

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2024.0671

# 生物菌肥对甜瓜不同质地土壤养分淋失的影响

杨克明<sup>1</sup>, 刘国宏<sup>1</sup>, 胡西旦·买买提<sup>1</sup>, 热西旦·阿木提<sup>1</sup>,  
李海峰<sup>1,2</sup>, 马兴旺<sup>2,3</sup>, 刘志刚<sup>1,2</sup>

(1. 新疆农业科学院吐鲁番农业科学研究所 新疆吐鲁番 838000; 2. 农业农村部西北绿洲农业环境重点实验室 乌鲁木齐 830000; 3. 新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 甜瓜在种植过程中必须保证充足的水分供应才能正常生长发育, 然而在实际生产中过量灌水往往会导致深层渗漏, 不仅浪费资源, 还污染地下水。为了解不同质地土壤施用生物菌肥(BOF)对缓解因灌溉而导致的营养元素淋失的影响, 在灌溉过程中分别施用可溶性 BOF 于质地为壤土(S1)、砂土(S2)和黏土(S3)的盆栽甜瓜土壤中, 测定甜瓜成熟后植株和果实干物质质量及氮磷钾含量、土壤理化性质和氮磷钾含量、渗漏液中氮磷钾含量和不同氮素形态含量。结果表明, 与不施生物菌肥(CK)相比, BOF 处理显著降低了 S1、S2 和 S3 的土壤 pH 及渗漏液总氮、渗漏液 NO<sub>3</sub>-N、渗漏液总磷和渗漏液总钾含量; 显著降低了 S1 和 S2 的电导率及土壤速效钾、土壤速效磷、土壤总氮和土壤 NO<sub>3</sub>-N 含量; 显著提高了 S1、S2 和 S3 的土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量; 显著提高了 S3 的电导率及土壤速效磷、土壤总氮、土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、土壤 NO<sub>3</sub>-N 和甜瓜总氮磷钾含量。因此施用 BOF 不仅可以改善土壤 pH 和土壤电导率, 缓解灌溉对土壤总氮、NO<sub>3</sub>-N、磷和钾的渗漏; 而且还可以在提高甜瓜干物质质量、土壤养分含量及减少土壤养分淋失方面发挥作用。

**关键词:** 甜瓜; 生物菌肥; 土壤; 渗漏液; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N; NO<sub>3</sub>-N

中图分类号: S652

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)06-120-10

## Effects of biological-organic fertilizer on nutrient loss in different texture soils of cantaloupe

YANG Keming<sup>1</sup>, LIU Guohong<sup>1</sup>, Huxidan·Maimaiti<sup>1</sup>, Rexidan·Amuti<sup>1</sup>, LI Haifeng<sup>1,2</sup>, MA Xingwang<sup>2,3</sup>, LIU Zhigang<sup>1,2</sup>

(1. Turpan Institute of Agricultural Sciences, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Turpan 838000, Xinjiang, China; 2. Key Laboratory of Northwest Oasis Agricultural Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Urumqi 830000, Xinjiang, China; 3. Institute of Soil Fertilizer and Agricultural Water Conservation, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

**Abstract:** Cantaloupe must ensure sufficient water supply during their growth process in order to develop normally. However, in actual production, excessive water supply often leads to deep leakage, which not only wastes resources but also pollutes groundwater. To understand the effects of applying biological-organic fertilizer (BOF) on alleviating nutrient loss caused by irrigation in soils with different textures, soluble BOF was applied to potted cantaloupe soils with textures of loam (S1), sand (S2), and clay (S3) during irrigation. The dry matter mass and nitrogen, phosphorus, and potassium content of plants and fruits after maturity were measured, as well as the physicochemical properties and nitrogen, phosphorus, and potassium content of soil, nitrogen, phosphorus, and potassium content in leachate, and the content of different nitrogen forms. The results showed that compared with no application of biofertilizer (CK), BOF treatment significantly reduced the soil pH, total nitrogen, NO<sub>3</sub>-N, total phosphorus, and total potassium content of S1, S2, and S3; significantly reduced soil conductivity, soil available potassium, soil available phosphorus, soil total nitrogen, soil NO<sub>3</sub>-N, and cantaloupe fruit potassium content in S1 and S2; significantly increased the soil NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N content of S1, S2 and S3; significantly increased the soil conductivity, soil available phosphorus, soil total nitrogen, soil NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, soil NO<sub>3</sub>-N, cantaloupe plant ni-

收稿日期: 2024-10-29; 修回日期: 2025-03-11

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金(2022D01A265); 农业农村部西北绿洲农业环境重点实验室开放基金课题(XBLZ-20203); 新疆“三农”骨干人才培养项目(2023SNGGNT056); 新疆维吾尔自治区创新环境(人才、基地)建设专项计划(PT2314)

作者简介: 杨克明, 男, 硕士, 主要从事土壤氮素循环研究。E-mail: 2037097611@qq.com

通信作者: 刘志刚, 男, 高级农艺师, 主要从事园艺作物栽培与育种研究。E-mail: 1225883958@qq.com

马兴旺, 男, 研究员, 主要从事养分资源高效利用与面源污染防治研究。E-mail: maxw@xass.ac.cn

trogen, phosphorus, and potassium content, cantaloupe fruit nitrogen and phosphorus content, and cantaloupe total nitrogen, phosphorus, and potassium content in S3. Therefore, the application of BOF can not only improve soil pH and soil conductivity, alleviate irrigation induced leakage of total nitrogen,  $\text{NO}_3^-$ -N, total phosphorus, and total potassium in the soil; and it can also play a role in improving the dry matter mass of sweet melon, soil nutrient content, and reducing soil nutrient leaching.

**Key words:** Cantaloupe; Biological-organic fertilizer; Soil; Leachate;  $\text{NH}_4^+$ -N;  $\text{NO}_3^-$ -N

甜瓜(*Cucumis melo* L.)属葫芦科黄瓜属植物,果肉肥厚、清脆爽口,深受消费者喜爱。新疆是我国甜瓜的重要产区之一。新疆属于干旱区,降水稀少且蒸发量大,因此必须在作物生长期灌溉以保证其正常生长<sup>[1]</sup>。甜瓜对水分极为敏感,整个生育期需要大量的水分。灌溉量不足会限制植株的生长发育,导致减产;然而在生产过程中为保证甜瓜的生长,生产者往往会过量灌水,导致水分的无效蒸发和深层渗漏<sup>[2]</sup>。

