

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2025.0486

不同改良措施对生菜产量、品质及土壤理化性质的影响

陈俊超¹, 张玲玉¹, 张翠英², 张树明³, 李贺静³, 韩捷³, 张建恒¹, 崔江慧¹(1. 河北农业大学 河北保定 071000; 2. 滦南县农业农村局 河北滦南 063500;
3. 唐山市耕地质量保护中心 河北唐山 063000)

摘要:为探明在次生盐渍化土壤条件下不同改良措施对生菜施用的效果,笔者调查了农民习惯施肥(T1, CK)、T1+土壤调理剂(T2)、T1+功能肥(T3)、T1+微藻肥(T4)、T1+生物炭肥(T5)等5个处理对生菜产量、品质及土壤理化性质和微生物多样性的影响。结果表明, T2处理的产量和维生素C含量最高,较T1处理分别显著提高10.69%和31.46%; T5处理的株高最高,比T1处理显著增加9.56%。在0~20 cm土层,与T1处理相比,其他4个处理的土壤pH呈下降趋势,显著提高了土壤养分含量;盐分离子中阴离子以 SO_4^{2-} 为主,阳离子以 Ca^{2+} 为主; T2、T3、T4处理使芽单胞菌门(Gemmatimonadota)、浮霉菌门(Planctomycetota)、骸骨细菌门(Patescibacteria)、拟杆菌门(Bacteroidota)、放线菌门(Actinobacteriota)和变形菌门(Proteobacteria)的群落相对丰度增加,其中T2和T3处理的效果最显著; T2处理显著提高土壤细菌数量及有机质和有效磷含量。通过隶属函数法对产量、品质、土壤理化性质和微生物多样性进行综合评价, T2处理的综合得分最高。综上,增施土壤调理剂是保障在次生盐渍化土壤条件下生菜高产优质生产及菜地土壤健康的有效措施,可在当地推广应用。

关键词:生菜;产量;品质;土壤性质;细菌多样性;隶属函数

中图分类号: S636.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-2871(2026)04-176-09

Effects of different improvement measures on yield, quality of lettuce and physicochemical property of soil

CHEN Junchao¹, ZHANG Lingyu¹, ZHANG Cuiying², ZHANG Shuming³, LI Hejing³, HAN Jie³, ZHANG Jianheng¹, CUI Jianghui¹

(1. Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China; 2. Luannan Agriculture and Rural Affairs Bureau, Luannan 063500, Hebei, China; 3. Tangshan Cultivated Land Quality Protection Center, Tangshan 063000, Hebei, China)

Abstract: To investigate the effects of different improvement measures on lettuce cultivation in secondary salinized soil, the author surveyed five treatments: Conventional fertilization (T1), T1+soil conditioner (T2), T1+functional fertilizer (T3), T1+microalgae fertilizer (T4), and T1+biochar fertilizer (T5). The study examined their impact on lettuce yield, quality, soil physicochemical properties, and microbial diversity. The results showed that the T2 treatment achieved the highest yield and vitamin C content, significantly increasing by 10.69% and 31.46%, respectively, compared to the T1 treatment. The T5 treatment resulted in the tallest plant height, significantly increasing by 9.56% compared to T1. In the 0-20 cm soil layer, compared with T1, the other four treatments exhibited a decreasing trend in soil pH and significantly increased soil nutrient content. Among salt ions, SO_4^{2-} was the dominant anion, and Ca^{2+} was the dominant cation. The T2, T3, and T4 treatments increased the relative abundance of bacterial communities such as Gemmatimonadota, Planctomycetota, Patescibacteria, Bacteroidota, Actinobacteriota, and Proteobacteria, with T2 and T3 showing the most significant effects. The T2 treatment significantly increased soil bacterial count, organic matter content, and available phosphorus content. A comprehensive evaluation of yield, quality, soil physicochemical properties, and microbial diversity using the membership function method revealed that the T2 treatment had the highest comprehensive score. In conclusion, applying

收稿日期: 2025-07-08; 修回日期: 2025-10-12

基金项目: 河北省现代农业产业技术体系露地蔬菜创新团队坝上蔬菜节水综合提升岗(HBCT2025140204); 河北省耕地退化治理项目(20220826)

作者简介: 陈俊超,男,在读硕士研究生,主要从事作物生产与利用研究。E-mail: 414879817@qq.com

通信作者: 崔江慧,女,正高级实验师,主要从事作物生产潜力及新品种开发研究。E-mail: cjianghui521@126.com

soil conditioner is an effective measure to ensure high yield and quality of lettuce in secondary salinized soil and maintain soil health in vegetable fields, making it suitable for local.

Key words: Lettuce; Yield; Quality; Soil property; Bacterial diversity; Membership function

蔬菜为我国仅次于粮食的第二大农作物,是人民群众菜篮子中不可缺少的部分。中国是世界上最大的蔬菜生产国,2021年我国蔬菜种植面积2 133.3万 hm^2 ,产量达7.5亿t,占世界总产量的50%以上^[1]。生菜为人们最喜爱的叶菜类蔬菜之一,其中的叶绿素、维生素C和硝酸盐含量会对生菜的口感和商品价值产生影响^[2]。随着消费者对鲜食生菜需求量增多,生菜的种植面积逐渐加大,多数菜农通过增加化肥投入量来提高产量,致使土壤肥力下降,生菜品质也受到影响,因此,提高生菜产量和品质对丰富餐桌饮食和提高人们生活质量具有重要作用,也是提高农业综合生产能力的必然要求^[3-4]。

