

## 人尿施用对生菜品质性状及土壤细菌群落结构的影响

于广泉, 魏孝承, 王倩, 王强, 张春雪, 杨波, 郑向群

### 引用本文:

于广泉, 魏孝承, 王倩, 王强, 张春雪, 杨波, 郑向群. 人尿施用对生菜品质性状及土壤细菌群落结构的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(3): 558–567.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0811>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 稻作条件下不同施肥模式对盐碱化土壤细菌和古菌群落结构的影响

李明, 马飞, 肖国举

农业环境科学学报. 2018, 37(3): 495–504 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1107>

#### 施用鸡粪有机肥对种植小油菜土壤微生物群落结构多样性的影响

李可, 孙彤, 孙涛, 徐应明, 孙约兵

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2316–2324 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0036>

#### 蚯蚓对不同pH值土壤中铬赋存及细菌群落的影响特征

王浩羽, 韦杰, 孙进宇, 宋言, 顾强, 宓文海, 居静, 赵海涛, 封克

农业环境科学学报. 2022, 41(7): 1472–1482 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1260>

#### 生物炭对中性水稻土养分和微生物群落结构影响的时间尺度变化研究

盖霞普, 刘宏斌, 翟丽梅, 任天志, 王洪媛

农业环境科学学报. 2016, 35(4): 719–728 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.04.016>

#### 应用灰色关联法分析石灰配施有机肥对镉污染土壤-植物系统的影响

肖豪, 黄柏豪, 孙凯, 徐敏, 伍钧

农业环境科学学报. 2022, 41(9): 1966–1974 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1501>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

于广泉, 魏孝承, 王倩, 等. 人尿施用对生菜品质性状及土壤细菌群落结构的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(3): 558–567.

YU G Q, WEI X C, WANG Q, et al. Effects of human urine application on lettuce quality traits and soil bacterial community structure [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(3): 558–567.

# 人尿施用对生菜品质性状及土壤细菌群落结构的影响

于广泉, 魏孝承\*, 王倩, 王强, 张春雪, 杨波, 郑向群\*

(农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

**摘要:**人尿作为一种传统的有机液体肥料,具有广泛的应用前景。为探讨人尿施用对作物品质性状和土壤微生物群落结构的影响,本研究以温室大棚盆栽生菜(*Lactuca sativa* L.)为研究对象,设置人尿 0 mL·kg<sup>-1</sup>(CK)、人尿 13 mL·kg<sup>-1</sup>(T1)、人尿 26 mL·kg<sup>-1</sup>(T2)和人尿 52 mL·kg<sup>-1</sup>(T3)4种不同施肥管理的盆栽试验,测定生菜的产量及品质性状,并对土壤采用高通量测序技术探究不同人尿施用量对土壤细菌群落结构的影响。结果表明:与CK处理相比,T1、T2处理的生菜鲜质量分别提高了56.75%和100.01%,可溶性糖含量分别上升了90.63%、210.94%,但Vc含量分别降低了13.93%、26.62%,且T3处理生菜无法生长;与CK相比,施用尿液(T1~T3)使土壤TN、TP、AP、AK、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、SOM含量分别上升了2.22%~37.78%、7.94%~20.63%、22.42%~128.90%、7.71%~83.70%、84.62%~159.62%、3.64%~7.52%,同时也使土壤EC提高了13.56%~161.02%,土壤C/N和pH分别下降了2.77%~21.90%和2.10%~10.28%;随着人尿施用量的增加,OTUs总数不断降低,Shannon指数不断降低,Simpson指数不断升高,土壤变形菌门(Proteobacteria)和芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)的相对丰度逐渐增加,而厚壁菌门(Firmicutes)的相对丰度逐渐下降;另外,各处理对放线菌门(Actinobacteria)、绿弯菌门(Chloroflexi)和酸杆菌门(Acidobacteria)等优势菌门的相对丰度均呈先升高后降低的趋势,其中T1处理达到最高值,较CK分别升高了14.71%、2.06%和16.17%。综上所述,在一定范围内,施用人尿能够显著增加生菜的鲜质量和可溶性糖含量,提高土壤养分含量,但过量施用会影响土壤细菌群落结构,降低细菌群落的多样性和丰度,生菜也无法正常生长。

**关键词:**人尿;细菌群落结构;生菜;品质性状

**中图分类号:**S154.3;S636.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2023)03-0558-10 **doi:**10.11654/jaes.2022-0811

## Effects of human urine application on lettuce quality traits and soil bacterial community structure

YU Guangquan, WEI Xiaocheng\*, WANG Qian, WANG Qiang, ZHANG Chunxue, YANG Bo, ZHENG Xiangqun\*

(Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

**Abstract:** Human urine, as a traditional organic liquid fertilizer, has wide application prospects. To investigate the effects of human urine application on soil microbial community structure, we conducted a potted lettuce (*Lactuca sativa* L.) experiment in a greenhouse with four different fertilizer applications: 0 mL·kg<sup>-1</sup> (CK), 13 mL·kg<sup>-1</sup> (T1), 26 mL·kg<sup>-1</sup> (T2) and 52 mL·kg<sup>-1</sup> (T3) human urine. We measured the yield and quality traits of lettuce in these treatments. The results showed that compared with CK, the fresh weight of T1 and T2 lettuce increased 56.75% and 100.01%, respectively; and the soluble sugar content increased by 90.63% and 210.94%, respectively; but the Vc content decreased by 13.93% and 26.62%, respectively. Moreover, in T3, the lettuce did not grow. Compared with CK, the application of urine (T1–T3) increased soil TN, TP, AP, AK, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, and SOM contents by 2.22%–37.78%, 7.94%–20.63%, 22.42%–128.90%, 7.71%–83.70%, 84.62%–159.62%, and 3.64%–7.52%, respectively, but also increased soil EC by 13.56%–161.02%; soil C/N and pH decreased

收稿日期:2022-08-10 录用日期:2022-11-18

作者简介:于广泉(1992—),男,江西都昌人,硕士,从事农业废弃物资源化利用研究。E-mail:18447055394@163.com

\*通信作者:魏孝承 E-mail:13752221539@163.com; 郑向群 E-mail:zhengxiangqun@126.com

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y2022LM13);创新工程所级重点项目(2022-cxgcdrw-zxq)

Project supported: Special Fund for Basic Scientific Research of Central Public Welfare Institutes (Y2022LM13); Institute Level Key Project of Innovation Engineering (2022-cxgcdrw-zxq)

by 2.77%–21.90% and 2.10%–10.28%. With the increase in human urine dosage, the total number of OTUs decreased, the Shannon index decreased, and the Simpson index increased. With the increase in human urine dosage, the relative abundance of Proteobacteria and Gemmatimonadetes in the soil gradually increased, while the relative abundance of Firmicutes gradually decreased, and the relative abundance of Actinobacteria, Chloroflexi and Acidobacteria in each treatment showed a trend of increasing and then decreasing. We obtained the highest values from T1 lettuce, where they were increased by 14.71%, 2.06%, and 16.17%, respectively, compared with those of CK. In summary, within a certain range, the application of human urine can substantially increase the fresh weight and soluble sugar content of lettuce, and improve the soil nutrient content, but excessive application affects the structure of the soil bacterial community and reduces the diversity and abundance of the bacterial community, and thus lettuce does not grow normally.