土壤养分随着降水或灌溉淋失,是导致养分利用效率不高的主要原因。氮肥是维持作物生长和产量所必需的大量营养元素,但在作物生长过程中,施用的氮肥中只有约50%被作物吸收利用<sup>[3]</sup>;剩余的氮部分挥发到空气中,部分随降雨或灌溉淋溶,污染地表和地下水<sup>[4]</sup>。在干旱和半干旱地区往往灌溉超量水以保证作物正常生长,部分灌溉水未利用而渗到耕层以下<sup>[5]</sup>。灌溉促使肥料从耕层土壤淋失,大多数旱地土壤中, $\text{NO}_3^-$ -N是作物吸收有效氮的主要形式(89%~99%),然而 $\text{NO}_3^-$ -N极易溶解,并随着土壤水分迁移出根区,造成淋溶损失<sup>[6]</sup>;灌溉促使土壤非活性磷逐渐从耕层淋溶转移<sup>[7]</sup>;土壤中的钾主要以淋溶的形式损失,据估算,中国土壤中有效钾的总体平均含量每年减少了3~10  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[8]</sup>;这不仅造成我国土壤肥力和质量不断下降,还对环境和人类健康造成威胁<sup>[9]</sup>。此外,养分淋失也与土壤质地有关,Nguyen等<sup>[10]</sup>研究表明,砂土 $\text{NH}_4^+$ -N和磷淋失量大于黏土。农业中常用动物粪便、作物残渣、石膏、硫黄、明矾和生物炭等改良剂改善土壤性质和水分动态,以减少土壤养分淋失<sup>[11]</sup>。研究表明,生物菌肥也能显著减少养分淋失<sup>[12]</sup>,在农业生产中常以枯草芽孢杆菌植物促生菌生物菌肥用于土壤改良,以提高作物养分吸收和减少土壤养分淋失<sup>[13]</sup>。

枯草芽孢杆菌可明显改善土壤理化性质,Xia等<sup>[14]</sup>研究表明,枯草芽孢杆菌可明显降低碱土pH和可溶性盐含量,提高土壤有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量。还有研究表明,枯草芽孢杆菌在促进番茄和水稻植物生长、预防植物病害(枯萎病)和提高氮利用效率方面发挥作用<sup>[15]</sup>。在土壤中添加枯

草芽孢杆菌可缓解土壤退化、提高作物产量<sup>[16]</sup>、增强土壤酶活性和提高土壤微生物丰度<sup>[17]</sup>。此外,枯草芽孢杆菌可抑制土壤中氮素损失。Sun等<sup>[18]</sup>研究表明,枯草芽孢杆菌作为生物肥料可降低土壤氮排放44%和降低氮素淋失54%。枯草芽孢杆菌还可促进作物根系生长,提高养分吸收利用水平,以减少土壤养分损失。Araujo等<sup>[19]</sup>研究表明,枯草芽孢杆菌可明显提高花生根长、根表面积、根体积和根尖数。Moreno-lora等<sup>[20]</sup>研究表明,枯草芽孢杆菌可提高小麦根系磷的吸收量。研究表明,枯草芽孢杆菌促进了马兰杜草氮磷钾的吸收<sup>[21]</sup>。

虽然枯草芽孢杆菌在调节土壤微生物群落、改善土壤结构和提高作物养分吸收等方面已有相关研究,但鲜有枯草芽孢杆菌对不同质地土壤的氮磷钾淋失方面的研究。为弥补这一缺漏,笔者收集了壤土、砂土和黏土3种质地土壤并添加枯草芽孢杆菌生物菌肥,通过研究施用枯草芽孢杆菌菌肥对甜瓜生物量积累、甜瓜氮磷钾含量、土壤理化性质及渗滤液氮磷钾含量的影响,探明生物菌肥对吐鲁番甜瓜种植区不同质地土壤养分含量、养分淋溶、甜瓜生物生长和氮磷钾吸收的影响,以为枯草芽孢杆菌菌肥在甜瓜生产和土壤养分淋失方面的应用提供数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试土样分别采自吐鲁番高昌区恰特喀勒乡原种场甜瓜种植基地、吐鲁番市鄯善县吐峪沟乡洋海湾甜瓜种植基地和吐鲁番市鄯善县达浪坎乡甜瓜种植基地,将土样分别记为S1、S2和S3。S1、S2和S3的土壤质地分别为壤土、砂土和黏土。按照五点采样法,用土壤采样器收集土壤,去除土壤中的石粒、草根等杂质。3种土壤基本的理化性质见表1。

供试甜瓜品种为西州密17号,种子购自新疆维吾尔自治区葡萄瓜果研究所。

生物有机肥(biological-organic fertilizer, BOF)为水溶性有机肥,由河北伊诺生物有限公司提供,有效菌种为枯草芽孢杆菌,有效活菌数 $>0.2$ 亿 $\cdot\text{g}^{-1}$ ,

表1 不同种类土壤基本的理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of different types of soil

土样 Soil sample	w(有机质) Organic matter content/(g·kg <sup>-1</sup> )	w(碱解氮) Alkali hydrolyzed nitrogen content/(mg·kg <sup>-1</sup> )	w(有效磷) Available phosphorus content/(mg·kg <sup>-1</sup> )	w(有效钾) Available potassium content/(mg·kg <sup>-1</sup> )	pH	电导率 Conductivity/ (μS·cm <sup>-1</sup> )
S1	12.19	25.00	30.40	199.67	8.87	336.67
S2	6.97	15.33	38.73	172.33	9.14	550.67
S3	15.09	28.67	33.87	202.33	9.17	485.67

有机质含量(w,后同)>40%。

### 1.2 试验设计

试验于2023年3—6月在新疆农业科学院吐鲁番农业科学研究所温室中以盆栽方式进行。经调查当地甜瓜扎根深度不超过40 cm。用壤土(S1)、砂土(S2)和黏土(S3)填充高45 cm、直径25 cm的桶,桶底部中心打一个直径2.5 cm小孔,孔内用布条引流至桶底渗液收集装置。采用裂区试验于3种土壤中种植甜瓜,在甜瓜生长过程中,以不施用生物有机肥为对照(CK),追施800 g·桶<sup>-1</sup> BOF为处理,每个处理3次重复。甜瓜幼苗于2023年3月12日定植,在生长过程中共灌水8次,灌水前在BOF处理的盆中施用100 g BOF,灌水量根据甜瓜长势、气温等情况确定,每次滴灌3~4 h,根据测试滴头滴水量3.0~3.2 L·h<sup>-1</sup>,每次滴水2 d后收集渗滤液于-20℃密封冷藏保存。甜瓜于6月9日采收,采收后测定土壤基本理化性质、氮素形态和甜瓜氮素吸收状况。

### 1.3 试验方法

将土壤风干、磨细后过10目筛,采用电位法测定土壤pH,采用电极法测定电导率,采用双波长比色法测定土壤NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量,采用靛酚蓝比色法测定土壤NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量,采用碱解扩散法测定碱解氮含量,采用凯氏定氮法测定土壤全氮含量,采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法测定速效磷含量,采用中性乙酸铵溶液浸提-火焰光度计法测定速效钾含量,采用重铬酸钾氧化外加加热法测定土壤有机质含量<sup>[22]</sup>。采用靛酚蓝比色法测定渗滤液中的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量,采用双波长比色法测定NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量,采用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定总氮含量,采用钼酸铵分光光度法测定总磷含量,采用火焰光度计法测定总钾含量<sup>[22]</sup>。将采收的甜瓜分为植株和果实;用天平称甜瓜果实质量,将植株做好标记放入105℃烘箱中杀青30 min,然后将温度调至75℃烘干至恒质量后称量其干质量。采用硫酸双氧水消煮-奈氏比色法测定甜瓜的全氮含量,采用硫酸双氧水消煮-钒钼黄比色法测定全磷含量,采用硫酸双氧