不同改良措施对生菜的根、茎、叶形态建立和功能及产量、品质等有不同影响,且对维持土壤微生物菌群的平衡有重要作用。在我国农业生产过程中,常出现肥料施用不合理引发的一系列问题,如土壤板结、土壤盐渍化,同时土壤微生物群落也会受到影响,最终严重影响生菜的产量和品质^[5]。因此,科学施肥不仅能够及时调节土壤养分,提供植物所需营养,促进植物生长,还有利于促进植株代谢物的合成和累积,进而提高经济效益。科学施肥是增产优质、改善土壤环境的最有利措施,施肥后使土壤富含有机质、腐殖酸等天然泥炭或其他有机物,辅以生物活性成分及营养元素组成,可以改善土壤团粒结构、减少水肥流失、增加土壤总孔隙度,还可增加土壤细菌含量^[6-9]。有机肥与常规化肥配施的效果优于单独施用。张涛等^[10]研究表明,随着化肥减量配施有机肥比例的增大,土壤(0~20 cm)全氮和有效磷含量呈上升趋势,化肥配施有机肥提高了作物根系土壤细菌和放线菌数量,降低了真菌数量。曾子凡等^[11]研究发现,有机肥替代化肥显著优化了土壤物理性状,在提升土壤养分含量的同时显著减缓了土壤酸化和盐渍化,并显著提高了微生物群落的物种丰度、有益微生物占比以及土壤酶活性,使土壤微生态系统稳定性显著提高。也有研究发现,在生菜^[12]、辣椒^[13]、黄瓜^[14]等作物上增施土壤调理剂、生物炭肥、微藻肥等对产量、品质及土壤养分含量等会产生有益影响。采用营养物质含量不同的改良措施可不同程度地提高作物产量,改善土

壤理化性状,激发土壤微生物活性,因此,筛选出最优改良措施及最佳替代化肥的比例,对发展现代农业和保证生菜产业的可持续发展具有重要意义^[15-16]。鉴于此,笔者通过采用5种不同种类的改良措施,研究在农民习惯施肥的基础上增施调理剂、功能肥、微藻肥和生物炭肥等肥料对生菜产量、品质及土壤理化性质的影响,以期为河北省生菜产业的发展提供技术指导。

1 材料与方方法

1.1 材料

试验于2022年9—12月在河北省唐山市滦南县姚王庄镇李营村的试验地进行。供试生菜品种为绿波,由滦南县河清蔬菜种植专业合作社提供。供试土壤为潮土,轻度次生盐渍化,pH=7.55,EC值 $1.76 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,有机质含量(w,后同) $13.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量 $1.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮含量 $105.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷含量 $98.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $125 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,缓效钾含量 $660 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,水溶性盐总量 $1.90 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

供试肥料:湖北群磊肥业有限公司提供的复合肥(N-P₂O₅-K₂O=17-17-17)、上海文鑫生物科技有限公司提供的土壤调理剂[有机质总量 $\geq 85\%$,有机质含量 $\geq 75\%$,易氧化有机质含量 $\geq 20\%$,有效复合活菌数 $\geq 2 \text{ 亿} \cdot \text{g}^{-1}$, (钙+镁+铁+锰+锌+碘)含量 $\geq 400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH ≥ 7.5]、河北省硅谷肥业有限公司提供的功能肥[有机质含量 $\geq 45\%$,活性硅含量 $\geq 3\%$,黄腐酸含量 $\geq 1\%$, (氮+磷+钾)含量 $\geq 15\%$, pH=6.5~7.5]、河北八度生物科技有限公司提供的生物炭肥[有机质含量 $\geq 35\%$,有效活菌数量 $\geq 2 \text{ 亿} \cdot \text{g}^{-1}$,有机碳含量 $\geq 15\%$, (氮+磷+钾)含量 $\geq 12\%$, pH=7.5~8.5]、阿尔格河北生命科学有限公司提供的微藻肥[有机质含量 $\geq 30\%$,单细胞藻体数量 $\geq 100 \text{ 万个}$, (氮+磷+钾)含量 $\geq 2\%$, pH=6.5~8.0]。

1.2 方法

本试验共设5个处理:农民习惯施肥(T1, CK)、农民习惯施肥+土壤调理剂(T2)、农民习惯施肥+功能肥(T3)、农民习惯施肥+微藻肥(T4)和农民习惯施肥+生物炭肥(T5),根据往年产量结合当年测土后的土壤肥力情况确定各肥料的最佳施用量。各处理按照随机区组排列,小区面积 25 m^2 ,3

次重复,密度为 57 000 株·hm²。

设施生菜种植前将各处理的肥料称好撒施地表后进行翻耕 20~30 cm,栽培管理措施按照农民习惯进行,每个处理生长期浇水 3 次,每次随水追施复合肥 10 kg(N-P₂O₅-K₂O=17-17-17)。各处理的底肥施用量详情见表 1。

表 1 各处理的底肥施用量

Table 1 Base fertilizer application amount for different treatments

处理 Treat- ment	复合肥 Compound fertilizer/ (kg·hm ⁻²)	土壤调理剂 Soil conditioner/ (kg·hm ⁻²)	功能肥 Functional fertilizer/ (kg·hm ⁻²)	微藻肥 Microalgal fertilizer/ (mL·hm ⁻²)	生物炭 Biochar/ (kg·hm ⁻²)
T1(CK)	360				
T2	360	3000			
T3	360		1125		
T4	360			7500	
T5	360				1800

1.3 测定指标与方法

1.3.1 设施生菜产量测定 于收获期各小区分别取 3 个样点,每个样点取 1 m²(1 m×1 m)称质量测产,按照采样面积折算产量。

1.3.2 收获期形态指标及品质测定 于收获期每个小区选取长势一致具有代表性的 3 个样点,用精度 1 mm 的钢卷尺测量生菜从地面至生长点的距离即为株高。每个样点测定 5 株,取均值。

于收获后测定每个处理设施生菜的硝酸盐和维生素 C 含量。各小区处理取 3 个样点,每个样点取样 5 株,采用分光光度计测定硝酸盐含量^[17],采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法测定维生素 C 含量^[18]。

1.3.3 土壤样品测定 土壤理化性质测定:于种植前和收获期按“S”形取样法,采集 15 个样点 0~20 cm 土壤样品,每个处理各小区采 5 个点土壤混成 1 个样本,3 次重复,将采集的土壤样品置于室内自然风干,研磨后过 10 和 100 目筛,置于 4 °C 以下保存,用于测定土壤理化性质。采用电位法测定 pH,采用外加热容量法测定有机质含量(OM),采用全自动凯氏定氮仪-H₂SO₄-H₂O₂消煮法测定全氮含量(TN),采用 0.5 mol·L⁻¹NaHCO₃法测定有效磷含量(AP),采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定速效钾含量(AK),采用电导法测定水溶性盐含量(TSS),采用热 HNO₃ 浸提火焰光度法测定缓效钾含量(SAP),采用火焰光度法测定 K⁺和 Na⁺含量,采用 EDTA 容量法测定 Ca²⁺和 Mg²⁺含量,采用硝酸银滴定法测定 Cl⁻含量,采用硫酸钡比浊法测定 SO₄²⁻含量,采用双指示剂滴定法测定 CO₃²⁻和 HCO₃⁻含