**Keywords:** human urine; bacteria community structure; lettuce; quality trait

化肥对作物增产至关重要,然而化肥的过量施用不仅造成了能源和资源的浪费,而且还会带来土壤板结、酸化等一系列问题<sup>[1]</sup>。另外,化肥产业高耗高排,难以满足“碳达峰、碳中和”和“绿色发展”的新需求<sup>[2]</sup>。有机肥具有缓解土壤酸化、培肥地力及改善耕层土壤结构等优点,是化肥的理想替代品,改变施肥结构是农业生产可持续发展的有效途径<sup>[3]</sup>。因此,亟需寻找到一种可替代化肥的有机肥料,既能减少自然资源的消耗,又能够保证作物产量和品质,同时降低施肥对土壤环境的影响。

人尿作为一种生态型的有机液体肥料,含有丰富的N、P、K等营养物质,可有效增加地力,被认为可以部分替代化肥<sup>[4]</sup>。从化学成分来看,人的尿液是一种富N的水溶液,其中尿素占尿中总N的75%~90%<sup>[5-6]</sup>。尿液中大部分N与尿素或氮肥一样,易于被作物吸收,其N利用效率相当于同类无机肥料的90%<sup>[7]</sup>。研究表明如果在20℃或更高的温度下储存2~6个月,尿液可以直接作为农业的液体肥料<sup>[8-9]</sup>。Philip等<sup>[10]</sup>的研究发现,施用尿液能够提高卷心菜的株高、叶片数和冠层数,分别提高2.5%、2.4%和4.0%。另外有研究表明,与化肥相比较,用尿液作液体肥料可增加黄瓜(*Cucumis sativus* L.)、白菜(*Brassica pekinensis* Rupr.)和苋属(*Amaranthus* L.)植物的单产,表明尿液也可以为植物提供必需的营养<sup>[11-13]</sup>。但是,也有研究显示,人尿的施用可能会增加土壤的电导率和盐度,最终造成土壤盐渍化,影响土壤微生态环境,在农业生产力较低的情况下,甚至会导致作物歉收<sup>[14]</sup>。微生物作为土壤的重要组成部分,在生态系统物质循环和能量流动中发挥着重要作用,对土壤肥力演变、植物生长发育及土壤生态系统结构和功能均能产生重要影响<sup>[15]</sup>。土壤细菌作为土壤微生物重要组成部分,几乎与土壤中所发生的各种生化反应均相关,能够显著改善土壤肥力以及生态系统结构<sup>[16]</sup>。然而,目前关于人

尿施用对土壤理化性质以及土壤细菌群落结构及多样性的影响还鲜有报道,其土壤理化性质与细菌的相关关系尚未明确。

生菜(*Lactuca sativa* L.)属于菊科莴苣属,别名莴苣,一二年生草本植物,由于其具有生长周期短、产量高、口感好、食用方便且营养及经济价值较高的特点,已成为叶菜类中的重要蔬菜<sup>[17-18]</sup>。本试验以大棚温室盆栽中的生菜和其表层土壤为研究对象,探究施用人尿有机液体肥对生菜产量品质及土壤微生态环境的影响,揭示施用人尿条件下盆栽土壤理化性质和土壤细菌群落结构及其多样性的变化机制,并分析土壤理化性质与土壤细菌的相关性,以期为进一步完善和确立人尿施肥管理制度和土壤可持续健康发展提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

本试验用的土壤取自天津市宁河区玉米良种场(39°25' N, 117°29' E)表面的耕层土壤,其基本理化性质为:总氮(TN)0.91 g·kg<sup>-1</sup>、总磷(TP)0.63 g·kg<sup>-1</sup>、速效钾(AK)310.27 mg·kg<sup>-1</sup>、有效磷(AP)31.35 mg·kg<sup>-1</sup>、pH 8.43、电导率(EC)0.48 mS·cm<sup>-1</sup>。将采集的土壤运输到农业农村部环境保护科研监测所温室大棚内,准备12个规格相同的花盆(高23 cm,直径20 cm),每个盆中装满5 kg土壤。播种前,将尿液提前施入土壤并充分搅拌均匀。每盆播撒5粒种子,待种子发芽后,对其进行间苗,保证每个盆中三颗生菜苗。依据设施蔬菜生长的养分需求<sup>[19]</sup>,本试验设置4个不同人尿施用水平:0 mL·kg<sup>-1</sup>(CK)、13 mL·kg<sup>-1</sup>(T1)、26 mL·kg<sup>-1</sup>(T2)和52 mL·kg<sup>-1</sup>(T3),每个处理设3组重复。盆栽试验期间统一管理,种植期间定期浇水,保持盆栽土壤湿润。本试验施用的人尿来自于农业农村部环境保护科研监测所健康男性志愿者,使用粪



尿分集式生态旱厕收集,将收集的尿液室温下密封储存三个月,其基本理化性质为:化学需氧量(COD)  $12.40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、TOC  $5.72 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、TN  $3.62 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、TP  $0.26 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、TK  $1.18 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{Na}^{+}$   $1.35 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{Cl}^{-}$   $2.23 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH 9.18、EC  $34 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。微量元素含量:B  $0.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、Cu  $57 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、Zn  $72 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、Mo  $47 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、Fe  $0.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、Co  $0.26 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、Mn  $0.08 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

## 1.2 土壤样品采集

生菜生长40 d后收获,并随即对每盆随机采集表层0~10 cm土壤样本,剔除土壤中的碎石块和植物残体等杂质后装入灭菌自封袋带回实验室。将每盆采集的土壤样品分为3份子样品,一份混匀过2 mm筛,保存在10 mL无菌离心管中,用干冰保存送往上海美吉生物科技有限公司进行基因测序;另一份经风干、研磨、过筛后用于检测土壤理化指标;第三份于4℃冰箱内低温保存,用于测定土壤铵态氮( $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ )和硝态氮( $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ )含量。