水消煮-火焰光度计法测定全钾含量<sup>[22]</sup>。

### 1.4 数据处理与分析

甜瓜总氮磷钾含量按下列公式计算:

$$\text{甜瓜总氮磷钾含量}/(\text{g}\cdot\text{株}^{-1})=(C1\times W1+C2\times W2)/1000; \quad (1)$$

式中,C1和C2分别为甜瓜总氮磷钾单位含量(mg·kg<sup>-1</sup>),W1和W2分别为每桶植株和果实质量(kg)。

$$\text{土壤氮磷钾含量}/(\text{g}\cdot\text{桶}^{-1})=C\times W/1000; \quad (2)$$

式中,C为土壤总氮磷钾单位含量(mg·kg<sup>-1</sup>),W为每桶土壤质量(kg)。

渗滤液中总氮、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、总磷和总钾的淋失量按下式计算:

$$\text{淋失量}/(\text{g}\cdot\text{桶}^{-1})=C\times V/1000; \quad (3)$$

式中,C为渗滤液中总氮、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、总磷或总钾的质量浓度(mg·L<sup>-1</sup>),V为渗滤液收集装置中的渗滤液体积(L)。

渗滤液中有有机态氮(DON)的淋失量按下式计算:

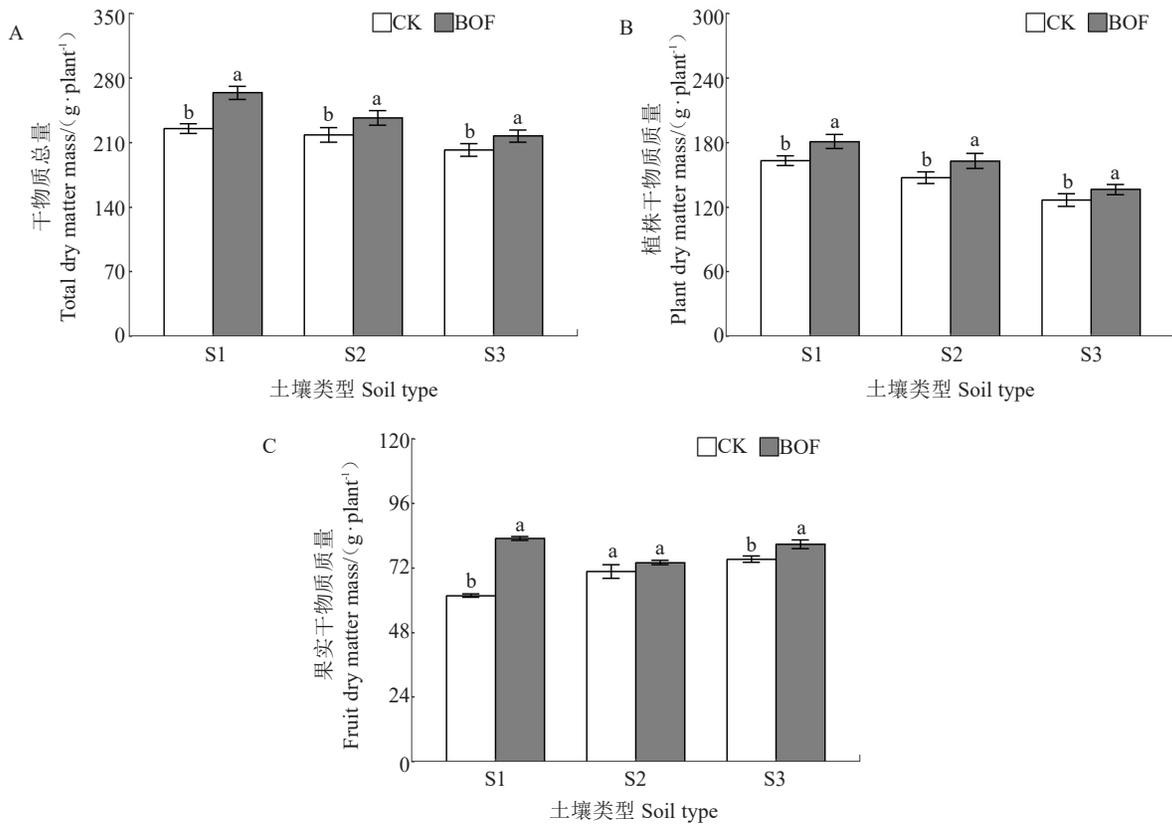
$$\text{DON淋失量}/(\text{g}\cdot\text{桶}^{-1})=\text{总氮淋失量}-\text{NO}_3\text{-N淋失量}-\text{NH}_4\text{-N淋失量}。 \quad (4)$$

采用Excel 2019对数据进行基础处理;采用SPSS 19.0软件对数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA),差异显著性水平为p<0.05;采用R语言(版本4.2.3)的ggplot2包绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 BOF对3种土壤甜瓜干物质质量的影响

由图1可知,不施用生物菌肥的3种土壤甜瓜干物质总量在201.91~224.98 g·株<sup>-1</sup>,大小为S1>S2>S3;施用BOF后,S1、S2和S3甜瓜干物质总量分别显著提高了17.31%、8.55%和7.51%。不施用生物菌肥的3种土壤甜瓜植株干物质质量在126.67~163.31 g·株<sup>-1</sup>,大小为S1>S2>S3;施用BOF后,S1、S2和S3甜瓜植株干物质质量分别显著提高了10.81%、10.38%和7.61%。不施用生物菌肥的3种土壤的甜瓜果实干物质质量在61.67~75.24 g·株<sup>-1</sup>,



注:同一土壤类型不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters in the same soil type indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

图 1 BOF 对 3 种土壤甜瓜干物质总量(A)、植株干物质质量(B)和果实干物质质量(C)的影响

Fig. 1 Effects of BOF on total dry matter mass(A), plant dry matter mass(B), and fruit dry matter mass(C) of cantaloupe in three different soil types

大小为 S3> S2> S1;施用 BOF 后,S1 和 S3 甜瓜果实干物质质量分别显著提高了 34.51%和 7.34%。与不施用生物菌肥相比,BOF 处理提高了 3 种土壤甜瓜干物质总量、甜瓜植株干物质质量和甜瓜果实干物质质量,且在 S1 中施用效果最佳,干物质质量增幅最大。

## 2.2 BOF 对 3 种土壤甜瓜氮磷钾吸收的影响

由图 2 可知,不施用生物菌肥的 3 种土壤的甜瓜总氮含量在 2.16~3.08 g·株<sup>-1</sup>,大小为 S1> S2> S3;施用 BOF 后,S1 和 S2 甜瓜总氮含量与 CK 无显著差异,S3 甜瓜总氮含量比 CK 显著提高了 36.55%。不施用生物菌肥的 3 种土壤的甜瓜总磷含量在 0.15~0.19 g·株<sup>-1</sup>,大小为 S1> S2> S3;施用 BOF 后,S1 甜瓜总磷含量显著降低了 15.95%,S3 甜瓜总磷含量显著提高了 40.12%。不施用生物菌肥的 3 种土壤的甜瓜总钾含量在 4.35~4.85 g·株<sup>-1</sup>,大小为 S3> S2> S1;施用 BOF 后,S1 和 S3 甜瓜总钾含量分别显著提高了 28.16%和 9.65%。与不施用生物菌肥相比,BOF 处理显著提高 S3 甜瓜总氮、总磷和总钾含量及 S1 甜瓜总

