

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.06.026

引用格式:李艳华,于群家,朱春磊,等.增施沼液肥对中度退化草地土壤理化性质的短期影响[J].草地学报,2026,34(6):2242—2251

LI Yan-hua, YU Qun-jia, ZHU Chun-lei, et al. Short-Term Effects of Additional Application of Biogas Slurry Fertilizer on the Physicochemical Properties of Moderately Degraded Grassland Soil[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(6): 2242—2251

增施沼液肥对中度退化草地土壤理化性质的短期影响

李艳华^{1,2}, 于群家^{1,2}, 朱春磊^{1,2}, 马玥琪^{1,2}, 郑博方^{1,2}, 张磊^{1,2}, 王成杰^{1,2*}

(1. 内蒙古农业大学草业学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古农业大学草原资源教育部重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要:为探究沼液肥对退化草地土壤理化性质的短期影响,本研究以锡林郭勒盟正蓝旗中度退化草地为对象,设置空白对照(CK)、水分对照(W₀)、50%稀释浓度沼液肥(BS_{50%})和全浓度沼液肥(BS_{100%})4种处理,施用量为300 m³·ha⁻¹。沼液养分氮(N)、磷(P₂O₅)和钾(K₂O)含量分别为0.11%, 0.07%和0.09%。采集0~15 cm、15~30 cm土层的土壤样品,分析其理化性质指标。结果表明:与CK相比,BS_{50%}和BS_{100%}处理均能显著改善土壤物理结构,降低土壤容重(Soil bulk density, SBD),提高土壤孔隙度(Soil porosity, SP)。增施沼液肥能显著提升土壤理化性质及微生物活性,土壤全氮(Soil total nitrogen, STN)、速效磷(Soil available phosphorus, SAP)、速效钾(Soil available potassium, SAK)含量显著增加14.50%~25.86%, 66.87%~224.17%和30.26%~193.91%,土壤微生物生物量碳(Soil microbial biomass carbon, SMBC)、土壤微生物生物量氮(Soil microbial biomass nitrogen, SMBN)含量显著增加11.04%~18.39%, 12.47%~28.34%。本研究揭示了沼液肥对退化草地土壤理化性质影响的短期效应,为修复退化草地、提升土壤地力提供基础科学依据,也为沼液肥的资源化利用及草地生态系统的可持续管理提供了参考支撑。

关键词:沼液肥;典型草原;中度退化草地;土壤理化性质

中图分类号:S812.2

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)06-2242-10

Short-Term Effects of Additional Application of Biogas Slurry Fertilizer on the Physicochemical Properties of Moderately Degraded Grassland Soil

LI Yan-hua^{1,2}, YU Qun-jia^{1,2}, ZHU Chun-lei^{1,2}, MA Yue-qi^{1,2}, ZHENG Bo-fang^{1,2},

ZHANG LEI^{1,2}, WANG Cheng-jie^{1,2*}

(1. College of Grassland Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;

2. Key Laboratory of Grassland Resources of the Ministry of Education, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: To investigate the short-term effects of biogas slurry fertilizer on the physicochemical properties of degraded grassland soil, this study investigated moderately degraded grasslands in Zhenglan Banner, Xilingol League. Four treatments were established: blank control (CK), water control (W₀), 50% diluted concentration of biogas slurry fertiliser (BS_{50%}), and full concentration of biogas slurry fertiliser (BS_{100%}). The application rate was 300 m³·ha⁻¹. The contents of nitrogen (N), phosphorus pentoxide (P₂O₅) and potassium oxide

收稿日期:2025-08-20;修回日期:2025-09-27

基金项目:内蒙古农业大学一流学科科研专项(YLXKZX-NND-029);创新平台载体(人才)计划项目“内蒙古自治区草地管理与利用重点实验室(2022PT0003)”资助

作者简介:李艳华(2000-),女,汉族,内蒙古呼伦贝尔人,硕士研究生,主要从事草地资源生态与管理研究,E-mail: qingxiu169@163.com;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail: nmgcjwang3@163.com

(K_2O) in the biogas slurry are 0.11%, 0.07% and 0.09% respectively. Soil samples from 0~15 cm and 15~30 cm soil layers were collected to analyze their physical and chemical property indexes. The results showed that compared with CK, both $BS_{50\%}$ and $BS_{100\%}$ treatments significantly improved soil physical structure, with decreasing soil bulk density and increasing soil porosity. Applying biogas slurry fertilizer markedly enhanced soil physical and chemical properties and microbial activity. The contents of soil total nitrogen, available phosphorus and available potassium increased significantly by 14.50%-25.86%, 66.87%-204.06% and 30.26%-193.91%, respectively, while the contents of soil microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen increased significantly by 11.04%-18.39% and 12.47%-28.34%, respectively. This study revealed the short-term effects of biogas slurry fertilizer on the physicochemical properties of degraded grassland soils. It provides fundamental scientific evidence for restoring degraded grasslands and enhancing soil fertility, while also offering reference support for the resource utilization of biogas slurry fertilizer and the sustainable management of grassland ecosystems.

Key words: Biogas slurry fertilizer; Typical grassland; Moderately degraded grassland; Soil physical and chemical properties

草地作为全球分布最广的陆地生态系统之一,其面积约占地球陆地面积的四分之一^[1],在维系全球碳循环平衡、涵养水源、保持生物多样性及支撑畜牧业发展等方面发挥着不可替代的生态与经济功能。然而,在气候变化与人类活动的双重驱动下,全球草地退化已成为亟待解决的生态危机^[2]。草地退化不仅存在有机质流失、养分失衡和微生物活性降低等现象^[3],还伴随生态系统反馈调节能力减弱,物种多样性减少、裸地面积增加,优良牧草衰减等现象^[4],既损害草地的生态服务功能、威胁区域生态安全,也直接影响牧民的生计和粮食安全。因此,制定科学有效的草地修复策略,成为遏制退化趋势、确保生态平衡、促进可持续发展的当务之急。

退化草地的恢复常采用传统施肥方法,肥料多为氮肥和以氮为主的复合肥,通过平衡土壤养分改善土壤的理化性质^[5]。但这类方法存在养分利用率低、易引发土壤板结及微生物群落失衡等问题^[6]。沼液富含氮、磷等多元营养组分及生物活性物质,可通过调控土壤养分循环、改善理化性状显著提升土壤地力^[7]。习彦花等人^[8]在草地中施用沼液肥后土壤肥力大幅提升,微生态环境质量明显改善。隋好林等人^[9]将沼液肥通过滴灌施用,使土壤碱解氮(Soil alkali-hydrolyzable nitrogen, SAHN)、速效磷(Soil available phosphorus, SAP)、速效钾(Soil available potassium, SAK)、有机质(Soil organic matter, SOM)的含量分别提高25.4%, 13.4%, 49.6%, 30.7%。许建锋等人^[10]将沼液肥施用在种植西兰花(*Brassica oleracea*)的土壤,结果表明土壤多项理化性质显著提高,其中SAK和SAP含量分别增加633.0%和95.3%。欧洲也将沼液肥施用于农田