量^[19]。各处理测定 3 次重复,取平均值。

土壤微生物样品采集和测定:各处理实施 30 d,各小区随机选取 5 点土样混样,3 次重复。将样品收集于无菌自封袋中,放入冰盒尽快运回实验室,置于-80 °C 保存。使用美吉生物科技有限公司的 Illumina Miseq 平台进行测序,采用双末端测序法对细菌的 16S rDNA 基因的 V3-V4 区进行扩增及测序。通过对 Reads 拼接过滤,将 97%相似水平下的序列分成不同的操作分类单元(OTUs),并进行物种注释、丰度分析及微生物多样性分析^[20]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010、SPSS 22.0 软件进行数据处理与统计分析,利用 Duncan 法进行各处理差异显著性检验(P<0.05),采用 Origin 2022 软件制作图表,运用 mothur 软件进行样本微生物多样性分析,采用 chao1 算法对样本中所含 OTUs 数目指数进行估算,用以测定物种丰富度,采用 R 语言进行冗余分析(RDA)并作图。采用隶属函数法进行多指标综合评价: $U(X_i)=(X_i-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$,其中 X_i为测定值,X_{max}和 X_{min}为所有处理中某一指标的最大值和最小值。对于与正效应呈负相关的指标(如 pH、硝酸盐含量),采用反隶属函数计算: $U(X_i)=1-(X_i-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$ 。各指标权重采用主成分分析贡献率确定,加权计算各处理的综合隶属函数值。

2 结果与分析

2.1 不同改良措施对土壤理化性质的影响

由表 2 可以看出,不同处理使土壤理化性质发生变化。T2~T5 处理与 T1 处理相比,土壤 pH 均显著降低,可能由于改良剂中有机质分解产生有机酸、离子交换作用等因素共同影响,其中,T3 和 T5 处理土壤 pH 最低,均较 T1 处理显著降低 1.83%;T2 处理的土壤有机质含量显著高于其他处理,其次是 T5 处理,二者较 T1 处理分别显著提高 9.09%和 7.03%;T3 处理的土壤全氮含量显著高于其他处理,较 T1 处理显著提高 4.07%;T2 和 T3 处理的有效磷含量较 T1 处理分别显著提高 2.83%和 1.95%;各处理之间的速效钾含量和水溶性盐总量差异均不显著;各处理土壤缓效钾含量均高于 T1 处理,其中 T3 处理最高,较 T1 处理显著提高 3.40%。综合以上数据,T2 和 T3 处理对土壤理化性状的改善效果最佳。

由表 3 可知,在不同处理下,土壤中各离子含量整体上由高到低依次为 Ca²⁺>SO₄²⁻>Na⁺>K⁺>Mg²⁺>

表2 不同处理对土壤理化性质的影响

Table 2 Effects of different treatments on physicochemical property of soil

处理 Treatment	pH	w(有机质) Organic matter content/ (g·kg ⁻¹)	w(全氮) Total nitrogen content/(g·kg ⁻¹)	w(有效磷) Available phosphorus content/(mg·kg ⁻¹)	w(速效钾) Available potassium content/(mg·kg ⁻¹)	w(缓效钾) Slowly available potassium content/(mg·kg ⁻¹)	w(总水溶性盐) Total water- soluble salt content/%
T1(CK)	7.63±0.02 a	13.09±0.06 c	1.23±0.01 b	102.40±1.15 c	132.67±2.08 a	666.67±4.16 c	1.91±0.01 a
T2	7.50±0.01 b	14.28±0.20 a	1.23±0.01 b	105.30±0.75 a	134.33±1.53 a	677.67±2.52 b	1.82±0.01 a
T3	7.49±0.01 b	13.24±0.06 c	1.28±0.01 a	104.40±0.82 ab	134.00±3.61 a	689.33±8.08 a	1.84±0.01 a
T4	7.50±0.01 b	13.20±0.02 c	1.24±0.01 b	103.10±0.89 bc	133.00±2.65 a	682.33±2.52 ab	1.83±0.01 a
T5	7.49±0.01 b	14.01±0.01 b	1.22±0.01 b	102.77±0.40 c	131.67±1.53 a	674.00±3.61 bc	1.84±0.01 a

注:同列不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$). The same below.

表3 不同处理下的土壤盐基八大离子含量

Table 3 Content of eight major base ions in soil under different treatments

处理 Treatment	w(HCO ₃ ⁻)	w(Cl ⁻)	w(K ⁺)	w(Na ⁺)	w(SO ₄ ²⁻)	w(Ca ²⁺)	w(Mg ²⁺)	w(CO ₃ ²⁻)
T1(CK)	5.51±0.05 b	12.43±0.98 a	37.83±1.19 c	67.26±1.01 a	75.59±3.22 a	258.43±8.94 cd	32.53±2.78 a	0.00±0.00 a
T2	4.84±0.26 c	12.41±1.71 a	45.76±0.79 a	58.07±0.43 b	73.73±0.83 a	252.83±6.34 d	21.47±0.91 b	0.00±0.00 a
T3	4.95±0.08 c	9.25±0.37 b	36.60±0.99 cd	55.69±0.66 c	65.18±1.81 c	274.10±17.29 c	31.47±0.95 a	0.00±0.00 a
T4	6.92±0.12 a	5.55±0.50 c	41.32±0.95 b	52.87±0.49 d	64.14±0.32 c	374.10±10.88 a	15.37±5.05 c	0.00±0.00 a
T5	5.83±0.10 b	6.82±0.32 c	35.85±0.35 d	52.81±0.58 d	68.78±1.39 b	301.98±2.07 b	27.70±3.01 a	0.00±0.00 a

Cl⁻>HCO₃⁻>CO₃²⁻,除CO₃²⁻外,不同处理的其他离子含量均存在显著差异,其中T2和T3处理的HCO₃⁻含量较低,T4处理最高,较T1处理显著提高25.59%;T1处理的Cl⁻含量最高,T4处理最低,较T1处理显著降低55.35%;T2处理的K⁺含量最高,较T1处理显著提高20.96%;T1处理的Na⁺含量显著高于其他处理,T5处理最低,较T1处理显著降低21.48%;T1处理的SO₄²⁻含量最高,T2~T5处理与T1处理相比,分别降低2.46%、13.77%、15.15%