钾含量,显著降低 S1 甜瓜总磷含量。

## 2.3 BOF 对 3 种土壤理化性质的影响

由图 3 可知,不施用生物菌肥的 3 种土壤均呈碱性,pH 在 8.96~9.24;施用 BOF 后,S1、S2 和 S3 的 pH 均显著降低,降低幅度分别为 2.42%、1.84%和 2.15%。不施用生物菌肥的 3 种土壤的电导率在 311.67~1 068.00  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,大小为 S2> S1> S3;施用 BOF 后,S1 和 S2 的电导率分别显著降低 37.48%和 38.92%,而 S3 电导率显著提高了 90.27%。不施用生物菌肥的 3 种土壤的速效磷含量在 0.63~0.98 g·桶<sup>-1</sup>,大小为 S2> S3> S1;施用 BOF 后,S1 和 S2 的速效磷含量分别显著降低 14.85%和 9.72%,而 S3 施用 BOF 后速效磷含量显著提高 13.61%。不施用生物菌肥的 3 种土壤的速效钾含量在 3.64~6.91 g·桶<sup>-1</sup>,大小为 S2> S3> S1;施用 BOF 后,S1 和 S2 的速效钾含量分别显著降低 24.49%和 15.18%。与不施用生物菌肥相比,BOF 处理显著降低 S1 和 S2 土壤 pH、电导率及速效磷和速效钾含量;显著降低 S3 土壤 pH,显著提高 S3 电导率和速效磷含量。

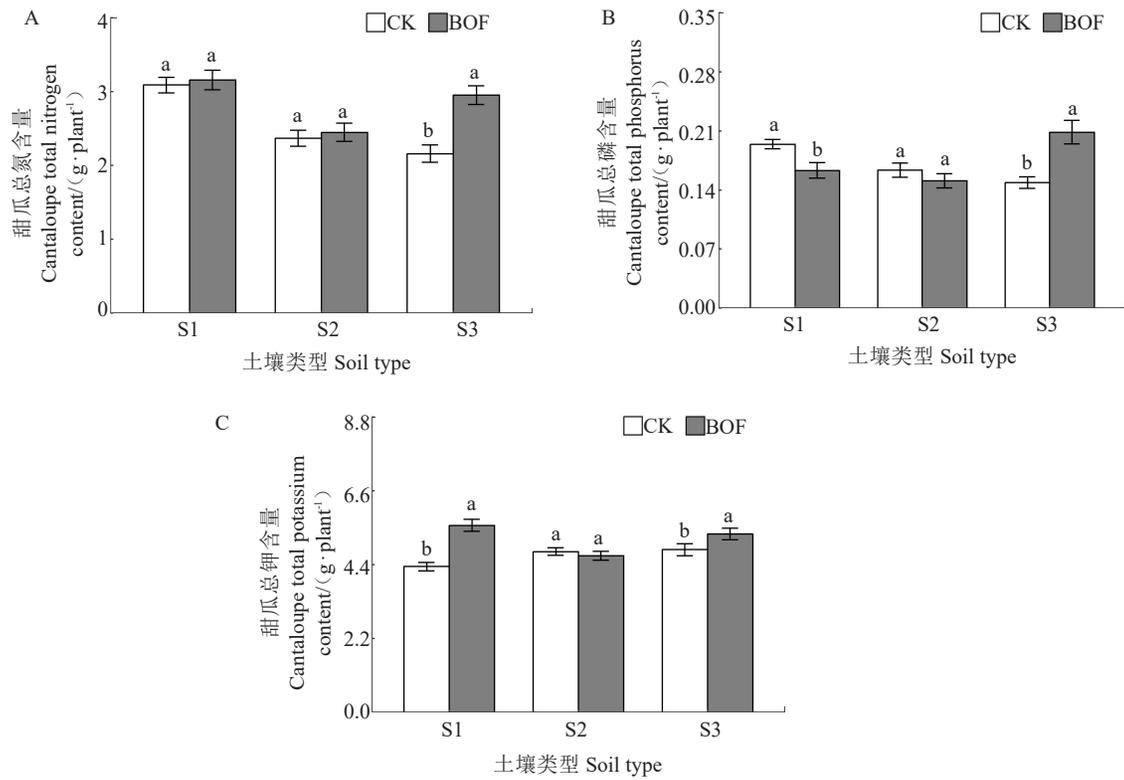


图2 BOF对3种土壤甜瓜总氮(A)、总磷(B)和总钾(C)含量的影响

Fig. 2 Effects of BOF on total nitrogen(A), total phosphorus(B), and total potassium content(C)of cantaloupe in three different soil types

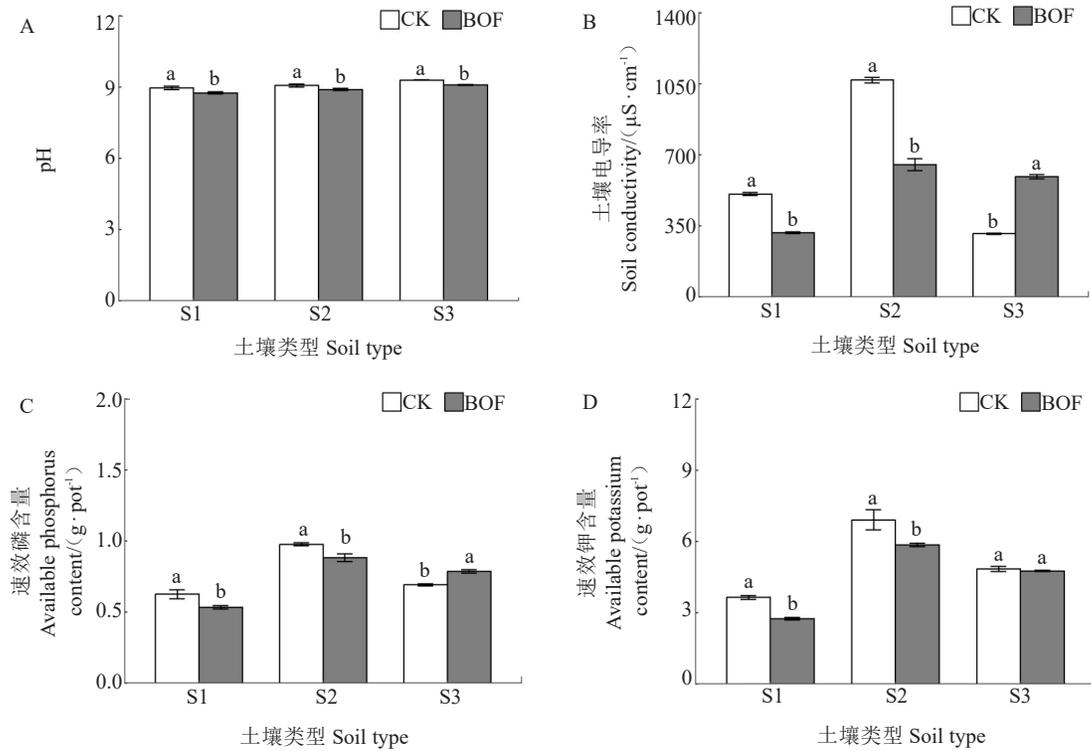


图3 BOF对3种土壤pH(A)、电导率(B)及速效磷(C)和速效钾含量(D)的影响

Fig. 3 Effects of BOF on pH(A), conductivity(B), available phosphorus(C) and available potassium content(D)of three different soil types