中^[11],通过提高肥料质量和利用率、减少氮磷淋溶,提高土壤地力。但沼液施用亦存在潜在风险:过量施用易导致土壤板结、pH偏移等问题;其含有的重金属可能积累污染;不适宜的沼液配方可能抑制敏感微生物活性等^[12]。刘炳好等人^[13]在不同种植模式下施用沼液肥后发现沼液对土壤的主要污染是Cu, Zn, Cd等元素。

关于增施沼液肥对土壤理化性质的研究多集中在农田生态系统,针对草地生态系统的研究仍较为薄弱:现有研究多局限于单一草地的短期效应,缺乏对不同退化程度草地的系统对比分析;且对沼液影响草地土壤微生物生物量的具体机制与规律认知不足^[14],更未建立适配不同退化草地的沼液适宜施用量与频率标准。这在一定程度上限制了对沼液施用改良草地土壤、提高生产力的评估。本研究以内蒙古自治区锡林郭勒盟正蓝旗黑城子中度退化草地为研究对象,重点关注土壤温度(Soil temperature, ST)、土壤湿度(Soil moisture, SM)、土壤容重(Soil bulk density, SBD)、土壤孔隙度(Soil porosity, SP)、土壤pH值、土壤全碳(Soil total carbon, STC)、土壤全氮(Soil total nitrogen, STN)、土壤全磷(Soil total phosphorus, STP)、土壤全钾(Soil total potassium, STK)、SOM、SAHN、SAP、SAK、土壤微生物生物量碳(Soil microbial biomass carbon, SMBC)、土壤微生物生物量氮(Soil microbial biomass nitrogen, SMBN)十五大核心指标:ST、SM直接影响牧草、微生物生长与养分转化;SBD、SP反映土壤松紧度与通气保水能力,关联根系伸展及物质循环;土壤pH值作为土壤健康标尺,决定养分有效性与微生物群落组成^[15];STC, STN等核心指标表征长期肥力储备^[16], SOM与速效养分则反

映即时供给能力,影响牧草吸收;土壤微生物参与碳氮循环以调控养分转化,且在土壤发育与生态平衡中发挥重要作用^[17]。这些指标可全面反映增施沼液肥对中度退化草地土壤理化性质的改良效应及机制,为我国草原生态修复技术研究提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于内蒙古自治区锡林郭勒盟正蓝旗黑城子示范区(42°1'29" N, 115°50'48" E),平均海拔1327 m。气候类型为中温带大陆性季风气候,气温梯度大,日照时间长,雨季多。该地点草地类型为天然草地典型草原,草地优势种包括羊草(*Leymus chinensis*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)等。此外,研究样地中还存在其他禾本科(Gramineae)、豆科(Leguminosae)和杂类草植物,如冰草(*Agropyron michnoi*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、斜茎黄耆(*Astragalus adsurgens*)、菊叶委陵菜(*Potentilla tanacetifolia*)等。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,设置空白对照(CK)、水分对照(W₀)、50% 稀释浓度沼液肥(BS_{50%})、全浓度沼液肥(BS_{100%})4个处理,每个处理设置9个重复,共36个小区,小区面积为25 m²(5 m×5 m),不同小区之间设置2 m隔离带。施肥时间为2024年4月牧草返青期,施用量为300 m³·ha⁻¹,施用方式为机器喷施,50% 稀释浓度沼液肥采用1:1体积比的方式稀释,水分对照用等体积水代替。试验所用沼液肥来自现代牧业(张家口)有限公司,采用厌氧消化工艺对牛粪进行发酵得到沼液肥,供试沼液基本理化性质如表1所示。

表1 供试沼液基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of biogas slurry

总氮 Total nitrogen/%	总磷 Total phosphorus/%	总钾 Total potassium/%	有机质 Organic matter/%	pH
0.11	0.07	0.09	14.5	7.11

注:总磷以P₂O₅计,总钾以K₂O计

Note: Total phosphorus is measured by P₂O₅ and total potassium by K₂O

1.3 测定指标及方法

土壤样品采集时间为2024年8月,采用五点取样法进行采样,在每个小区内对0~15 cm和15~30 cm土层的土壤进行取样,筛除所取土样中的砂石和树根残渣,在实验室进行各种指标的测定。ST、SM采用地温计测定;SBD采用环刀法测定;SP由SBD计算得出(式1),土壤pH值使用PHS-3G数字pH计测定;STC、STN采用德国Elementar公司生产的isoprime100稳定同位素质谱仪连接元素分析仪(Vario Isotope Select)测定;STP、SAP采用钼锑抗比色法测定;STK、SAK采用上海仪电分析仪器有限公司生产的FP6410火焰分光光度计测定;SAHN采用碱解扩散法测定;SOM采用重铬酸钾容量法-外加热法测定;SMBC、SMBN采用氯仿熏蒸法测定。

土壤孔隙度的计算公式:

$$P_t = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中, P_t 为土壤孔隙度(%); ρ_b 为土壤容重(g·cm⁻³); ρ_s 为土壤比重默认值(g·cm⁻³,取值2.65)。

1.4 数据处理

使用Microsoft office excel 2023对原始数据进行整理及初步计算,通过SPSS 27.0对数据进行单因素(One-way ANOVA)及双因素(Two-way ANOVA)方差分析,比较增施沼液肥对不同土层土壤理化特征的差异,通过LSD(Least significant difference)方法对结果进行多重比较,通过皮尔逊相关系数(Pearson correlation coefficient)研究不同理化性质间相互关系,通过对标准化处理后的土壤多指标数据进行主成分分析(Principal component analysis, PCA)探究不同处理的效应差异,使用Origin-Pro 2025绘图。

2 结果与分析

2.1 增施沼液肥对退化草地土壤物理性质和pH的影响

由表2可知,BS_{100%}处理的ST显著低于其他处理($P < 0.05$)。W₀处理的SM显著高于其他处理($P < 0.05$),BS_{100%}处理的SM最低。BS_{50%}, BS_{100%}SBD显著低于对照组($P < 0.05$),相比CK降低8.98%, 11.37%;相比W₀降低10.56%, 12.90%。BS_{50%},

BS_{100%}处理的 SP 显著高于对照组 ($P<0.05$), 相比 CK 增加 9.27%, 11.37%; 相比 W₀ 增加 11.31%, 13.81%。不同处理间土壤 pH 值并无显著差异 ($P=0.22$)。

表 2 增施沼液肥对中度退化草地土壤物理性质的影响

Table 2 Effects of application of biogas slurry on soil physical properties of moderately degraded grassland soil