## 1.3 试验方法

### 1.3.1 生菜品质测定

从温室大棚中采集收获生菜后,立即装入密封袋带回实验室用蒸馏水进行冲洗、晾干擦拭干净,然后对其进行称重和测量,随后对生菜的可溶性糖和Vc含量进行检测,将剩余部分生菜装入密封袋内放在4℃冰箱内冷藏保存待测。植株高度用直尺测量,植株鲜质量用电子天秤称量,可溶性糖参考《蔬菜及其制品中可溶性糖的测定 铜还原碘量法》(NY/T 1278—2007)测定,Vc参考《食品中抗坏血酸的测定》(GB 5009.86—2016)测定。

### 1.3.2 土壤理化性质测定

土壤理化性质中pH、电导率、有机质、总氮和总磷的测定方法参照土壤农化分析<sup>[20]</sup>。有效磷(AP)采用北京普析通用仪器有限责任公司生产的TU-1900双光束紫外可见分光光度计测定;速效钾(AK)采用德国耶拿ZEE nit 700P火焰石墨原子吸收光谱仪测定; $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 含量和 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 含量经 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$ 浸提后使用流动分析仪(AA3, SEAL Analytical, 德国)测定。

### 1.3.3 土壤微生物测定分析

根据生产商的说明采用Fast DNA® Spin Kit for Soil(MP Biomedicals, 美国)试剂盒提取土壤总DNA,然后使用NanoDrop2000测定DNA浓度和纯度,并对细菌16S rRNA基因的V3~V4高变区序列中的338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3')和806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')进行扩增<sup>[21]</sup>。将

同一样品的PCR产物按相同比例混合,通过2%琼脂糖凝胶电泳进行检测,以确定扩增是否成功以及条带的相对强度。使用AxyPrep DNA Gel Extraction Kit(Axygen Biosciences, Union City, CA, 美国)进行纯化,并采用Quantus™ Fluorometer(Promega, 美国)进行定量。使用UPARSE软件(version 7.1, <http://drive5.com/uparse/>),以97%的一致性将序列聚类成为操作分类单元(operational taxonomic units, OTUs)并剔除嵌合体<sup>[22]</sup>。本试验中设置空白对照,空白对照和每个DNA样品均设置3次重复。

## 1.4 数据分析

数据采用Excel进行统计计算,处理生菜品质性状、土壤理化性质及土壤细菌的 $\alpha$ 多样性等数据的多重比较、方差分析和相关性分析用SPSS 25.0软件完成,并采用Origin 9.1做柱状图,采用TB tools绘制热图,采用R语言Vegan包进行冗余分析以评价土壤理化因子对细菌群落结构的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 人尿对生菜产量及品质的影响

由图1可知,施用人尿种植生菜对其品质性状影响显著。当尿液施用量由CK处理增加至T2处理时,生菜的鲜质量和可溶性糖含量均呈现出增加的趋势,T1、T2处理的生菜鲜质量较CK处理分别提高了56.75%和100.01%(图1a),T1、T2处理的可溶性糖含量较CK处理分别上升了90.63%、210.94%(图1b);当尿液施用量由CK处理增加至T2处理时,生菜的株高和Vc含量呈逐渐降低的趋势,T1、T2处理的生菜株高较CK处理分别下降了20.16%、36.05%(图1a),T1、T2处理的Vc含量较CK处理分别降低了13.93%、26.62%(图1b);而当人尿施用量增加至T3处理时,生菜种子不能正常发芽生长。

### 2.2 人尿对土壤理化性质的影响

由表1可知,人尿的施用不仅提高了土壤的TN、TP、AP、AK、 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 、SOM等养分含量,还提高了土壤EC,且随着人尿施用量的增加(由CK处理增加至T3处理),各处理组土壤TN、TP、AP、AK、 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 、SOM和EC增加的越多,相比较CK处理,分别增加了2.22%~37.78%、7.94%~20.63%、22.42%~128.90%、7.71%~83.70%、84.62%~159.62%、3.64%~7.52%和13.56%~161.02%。与此同时,施用人尿降低了土壤 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 、C/N和pH,且随着人尿施用量的增加(由CK处理增加至T3处理),各处理组土壤C/N和pH降低的越多,与



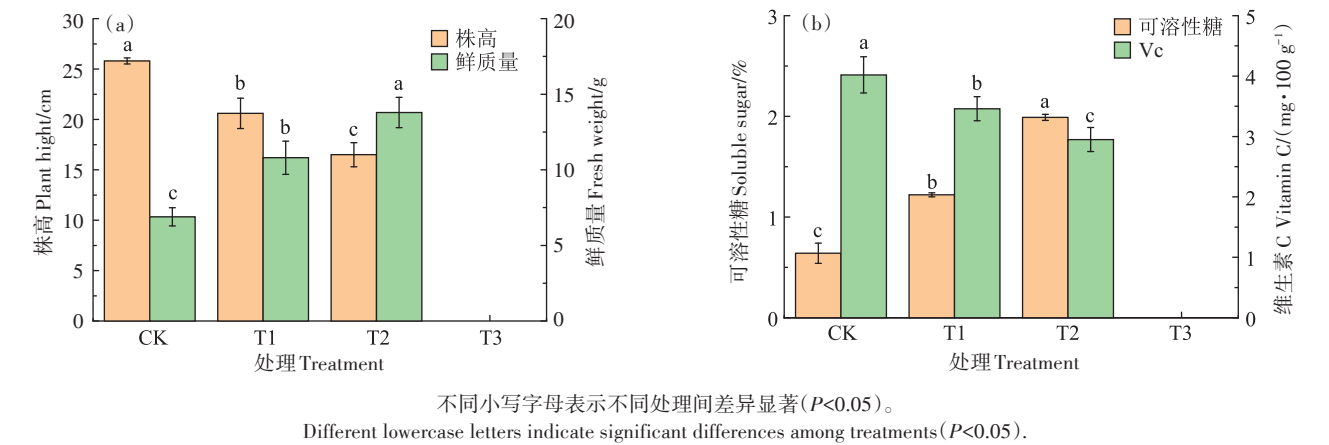


图1 不同人尿施用量对生菜品质性状的影响

Figure 1 Effects of different amount of urine application dosages on the quality traits of lettuce