### 2.4 BOF对3种土壤氮含量的影响

由图4可知,不施用生物菌肥的3种土壤总氮含量在1.11~2.25 g·桶<sup>-1</sup>,大小为S2>S1>S3;施用BOF后,S1和S2的总氮含量分别显著降低46.15%和26.20%,而S3施用BOF后总氮含量显著提高62.13%。不施用生物菌肥的3种土壤NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量在0.04~0.07 g·桶<sup>-1</sup>,大小为S1>S2>S3;施用BOF后,S1、S2和S3的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量分别显著提高

33.51%、121.32%和96.66%。不施用生物菌肥的3种土壤的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量在0.35~1.38 g·桶<sup>-1</sup>,大小为S2>S1>S3;施用BOF后,S1和S2的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量分别显著降低57.44%和41.09%,而S3施用BOF后NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量显著提高182.56%。与不施用生物菌肥相比,BOF处理显著降低了S1和S2土壤总氮和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量,而S3土壤总氮和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量却显著升高;BOF处理显著提高了3种土壤NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量。

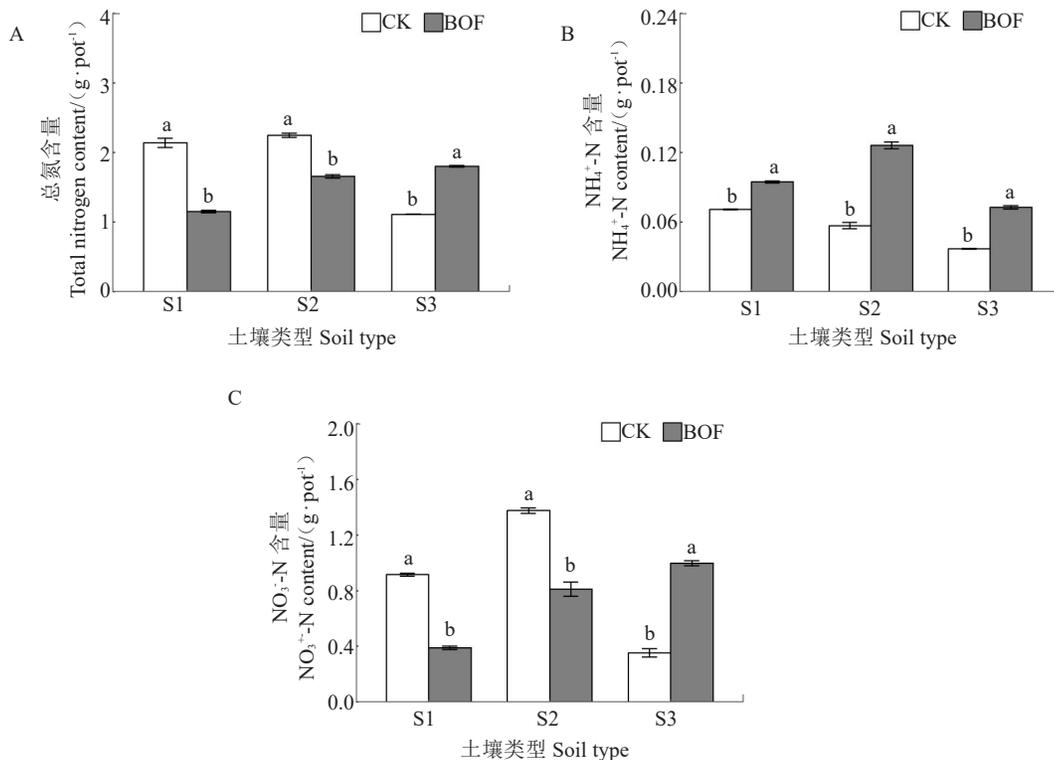


图4 BOF对3种土壤总氮(A)、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N(B)和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N(C)含量的影响

Fig. 4 Effects of BOF on total nitrogen(A), NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N(B), and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N content(C) of three different soil types

### 2.5 BOF对3种土壤渗滤液氮含量的影响

由图5可知,不施用生物菌肥的3种土壤渗滤液总氮含量在0.37~0.46 g·桶<sup>-1</sup>,大小为S3>S2>S1;施用BOF后,S1、S2和S3的渗滤液总氮含量分别显著降低29.50%、36.08%和25.29%。不施用生物菌肥的3种土壤渗滤液NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量在0.01~0.10 g·桶<sup>-1</sup>,大小为S3>S1>S2;施用BOF后,S2的渗滤液NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量显著提高174.52%;S3的渗滤液NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量显著降低58.91%。不施用生物菌肥的3种土壤的渗滤液NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量在0.32~0.39 g·桶<sup>-1</sup>,大小为S2>S3>S1;施用BOF后,S1、S2和S3的渗滤液NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量分别显著降低29.28%、40.90%和15.18%。不施用生物菌肥条件下,S1、S2和S3渗滤液DON占比依次逐渐减小,渗滤液NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量

占比为S3>S1>S2,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量占比为S2>S1>S3。施用BOF后,S1渗滤液DON占比减小,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量占比增大,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量占比基本保持不变;S2渗滤液DON占比稍有增大,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量占比增大,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量占比减小;S3渗滤液DON占比基本保持不变,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N占比减小,渗滤液NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N占比增大。与不施用生物菌肥相比,BOF处理可显著降低3种土壤渗滤液总氮和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量;BOF处理对3种类型土壤NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量的影响存在差异,S1无明显变化,S2显著提高,S3显著降低。

### 2.6 BOF对3种土壤渗滤液磷钾含量的影响

由图6可知,不施用生物菌肥的3种土壤渗滤液总磷含量在0.05~0.09 g·桶<sup>-1</sup>,大小为S1>S2>S3;施用BOF后,S1、S2和S3的渗滤液总磷含量分