指标 Index	温度 Temperature/°C	湿度 Humidity/%	容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)	孔隙度 Porosity/%	pH 值
CK	25.67±0.45 ^A	23.60±0.62 ^B	1.34±0.03 ^A	49.21±1.09 ^B	8.17±0.15 ^A
W ₀	21.97±1.31 ^B	28.07±1.53 ^A	1.37±0.03 ^A	48.31±1.24 ^B	7.84±0.35 ^A
BS _{50%}	24.40±1.04 ^A	22.53±1.44 ^B	1.23±0.01 ^B	53.78±0.49 ^A	7.94±0.30 ^A
BS _{100%}	21.43±0.85 ^C	21.43±1.06 ^B	1.19±0.01 ^B	54.99±0.48 ^A	8.12±0.57 ^A

注: CK, 对照; W₀, 水分对照; BS_{50%}, 50% 稀释浓度沼液肥; BS_{100%}, 全浓度沼液肥; 不同大写字母代表不同处理间差异达到显著水平 ($P<0.05$)

Note: CK, control; W₀, water control; BS_{50%}, 50% diluted biogas slurry fertilizer; BS_{100%}, full-strength biogas slurry fertilizer; different capital letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$)

2.2 增施沼液肥对退化草地土壤碳氮组分的影响

在 0~15 cm 土层中, BS_{100%} 处理的 STC 含量(图 1A)显著高于 CK ($P<0.05$), BS_{50%} 高于 CK 但并不显著 ($P=0.05$)。BS_{50%} 处理的 SOM 含量(图 1B)显著高于 CK ($P<0.05$)。BS_{50%}, BS_{100%} 处理的 STN 含量(图 1C)显著高于对照组 ($P<0.05$), 相比 CK 分别增长 20.00%, 14.50%, 相比 W₀ 分别增长 19.41%, 13.93%。BS_{50%}, BS_{100%} 处理的 SAHN 含量(图 1D)显著高于 CK ($P<0.05$), 相比 CK 分别增长 23.72%, 12.97%, 相比 W₀ 分别增长 14.35%, 4.42%。BS_{50%} 与 BS_{100%}; 15~30 cm 土层中, 不同处理间 STC 含量无显著差异 ($P=0.09$)。BS_{50%} 处理的 SOM 含量显著高于 CK ($P<0.05$)。BS_{50%}, BS_{100%} 处理的 STN 含量显著高于对照组 ($P<0.05$), 相比 CK 分别增长 25.86%, 25.29%, 相比 W₀ 分别增长 11.73%, 11.22%。BS_{50%}, BS_{100%} 处理的 SAHN 含量显著高于 CK ($P<0.05$), 相比 CK 分别增长 34.60%, 33.10%, 相比 W₀ 分别增长 19.11%, 17.78%。

在 0~15 cm 土层中, BS_{50%}, BS_{100%} 处理的 SMBC(图 1E)含量显著高于对照组 ($P<0.05$), 相比 CK 分别增长 11.04%, 18.39%, 相比 W₀ 分别增长 6.80%, 13.87%。BS_{50%}, BS_{100%} 处理的 SMBN 含量(图 1F)并显著高于 CK ($P<0.05$), 相比 CK 分别增长 28.34%, 12.47%, 相比 W₀ 分别增长 15.93%, 1.60%; 在 15~30 cm 土层中, BS_{50%}, BS_{100%} 处理的 SMBC 含量显著高于对照组 ($P<0.05$), 相比 CK 分别增长 12.15%, 12.52%, 相比 W₀ 分别增长 5.06%, 5.41%。BS_{50%}, BS_{100%} 处理的 SMBN 含量并显著高于 CK ($P<0.05$), 相比 CK 分别增长 24.79%, 14.04%, 相比 W₀ 分别增长 16.64%, 6.59%。BS_{50%} 处理的 STN, SAHN, SMBC 含量表

现为 0~15 cm 显著高于 15~30 cm 土层 ($P<0.05$)。土壤 SOM, STN, SAHN, SMBC, SMBN 含量表现为增施沼液肥主效应显著 ($P<0.05$), STN, SAHN, SMBC 含量表现为土层间主效应显著 ($P<0.05$), SMBC、SMBN 含量表现为增施沼液肥与土层间交互作用显著 ($P<0.05$)。

2.3 增施沼液肥对退化草地土壤磷钾组分的影响

在 0~15 cm 土层中, BS_{100%} 处理的 STP 含量(图 2A)显著高于 CK ($P<0.05$)。BS_{100%}, BS_{50%} 处理的 SAP 含量(图 2B)显著高于对照组 ($P<0.05$), 相比 CK 分别增长 204.06%, 66.87%, 相比 W₀ 分别增长 107.22%, 13.72%。BS_{100%} 处理的 STK 含量(图 2C)显著高于对照组 ($P<0.05$), 相比 CK 增长 15.75%, 相比 W₀ 增长 15.03%。BS_{50%}, BS_{100%} 处理的 SAK 含量(图 2D)显著高于对照组 ($P<0.05$), 相比 CK 分别增长 169.64%, 193.91%, 相比 W₀ 分别增长 35.39%, 47.58%; 在 15~30 cm 土层中, 不同处理间 STP 含量无显著差异 ($P=0.85$)。BS_{50%}, BS_{100%} 处理的 SAP 含量显著高于对照组 ($P<0.05$), 相比 CK 分别增长 165.24%, 224.17%, 相比 W₀ 分别增长 98.08% 和 142.09%。BS_{100%} 处理的 STK 含量显著高于 CK ($P<0.05$)。BS_{50%}, BS_{100%} 处理的 SAK 含量显著高于对照组 ($P<0.05$), 相比 CK 分别增长 40.06%, 30.26%, 相比 W₀ 分别增长 51.76%, 41.14%。SAP、SAK 含量表现为 0~15 cm 土层显著高于 15~30 cm 土层 ($P<0.05$)。SAP, STK, SAK 含量表现为增施沼液肥主效应显著 ($P<0.05$), STP, SAP, STK, SAK 含量表现为土层间主效应显著 ($P<0.05$), SAP, SAK 含量表现为增施沼液肥与土层间交互作用显著 ($P<0.05$)。

