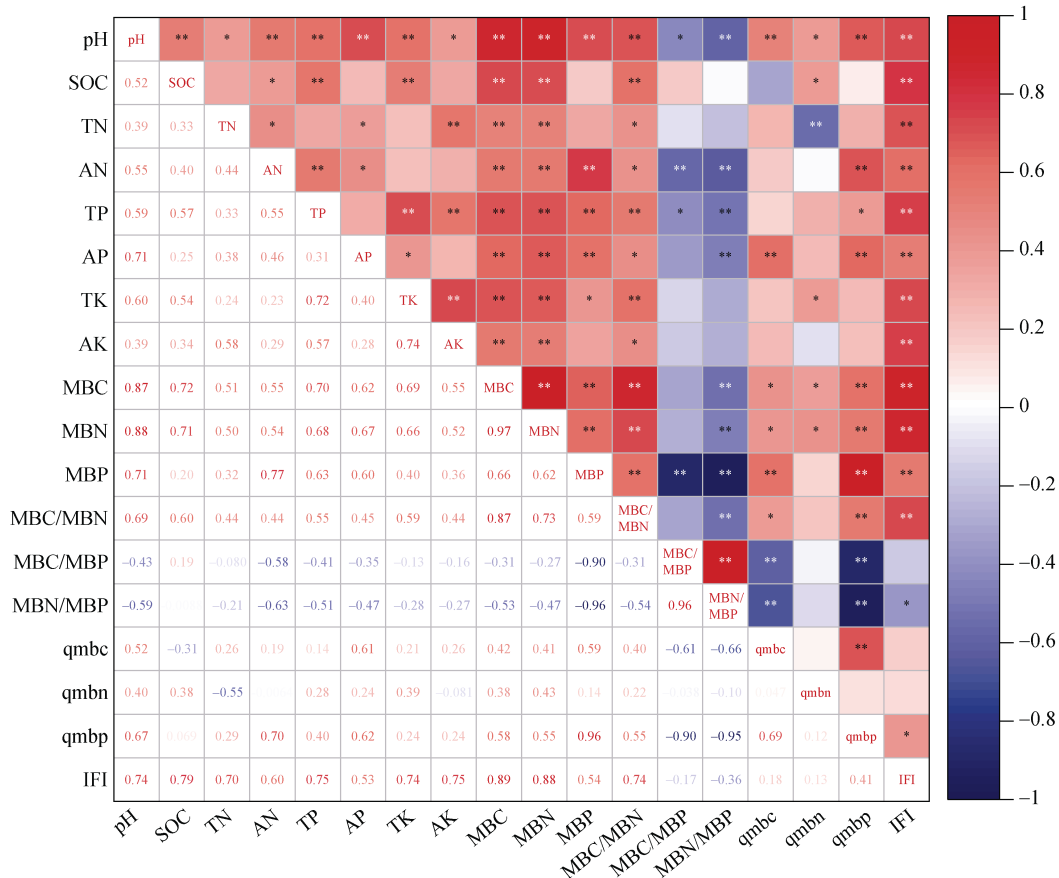
图 2 不同处理下土壤微生物熵碳、氮、磷及化学计量不平衡比

Fig. 2 qmbc, qmbn, qmbp and their stoichiometric imbalance ratios under different treatments

2.4 土壤养分和土壤微生物生物量化学计量特征的相关性

土壤养分与土壤微生物生物量化学计量特征之间的相关性如图 3 所示。8 个土壤养分指标与 MBC 和 MBN 均呈现极显著($P<0.01$)正相关关系。土壤 pH、AN、TP、AP、TK 与土壤 MBP 呈极显著或显著正相

关。pH 和 AP 与 qmbc 极显著正相关。pH、SOC 和 TK 与 qmbn 呈显著正相关, TN 与 qmbn 极显著负相关。土壤 pH、AN 和 AP 与 qmbp 极显著正相关。IFI 与 8 个土壤养分指标和 MBC、MBN、MBP 以及 MBC/MBN 极显著正相关, 与 qmbp 显著正相关, 与 MBN/MBP 显著负相关。



(*表示在 $P<0.05$ 水平显著相关; **表示在 $P<0.01$ 水平极显著相关)

图 3 土壤养分与土壤微生物生物量化学计量特征的相关性

Fig. 3 Correlations between soil nutrient and, soil microbial stoichiometric ratios and its stoichiometric imbalance