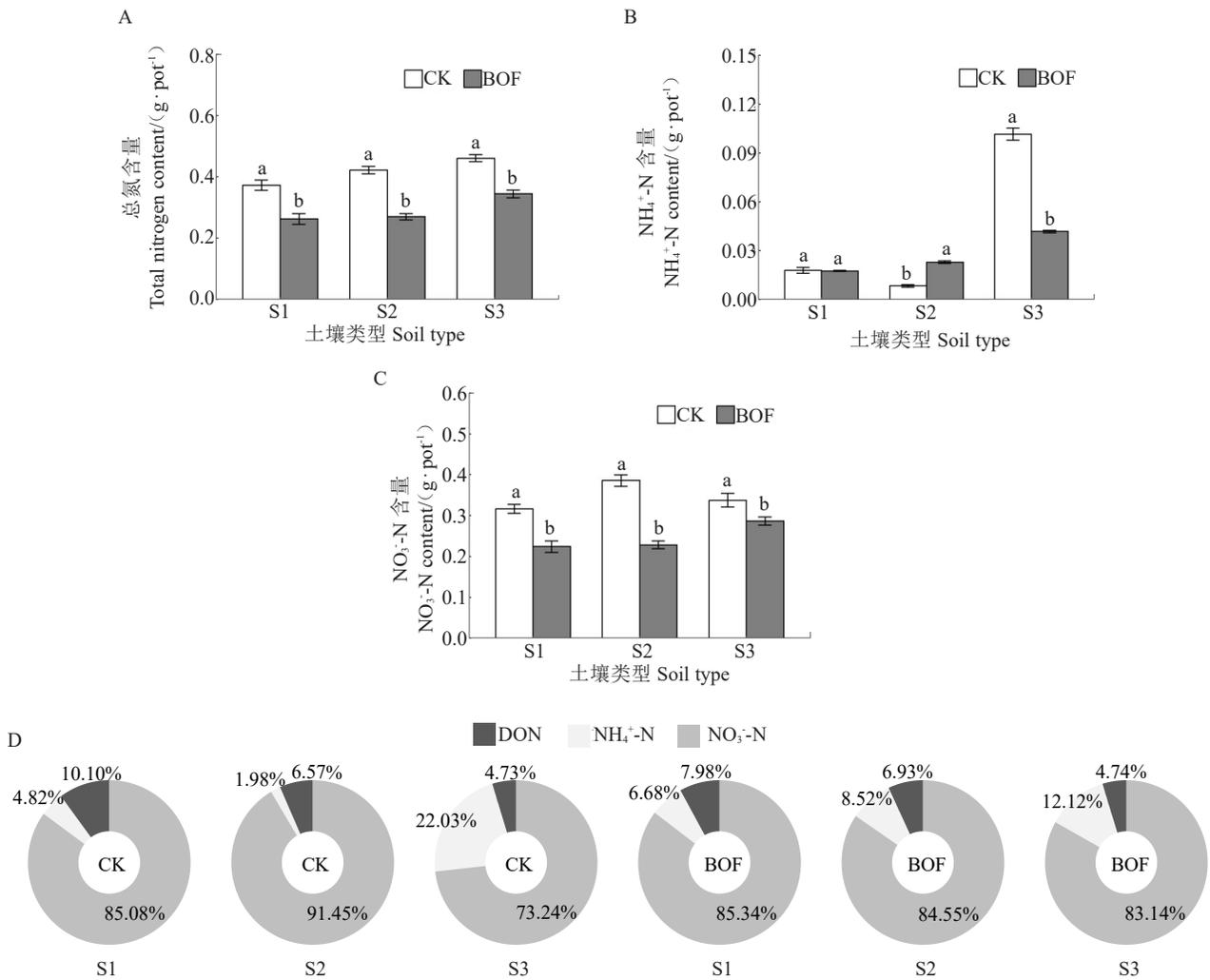


图5 BOF对3种土壤渗液总氮(A)、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N(B)、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N(C)含量和不同形态氮素比例(D)的影响

Fig. 5 Effects of BOF on total nitrogen(A), NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N(B), NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N content(C), and different forms of nitrogen ratios(D) in three types of soil leachates

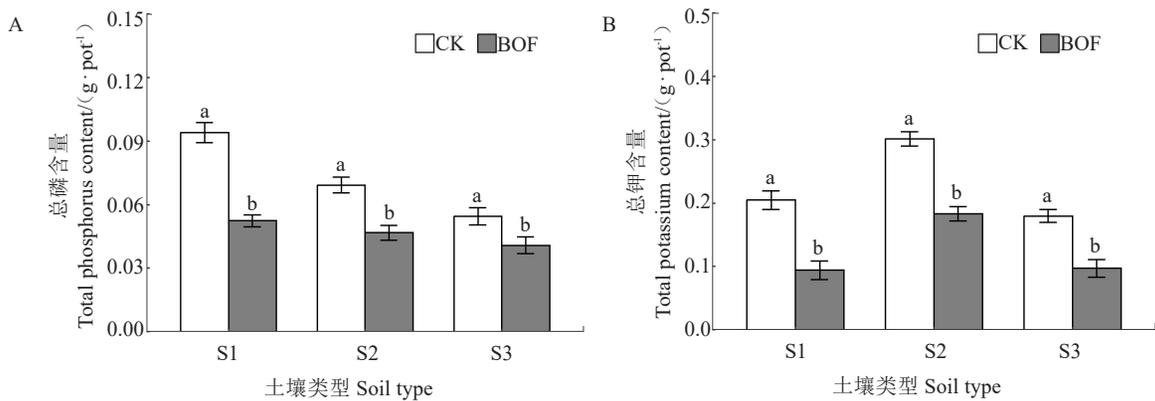


图6 BOF对3类土壤渗液总磷(A)和总钾含量(B)的影响

Fig. 6 Effects of BOF on total phosphorus(A) and total potassium content(B) in three types of soil leachates

别显著降低 44.33%、32.55%和 25.15%。不施用生物菌肥的3种土壤渗液总钾含量在 0.18~0.30 g·桶<sup>-1</sup>, 大小为 S2> S1> S3;施用 BOF 后,S1、S2 和 S3 的渗

漏液总钾含量分别显著降低 54.02%、39.23%和 46.01%。由此可见,与不施用生物菌肥相比,BOF 处理可显著降低 3 种土壤渗液总磷和总钾含量。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 BOF 影响作物生长和氮磷钾吸收

枯草芽孢杆菌生物菌肥可促进甜瓜植株和果实干物质积累,这与 Sun 等<sup>[18]</sup>研究的枯草芽孢杆菌菌肥能提高水稻产量的结果相似。植物体氮磷钾积累量可以评估作物生长状况,作物氮磷钾的吸收量增大,特别是在生殖器官中,可以提高作物产量;作物吸收元素的比例影响作物产量和品质,而大多数研究考虑了氮磷钾的单一元素,忽略了不同营养素之间的相互作用<sup>[23]</sup>。Song 等<sup>[24]</sup>研究表明,配施氮磷钾肥影响甜瓜产量和品质。不同类型土壤中有效元素含量的差异也是影响作物产量和品质的因素之一,且直接影响作物对营养元素的积累。本研究结果表明,S3 处理的甜瓜氮和磷元素积累量与相应土壤元素含量呈正相关,而 S1 和 S2 处理的甜瓜氮和钾元素积累量与相应土壤元素含量并未呈现相关性,这可能与不同土壤特性影响作物生长和调控作物元素迁移有关<sup>[25]</sup>。