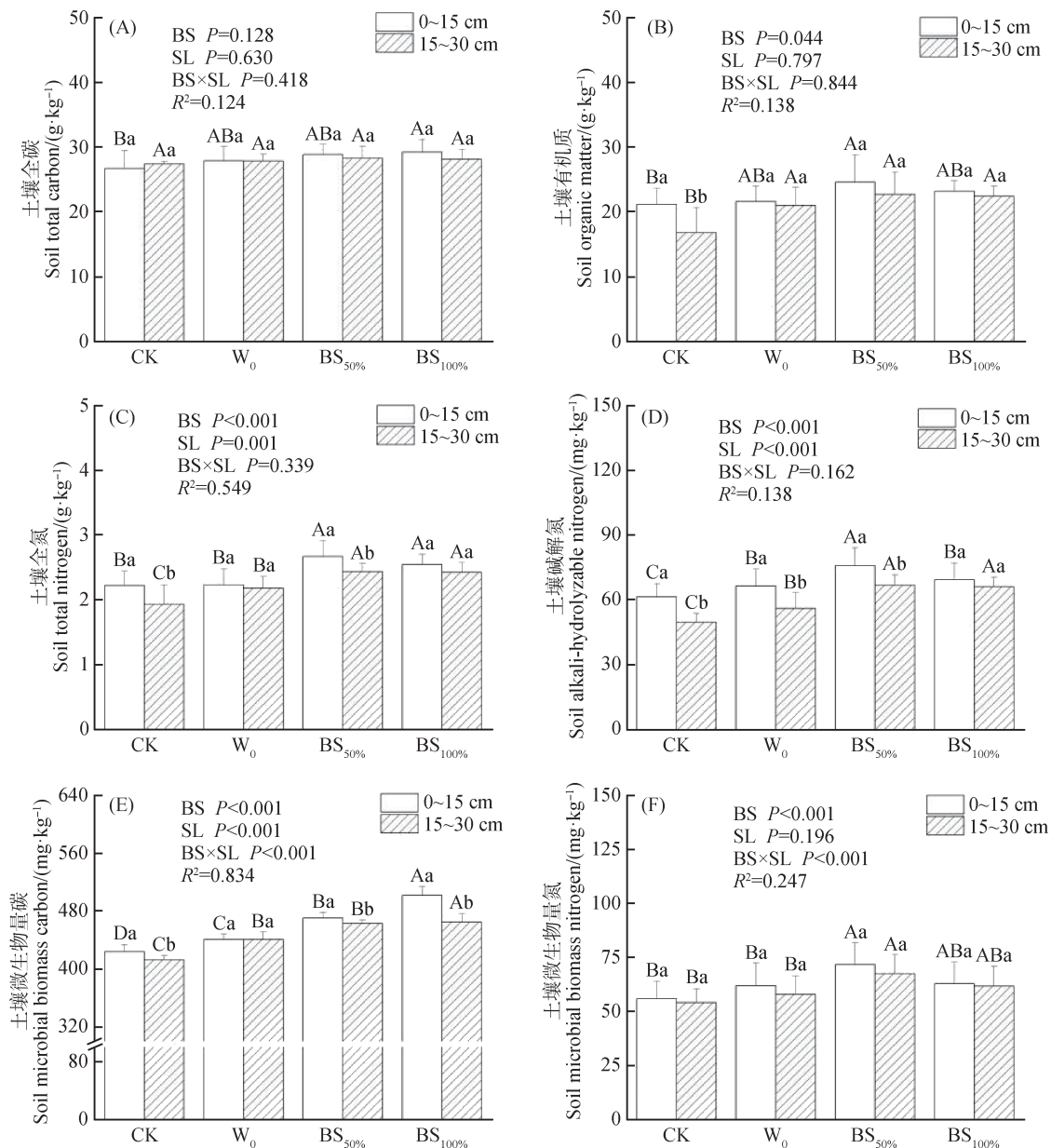


图 1 增施沼液肥对中度退化草地土壤碳氮组分的影响

Fig. 1 Effects of application of biogas slurry on carbon and nitrogen fractions of moderately degraded grassland soil

注:CK,对照;W₀,水分对照;BS_{50%},50%稀释浓度沼液肥;BS_{100%},全浓度沼液肥;BS,不同处理;SL,土层;BS×SL,不同处理与土层的交互作用;不同大(小)写字母代表不同处理间、不同土层间差异达到显著水平($P<0.05$); $P<0.05$ 代表显著差异, $P<0.01$ 代表极显著差异; R^2 ,线性混合模型指数。下同

Note: CK, control; W₀, water control; BS_{50%}, 50% diluted biogas slurry fertilizer; BS_{100%}, full-strength biogas slurry fertilizer; BS, different treatments; SL, soil layer; BS×SL, interaction between different treatments and soil layer; different uppercase/lowercase letters indicate that the differences between different treatments or different soil layers reach a significant level ($P<0.05$); $P<0.05$ indicates a significant difference, while $P<0.01$ indicates an extremely significant difference; R^2 , linear mixed model index. The same as below

2.4 增施沼液肥对退化草地土壤理化性质之间的关系分析

由图 3 可知, SBD 与 STN, SAP, SAK, SMBC 之间均存在极其显著正相关关系, 而 SP 与上述指标之间均存在极显著负相关关系。在 0~15 cm 土层, STN 与 SAHN, SAHN 与 SAK, SAP 与

SAK 及 SMBC 之间均存在极显著正相关关系。在 15~30 cm 土层, STN 与 STK, SAHN, SAP, SMBC 之间; SAHN 与 SAP, SAK, SMBC 之间; SAP 与 SAK 之间均存在极显著正相关关系。相较而言, 15~30 cm 土层各指标间相关关系更为紧密。