2.5 土壤微生物熵与土壤微生物化学计量不平衡性的关系

土壤化学计量比、土壤微生物生物量化学计量比及土壤-微生物化学计量不平衡比与土壤微生物熵做冗余分析, 其结果如图 4 所示。前两个排序轴共解释了所有变异的 96.68%, 其中第一轴解释了 54.91%, 第二轴解释了 41.77%, 说明两轴能很好地说明各因素间的响应关系。CK、T2、T5 处理位于 RDA1 的右侧, 其余处理位于 RDA1 轴的左侧且与 12 个指标中的 9 个指标位于同侧, 说明 T1、T3、T4、T6、T7、T8、T9 处理能显著改变土壤微生物生物量及其化学计量特征。qmbc 和 qmbp 与 MBC/MBN、C/P_{imb}、N/P_{imb} 呈正相关, 而与 SOC/TN、SOC/TP、MBC/MBP、

MBN/MBP 和 C/N_{imb} 呈负相关, 且 qmbc 与 qmbp 之间呈正相关。qmbn 与 SOC/TN、SOC/TP 和 C/N_{imb} 呈正相关, 而仅与 TN/TP 呈负相关。RDA 排序图的交互式向前分析检验表明 N/P_{imb} 和 SOC/TN 对微生物熵作用明显, 分别解释了土壤 qmbc、qmbn、qmbp 的 42.5% ($F=20.7, P=0.002$) 和 38.0% ($F=52.7, P=0.002$), 说明这 2 个指标是土壤微生物熵的关键驱动因子。

3 讨论

3.1 煤矸石和煤泥配施对土壤肥力的影响

科尔沁地区风沙土壤松散, 养分含量低^[10-11]。本研究选用典型富含黏土矿物的煤矸石和煤泥配施改良土壤, 结果发现各处理条件下土壤养分指标均显著

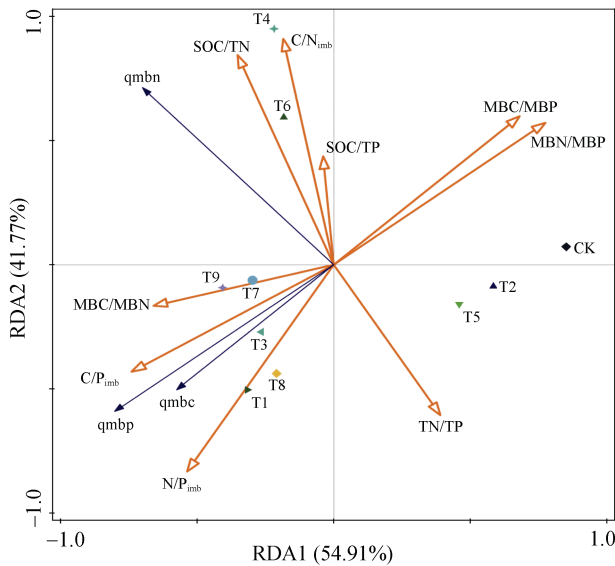


图4 土壤微生物熵与土壤微生物化学计量不平衡性的冗余分析

Fig. 4 Redundancy analysis of soil microbial entropy and soil microbial stoichiometric imbalance

提高(表3), 其中10%煤矸石配施15%煤泥时效果最佳, 施加量过高时土壤肥力下降。与本研究结果相相似, 李等^[7]研究发现煤泥、煤矸石、风化煤配施可以提高紫花苜蓿产量和碳氮代谢相关酶活性, 且复配效果更有利于微生物养分的利用和土壤肥力的提升积累。张宇航等^[23]用混合粒径的煤矸石改良盐碱土, 发现20%施加量时的土壤综合肥力指数最大, 但随施加量增加, 土壤综合指数会下降。本研究所用的煤矸石由石英、高岭石、赤铁矿、钾霞石、磷酸铝石等矿物组成, 而煤泥主要由石英和高岭石矿物组成, 二者的矿物组成不同, 同时二者间镁、钾、钙、铁等化学元素含量也不相同(表1), 因此煤矸石与煤泥的配施比例对土壤理化性质产生不同的影响, 导致二者复配出现交互协调效果。15%煤矸石和10%煤泥配施处理下土壤肥力显著低于10%煤矸石和15%煤泥配施处理, 说明煤泥添加量对土壤综合肥力的影响要高于煤矸石, 可能原因是煤泥的粒径(1.5~0.25 mm)小于煤矸石的粒径(<5 mm), 因此相同质量情况下煤泥的比表面积更大, 吸附性、离子交换性、吸收膨胀性更强, 进而对土壤肥力的影响更多。有研究表明土壤pH是快速评价土壤修复效果的指标^[10, 24], 本研究显示改良后的土壤pH值在7.03~7.26之间, 较CK(pH 6.67)提高了5.40%~8.85%, 符合前人研究^[24]的最适土壤微生物活性和养分有效性的pH范围(6.5~7.5), 表明煤矸石和煤泥配施改良风沙土壤是可行的。煤矸石和煤泥处理条件下土壤pH显著高于CK, 可能原因是供试煤矸石和煤泥呈碱性, 添加后会提高