和9.05%;T4处理的Ca²⁺含量最高,较T1处理显著提高44.76%;T1处理的Mg²⁺含量最高,T4处理最低,较T1处理显著降低52.75%。

2.2 不同改良措施对土壤微生物的影响

2.2.1 土壤样品中微生物多样性指数分析

通过Uparse软件比较序列的相似性,将大于97%相似性的序列定为相同的OTUs。由表4可知,土壤微生物群落覆盖率为98%。通过Sobs指数、Ace指数和Chao1指数可知,T2、T3、T4、T5处理的物种丰富度

表4 不同处理下的土壤微生物群落α多样性指数

Table 4 Soil microbial community α-diversity index under different treatments

处理 Treatment	Shannon 指数 Shannon index	Simpson 指数 Simpson index	Sobs 指数 Sobs index	Ace 指数 Ace index	Chao1 指数 Chao1 index	覆盖率 Coverage rate/%
T1(CK)	5.99±0.22 a	0.10±0.00 a	2 526.67±187.02 e	3 211.27±174.01 c	3 039.65±117.21 b	98 a
T2	6.12±0.10 a	0.10±0.00 a	2 783.67±58.69 a	3 409.36±40.72 a	3 121.21±34.05 a	98 a
T3	6.10±0.26 a	0.10±0.00 a	2 679.67±279.59 b	3 300.08±217.32 b	3 181.04±10.93 a	98 a
T4	6.08±0.04 a	0.10±0.00 a	2 599.67±105.72 c	3 294.96±419.35 b	3 105.03±221.32 a	98 a
T5	6.08±0.06 a	0.10±0.00 a	2 592.67±537.79 d	3 243.82±56.58 c	3 085.05±297.21 a	98 a

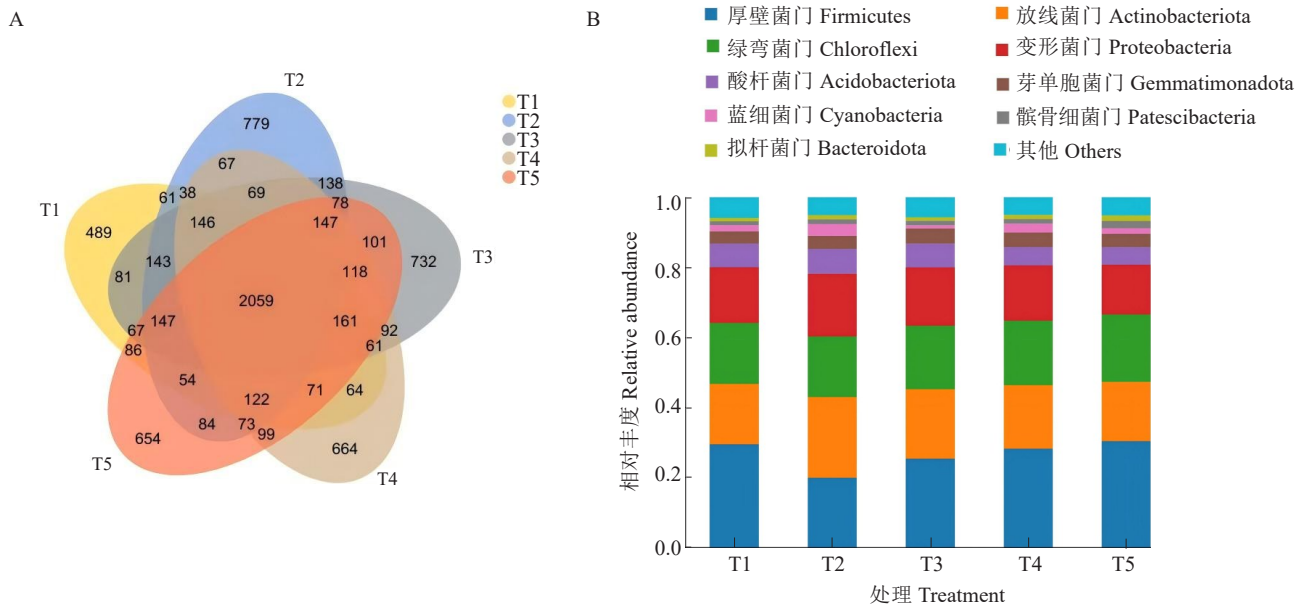
显著高于T1处理,从高到低依次为T2>T3>T4>T5>T1,说明T2处理显著提高土壤中细菌丰富度。各处理间的Shannon指数和Simpson指数差异不显著。

2.2.2 细菌群落组成分析

图1表明,不同处理共同拥有的细菌群落OTUs为2059个(图1-A),各处

理特有的OTUs数量分别为489、779、732、664、654个,说明施用不同种类肥料使土壤细菌群落发生了显著变化。

在门水平下,不同处理下相对丰度最高的菌门为厚壁菌门(Firmicutes)19.88%~30.32%,然后依次为放线菌门(Actinobacteriota)11.22%~22.99%、绿弯



注:A. 不同处理中 OTUs 数目 Venn 图;B. 门水平上丰度排名前 10 的物种相对丰度。

Note: A. Venn diagram of OTU numbers under different treatments; B. Relative abundance of the top 10 taxa at the phylum level.