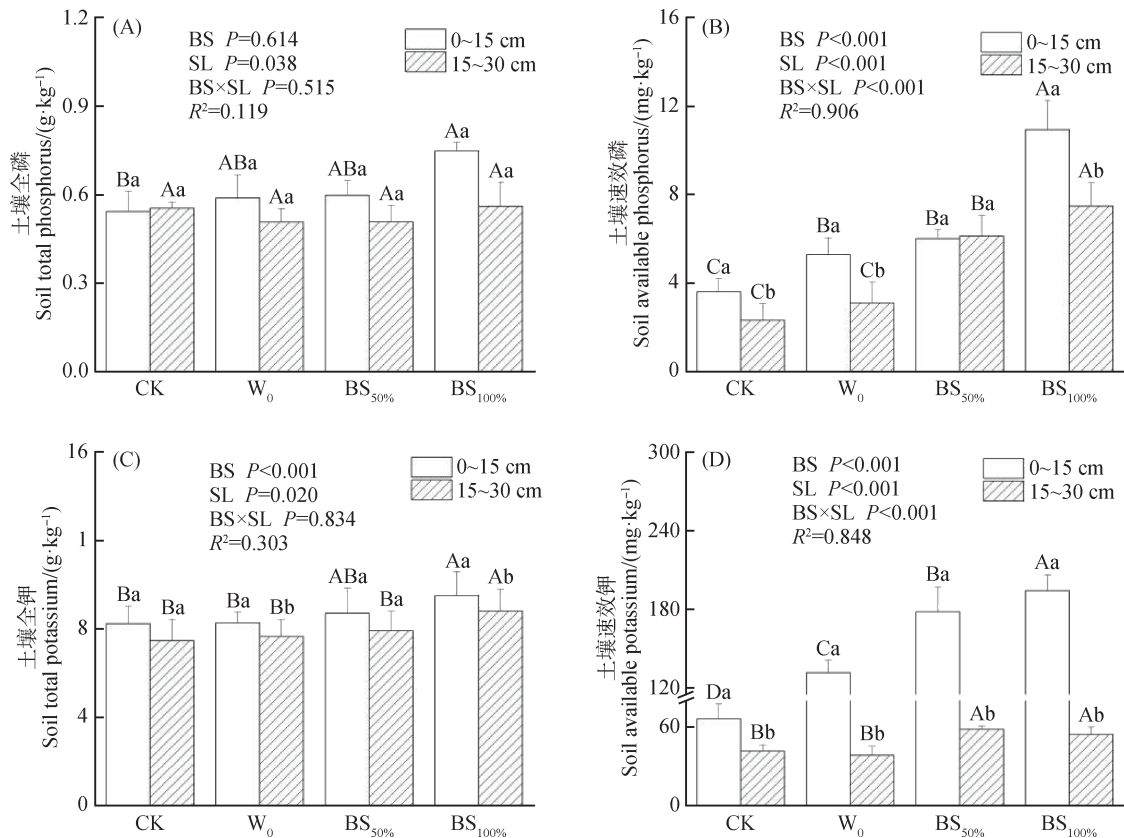


图 2 增施沼液肥对中度退化草地土壤磷钾组分的影响

Fig. 2 Effects of application of biogas slurry fertilizer on phosphorus and potassium fractions of moderately degraded grassland soil

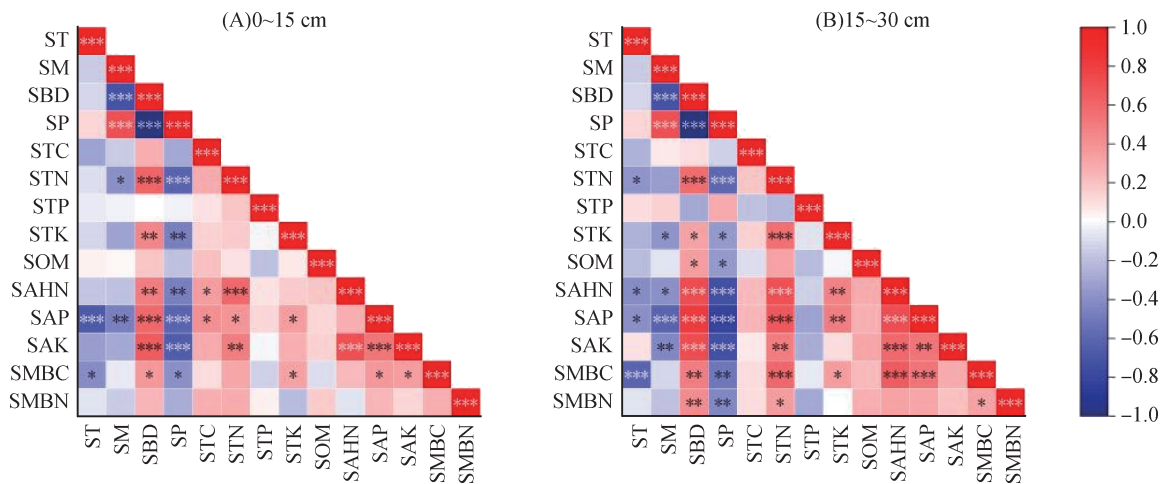


图 3 土壤 0~15 cm 土层和 15~30 cm 土层各理化性质指标之间的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis between the physical and chemical properties of soil 0-15 cm and 15-30 cm

注:ST, 土壤温度; SM, 土壤湿度; SBD, 土壤容重; SP, 土壤孔隙度; STC, 土壤全碳; STN, 土壤全氮; STP, 土壤全磷; STK, 土壤全钾; SOM, 土壤有机质; SAHN, 土壤碱解氮; SAP, 土壤速效磷; SAK, 土壤速效钾; SMBC, 土壤微生物生物量碳; SMBN, 土壤微生物生物量氮; *, ** 或 *** 表示在 $P < 0.05$, $P < 0.01$ 或 $P < 0.001$ 水平下具有显著相关关系

Note: ST, soil temperature; SM, soil moisture; SBD, soil bulk density; SP, soil porosity; STC, soil total carbon; STN, soil total nitrogen; STP, soil total phosphorus; STK, soil total potassium; SOM, soil organic matter; SAHN, soil alkali-hydrolyzable nitrogen; SAP, soil available phosphorus; SAK, soil available potassium; SMBC, soil microbial biomass carbon; SMBN, soil microbial biomass nitrogen; *, ** or *** indicate significant correlation at the levels of $P < 0.05$, $P < 0.01$ or $P < 0.001$, respectively

2.4 增施沼液肥对退化草地土壤理化性质的主成分分析

PCA 结果显示(表 3),前 4 个成分特征值均大于 1,累计贡献率达 67.34%,能够较好地反映数据要表达的信息。由载荷图(图 4A)可知,SMBC、SBD、SAP、STN 和 SAHN 等指标在 PC1 上具有较高的正载荷,土壤湿度、孔隙度在 PC1 上具有较高的负载荷,其贡献率达 37.60%。SM,STC 和 SP 在

PC2 上具有较高的正载荷,ST、pH 值在 PC2 上具有较高的负载荷,其贡献率达 11.2%。由得分图(图 4B)可知,不同处理的土壤样本在 PC1-PC2 平面上呈现出不同的聚集模式。结合前文单因素方差分析结果可知:BS_{50%} 和 BS_{100%} 处理的样本聚集区域重叠较高,且二者与 CK、W₀ 处理的样本聚集区域存在明显区分($P<0.05$),这表明沼液肥处理下土壤的综合理化性质与对照组存在统计学差异。

表 3 土壤理化性质指标主成分分析特征值与方差贡献率

Table 3 Eigenvalues and variance explanation in principal component analysis of soil physicochemical properties

主成分数 Principal component number	特征值 Eigenvalue	贡献率 Percentage of variance/%	累计贡献率 Cumulative percentage of variance/%
1	5.6382	37.5878	37.5878
2	1.6830	11.2198	48.8076
3	1.5610	10.4068	59.2143
4	1.2191	8.1270	67.3414
5	0.9645	6.4301	73.7715
6	0.8908	5.9387	79.7102
7	0.7346	4.8973	84.6075
8	0.6399	4.2660	88.8735
9	0.5288	3.5255	92.3990
10	0.3685	2.4566	94.8556
11	0.3067	2.0450	96.9006
12	0.2119	1.4127	98.3132
13	0.1450	0.9666	99.2799
14	0.1080	0.7201	100.0000
15	1.6691E ⁻⁷	1.1128E ⁻⁶	100.0000