表1 不同人尿施用量对土壤理化性质的影响

Table 1 Effects of different amount of urine application on soil physical and chemical properties

| 处理                                                     | CK           | T1           | T2           | T3           |
|--------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| TN/(g·kg <sup>-1</sup> )                               | 0.90±0.02b   | 0.92±0.02b   | 1.12±0.01ab  | 1.24±0.04a   |
| TP/(g·kg <sup>-1</sup> )                               | 0.63±0.03b   | 0.68±0.04b   | 0.70±0.02ab  | 0.76±0.03a   |
| AP/(mg·kg <sup>-1</sup> )                              | 32.25±1.08d  | 39.48±0.72c  | 51.29±2.32b  | 73.82±3.77a  |
| AK/(mg·kg <sup>-1</sup> )                              | 300.09±0.02b | 323.24±0.04b | 407.50±0.3ab | 551.28±0.04a |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 0.52±0.16c   | 0.96±0.28b   | 1.12±0.12a   | 1.35±0.41a   |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 6.58±0.30a   | 5.12±0.32ab  | 4.76±2.35b   | 3.08±0.70c   |
| SOM/(g·kg <sup>-1</sup> )                              | 12.90±0.23a  | 13.37±0.41a  | 13.53±0.49a  | 13.87±0.33a  |
| C/N                                                    | 8.31±0.13a   | 8.08±0.75ab  | 7.01±0.62bc  | 6.49±0.44c   |
| pH                                                     | 8.56±0.23a   | 8.38±0.35a   | 7.85±0.22b   | 7.68±0.15b   |
| EC/(mS·cm <sup>-1</sup> )                              | 0.59±0.04c   | 0.67±0.11c   | 0.86±0.35b   | 1.54±0.25a   |

注:同行不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。  
Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant differences among treatments (P<0.05).

CK处理相比,分别降低了22.19%~53.19%、2.77%~21.90%和2.10%~10.28%。

### 2.3 人尿对土壤微生物群落多样性的影响

经过质量筛选后,从12个土壤样品中总共获得622 889条高质量的16S rRNA基因序列。按照97%相似性对非重复序列(不含单序列)进行OTUs聚类,在聚类过程中去除嵌合体,最终得到4 862个OUTs数。聚类分析结果表明,细菌菌群分属40个门、138个纲、330个目、513个科、916个属和1 788个种。由图2可以看出,所有处理样本中共有的OTUs总数为2 330,CK、T1、T2、T3处理所占有的OTUs总数分别为3 847、3 735、3 516和3 327。

各处理组土壤中所检测到的细菌测序深度指数Coverage均达到97%以上(表2),说明各处理条件下的土壤细菌物种信息得到了充分体现。Chao1指数

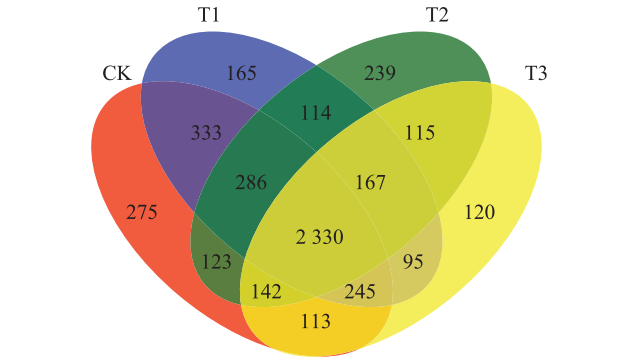


图2 各个处理细菌群落OTUs数

Figure 2 OTUs number of bacterial communities in each treatment

和ACE指数得出的丰富度均为CK>T1>T2>T3,表明施用人尿降低了土壤中细菌的丰富度,且随着人尿施

表2 不同人尿用量对土壤细菌群落 $\alpha$ -多样性的影响Table 2 Effects of different human urine dosage on  $\alpha$  diversity of bacterial community

| 处理 | Shannon              | Simpson              | ACE                   | Chao1                 | Coverage               |
|----|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| CK | 6.701 4 $\pm$ 0.06a  | 0.003 1 $\pm$ 0.00b  | 3 608.65 $\pm$ 35.14a | 3 594.78 $\pm$ 25.56a | 0.970 5 $\pm$ 0.000 3b |
| T1 | 6.654 3 $\pm$ 0.04ab | 0.003 8 $\pm$ 0.00b  | 3 577.35 $\pm$ 77.01a | 3 578.78 $\pm$ 98.75a | 0.970 6 $\pm$ 0.000 4b |
| T2 | 6.446 7 $\pm$ 0.05b  | 0.005 0 $\pm$ 0.01ab | 3 295.62 $\pm$ 26.34b | 3 313.90 $\pm$ 34.27b | 0.973 8 $\pm$ 0.001 3a |
| T3 | 6.420 5 $\pm$ 0.07b  | 0.006 1 $\pm$ 0.00a  | 3 187.21 $\pm$ 18.15c | 3 198.41 $\pm$ 55.00c | 0.974 2 $\pm$ 0.000 5a |

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ( $P<0.05$ ).

用量的增加,ACE指数和Chao1指数下降的越多,相比较于CK处理,分别下降了0.87%~11.68%和0.45%~11.03%。Shannon指数为CK>T1>T2>T3, Simpson指数为T3>T2>T1>CK,表明施用人尿降低了土壤细菌多样性,且随着人尿施用量的增加,Shannon指数下降的越多, Simpson指数上升的越多,相比较于CK处理,分别下降与上升了0.70%~4.19%和22.58%~96.77%。

#### 2.4 人尿对土壤细菌群落组成的影响

由图3可知,门水平下,将平均相对丰度 $\geq 10\%$ 类群归类为优势菌群,包括变形菌门(Proteobacteria, 24.84%)、放线菌门(Actinobacteria, 22.54%)、绿弯菌门(Chloroflexi, 13.76%)、酸杆菌门(Acidobacteria, 11.89%),其次排名前4的细菌分别为芽单胞菌门(Gemmatimonadetes, 7.25%)、拟杆菌门(Bacteroidetes, 4.24%)、黏球菌门(Myxococcota, 2.93%)、厚壁菌门(Firmicutes, 2.69%)。各处理条件下的变形菌门(Proteobacteria)丰富度呈升高的趋势,T1、T3处理的丰富度较CK处理分别提高了3.06%和16.97%,其中T2处理达到最高值,其丰富度为30.33%;各处理的放线菌门(Actinobacteria)、绿弯菌门(Chloroflexi)和酸

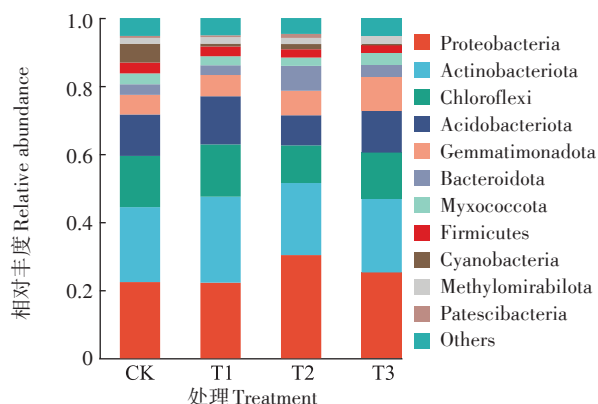


图3 细菌群落门水平上物种相对丰度

Figure 3 Relative abundances of the top ninespecies with the highest abundances at the phylum level