图 1 不同处理下土壤细菌群落多样性的变化

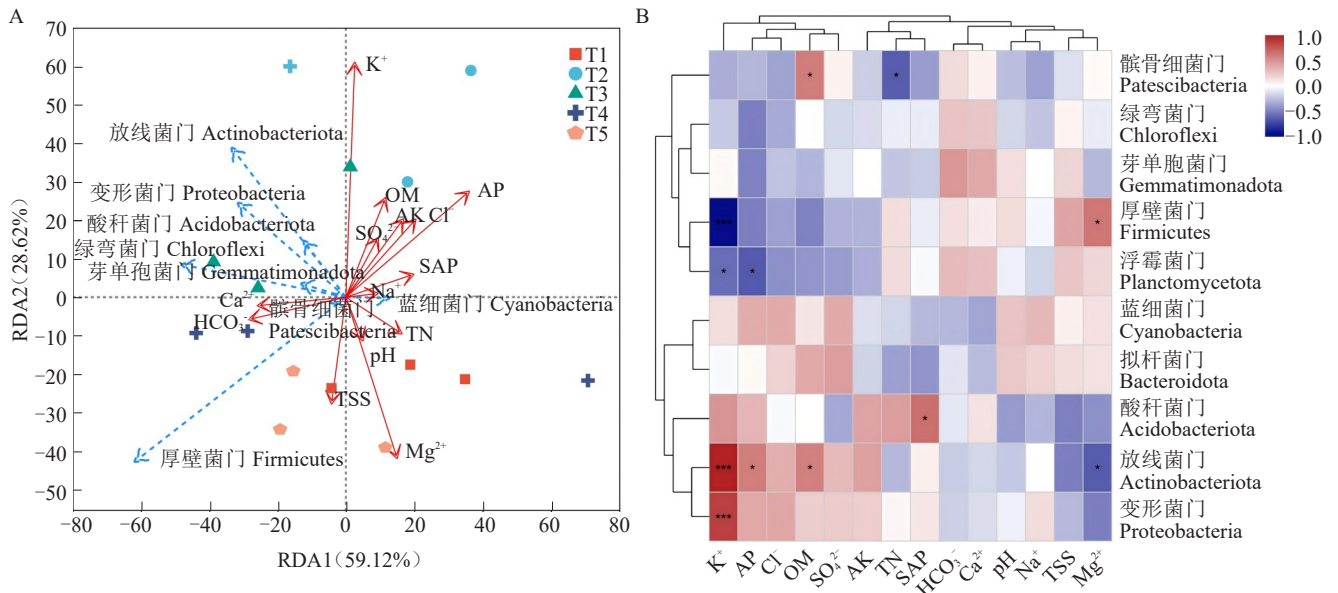
Fig. 1 Changes of soil bacterial community diversity under different treatments

菌门 (Chloroflexi) 17.33%~19.28%、变形菌门 (Proteobacteria) 14.20%~17.95%、酸杆菌门 (Acidobacteriota) 5.04%~7.09%、芽单胞菌门 (Gemmatimonadota) 3.53%~4.35%，低于 4.00% 的有蓝细菌门 (Cyanobacteria)、髌骨细菌门 (Patescibacteria)、拟杆菌门 (Bacteroidota) 和其他菌门 (图 1-B)。T2、T3 和 T4 处理的厚壁菌门相对丰度均低于 T1 处理；各处理的放线菌门的相对丰度从高到低依次为 T2>T3>T4>T1>T5；绿弯菌门的相对丰度从高到低依次为 T3>T4>T5>T2>T1。以上结果表明，T2 和 T3 处理可提高土壤肥力，增加细菌群落的相对丰度。

2.3 环境因子与细菌群落的关系

利用冗余分析 (RDA) 法对环境因子和主要细菌群落进行分析，由图 2 可知，RDA 第一排序轴和第二排序轴的特征值分别为 59.12% 和 28.62%，解释了细菌群落结构变化总方差值的 87.74%。不同处理的细菌群落有较大差异，各处理分布在第一排序轴正、负两端，T2 和 T3 处理在第二排序轴正端，T1、T4 和 T5 处理在第二排序轴负端。有机质含量 (OM) 与有效磷含量 (AP)、速效钾含量 (AK)、缓效钾含量 (SAP) 以及 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Cl^- 和 Na^+ 含量均呈正相关，与土壤全氮含量 (TN)、pH、水溶性盐总量 (TSS) 及 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 含量均呈负相关。 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 含量及 AP、TSS 等对物种分布影响程度较大，OM 对放线菌门 (Actinobacteria)、变形

菌门 (Proteobacteria)、髌骨细菌门 (Patescibacteria) 和拟杆菌门 (Bacteroidota) 的影响较大，pH 对蓝细菌门 (Cyanobacteria)、芽单胞菌门 (Gemmatimonadetes)、拟杆菌门 (Bacteroidota) 和厚壁菌门 (Firmicutes) 的影响较大，AP 对细菌群落中酸杆菌门 (Acidobacteriota)、放线菌门 (Actinobacteria)、变形菌门 (Proteobacteria)、蓝细菌门 (Cyanobacteria) 的影响较大，AK 对酸杆菌门 (Acidobacteriota)、放线菌门 (Actinobacteria)、变形菌门 (Proteobacteria) 的影响较大，TN 对细菌群落中酸杆菌门 (Acidobacteriota)、厚壁菌门 (Firmicutes)、浮霉菌门 (Planctomycetota) 的影响较大，SAP 对酸杆菌门 (Acidobacteriota)、变形菌门 (Proteobacteria) 的影响较大，TSS 对芽单胞菌门 (Gemmatimonadetes)、厚壁菌门 (Firmicutes)、浮霉菌门 (Planctomycetota) 和拟杆菌门 (Bacteroidota) 的影响较大， K^+ 对蓝细菌门 (Cyanobacteria)、酸杆菌门 (Acidobacteriota)、放线菌门 (Actinobacteria) 和变形菌门 (Proteobacteria) 的影响较大， Cl^- 和 SO_4^{2-} 对蓝细菌门 (Cyanobacteria)、拟杆菌门 (Bacteroidota)、放线菌门 (Actinobacteria) 和变形菌门 (Proteobacteria) 的影响较大， HCO_3^- 和 Ca^{2+} 对绿弯菌门 (Chloroflexi)、芽单胞菌门 (Gemmatimonadetes) 和浮霉菌门 (Planctomycetota) 的影响较大， Na^+ 对蓝细菌门 (Cyanobacteria)、拟杆菌门 (Bacteroidota) 和变形菌门 (Proteobacteria) 的影响较大，



注:*表示在 0.05 水平显著相关,***表示在 0.001 水平极显著相关。

Note: * indicates significant correlation at 0.05 level; *** indicates extremely significant correlation at 0.001 level.