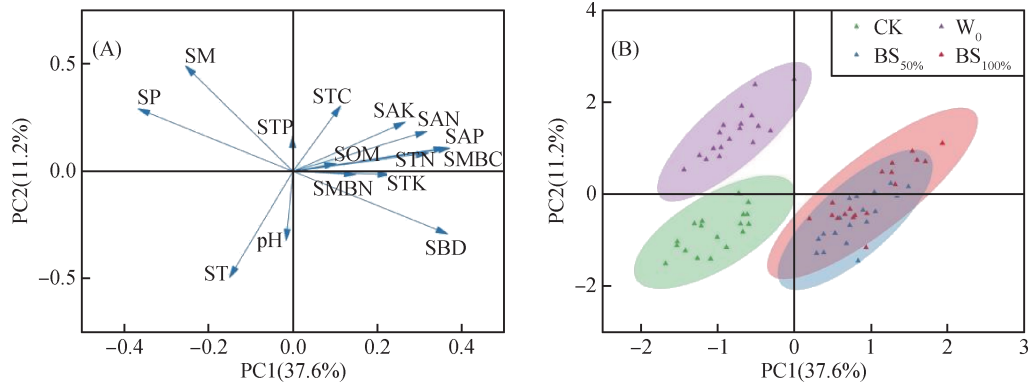


图 4 增施沼液肥对中度退化草地土壤各理化性质指标的主成分分析

Fig. 4 Principal component analysis of soil physical and chemical property indicators in moderately degraded grassland with application of biogas slurry fertilizer

3 讨论

3.1 增施沼液肥对退化草地土壤物理性质的影响

土壤作为调控植物生长、水分养分运输及土壤生物活动的物质载体,其结构与功能的优劣直接影响生态系统碳汇能力、水土保持效益及农业可持续发展潜力^[18]。BS_{100%} 处理下 ST 低于其他处理,可能是因为沼液肥为植被生长提供养分,提高植被盖度,

增强遮光效应,导致土壤温度降低^[19]。增施沼液肥后 SBD 低于对照组,是因为沼液肥中的有机物质可改善土壤团粒结构,与矿物质共同增加土壤养分,为植物根系生长提供充足营养支撑,促使根系生物量增加、分布范围扩大,根系的穿插与伸展作用增强了对土壤基质的机械扰动^[20],促进土壤孔隙数量增多、连通性提升,使 SBD 降低。此外,土壤 pH 在不同处理间并无明显差异,可能是因为土壤自身的化学过

程及微生物群落的调节作用,能够维持相对稳定的酸碱环境^[21],抵消处理因素带来的影响。

3.2 增施沼液肥对退化草地土壤碳氮组分的影响

土壤碳含量不仅反映了土壤质量和养分状况,也是维持陆地生态系统养分循环的重要元素^[22]。增施沼液肥后 STC, SOM 含量增加,这与李焕茹等人^[23]的研究结果一致,可能是因为沼液肥输入的碳源主要补充表层(0~15 cm 土层)土壤活性碳库,且活性碳易被微生物快速分解,而以惰性碳为主的亚表层(15~30 cm 土层)则分解缓慢,故两者形成动态平衡使得整体碳含量变化不显著。土壤氮含量作为评估土壤质量的核心指标之一,对土壤质量具有多维度的重要影响^[24]。增施沼液肥后氮含量显著增加($P<0.05$),且 BS_{50%} 处理下 STN, SAHN 含量最高,这与 Yin 等^[25]和刘颖等人^[26]的研究结果一致,表明沼液肥输入的氮源可增强表层土壤的氮矿化能力,提升土壤氮含量。STN, SAHN 具有显著相关关系,表明氮素在土壤中的转化过程具有连贯性,在微生物代谢驱动下协同参与土壤养分循环与供应^[27]。

土壤微生物生物量的承载力是一种土壤特性,是土壤稳定维持土壤微生物生物量的能力,其大小与土壤养分的供应和周转有关^[28]。沼液通过改变土壤物理、化学和生物学特征,促进土壤微生物群落活动^[29]。增施沼液肥后 SMBC 含量显著提高($P<0.05$),是因为沼液肥为土壤微生物群落提供了稳定碳源,且土壤孔隙为微生物获取基质创造有利条件^[30],提升了微生物对基质的利用效率。增施沼液肥对 SMBC, SMBN 含量的主效应达到显著水平($P<0.05$),同时呈现出表层土壤含量高、亚表层土壤含量低的趋势,这与张静等人^[31]的研究结果一致,可能是因为表层土壤光照充足、通气条件良好,更利于土壤微生物活动,而亚表层土壤养分供应相对不足,限制了土壤微生物对沼液肥的响应^[32]。

3.3 增施沼液肥对退化草地土壤磷钾组分的影响

磷是土壤-植物系统中能量流动、物质循环与生态平衡的核心枢纽,磷添加直接影响土壤养分含量的变化^[33]。增施沼液肥后土壤磷含量明显增加,表层 STP, SAP 含量均高于亚表层土壤,这与郁宁等^[34]和商小兰等人^[35]的研究结果一致,可能是因为沼液肥中富含磷元素,且表层土壤微生物活动更旺盛,促进了磷的矿化与释放。土壤中的钾是生态系

统中的重要养分之一^[36],钾离子不仅能促进植物光合作用^[37-38],还能增强植物对氮、磷的吸收,提高植物的抗逆性^[39]。表层 STK, SAK 含量均高于亚表层土壤,这与雷泽勇等人^[40]的研究结果一致。增施沼液肥后表层 SAK 含量较高且显著增加($P<0.05$),可能是因为沼液肥本身富含的钾能减缓钾离子的淋溶过程^[41],提高钾在表层土壤的固定和保持能力^[42],使表层土壤维持较高的钾含量水平。增施沼液肥对 SAP, SAK 的主效应达到显著水平($P<0.05$),且两者之间存在极显著的正相关关系($P<0.01$),可能是因为沼液肥中磷、钾的协同输入改善了土壤微环境,同步促进了两者的有效化过程。

3.4 增施沼液肥对退化草地土壤理化性质的主成分分析

主成分分析作为一种可实现多指标降维与综合评价的统计方法,能有效提取关键影响因素,在农田、草地等土壤肥力的多维度评价中已有诸多应用^[43]。沼液肥的液态特性使其能更快速渗透土壤,对土壤各元素影响更直接。第一主成分与 SMBC, SBD, SAP, STN 和 SAHN 等指标呈正相关,且施肥处理明显聚集在第一主成分的正半轴区域,对照组明显聚集在负半轴,且施肥处理的样本聚集更紧密且远离对照组,这与冯慧琳等人^[44]的研究结果一致,表明沼液肥能够补充土壤碳氮养分、激活微生物活性^[45],改善中度退化草地土壤理化性质。本研究仅基于单次采样的土壤指标开展主成分分析,可能遗漏部分次要但仍有意义的土壤信息。未来可延长观测周期,结合多年动态数据进行主成分分析,更全面揭示沼液肥对土壤的长期影响,深化对草原生态修复机制的理解。