#### 3.2 BOF 影响土壤理化性质

土壤肥力是由土壤有机碳、pH、植物所需的大量微量元素、微生物种群、土壤酶等多种因素决定的,已有大量研究表明,添加 BOF 可通过改善土壤性质来实现作物增产提质<sup>[26]</sup>。本研究结果表明,与不施用生物菌肥相比,BOF 可显著降低 3 种碱性土壤的 pH 及 S1 和 S2 的土壤电导率,显著提高 S3 的土壤电导率,因此 BOF 改善土壤的 pH 趋于中性并调节电导率在较稳定范围,这与 Yang 等<sup>[27]</sup>利用 BOF 改良尾矿土壤的结果相似。BOF 中含有有机质成分,有机质在改善土壤理化性质方面发挥巨大作用,同时 BOF 还显著降低了 S1 和 S2 土壤速效磷和速效钾含量,显著提高了黏土 S3 土壤速效磷含量,这与 Silva 等<sup>[28]</sup>的研究结果相似。施用 BOF 后一方面改善了土壤结构,另一方面由于生物菌群的改变引起相关土壤酶活性变化促使土壤肥力改变<sup>[26]</sup>。土壤氮素受土壤微生物调控,土壤氮素循环中固氮作用、氨化作用、硝化作用和反硝化作用均受土壤微生物的影响。添加 BOF 后土壤 S1 和 S2 的总氮、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量显著降低,而 S3 的总氮、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量显著提高,这可能是由土壤透气性决定的,BOF 的施用使土壤结构和透气性发生改变,致使土壤 S1 和 S2 的硝化作用减弱,S3 的硝化作用增强。施用 BOF 使 3 种土壤的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量显著提高,可能是 BOF 促使有机态氮经过氨化作用转化成

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N<sup>[29]</sup>,同时 BOF 降低氨氧化作用中的氨氧化细菌基因丰度,使土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 逐渐积累<sup>[18]</sup>。

#### 3.3 BOF 影响渗漏液氮磷钾含量

土壤渗透主要取决于土壤团聚体膨胀时对孔隙的堵塞程度,同时土壤团聚体的形成也与土壤保肥能力有关<sup>[30]</sup>。施用 BOF 后 3 种土壤渗漏液的总氮和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量均显著降低,S3 渗漏液的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量也显著降低,这表明 BOF 可在一定程度上缓解灌溉中土壤氮素淋失<sup>[18]</sup>。施用 BOF 后 S2 渗漏液的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量显著升高,这可能是土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量增加,而砂土对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 吸附能力弱导致的<sup>[31]</sup>。施用 BOF 后 S3 黏土氮素淋失降低可能与 BOF 中有有机质对土壤的影响有关,Fan 等<sup>[32]</sup>在黏性潮土中施用有机肥,较对照降低了 39%的氮素淋失,说明有机质在降低黏性土氮素淋失方面发挥重要作用。渗漏液中土壤氮素形态以 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 为主,均在 73% 以上,渗漏液在土壤中逐渐下渗或污染地下水,或下渗后因含氧量降低,促使 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 进行反硝化作用生成 N<sub>2</sub>O 和 N<sub>2</sub> 向空气外溢,造成资源浪费。此外,土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失还驱动土壤中钙和镁的淋失,造成资源进一步浪费<sup>[33]</sup>。

土壤中淋失的磷来自施用的肥料或土壤吸附遇水解吸的磷<sup>[34]</sup>。磷的淋溶损失不仅降低了土壤肥力,淋溶液还会导致水体富营养化。不同质地土壤磷淋失程度也存在差异,这与土壤中溶解态磷含量和土壤对磷的吸附能力有关<sup>[35]</sup>。钾淋溶主要取决于土壤的颗粒组成、土壤吸附的阳离子组成以及有机物质的转移<sup>[36]</sup>。本研究表明,不施用生物菌肥的渗漏液总磷含量为 S1>S2>S3,施用 BOF 后 3 种土壤渗漏液总磷含量均显著降低,说明 BOF 改善土壤结构,增强了土壤对溶解态磷的吸附作用,降低土壤磷的淋溶损失。不施用生物菌肥的渗漏液总钾含量为 S2>S1>S3,这与土壤中粉粒占比有关,土壤粉粒占比越大对钾的吸附作用越强<sup>[37]</sup>;施用 BOF 后 3 种土壤渗漏液总钾含量均显著降低,与 BOF 改变土壤结构粒径和增强土壤吸附能力有关。

#### 3.4 BOF 调节土壤-渗漏液-植株

BOF 是化肥的一种安全有效的替代品,不仅为植物生长提供营养,提高产量,还改善土壤生态环境<sup>[13]</sup>。长期施用 BOF 具有提高土壤肥力、促进植物生长、提供植物所需的微量元素、改善土壤微生物的结构及丰度、刺激植物生长激素的分泌和抵消化学肥料的负面影响等作用<sup>[15]</sup>。此外,BOF 的施用明显缓解了水稻田氮素淋失<sup>[18]</sup>。由此可见,BOF 的施

入对土壤-渗滤液-植株的影响是多方面的。BOF 对土壤营养元素淋失的研究表明,BOF 可缓解土壤淋溶,其原因可能是土壤微生物变化和功能基因调控营养元素促进了作物生长<sup>[18]</sup>。BOF 改善土壤结构对缓解土壤淋溶也起到一定的作用。本研究表明,施用 BOF 后 3 种土壤渗滤液的氮磷钾淋失量均显著降低,然而甜瓜氮磷钾积累量并未呈现统一的增长趋势,因此 BOF 缓解土壤淋溶的原因是多方面的,一方面影响土壤理化性质,通过改善土壤肥力和微生物群落结构,缓解营养元素的下渗淋失;另一方面 BOF 与植物根系分泌物协作,改善了根际对土壤养分的固持和吸收利用<sup>[38]</sup>,减小养分淋失量。

综上所述,与不施用生物菌肥相比,施用 BOF 显著提高 3 种土壤甜瓜干物质总量和 S3 的甜瓜总氮磷钾含量;显著降低了 3 种土壤的 pH 及渗滤液总氮、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、总磷和总钾含量;同时显著降低了 S1 和 S2 的土壤电导率以及速效磷、速效钾、总氮和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量,显著提高了 S1、S2、S3 的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量、S3 的土壤电导率以及速效磷、总氮、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量。因此,施用 BOF 不仅可以促进甜瓜生长和养分积累,还可改善土壤性质,降低因灌溉引起的养分淋失量。