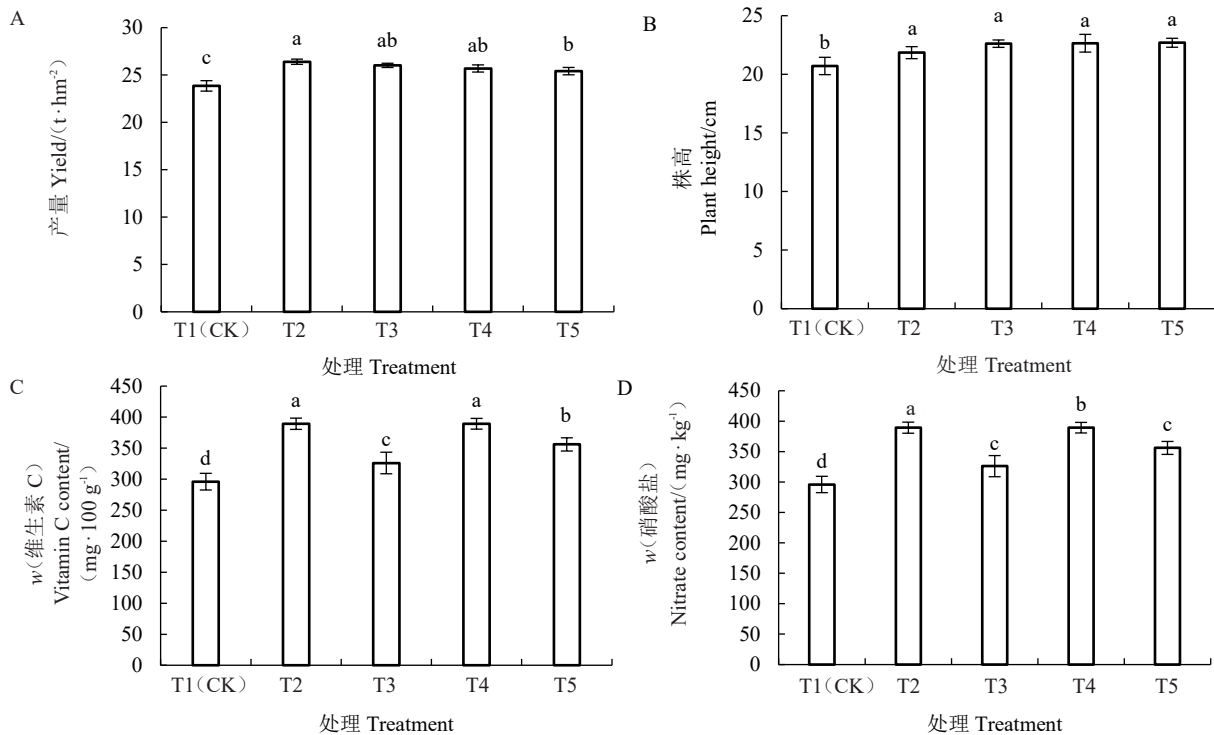
图 2 不同处理下部分环境因子与主要细菌群落的冗余分析(A)和相关性分析(B)

Fig. 2 Redundancy analysis(RDA)and correlation analysis of partial environmental factors and major bacterial communities under different treatments

Mg²⁺对厚壁菌门(Firmicutes)浮霉菌门(Planctomycetota)、蓝细菌门(Cyanobacteria)和拟杆菌门(Bacteroidota)的影响较大。

2.4 不同改良措施对设施生菜产量及品质的影响

由图 3-A 可知,不同改良措施处理下设施生菜的产量变化为 T2>T3>T4>T5>T1, T2~T5 处理较 T1



注:不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Note: Different small letters indicate significant difference at 0.05 level.

图 3 不同处理下设施生菜产量和品质的变化

Fig. 3 Changes in yield and quality of greenhouse lettuce under different treatments

处理分别显著增产 10.69%、9.12%、7.72%和 6.54%，其中 T2 处理产量最高，为 26.40 t·hm⁻²，在生产中可优先施用。T2、T3、T4 和 T5 处理的设施生菜株高分别比 T1 处理显著提高了 5.49%、9.37%、9.37%和 9.56%(图 3-B)。与 T1 处理相比，T2、T3、T4 和 T5 施肥模式的维生素 C 含量分别显著提高了 31.46%、10.11%、31.46%和 20.22%(图 3-C)。与 T1 处理相比，各改良剂处理(T2~T5)的硝酸盐含量均有所升高，其中 T2 处理的硝酸盐含量最高，T3 和

T5 处理则显著低于 T2 和 T4 处理(图 3-D)。

2.5 隶属函数分析

采用隶属函数分析法对产量、维生素 C 含量、硝酸盐含量、株高、有机质含量、有效磷含量、速效钾含量、细菌 Chao1 指数等 8 个关键指标进行综合分析(表 5)。结果表明，T2 处理的综合得分最高，其次为 T3、T4、T5，T1 处理最低。说明从产量、品质、土壤肥力和微生物多样性的综合效益来看，T2 处理(农民习惯施肥+土壤调理剂)效果最佳。

表 5 不同处理多指标隶属函数值比较

Table 5 Comparison of multi-indicator membership function value under different treatments

处理 Treatment	产量 Yield	维生素 C 含量 Vitamin C content	株高 Plant height	硝酸盐含量 Nitrate content	有机质含量 Organic matter content	有效磷含量 Available P content	速效钾含量 Available K content	Chao1 指数 Chao1 index	综合得分 Comprehensive score	排名 Rank
T2	1.00	1.00	0.57	0.00	1.00	1.00	1.00	0.58	0.77	1
T3	0.85	0.32	0.98	0.75	0.13	0.69	0.88	1.00	0.70	2
T4	0.72	1.00	0.98	0.30	0.09	0.24	0.50	0.46	0.54	3
T5	0.61	0.64	1.00	0.78	0.77	0.13	0.00	0.32	0.53	4
T1(CK)	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.38	0.00	0.17	5

3 讨论

3.1 不同改良措施对土壤理化性质的影响

不同改良剂处理(T2~T5)施入土壤后可疏松土壤，提高土壤肥力，改善土壤理化性质^[21]。与农民习惯施肥(T1)相比，这些改良剂处理会使土壤产生有机酸，增加土壤缓冲能力，使土壤保持相对稳定的 pH，有效调节土壤酸碱度。本研究中土壤 pH 的降低可能与改良剂中有机物料分解产生的有机酸、改良剂本身含有的酸性组分(如功能肥中的黄腐酸)，以及离子交换过程中 H⁺的释放等因素有关。本研究还发现，土壤有机质、全氮和速效磷含量均有不同程度的增加，这是由于这 4 种改良措施中营养物质对改善设施土壤的理化性质起关键作用^[22]。土壤中的盐基八大离子含量一般占土壤盐分的 95%以上，阴离子可调节土壤酸碱平衡，阳离子可参与土壤渗透作用和离子效应，分析土壤中可溶性盐分的阴、阳离子含量，可判断土壤的盐渍状况^[23-24]。本试验的设施土壤中阴离子以 SO₄²⁻为主，阳离子以 Ca²⁺为主，与农民习惯施肥相比，T2 和 T4 处理的土壤中 K⁺含量显著提高，T4 和 T5 处理使土壤中 Ca²⁺含量显著提高，说明添加改良剂的肥料施入后可提高土壤中 K⁺、Ca²⁺含量，改善土壤结构，提高土壤肥力，起到脱盐并改善土壤理化性质的作用^[25]。