4 结论

增施沼液肥能有效降低土壤容重、增加孔隙度,提高土壤全氮、速效磷、速效钾及微生物生物量碳、氮含量;对土壤理化性质指标的主效应表现突出,对氮、磷、钾组分的激活效应显著;亚表层土壤理化性质间的相关性较表层更为紧密。综合分析,在退化草地增施沼液肥可以通过促进有机养分和无机养分积累,间接加速土壤养分的转化和循环,提升土壤地力。本研究证实了短期增施沼液肥对退化草地土壤的积极改良作用。然而,土壤地力的修复是长期过程,该措施的持续改良效应仍需进一步监测。

参考文献

- [1] NANDINTSETSEG B, BOLDGIV B, CHANG J, et al. Risk and vulnerability of mongolian grasslands under climate change[J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(3):034035
- [2] 阿卜杜热合曼·吾斯曼, 玉素甫江·如素力, 张发, 等. 基于遥感监测的天山新疆段草地退化时空特征及其与气候因子的关系[J]. 草业科学, 2023, 40(7):1779-1792
- OSMAN A, RUSULI Y, ZHANG F, et al. Temporal and spatial characteristics of grassland degradation in Xinjiang Section of Tianshan Mountains based on remote sensing monitoring and its relationship with climate factors[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(7):1779-1792
- [3] LIU M, LIU S B, XU X, et al. Does restoration of degraded grasslands follow the theory of multiple stable states?[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2025, 383:109508
- [4] 潘庆民, 薛建国, 陶金, 等. 中国北方草原退化现状与恢复技术[J]. 科学通报, 2018, 63(17):1642-1650
- PAN Q M, XUE J G, TAO J, et al. Current status of grassland degradation and measures for grassland restoration in northern China[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(17):1642-1650
- [5] 古琛, 贾志清, 杜波波, 等. 中国退化草地生态修复措施综述与展望[J]. 生态环境学报, 2022, 31(7):1465-1475
- GU C, JIA Z Q, DU B B, et al. Views and prospects of ecological restoration measures for degraded grasslands of China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(7):1465-1475
- [6] DAI Z M, SU W Q, CHEN H H, et al. Long-term nitrogen fertilization decreases bacterial diversity and favors the growth of Actinobacteria and Proteobacteria in agro-ecosystems across the globe[J]. Global Change Biology, 2018, 24(8):3452-3461
- [7] 刘银秀, 池永清, 董越勇, 等. 不同沼液施用年限土壤养分含量和微生物群落结构差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(3):483-495
- LIU Y X, CHI Y Q, DONG Y Y, et al. Variation of nutrient content and microbial community in soils under different application years of biogas slurry[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(3):483-495
- [8] 习彦花, 程辉彩, 刘敬, 等. 沼液长期施用对白三叶草地土壤环境质量的影响[J]. 土壤通报, 2024, 55(4):1080-1088
- XI Y H, CHENG H C, LIU J, et al. Effects of long-term application of biogas slurry on soil environmental quality of *Trifolium repens* L. [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(4):1080-1088
- [9] 隋好林, 陈晓峰, 秦娜, 等. 沼液滴灌对番茄产量、品质和土壤理化性状的影响[J]. 山东农业科学, 2016, 48(2):80-84
- SUI H L, CHEN X F, QIN N, et al. Effects of drip irrigation with biogas slurry on yield and quality of tomato and physical and chemical properties of soil[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2016, 48(2):80-84
- [10] 许剑锋, 孟庆婷, 傅佳杰, 等. 沼液施用下的西蓝花种植土壤微生物群落演变特征[J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1347.S.20250509.1709.006,2025-06-28/2025-8-20>
- XU J F, MENG Q T, FU J J, et al. Evolution characteristics of soil microbial communities in broccoli cultivation under biogas slurry application <https://link.cnki.net/urlid/12.1347.S.20250509.1709.006,2025-06-28/2025-8-20>
- [11] HOLM-NIELSEN J B, AL SEADI T, OLESKOWICZ-POPIEL P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(22):5478-5484
- [12] 周伟, 徐莉, 俞元春, 等. 沼液肥用效果及其潜在风险评述[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(30):10528-10530
- ZHOU W, XU L, YU Y C, et al. Commentary on biogas slurry fertilizer effects and its potential risks[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(30):10528-10530
- [13] 刘炳好, 王一佩, 姚作芳, 等. 沼液还田下不同种植模式的重金属风险评价及安全消纳量分析[J]. 生态环境学报, 2023, 32(8):1507-1515
- LIU B Y, WANG Y P, YAO Z F, et al. Risk assessment and safe consumption analysis of heavy metals under different planting patterns of biogas slurry[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023, 32(8):1507-1515
- [14] WENTZEL S, JOERGENSEN R G. Effects of biogas and raw slurries on grass growth and soil microbial indices[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2016, 179(2):215-222
- [15] DUAN Y, ZHANG J, PETROPOULOS E, et al. Soil acidification destabilizes terrestrial ecosystems via decoupling soil microbiome[J]. Global Change Biology, 2025, 31(4):e70174
- [16] 尹晓雷, 李先德, 林少颖, 等. 不同轮作模式下土壤细菌群落特征及其对土壤全碳、全氮与温室气体释放潜力影响[J]. 环境科学学报, 2021, 41(12):5161-5173
- YIN X L, LI X D, LIN S Y, et al. Effects of soil bacterial community characteristics on total carbon and total nitrogen contents and greenhouse gas emission potential under different rotation patterns[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(12):5161-5173
- [17] WANG M, CUI J, LIU H, et al. Characterization of soil microbial biomass carbon and nitrogen in four forest types of shushan urban forest park[J]. Forests, 2023, 14(7):1498
- [18] TELO DA GAMA J. The role of soils in sustainability, climate change, and ecosystem services: Challenges and opportunities[J]. Ecologies, 2023, 4(3):552-567
- [19] 原慧芳, 岩香甩, 李金威, 等. 地膜覆盖对胶园间种辣木黄麻光合生理特性及产量的影响[J]. 热带作物学报, 2024, 45(1):134-143
- YUAN H F, YAN X S, LI J W, et al. Effects of plastic film mulching treatments on photosynthetic characteristics and yield of *amorphophallus muelleri* intercropped in rubber plantations[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2024, 45(1):134-143
- [20] TOMOBE H, TSUGAWA S, YOSHIDA Y, et al. A mechanical theory of competition between plant root growth and soil pressure reveals a potential mechanism of root penetration[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1):7473
- [21] PHILIPPOT L, CHENU C, KAPPLER A, et al. The interplay between microbial communities and soil properties[J]. Nature Reviews Microbiology, 2024, 22(4):226-239
- [22] 何高迅, 王越, 彭淑娟, 等. 滇中退化山地不同植被恢复下土壤碳氮磷储量与生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2020, 40(13):4425-4435
- HE G X, WANG Y, PENG S X, et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks and ecological stoichiometry characteristics of different vegetation restorations in degraded mountainous area of central Yunnan, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13):4425-4435
- [23] 李焕茹, 朱莹, 田纪辉, 等. 碳氮添加对草地土壤有机碳氮磷含量及相关酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(8):2470-2476
- LI H R, ZHU Y, TIAN J H, et al. Effects of carbon and nitro-