土壤pH。

3.2 煤矸石和煤泥配施对土壤微生物生物量及其化学计量比的影响

土壤微生物生物量是土壤中活体微生物的总量, 可直接驱动土壤微生物参与到养分循环过程, 并调控土壤肥力的形成^[25-26]。本研究发现在煤矸石和煤泥配施处理下土壤MBC、MBN、MBP含量显著提高。相关性分析表明土壤MBC、MBN、MBP与IFI之间呈现极显著的正相关关系, 其中MBC与IFI之间相关性更强($R^2=0.89$), 这与前人研究发现MBC与IFI有着极显著正相关关系一致^[14-15]。上述结果说明煤矸石和煤泥配施处理可以显著提高风沙土壤微生物活性, 进而显著提高土壤肥力。煤矸石和煤泥中含有镁钙铝铁等许多矿物元素、碳、腐殖酸及大量黏土矿物等, 为土壤微生物生长繁殖提供了营养物质以及更多的吸附位点, 增加了微生物的相对丰度, 促进微生物生长代谢酶的产生, 进而影响土壤元素循环^[27-28], 因此煤矸石和煤泥的配施显著提高了土壤肥力和微生物生物量。土壤微生物生物量化学计量比与土壤化学计量相比, 对土壤质量的变化往往更敏感^[29]。土壤MBC/MBN值反映了土壤中细菌和真菌的比例, 一般而言, 当MBC/MBN值为3~5时, 土壤微生物群落中细菌占优势, 其值为4~15时则真菌占优势^[30]。本研究MBC/MBN值为8.56~11.25, 表明煤矸石和煤泥配施改良风沙土壤微生物以真菌为主, 且随着煤矸石和煤泥的施加量的增加, 土壤真菌比例增加。相关性分析发现, MBC/MBN与IFI呈极显著正相关关系, 说明真菌在煤矸石和煤泥配施中驱动土壤肥力的提升。土壤MBC/MBP值能够反映土壤微生物对土壤磷素有效性调节的潜力, 当其比值减小时, 意味着土壤微生物不缺磷, 从而矿化磷的潜力大, 不会与植物竞争土壤中的磷^[31]。本研究发现, T8处理时土壤IFI最高, 同时MBC/MBP比值显著低于CK, 表明在最佳处理下土壤矿化磷的潜力大。本研究中MBN/MBP值除T2外其余处理均显著低于CK, 且与IFI呈负相关, 说明煤矸石和煤泥的添加提高土壤肥力, 导致紫花苜蓿生长旺盛, 而植物与微生物竞争土壤中的氮, 导致MBN/MBP值下降, 这与李品等^[31]研究发现植物生长过程中竞争了土壤中的氮导致MBN/MBP值下降的结果相似。

3.3 煤矸石和煤泥配施对土壤微生物熵和土壤-微生物化学计量不平衡性的影响

土壤微生物生物量与周围环境(土壤养分)之间的生态化学计量关系是控制微生物过程的重要因

素^[32]。土壤 qmbc 被认为是预测土壤有机质质量和监测有机碳变化的重要而灵敏的指标,而土壤 qmbn 和 qmbp 是反映土壤有效氮和有效磷供应潜能的重要指标^[14, 33]。土壤微生物熵越大,表明土壤有效养分积累越大^[17]。本研究发现,煤矸石和煤泥配施处理可以显著提高土壤 qmbc、qmbn 和 qmbp,说明煤矸石和煤泥的添加导致土壤中有有机质的输入量和 MBC 的转化速率、土壤中氨态氮所占的比例及全氮向 MBN 的转化效率、土壤中活性有机磷所占的比例以及土壤中全磷向 MBP 的转化效率均显著提高,煤矸石与煤泥的不同配比之间存在差异。这与吴秀芝等^[14]研究荒漠化草地土壤的微生物熵越小,荒漠化程度越高的结果相似。qmbp 与 IFI 显著正相关,qmbc 与 qmbn 与 IFI 正向相关,但未达显著水平,说明煤矸石和煤泥配施处理下,相较于土壤有机质和全氮,土壤中全磷向 MBP 的转化效率对土壤肥力的影响更大。本研究中,煤矸石和煤泥配施条件下,各处理间 C/N_{imb}、C/P_{imb} 和 N/P_{imb} 差异显著。各处理土壤 SOC/TN、SOC/TP、TN/TP 值均高于 CK 或与 CK 无显著差异,而各处理土壤 MBC/MBP 和 MBN/MBP 值差异明显,说明煤矸石与煤泥的配施条件下土壤-微生物化学计量不平衡性的差异是由土壤微生物生态的显著变化引起的。