3.2 不同改良措施对土壤微生物的影响

土壤微生物是评价土壤健康的关键指标，在农业生产中，施肥提高土壤肥力的同时也改变微生物的生存环境^[26]。在种植制度、土壤状况的影响下，形成养分限制因子、养分丰缺程度以及物理环境不同的土壤，土壤养分与土壤微生物之间关系密切^[27]。土壤微生物群落结构和多样性受环境影响较大，本研究中，这 4 种改良措施使土壤细菌群落多样性的 Sobs 指数、Ace 指数、Chao1 指数和 OTUs 数量显著提高，说明高养分含量刺激微生物生长，从而提高微生物丰度^[28-29]。细菌是土壤中数量最多的微生物，微生物繁殖需土壤中有足够的有机质，施用高有机质肥料有利于提高土壤细菌数量和物种多样性^[30-31]。本研究发现，这 4 种改良措施使土壤中芽单胞菌门(Gemmatimonadota)、浮霉菌门(Planctomycetota)、骸骨细菌门(Patescibacteria)、拟杆菌门(Bacteroidota)的相对丰度均有增加，除 T5 处理外，土壤中放线菌门(Actinobacteriota)和变形菌门(Proteobacteria)细菌群落相对丰度均有增加，可能是生物炭肥对放线菌门(Actinobacteriota)和变形菌门(Proteobacteria)细菌群落的影响作用较小，同时其他细菌群落相对丰度增加，由于细菌群落间的竞争作用，导致放线菌门(Actinobacteriota)和变形菌门(Proteobacteria)细菌群落相对丰度减少，这是土壤

肥力、环境和细菌群落协同发展的结果^[32]。酸杆菌门(Acidobacteriota)中酸杆菌能在以植物聚合物为底物的培养基上生长,降解植物残体,参与各种生态环境的铁循环;放线菌门(Actinobacteria)与OM、AP、AK及K⁺、Cl⁻和SO₄²⁻含量等紧密相关,降解土壤中难降解的有机质,改善土壤环境^[33]。由RDA分析可知,土壤有机质、有效磷和速效钾含量对细菌群落的影响较大,能改善土壤理化性质,保证植物正常生长,同时还可作为土壤细菌群落创造适宜的生存环境,与乌音嘎等^[34]的研究结果一致。

3.3 不同改良措施对设施生菜产量和品质的影响

不同改良措施可直接影响设施生菜的产量和品质。本研究中,不同土壤改良剂处理的设施生菜产量均优于农民习惯施肥(T1),其中T2处理的产量最高,这是由于土壤调理剂使土壤理化性质得到改善,土壤中的有机质和氮磷钾等营养物质含量均显著提高,当营养物质含量达到一定比例时,增产效果才显著。在不同处理下,设施生菜的品质差异较大,与肥料的成分有关^[35]。维生素C是人体所必需的营养物质之一,与人体健康关系密切,是判定生菜品质好坏的重要指标^[36]。本研究发现,4个改良剂处理通过养分协同作用使土壤环境得到改善,进而使生菜中的维生素C含量显著提高^[37]。肥料是影响蔬菜硝酸盐含量的重要因素,不同的肥料配比对生菜的硝酸盐含量有极大影响^[38]。徐金玉等^[39]研究发现,随着施氮量的增加,有机蔬菜中硝酸盐含量显著增加。刘强等^[40]也发现小白菜中硝酸盐含量与氮肥施用水平呈正相关。因此,氮肥施用量与蔬菜硝酸盐含量密切相关。研究发现,施肥年限过长或施肥量过多,也会导致设施生菜硝酸盐含量升高^[41]。与T1处理相比,采用改良措施的生菜中硝酸盐含量并未降低。因此,无论是有机肥还是化肥,在合理施用的情况下,虽然都可以生产出高产生菜,但是不同改良措施对设施生菜硝酸盐含量的影响还有待进一步探究。

4 结 论

在农民习惯施肥基础上增施土壤调理剂、功能肥、微藻肥和生物炭肥,不仅可以提高设施生菜产量和维生素C含量,而且还可以改善土壤理化性状,保持土壤微生物多样性,提高微生物群落结构丰度。其中增施土壤调理剂效果最佳。通过隶属函数法进行多指标综合评价,T2处理(农民习惯施肥+土壤调理剂)的综合得分最高。因此,农民习惯

施肥+土壤调理剂[有机物总量≥85%,有机质含量≥75%,易氧化有机质含量≥20%,有效复合活菌数≥2亿·g⁻¹, (钙+镁+铁+锰+锌+碘)含量≥400 mg·kg⁻¹, pH≥7.5]可在设施生菜优质高效生产中推广应用。