杆菌门(Acidobacteria)丰富度均呈先升高后降低的趋势,其中T1处理达到最高值,较CK处理分别升高了14.71%、2.06%和16.17%。此外,施用人尿提高了土壤芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)的丰富度,且随着人尿用量的增加,其丰富度提高的越多,相比较于CK处理,T1~T3处理提高了8.15%~69.67%;随着人尿施用量的增加,厚壁菌门(Firmicutes)的丰度均呈现逐渐下降的趋势,T1、T2和T3处理分别较CK处理下降了10.03%、23.82%和29.15%。

#### 2.5 土壤细菌群落组成与土壤环境因子的关系

在门水平上相对丰度前10名的细菌门类与土壤理化指标之间的相关关系见图4。由图4可知,芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)的相对丰度与C/N、pH呈显著负相关关系( $P<0.05$ ),与TP、AP、SOM和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈显著正相关关系( $P<0.05$ );甲基甲酰胺门(Methylomirabilota)的相对丰度与AP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和EC呈显著正相关

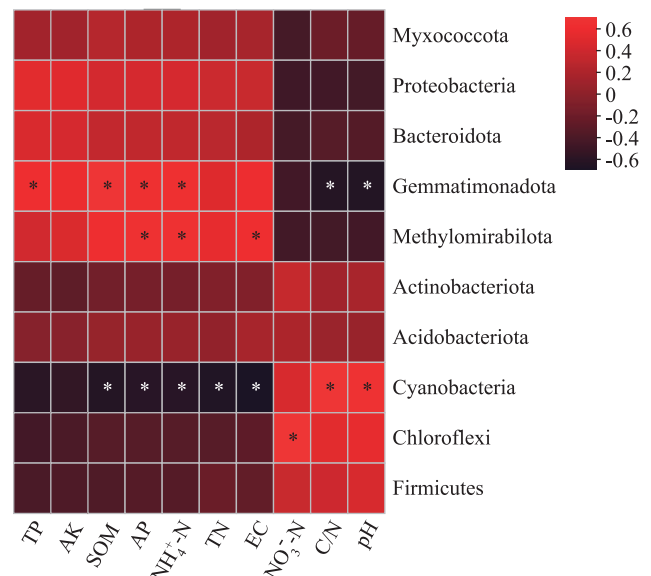


图4 土壤理化性质与细菌群落的相关性 Heatmap 图

Figure 4 Heatmap diagram of the correlation between soil physical and chemical properties and bacterial communities

关系( $P<0.05$ ),绿弯菌门(*Chloroflexi*)的相对丰度与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 呈显著正相关关系( $P<0.05$ )。

为进一步研究不同人尿施用量条件下土壤化学性质对细菌群落结构的影响,对其进行冗余分析。冗余分析结果(图5)表明,Axis1和Axis2两轴共解释了69.27%的细菌群落总变异。Mantel test分析结果表明,土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ ( $R^2=0.480\ 1$ ,  $P=0.028$ )、SOM( $R^2=0.483\ 3$ ,  $P=0.03$ )和AP( $R^2=0.412\ 6$ ,  $P=0.064$ )是细菌群落变异的最重要的3个环境贡献因子。此外CK处理和不同尿液施用量处理细菌的群落组成分离,说明施用人尿显著改变了土壤细菌微生物的群落结构。

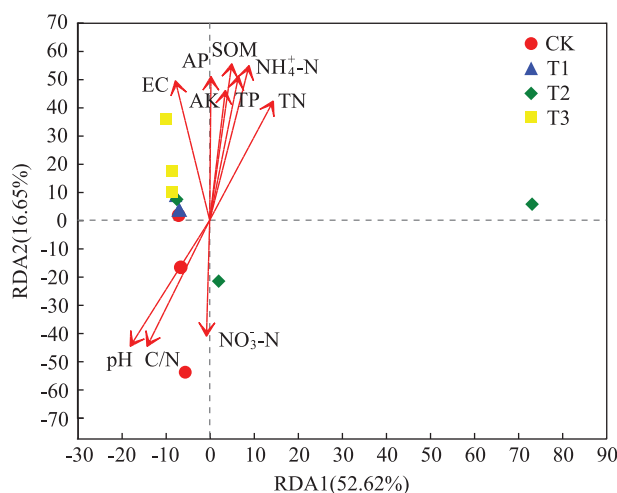


图5 土壤微生物群落结构与土壤化学特性的冗余分析

Figure 5 Redundancy analysis of soil microbial community structure and soil chemical properties

### 3 讨论

#### 3.1 人尿施用对生菜产量及品质的影响

相关研究表明,施用水溶肥料可改善蔬菜生物学性状、增加产量<sup>[23]</sup>,尿液属于液体肥料,这可能是促使生菜鲜质量提高的原因之一。土壤有机质含量也与蔬菜生长紧密相关<sup>[24]</sup>,施用人尿增加了土壤有机质含量(表1),可能进一步促进了生菜产量的提高。另外,叶菜中可溶性糖和Vc含量是其营养品质的重要指标<sup>[25]</sup>。生菜可溶性糖含量的升高可能是因为人尿液中除了含有生菜生长所需的必要营养元素以外,还含有大量B、Mo、Co、Mn等微量元素,这些元素对改善土壤的生物学特性有重要作用<sup>[26]</sup>。研究还发现营养元素供给更加全面、均衡,有助于叶菜类可溶性糖等物质的合成,这与刘沙沙等<sup>[27]</sup>的研究结果一致。生菜中Vc含量的降低则可能是因为叶菜类植株更易富集

硝酸盐,而硝酸盐的积累将间接导致植株体内的Vc含量降低<sup>[28]</sup>。此外,在植物生长发育过程中,最脆弱的时期是萌发期和幼苗期,盐度是限制植物生长发育重要的外界环境因素,其有害影响因气候条件、光照强度、植物种类或土壤条件而异<sup>[29]</sup>,而生菜作为一种糖生植物或叶生植物,对盐度十分敏感<sup>[30]</sup>。本试验中,当人尿施用量增至T3处理时,生菜不能正常萌发生长,其中可能的一个原因是随着人尿施用量持续增加,土壤的电导率陡然增加(表1),导致生菜受到高盐胁迫作用渗透压升高,生菜无法正常生长甚至无法萌发<sup>[31]</sup>。另外一个原因可能是尿液本身含有一定浓度的 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Cl}^-$ ,随着尿液施用量的不断增加,导致 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Cl}^-$ 浓度升高,致使生菜细胞膜中的营养不均衡,引起离子中毒死亡的现象<sup>[32]</sup>。因此,在今后的人尿施用过程中,必须严格控制其施用量,防止对植物产生毒害作用,影响人尿施用效果。