3.4 土壤-微生物化学计量不平衡性与土壤微生物熵的关系

土壤化学计量比、土壤微生物生物量计量比以及土壤-微生物化学计量不平衡性可一定程度上解释土壤微生物熵的变化^[17, 34]。Zhou 和 Wang^[35]研究森林生态系统发现土壤 qmbc 与 SOC/TN、SOC/TP 均呈显著负相关;吴秀芝等^[14]研究不同沙漠化程度,结果发现 qmbc 的变化也表现出与土壤 SOC/TN、SOC/T 显著负相关。与上述研究结果相似,本研究 RDA 表明,qmbc 与 SOC/TN、SOC/TP 呈负相关,说明在高 SOC/TN 和 SOC/TP 条件下,微生物生长会竞争土壤中的 N 或者 P。qmbc 与 N/P_{imb} 呈正相关,而与 C/N_{imb} 呈负相关,qmbn 与 C/N_{imb} 呈正相关,qmbp 与 C/P_{imb} 和 N/P_{imb} 呈正相关,这与张冠华等^[30]研究不同茶园土壤-微生物化学计量与土壤微生物熵的变化关系相似,表明土壤-微生物碳、氮、磷以及微生物元素利用之间的平衡对系统碳氮磷的循环产生一定影响。RDA 表明 N/P_{imb} 和 SOC/TN 是土壤微生物熵的关键驱动因子,说明微生物元素利用的平衡对生态系统中碳、氮和磷循环有一定的影响,这同样也说明了微生物与植物竞争土壤中的 N。

4 结论

煤矸石和煤泥配施可以显著提高风沙土壤肥力、土壤微生物生物量及土壤微生物熵,改善土壤质量,且呈现随配施量的增加出现先增加后降低的趋势。10% 煤矸石和 15% 煤泥配施处理下土壤 IFI 和土壤微生物生物量最高,与 CK 相比 IFI 显著提高了 28.13%,MBC、MBN、MBP 含量分别显著提高 173.44%、112.09% 和 404.35%。煤矸石和煤泥的添加导致土壤微生物与资源化学组分之间差异性显著改变,N/P_{imb}、SOC/TN 是土壤微生物熵的关键驱动因子。总之,煤矸石和煤泥配施处理可以改变风沙土壤养分含量和组成、微生物养分含量和组成及其 C : N : P 化学计量比,有助于风沙土壤改良及煤矸石和煤泥资源化利用。

参考文献:

- [1] 胡振琪,赵艳玲,毛缙.煤矸石规模化生态利用原理与关键技术[J].煤炭学报,2024,49(2):978-987.
- [2] 米美霞,邵明安,武小刚,等.煤矸石和钙结石对植物生长和土壤含水量的影响[J].土壤学报,2021,58(6):1460-1471.
- [3] 刘誉,索全义,刘巍,等.煤泥特性及其对砂性土物理性质的影响[J].北方农业学报,2023,51(1):38-44.
- [4] 郭佳琪,刘冠男,张长青,等.煤矸石生态修复利用及其重金属污染防控研究进展[J].中国矿业,2024,33(11):18-27.
- [5] 王鑫,凌鹏,安晓雪,等.典型污泥与煤泥混合燃烧及硫化物释放特性[J].洁净煤技术,2022,28(6):44-53.
- [6] 潘硕,胡雨晴,王海燕,等.煤矸石综合利用技术现状与标准体系研究[J].中国矿业,2024,33(7):89-98.
- [7] 李依临,尚海丽,温欣,等.多源废弃物配施对矿区土壤的改良效应[J].北方农业学报,2022,50(4):74-82.
- [8] 白宏伟,索全义,刘巍,等.煤基复混肥在模拟农田条件下氮磷钾养分的释放特性[J].北方农业学报,2020,48(2):34-42.
- [9] 赵才毅,索全义,刘巍,等.模拟农田条件下不同煤基物质配比对盐碱土理化性质的影响[J].北方农业学报,2020,48(2):51-57.
- [10] 高传俊,赵雪淞,王力恒,等.膨润土对科尔沁沙地土壤肥力和活性有机碳的影响[J].干旱区资源与环境,2024,38(6):174-181.
- [11] 高欣,赵雪淞,赵凤艳,等.有机培肥对连作花生土壤肥力及活性有机碳库的影响[J].土壤通报,2023,54(1):67-76.
- [12] 王理德,何洪盛,韩福贵,等.民勤绿洲不同退耕年限土壤微生物量的变化特性[J].生态与农村环境学报,2022,38(10):1338-1346.
- [13] Luo H Q, Yu J L, Li R X, et al. Microbial biomass C: N: P as a better indicator than soil and ecoenzymatic C: N: P for microbial nutrient limitation and C dynamics in Zoige