- gen additions on soil organic C, N, P contents and their catalyzed enzyme activities in a grassland [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(8): 2470-2476
- [24] 孙益权, 张忠启, 于东升, 等. 采样点空间集聚度对揭示区域土壤全氮变异性的影响[J]. *土壤*, 2018, 50(4): 787-794
SUN Y Q, ZHANG Z Q, YU D S, et al. Effects of sampling point aggregation on detecting spatial variability of regional soil total nitrogen [J]. *Soils*, 2018, 50(4): 787-794
- [25] YIN D X, CHEN D, QIN J, et al. Effect of drip irrigation with biogas slurry on the yield and quality of Chinese cabbage [J]. *BioResources*, 2024, 19(3): 5717-5730
- [26] 刘颖, 顾昀悻, 张伟杨, 等. 水分与氮素及其互作调控小麦产量和水氮利用效率研究进展[J]. *作物杂志*, 2023, (4): 7-15
LIU Y, GU Y Y, ZHANG W Y, et al. Research advances in the effects of water and nitrogen and their interaction on the grain yield, water and nitrogen use efficiencies of wheat [J]. *Crops*, 2023, (4): 7-15
- [27] 李瑞, 张巡, 杨阳, 等. 沼液替代化学氮肥对滨海稻田土壤有机氮和细菌群落的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(8): 1364-1375
LI R, ZHANG X, YANG Y, et al. Effects of substituting biogas slurry for chemical nitrogen fertilizer on soil organic nitrogen and bacterial communities in coastal paddy fields [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(8): 1364-1375
- [28] 王继红, 刘景双, 于君宝, 等. 氮磷肥对黑土玉米农田生态系统土壤微生物量碳、氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 35-38
WANG J H, LIU J S, YU J B, et al. Effect of fertilizing N and P on soil microbial biomass carbon and nitrogen of black soil corn agroecosystem [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, (1): 35-38
- [29] CHEN X, HENRIKSEN T M, SVENSSON K, et al. Long-term effects of agricultural production systems on structure and function of the soil microbial community [J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 147: 103387
- [30] HARTMANN M, SIX J. Soil structure and microbiome functions in agroecosystems [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4(1): 4-18
- [31] 张静, 马玲, 丁新华, 等. 扎龙湿地不同生境土壤微生物生物量碳氮的季节变化[J]. *生态学报*, 2014, 34(13): 3712-3719
ZHANG J, MA L, DING Q H, et al. Seasonal dynamics of soil microbial biomass C and N in different habitats in Zhalong Wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(13): 3712-3719
- [32] 彭娜娜. 崇明东滩湿地土壤微生物生物量碳氮分异及影响因素分析[D]. 上海: 华东师范大学, 2022: 51-52
PENG N N. Divergence of soil microbial biomass carbon and nitrogen and its influencing factors in Chongming Dongtan wetland. [D]. East China Normal University, 2022: 51-52
- [33] 赵琼, 曾德慧. 陆地生态系统磷素循环及其影响因素[J]. *植物生态学报*, 2005(1): 153-163
ZHAO Q, ZENG D H. Phosphorus cycling in terrestrial ecosystems and its controlling factors [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, (1): 153-163
- [34] 郁宁, 马任甜, 寇太记, 等. 施磷对玉米/花生间作农田土壤碳氮磷化学计量特征和产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(10): 2013-2023
YU N, MA R T, KOU T J, et al. Effects of phosphorus fertilizer on the stoichiometry of carbon nitrogen and phosphorus and yield in maize/peanut intercrop fields [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(10): 2013-2023
- [35] 商小兰, 徐著, 张海娟, 等. 沼液灌溉对南方低丘果园土壤碳氮磷积累与淋移的影响[J]. *中国农学通报*, 2024, 40(29): 52-58
SHANG X L, XU Z, ZHANG H J, et al. Effects of biogas slurry irrigation on accumulation and leaching of soil carbon, nitrogen and phosphorus in low hilly orchards in southern China [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(29): 52-58
- [36] SHEN Y X, WANG D J, CHEN Q Q, et al. Large heterogeneity of water and nutrient supply derived from runoff of nearby rock outcrops in karst ecosystems in SW China [J]. *Catena*, 2019, 172: 125-131
- [37] 万青, 胡振民, 李欢, 等. 调理剂对茶园土壤和茶叶产量及品质的影响[J]. *土壤*, 2019, 51(6): 1086-1092
WAN Q, HU Z M, LI H, et al. Effects of soil conditioners on soil properties and yield and quality components of tea in tea garden [J]. *Soils*, 2019, 51(6): 1086-1092
- [38] ABIDEEN Z, KOYRO H W, HUCHZERMEYER B, et al. Moderate salinity stimulates growth and photosynthesis of *Phragmites karka* by water relations and tissue specific ion regulation [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2014, 105: 70-76
- [39] HOUMANI H, DEBEZ A, DE FREITAS-SILVA L, et al. Potassium (K^+) starvation-induced oxidative stress triggers a general boost of antioxidant and NADPH-generating systems in the halophyte *Cakile maritima* [J]. *Antioxidants*, 2022, 11: 401
- [40] 雷泽勇, 陈伟, 王巍凝. 科尔沁沙地不同生态系统土壤钾素分布特征分析[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2024, 43(6): 719-725
LEI Z Y, CHEN W, WANG W N, et al. Analysis on soil K distribution characteristics of different ecosystems in Horqin sandy land [J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition)*, 2024, 43(6): 719-725
- [41] SONG X D, LIU F, WU H Y, et al. Effects of long-term K fertilization on soil available potassium in East China [J]. *Catena*, 2020, 188: 104412
- [42] 薛斌, 徐涵涓, 阮宏华. 施用沼液对农林土壤生态系统影响的研究进展[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2019, 43(3): 175-182
XUE B, XU H M, RUAN H H. A review on the effects of biogas slurry on agroforestry soil ecosystems [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2019, 43(3): 175-182
- [43] 冯慧敏, 郭小丽, 肖远业, 等. 基于主成分分析不同种养模式下的土壤肥力评价[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(10): 1-10
FENG H M, GUO X L, XIAO Y Y, et al. Evaluation of soil fertility under different planting and breeding models based on principal component analysis [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(10): 1-10
- [44] 冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 等. 生物炭对土壤酶活和细菌群落的影响及其作用机制[J]. *环境科学*, 2021, 42(1): 422-432
FENG H L, XU C S, HE H H, et al. Effect of biochar on soil enzyme activity & the bacterial community and its mechanism [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(1): 422-432
- [45] YIN D, QIN J, WANG B, et al. Comprehensive evaluation of biogas slurry fertility: a study based on the effects of biogas slurry irrigation on soil microorganisms and enzyme activities in winter wheat fields [J]. *Microorganisms*, 2025, 13(9): 2054