#### 3.2 人尿施用对土壤理化性质的影响

施肥是增加土壤肥力的有力措施,其最直接的作用是通过改变土壤养分含量而间接影响有机质含量<sup>[33]</sup>。先前研究发现,有机肥替代化肥,对于改善土壤理化性状,调节水、肥、气关系,具有相当重要的作用<sup>[34]</sup>。本研究结果显示,施用人尿后,土壤总氮、有效磷、速效钾的含量显著高于CK处理,说明施用一定量的人尿会提高土壤养分含量。Zhao等<sup>[35]</sup>的研究结果同样表明,土壤中有有效磷、速效钾含量与施用的有机肥量呈正相关。猜测可能的原因是有机肥中含有大量的腐植酸,其对土壤具有改良作用,尤其是对土壤速效养分含量有显著提升作用<sup>[36]</sup>。施用人尿提高了土壤有机质的含量,这可能是因为尿液中富含有机碳<sup>[37]</sup>,随着尿液施用将有机质带入土壤所致,这与Guo等<sup>[38]</sup>的研究结果一致。土壤电导率随尿液施用量的增加而增加,这是由于尿液本身具有一定的电导率,施用量增大,离子浓度增大,最终导致土壤电导率增加<sup>[39]</sup>。本研究发现,人尿的施用普遍导致土壤pH值的降低,原因之一可能是因为土壤中铵发生硝化反应,铵盐转化为亚硝酸盐的过程中会释放两个 $\text{H}^+$ ,从而导致土壤pH值降低<sup>[40-41]</sup>。事实上,良好的土壤管理可以促进土壤健康,从而促进粮食安全。除了提高土壤肥力,有机农业最大限度地减少了化肥和农药的施用,同时尽可能增加了养分循环<sup>[42]</sup>。

#### 3.3 人尿施用对土壤细菌多样性的影响

土壤微生物群落多样性水平对保持生态系统的稳定性和扰动后的系统功能恢复具有决定性的作



用<sup>[43]</sup>。土壤环境因子和土壤微生物群落显著相关,土壤环境因子的改变,会影响土壤中微生物群落结构的多样性<sup>[44]</sup>。本研究中,施用人尿降低了土壤细菌的多样性(表2),这可能是由于人尿的施用导致土壤的含盐量增加,而土壤微生物对其生活环境盐分变化十分敏感,盐分含量升高会导致土壤微生物渗透胁迫,最终导致土壤微生物多样性降低<sup>[45]</sup>。另外,据 Rousk 等<sup>[46]</sup>报道,pH 值的变化是导致细菌群落结构和多样性变化的主要原因,土壤 pH 值与细菌的生长成正比,这与本研究的结果相似。Wu 等<sup>[47]</sup>也证实,土壤电导率升高、pH 值降低,会导致土壤细菌多样性和群落组成变化。另外,本研究还发现,施用人尿降低了土壤 C/N,这会促使土壤中原有有机碳加速分解,进而影响土壤微生物的活性,这可能也是导致土壤细菌多样性和群落组成变化的原因之一<sup>[48]</sup>。

### 3.4 人尿施用对土壤细菌群落结构组成的影响

土壤细菌群落对土壤环境的变化十分敏感,土壤理化性质改变会导致土壤细菌群落结构变化,影响土壤肥力和作物产率,进而对植物的生长造成影响<sup>[49]</sup>。在本研究中,高通量测序揭示了不同人尿施用量条件下土壤细菌微生物群落结构的显著变化,优势细菌类群的相对丰度对土壤养分含量的变化有正反向响应。变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)属于富营养类群,对养分要求较高<sup>[50]</sup>,而人尿的施用增加了土壤中营养物质含量,为这些细菌的生长提供了良好的环境,进而促进了这些细菌丰度的增加。本研究冗余分析结果也进一步证实,芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)的相对丰度与 TP、AP、SOM 和  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  呈显著正相关关系(图5),这一结果也与桑文等<sup>[51]</sup>的研究结果相似。酸杆菌门(Acidobacteria)和绿弯菌门(Chloroflexi)多属于寡营养类群,由于人尿中含有丰富的营养物质,施用人尿导致土壤肥力增加,致使该类细菌的生长受到抑制<sup>[52-53]</sup>,最终导致丰度降低。另外,以往的研究表明,有机质通常是土壤微生物群落构建的重要环境因子<sup>[54]</sup>,大多数土壤微生物主要利用有机碳中的活性有机碳组分来促进其生理代谢<sup>[55]</sup>。因此,有机碳含量的变化可能会改变土壤微生物群落结构<sup>[56]</sup>。绿弯菌门(Chloroflexi)可以通过光合作用产生能量,在有机物分解和营养循环中发挥重要作用<sup>[57]</sup>,尿液施用增加了土壤有机质的含量,这可能是绿弯菌门丰度出现升高的原因。此外,研究发现,土壤酸化、盐渍化会导致土壤微生物群落结构的改变<sup>[58]</sup>。甲基甲酰胺门(Methy-

lomirabilota)为中度嗜盐菌<sup>[59]</sup>,而施用人尿在一定程度上提高了土壤的盐碱性,因此其丰度随之增加,这也解释了甲基甲酰胺门(Methylomirabilota)与土壤 EC 呈正相关关系的原因。

人尿被作为一种有潜力的有机液体肥料,不仅营养丰富且可再生,将人尿作为一种资源加以利用,对环境的可持续发展具有重要意义。本研究结果表明,施用人尿可以显著提高生菜的产量,改善土壤肥力,但却对土壤微生物群落的多样性产生了不利影响。因此,在以后的人尿农业利用方面,有必要继续深入研究人尿对不同类型肥料替代的应用、不同作物的种植以及土壤微生态系统的影响,科学地指导尿液资源的利用。此外,在实际应用中,尿液的单独分离使用还存在操作上的难题,还需要关注和研究人尿与粪便或其他肥料混合施用效果及其环境安全风险,这将有助于优化人尿液的应用条件,为尿液的进一步农业利用提供科学依据。

## 4 结论

(1)单施人尿情况下,施用量在 0~26  $\text{mL}\cdot\text{kg}^{-1}$  范围内,可显著提高生菜的鲜质量和可溶性糖含量,且均随着尿液施用量的增加而增加,但生菜的株高和 Vc 含量却随着尿液施用量的增加而不断降低。