- Plateau peatland soils[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2022, 175: 105492.
- [14] 吴秀芝, 刘秉儒, 阎欣, 等. 荒漠草地土壤微生物生物量和微生物熵对沙漠化的响应[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(8): 2691–2698.
- [15] Cao R, Yang W Q, Chang C H, et al. Soil microbial biomass carbon and freeze-thaw cycles drive seasonal changes in soil microbial quotient along a steep altitudinal gradient[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, 126(9): e2021JG006325.
- [16] 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.
- [17] Yu J Y, Yu Z J, Li J W, et al. Responses of soil microbial biomass C: N: P stoichiometry to increased precipitation and nitrogen deposition in temperate shrublands[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2023, 119: 103553.
- [18] 赵雪淞, 宋王芳, 高欣, 等. 秸秆还田和耕作方式对花生土壤微生物量、酶活性和产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(3): 126–132.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [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.
- [21] 黄菲, 张佛熠, 钟嘉琳, 等. 南昌城市森林土壤肥力综合评价及其空间分布特征[J]. *中南林业科技大学学报*, 2024, 44(8): 129–138.
- [22] 曹雪莹, 谭长银, 杨佳, 等. 有机物料对农田土壤肥力及镉有效性的影响[J]. *土壤*, 2024, 56(2): 367–374.
- [23] 张宇航, 宋子岭, 孔涛, 等. 煤矸石对盐碱土壤理化性质的改良效果[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(1): 195–204.
- [24] He M J, Xiong X N, Wang L, et al. A critical review on performance indicators for evaluating soil biota and soil health of biochar-amended soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 414: 125378.
- [25] 李晓英, 周惠民, 李畅, 等. 城市不同功能区绿地土壤理化性质及微生物生物量的分布特征[J]. *土壤*, 2021, 53(4): 874–880.
- [26] Zhang G H, Yang W J, Hu J J, et al. Effects of tea planting age on soil microbial biomass C: N: P stoichiometry and microbial quotient[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2023, 69(5): 221–229.
- [27] Chen C F, Liu W J, Jiang X J, et al. Effects of rubber-based agroforestry systems on soil aggregation and associated soil organic carbon: Implications for land use[J]. *Geoderma*, 2017, 299: 13–24.
- [28] 尚海丽. 西北干旱区粘土矿物-微生物作用机理及促生效应[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.
- [29] Khan K S, Naveed M, Qadir M F, et al. Variation in soil C and P fractions associated with microbial biomass[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2023, 23(4): 6573–6583.
- [30] 张冠华, 牛俊, 易亮, 等. 不同植茶年限土壤-微生物生物量碳氮磷化学计量特征[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(4): 969–976.
- [31] 李品, 木勒德尔·吐尔汗拜, 田地, 等. 全球森林土壤微生物生物量碳氮磷化学计量的季节动态[J]. *植物生态学报*, 2019, 43(6): 532–542.
- [32] 刘小勇, 任静, 张锐, 等. 核桃大豆间作土壤微生物生物量碳氮、氮素营养与酶活性特征[J]. *土壤*, 2024, 56(5): 982–991.
- [33] Yan Y C, Wang C, Zhang J M, et al. Response of soil microbial biomass C, N, and P and microbial quotient to agriculture and agricultural abandonment in a meadow steppe of Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 223: 105475.
- [34] 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.
- [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.

(责任编辑: 王方方)