### 参考文献

- [1] 毛亮,周成松,潘卫萍,等.新疆西瓜甜瓜产业发展现状及对策建议[J].中国瓜菜,2024,37(6):195-201.
- [2] 林佳佳,张文静,韦丹妮,等.不同灌溉量对粗网纹甜瓜光合特性、产量和品质的影响[J].中国瓜菜,2024,37(3):63-70.
- [3] YAN M, PAN G X, LAVALLEE J M, et al. Rethinking sources of nitrogen to cereal crops[J]. Global Change Biology, 2019, 26(1):191-199.
- [4] HUANG T, JU X T, YANG H. Nitrate leaching in a winter wheat-summer maize rotation on a calcareous soil as affected by nitrogen and straw management[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1):42247.
- [5] ORTIZ C, PIEROTTI S, MOLINA M G, et al. Soil fertility and phosphorus leaching in irrigated calcareous soils of the mediterranean region[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2023, 195(11):1376.
- [6] HUDDLELL A, ERNFORS M, CREWS T, et al. Nitrate leaching losses and the fate of <sup>15</sup>N fertilizer in perennial intermediate wheatgrass and annual wheat: A field study[J]. Science of the Total Environment, 2023, 857:159255.
- [7] GATIBONI L, BRUNETTO G, PAVINATO P S, et al. Editorial: Legacy phosphorus in agriculture: Role of past management and perspectives for the future[J]. Frontiers in Earth Science, 2020, 8:619935.
- [8] HAN T F, HUANG J, LIU K L, et al. Soil potassium regulation by changes in potassium balance and iron and aluminum oxides in paddy soils subjected to long-term fertilization regimes[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 214:105168.
- [9] HUANG J, DUAN Y H, XU M G, et al. Nitrogen mobility, ammonia volatilization, and estimated leaching loss from long-term manure incorporation in red soil[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(9):2082-2092.
- [10] NGUYEN B T, PHAN B T, NGUYEN T X, et al. Contrastive nutrient leaching from two differently textured paddy soils as influenced by biochar addition[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 20(1):297-307.
- [11] BOHARA H, DODLA S, WANG J J, et al. Influence of poultry litter and biochar on soil water dynamics and nutrient leaching from a very fine sandy loam soil[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 189:44-51.
- [12] DUFFKOVÁ R, FUČÍK P, JURKOVSKÁ L, et al. Experimental evaluation of the potential of arbuscular mycorrhiza to modify nutrient leaching in three arable soils located on one slope[J]. Applied Soil Ecology, 2019, 143:116-125.
- [13] MOLINA-SANTIAGO C, PEARSON J R, NAVARRO Y, et al. The extracellular matrix protects *Bacillus subtilis* colonies from *Pseudomonas* invasion and modulates plant co-colonization[J]. Nature Communications, 2019, 10(1):1919.
- [14] XIA H J, LIU H G, GONG P, et al. Study of the mechanism by which *Bacillus subtilis* improves the soil bacterial community environment in severely saline-alkali cotton fields[J]. Science of the Total Environment, 2025, 958:178000.
- [15] TAHIR H A S, GU Q, WU H J, et al. Plant growth promotion by volatile organic compounds produced by *Bacillus subtilis* SYST2[J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8:171.
- [16] CHEN P, ZHANG J L, LI M, et al. Synergistic effect of *Bacillus subtilis* and *Paecilomyces lilacinus* in alleviating soil degradation and improving watermelon yield[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 13:1101975.
- [17] NG C W W, YAN W H, TSIM K W K, et al. Effects of *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas fluorescens* as the soil amendment[J]. Heliyon, 2022, 8(11):e11674.
- [18] SUN B, GU L K, BAO L J, et al. Application of biofertilizer containing *Bacillus subtilis* reduced the nitrogen loss in agricultural soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 148:107911.
- [19] ARAUJO F F, BONIFACIO A, BAVARESCO L G, et al. *Bacillus subtilis* changes the root architecture of soybean grown on nutrient-poor substrate[J]. Rhizosphere, 2021, 18:100348-100352.
- [20] MORENO-LORA A, RECENA R, DELGADO A. *Bacillus subtilis* QST713 and cellulose amendment enhance phosphorus uptake while improving zinc biofortification in wheat[J]. Applied Soil Ecology, 2019, 142:81-89.
- [21] DA COSTA S D A, CARDOSO A F, DE CASTRO G L S, et al. Co-inoculation of *Trichoderma asperellum* with *Bacillus subtilis* to promote growth and nutrient absorption in marandu grass[J]. Applied and Environmental Soil Science, 2022:3228594.
- [22] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.

- [23] CHEN Y, WEN M, MA X H, et al. Variation of nitrogen, phosphorus, and potassium contents in drip-irrigated cotton at different yield levels under combined effects of nitrogen, phosphorus and potassium[J]. *Agronomy*, 2024, 14(3):503.
- [24] SONG S W, LEHNE P, LE J G, et al. Yield, fruit quality and nitrogen uptake of organically and conventionally grown muskmelon with different inputs of nitrogen, phosphorus, and potassium[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2009, 33(1):130-141.
- [25] ARUANI M C, REEB P D, BARNES N E. Influence of soil properties on yield and fruit maturity at harvest of Williams pear[J]. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2014, 74(4):460-467.
- [26] MAHAPATRA S, YADAV R, RAMAKRISHNA W. *Bacillus subtilis* impact on plant growth, soil health and environment: Dr. Jekyll and Mr. Hyde[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2022, 132(5):3543-3562.
- [27] YANG J Q, OUYANG L N, CHEN S X, et al. Amendments affect the community assembly and co-occurrence network of microorganisms in Cd and Pb tailings of the *Eucalyptus camaldulensis* rhizosphere[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 930:172365.
- [28] SILVA P H V, SOUZA A G V, DE ARAUJO L D, et al. *Trichoderma harzianum* and *Bacillus subtilis* in association with rock powder for the initial development of maize plants[J]. *Agronomy*, 2023, 13(3):872.
- [29] HOCHROTH A, PFISTER C A. Ammonification by kelp associated microbes increases ammonium availability[J]. *PLoS One*, 2024, 19(3):e296622.
- [30] ZHAO W J, HU J Z, CUI Z, et al. Effects of superabsorbent polymers on the vertical infiltration of soil water with sand mulching[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(23):648.
- [31] KAVYA S R, RANI B, APARNA B, et al. Ammoniacal and nitrate nitrogen release pattern from biochar and biochar blended urea fertilizers in sandy soil[J]. *International Journal of Environment and Climate Change*, 2023, 13(8):617-625.
- [32] FAN J L, XIAO J, LIU D Y, et al. Effect of application of dairy manure, effluent and inorganic fertilizer on nitrogen leaching in clayey fluvo-aquic soil: A lysimeter study[J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 592:206-214.
- [33] ZHOU W W, WANG Q Y, CHEN S, et al. Nitrate leaching is the main driving factor of soil calcium and magnesium leaching loss in intensive plastic-shed vegetable production systems[J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 293:108708.
- [34] LIU J, ARONSSON H, ULÉN B, et al. Potential phosphorus leaching from sandy topsoils with different fertilizer histories before and after application of pig slurry[J]. *Soil Use and Management*, 2012, 28(4):457-467.
- [35] LIU J, SÆVARSSON H T, BECHMANN M, et al. Chemical processes and prediction of dissolved phosphorus leaching in mineral and organic soils[J]. *Geoderma*, 2024, 445:116890.
- [36] YAKOVLEVA L V, DANILOV D A, NIKOLAEVA E A. Effect of mineral and organic fertilizers on potassium leaching in sandy loam soils[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 828(1):012032.
- [37] HAN H W, CHEN T T, LIU C, et al. Effects of acid modified biochar on potassium uptake, leaching and balance in an alternate wetting and drying paddy ecosystem[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 900:166344.
- [38] LU J H, LIU Y X, ZOU X X, et al. Rotational strip peanut/cotton intercropping improves agricultural production through modulating plant growth, root exudates, and soil microbial communities[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 359:108767.