(2)施用人尿能够改善土壤肥力,提高土壤的氮、磷、钾和有机质等养分含量,但尿液中的盐分积累也会造成土壤 EC 值升高,从而带来盐渍化风险。

(3)尿液施用会造成土壤理化性质的变化,进而对土壤细菌群落多样性和丰度造成影响。随着尿液施用量的增加,细菌群落多样性显著降低,总体来说,变形菌门(Proteobacteria)和芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)等富营养类细菌丰度呈升高趋势,而酸杆菌门(Acidobacteria)和绿弯菌门(Chloroflexi)等寡营养类细菌丰度呈降低趋势。

### 参考文献:

- [1] 田善义, 王明伟, 成艳红, 等. 化肥和有机肥长期施用对红壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(15): 4963-4972. TIAN S Y, WANG M W, CHENG Y H, et al. Effects of long-term application of chemical and organic fertilizers on enzyme activities of red soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(15): 4963-4972.
- [2] 张福锁, 申建波, 危常州, 等. 绿色智能肥料: 从原理创新到产业化实现[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 873-887. ZHANG F S, SHEN J B, WEI C Z, et al. Green smart fertilizer: From principle innovation to industrial realization [J]. *Acta Pedologica*, 2022, 59(4): 873-887.

- [3] 张占田, 徐维华, 姜学玲, 等. 有机肥替代化肥对玉米生长、养分吸收和土壤肥力的影响[J/OL]. 分子植物育种; <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=FZZW20220421005&uniplatform=NZKPT&v=zovg2PWuffmIUZXVE-HQI16LBSymNEWMhVSLne52jW-m1sDLcHD-BqIVHqHq8Y0n5> [2022-08-09]. ZHANG Z T, XU W H, JIANG X L, et al. Effects of organic fertilizer replacement on growth, nutrient uptake and soil fertility of maize [J/OL]. *Molecular Plant Breeding*; <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=FZZW20220421005&uniplatform=NZKPT&v=zovg2PWuffmIUZXVE-HQI16LBSymNEWMhVSLne52jW-m1sDLcHD-BqIVHqHq8Y0n5> [2022-08-09].
- [4] RANDALL D G, NAIDOO V. Urine: The liquid gold of wastewater[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018, 6(2): 2627-2635.
- [5] MCFARLANE I G. Geigy scientific tables: 8th edition[J]. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 1986, 79(8): 497.
- [6] KIRCHMANN H, PETERSSON S. Human urine-chemical composition and fertilizer use efficiency[J]. *Fertilizer Research*, 1994, 40(2): 149-154.
- [7] JONSSON H, SALOMON E, VINNERAS B, et al. Guidelines on the use of urine and faeces in crop production[M]. EcoSanRes Programme, Researchgate, 2004: 357-360.
- [8] AKPAN-IDIOK A U, UDO I A, BRAIDE E I. The use of human urine as an organic fertilizer in the production of okra (*Abelmoschus esculentus*) in south eastern Nigeria[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2012, 62: 14-20.
- [9] VINNERDS B, NORDIN A, NIWAGABA C, et al. Inactivation of bacteria and viruses in human urine depending on temperature and dilution rate[J]. *Water Research*, 2008, 42(15): 4067-4074.
- [10] PHILIP A, NOAH A, OLUFUNKE C. Effect of urine, poultry manure, and dewatered faecal sludge on agronomic characteristics of cabbage in Accra, Ghana[J]. *Resources*, 2017, 6(2): 19.
- [11] HEINONEN-TANSKI H, BLOM A, FABRITIUS H, et al. Pure human urine is a good fertilizer for cucumbers[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(1): 214-217.
- [12] PRADHAN S K, NERG A M, SJÖBLOM A, et al. Use of human urine fertilizer in cultivation of cabbage (*Brassica oleracea*): Impacts on chemical, microbial, and flavor quality[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2007, 55(21): 8657-8663.
- [13] ADEOLUWA O O, COFIE O. Urine as an alternative fertilizer in agriculture: Effects in amaranths (*Amaranthus caudatus*) production[J]. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 2012, 27(4): 287-294.
- [14] VILLA-CASTORENA M, ULERY A L, CATALAN-VALENCIA E A, et al. Salinity and nitrogen rate effects on the growth and yield of chile pepper plants[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(6): 1781-1789.
- [15] 高本强, 齐瑞, 赵阳, 等. 洮河上游不同海拔紫果云杉根际与非根际土壤细菌多样性及影响因子[J]. 微生物学通报, 2022, 49(9): 3604-3616. GAO B Q, QI R, ZHAO Y, et al. Bacterial diversity and influencing factors of inter- and non-inter-rooted soil bacteria in Yew spruce at different elevations in the upper Taohe River[J]. *Microbiology China*, 2022, 49(9): 3604-3616.
- [16] 颜彩缤, 赵亚, 胡福初, 等. 槟榔林下间作平托花生土壤细菌群落结构及多样性研究[J]. 中国土壤与肥料, 2022(2): 42-53. YAN C B, ZHAO Y, HU F C, et al. Soil bacterial community structure and diversity of pinto peanut under betel nut forest intercropping[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(2): 42-53.
- [17] 刘杰. 光强和光周期对水培生菜生长及品质调控研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019: 15-16. LIU J. Light intensity and photoperiod on growth and quality control of hydroponic lettuce[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2019: 15-16.
- [18] 罗江宏, 李杰, 李娟, 等. 施氮水平和间断施氮对生菜生长和品质的影响[J]. 北方园艺, 2022(11): 23-30. LUO J H, LI J, LI J, et al. Effects of nitrogen application level and intermittent nitrogen application on growth and quality of lettuce[J]. *Northern Horticulture*, 2022(11): 23-30.
- [19] 张怀志, 黄绍文, 冀宏杰, 等. 蔬菜施肥量简便快速推荐系统APP实现与应用[J]. 中国农业信息, 2018, 30(5): 68-75. ZHANG H Z, HUANG S W, JI H J, et al. Implementation and application of smart phone APP for simplified vegetable fertilization recommendation system[J]. *China Agricultural Informatics*, 2018, 30(5): 68-75.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [21] WANG Q, WANG C, YU W, et al. Effects of nitrogen and phosphorus inputs on soil bacterial abundance, diversity and community composition in Chinese fir plantations[J]. *Front Microbiol*, 2018, 9: 1543.
- [22] WANG J, SONG Y, MA T, et al. Impacts of inorganic and organic fertilization treatments on bacterial and fungal communities in a paddy soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 112: 42-50.
- [23] 彭玉净, 高进华, 卞会涛, 等. 史丹利大量元素水溶性肥料对小白菜产量和品质的影响研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(4): 48-52. PENG Y J, GAO J H, BIAN H T, et al. Study on the effect of Stanley mass element water-soluble fertilizer on yield and quality of Chinese cabbage[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(4): 48-52.
- [24] DING X, YUAN Y, LIANG Y, et al. Impact of long-term application of manure, crop residue, and mineral fertilizer on organic carbon pools and crop yields in a Mollisol[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(5): 854-859.
- [25] 任人, 汪李平, 杨敏, 等. 不同有机肥在盆栽绿叶蔬菜上的使用效果比较[J]. 长江蔬菜, 2017(20): 78-83. REN R, WANG L P, YANG M, et al. Comparison of the effects of different organic fertilizers on potted green leafy vegetables[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2017(20): 78-83.
- [26] ZHAO Z, ZHAO S, FU L, et al. Efficacy of vegetable waste biogas slurry on yield, quality and nitrogen use efficiency of cauliflower[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing, 2021, 621(1): 012066.
- [27] 刘沙沙, 李兵, 张古彬, 等. 猪粪有机肥替代化肥对黄淮地区油菜菜品质及养分利用的影响[J]. 广东农业科学, 2019, 46(8): 71-79.