参考文献

- [1] 张晶,刘继芳,吴建寨,等. 2021年蔬菜市场运行分析与2022年展望[J]. 中国蔬菜, 2022(1): 1-8.
- [2] 张静,连炳瑞,金亚茹,等. 不同施肥处理对生菜产量、品质和经济效益的影响[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(10): 91-95.
- [3] ZANDVAKILI O R, BARKER A V, HASHEMI M, et al. Influence of nitrogen source and rate on lettuce yield and quality[J]. Agronomy Journal, 2022, 114(2): 1401-1414.
- [4] 王素萍,张贵友,杜雷,等. 不同减肥增效模式对生菜产量和品质的影响[J]. 长江蔬菜, 2022(4): 62-66.
- [5] 张绪美,管永祥,沈文忠,等. 不同施肥方式对设施土壤次生盐渍化及蔬菜生产的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(23): 137-142.
- [6] KUMARI R, KAUR I, BHATNAGAR A K. Enhancing soil health and productivity of *Lycopersicon esculentum* Mill. using sargassum johnstonii setchell & gardner as a soil conditioner and fertilizer[J]. Journal of Applied Phycology, 2013, 25(4): 1225-1235.
- [7] 秦彦林,钱志红,丁振涛,等. 土壤调理剂在设施栽培番茄上的应用效果初探[J]. 中国农技推广, 2022, 38(12): 71-73.
- [8] 刘欢欢,董宁禹,柴升,等. 生态炭肥防控小麦根腐病效果及对土壤健康修复机理分析[J]. 植物保护学报, 2015, 42(4): 504-509.
- [9] 隋常玲,宋宝安,宋杰,等. 腐殖酸功能肥对火龙果产量与品质的影响[J]. 贵州农业科学, 2014, 42(6): 124-128.
- [10] 张涛,刘勇鹏,朱广权,等. 定位化肥牛粪配施对设施蔬菜产量和土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(1): 161-168.
- [11] 曾子凡,马艳,罗佳,等. 长期施肥对设施蔬菜土壤理化及生物学性状的影响研究进展[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(6): 9-15.
- [12] 赖长鸿,陈泽恩,谢敏杰,等. 土壤调理剂对土壤环境和作物产量的影响[J]. 磷肥与复肥, 2018, 33(1): 23-25.
- [13] 李嫚,张忠良,刘东平,等. 生物炭肥对辣椒生长及根际土壤微生态环境的影响[J]. 中国蔬菜, 2019(2): 53-58.
- [14] 刘淑芳,吕俊平,冯佳,等. 施用微藻对黄瓜生长及土壤质量的影响[J]. 山西农业科学, 2016, 44(9): 1312-1315.
- [15] 海飞,王素平,刘欢欢. 生态炭肥对番茄和黄瓜苗期生长发育的影响[J]. 河南农业, 2016(21): 38-39.
- [16] 罗佳,黄兴学,林处发,等. 有机肥替代部分化肥对生菜产量和品质的影响[J]. 农业开发与装备, 2018(9): 126-128.
- [17] 吴大付,任秀娟,李东方. 蔬菜硝酸盐含量测定方法研究[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2010, 38(3): 36-38.
- [18] 王传芬,韩玉,王英博,等. 果蔬中维生素C含量的测定及比较[J]. 农业与技术, 2020, 40(18): 44-46.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 中国农业科技出版社. 2000.

- [20] 高志伟,刘凡惠,贾美清,等.基于 Illumina 高通量测序的天津北大港湿地沉积物细菌群落特征和多样性分析[J].天津师范大学学报(自然科学版),2021,41(4):45-52.
- [21] 周金婷,邢秋莹,徐嵩旻,等.不同种类有机肥对不结球白菜生理特性及土壤性质的影响[J].湖北农业科学,2022,61(19):34-38.
- [22] 王庆蒙,景宇鹏,李跃进,等.不同施肥措施对河套灌区盐碱地改良效果[J].中国土壤与肥料,2020(5):124-131.
- [23] VORONIN A Y, SAVIN I Y. GPR diagnostics of chernozem humus horizon thickness[J]. Russian Agricultural Sciences, 2018, 44(3):250-255.
- [24] 阎南南,崔国文,张茜,等.覆盖秸秆和补播牧草对松嫩退化盐碱草地土壤盐离子含量的影响[J].中国草地学报,2015,37(2):112-116.
- [25] KUMAR B B, THAKUR C L, HARISH S, et al. Influence of organic manures on soil physicochemical properties under morus based agrisilviculture system[J]. Agricultural Science Digest- A Research Journal, 2021, 41(4):584-589.
- [26] 黄颖博,罗凡,龚雪蛟,等.有机肥对土壤微生物群落特征影响的研究进展[J].中国农学通报,2023,39(3):88-96.
- [27] 徐万里,唐光木,葛春辉,等.长期施肥对新疆灰漠土土壤微生物群落结构与功能多样性的影响[J].生态学报,2015,35(2):468-477.
- [28] 高逸,杨悦,易欣欣,等.设施生菜种植与 T1 菌肥处理对土壤微生物群落的影响[J].中国农业大学学报,2020,25(6):57-66.
- [29] 理鹏,吴建强,沙晨燕,等.粪肥和有机肥施用对稻田土壤微生物群落多样性影响[J].环境科学,2020,41(9):4262-4272.
- [30] 康婉青,徐娅玲,徐晓玲,等.不同沼液施用量对土壤养分和土壤细菌群落结构的影响[J].中国草地学报,2022,44(10):75-83.
- [31] 刘平静,肖杰,孙本华,等.长期不同施肥措施下壤土细菌群落结构变化及其主要影响因素[J].植物营养与肥料学报,2020,26(2):307-315.
- [32] LI X, YAO S, BIAN Y R, et al. The combination of biochar and plant roots improves soil bacterial adaptation to PAH stress: Insights from soil enzymes, microbiome and metabolome[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 400:123227.
- [33] PANKRATOV T A, IVANOVA A O, DEDYSH S N, et al. Bacterial populations and environmental factors controlling cellulose degradation in an acidic *Sphagnum* peat[J]. Environmental Microbiology, 2011, 13(7):1800-1814.
- [34] 乌音嘎,乌恩,吴澜,等.复合微生物肥对碱土生物学性状与土壤肥力的影响[J].中国土壤与肥料,2021(1):197-203.
- [35] KATSUTO T, KOUKI H. Estimating leaf photosynthesis of C₃ plants grown under different environments from pigment index, photochemical reflectance index and chlorophyll fluorescence[J]. Photosynthesis Research, 2021, 148:33-46.
- [36] 杨诗谣,李美英,宋正蕊.不同蔬菜水果中维生素 C(VC)含量检测分析[J].中国检验检疫,2020,28(2):38-39.
- [37] 邓新为,刘萌,刘世鹏.施肥对山地枣果维生素 C 含量的影响[J].中国农学通报,2021,37(32):78-82.
- [38] 苏春莲.有机和无机肥料不同配比对大白菜产量及硝酸盐含量的影响研究[J].新农业,2020(3):7-8.
- [39] 徐金玉,付利波,王伟,等.两种有机物料等 N 和减 N 还田条件下对有机蔬菜产量、品质和土壤的影响[J].中国瓜菜,2025,38(10):132-139.
- [40] 刘强,杨志敏,陈玉成,等.含氮肥料和酸雨对小白菜中硝酸盐含量的影响[J].环境影响评价,2019,41(6):76-78.
- [41] 张迪,赵牧秋,牛明芬,等.有机肥对设施菜地土壤硝酸盐累积的影响[J].环境科学与技术,2010,33(增刊 1):115-119.