- LIU S S, LI B, ZHANG G B, et al. Effect of organic fertilizer substitution of pig manure for chemical fertilizer on quality and nutrient utilization of oil and wheat rape in Huang and Huaihai areas[J]. *Guangdong Agricultural Science*, 2019, 46(8):71-79.
- [28] 高宝云, 吴秀宁, 张军, 等. 大量元素水溶肥料对生菜产量及生理特性的影响[J]. *陕西农业科学*, 2018, 64(6):40-42. GAO B Y, WU X N, ZHANG J, et al. Effect of massive element water soluble fertilizer on yield and physiological characteristics of lettuce [J]. *Shaanxi Agricultural Science*, 2018, 64(6):40-42.
- [29] TANG X, MU X, SHAO H, et al. Global plant-responding mechanisms to salt stress: Physiological and molecular levels and implications in biotechnology[J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2015, 35(4):425-437.
- [30] ADHIKARI N D, SIMKO I, MOU B. Phenomic and physiological analysis of salinity effects on lettuce[J]. *Sensors*, 2019, 19:4814.
- [31] ACOSTA-MOTOS J R, ORTUNO M F, BERNAL-VICENTE A, et al. Plant responses to salt stress: Adaptive mechanisms[J]. *Agronomy*, 2017, 7:18.
- [32] NEGRAO S, SCHMOCKEL S M, TESTER M. Evaluating physiological responses of plants to salinity stress[J]. *Annals of Botany*, 2017, 119:1-11.
- [33] 马坤, 芦光新, 邓晔, 等. 有机肥对垂穗披碱草根际微生物及土壤理化性质的影响[J]. *草地学报*, 2022, 30(3):594-602. MA K, LU G X, DENG Y, et al. Effect of organic fertilizer on inter-rooted microorganisms and soil physicochemical properties of *Pterocarpus pendula* [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(3):594-602.
- [34] 杨忠赞, 迟凤琴, 匡恩俊, 等. 有机肥替代对土壤理化性状及产量的综合评价[J]. *华北农学报*, 2019, 34(增刊1):153-160. YANG Z Z, CHI F Q, KUANG E J, et al. Comprehensive evaluation of organic fertilizer substitution on soil physicochemical properties and yield [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, 34(Suppl1):153-160.
- [35] ZHAO J, NI T, LI J, et al. Effects of organic-inorganic compound fertilizer with reduced chemical fertilizer application on crop yields, soil biological activity and bacterial community structure in a rice-wheat cropping system[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 99:1-12.
- [36] 柴彦君, 黄利民, 董越勇, 等. 沼液施用量对毛竹林地土壤理化性质及碳储量的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(8):214-220. CHAI Y J, HUANG L M, DONG Y Y, et al. Effect of methane application on soil physicochemical properties and carbon storage in moso bamboo woodlands[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(8):214-220.
- [37] KARAK T, BHATTACHARYYA P. Human urine as a source of alternative natural fertilizer in agriculture: A flight of fancy or an achievable reality[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011, 55(4):400-408.
- [38] GUO L, WU G, LI Y, et al. Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat-maize rotation system in Eastern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 156:140-147.
- [39] KASSA K, ALI Y, ZEWDIE W. Human urine as a source of nutrients for maize and its impacts on soil quality at Arba Minch, Ethiopia[J]. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 2018, 8(4):516-521.
- [40] SCHNNING C, MAGID J, LIEBLEIN G, et al. Mycology and environmental microbiology. urine diversion: Hygienic risks and microbial guidelines for reuse[C]. Copenhagen: Urban areas - rural areas and recycling - the organic way forward? Proceedings from NJF-seminar, 2001.
- [41] 王毅琪, 韩文彪, 赵玉柱, 等. 沼液对土壤理化性质的影响[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(1):193-195. WANG Y Q, HAN W B, ZHAO Y Z, et al. Effect of methane on soil physicochemical properties[J]. *Anhui Agricultural Science*, 2016, 44(1):193-195.
- [42] KAMMOUN M, GHORBEL I, CHARFEDDINE S, et al. The positive effect of phosphogypsum-supplemented composts on potato plant growth in the field and tuber yield[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 200:475-483.
- [43] GIRVAN M S, CAMPBELL C D, KILLHAM K, et al. Bacterial diversity promotes community stability and functional resilience after perturbation[J]. *Environmental Microbiology*, 2005, 7(3):301-313.
- [44] ALGUACIL M M, TORRECILLAS E, LOZANO Z, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi communities in a coral cay system (Morrocoy, Venezuela) and their relationships with environmental variables[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 505:805-813.
- [45] ABEE T, GROOT M N, TEMPELAARS M, et al. Germination and outgrowth of spores of *Bacillus cereus* group members: Diversity and role of germinant receptors[J]. *Food Microbiology*, 2011, 28(2):199-208.
- [46] ROUSK J, BROOKES P C, BAATH E. Investigating the mechanisms for the opposing pH relationships of fungal and bacterial growth in soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(6):926-934.
- [47] WU L P, MA H, ZHAO Q L, et al. Changes in soil bacterial community and enzyme activity under five years straw returning in paddy soil [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2020, 100:103215.
- [48] 王伟华, 刘毅, 唐海明, 等. 长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(1):430-437. WANG W H, LIU Y, TANG H M, et al. Effects of long-term fertilizer application on the amount, community structure and activity of soil microorganisms in rice fields[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(1):430-437.
- [49] 刘亚军, 马琨, 李越, 等. 马铃薯间作栽培对土壤微生物群落结构与功能的影响[J]. *核农学报*, 2018, 32(6):1186-1194. LIU Y J, MA K, LI Y, et al. Effects of potato intercropping cultivation on the structure and function of soil microbial communities[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(6):1186-1194.
- [50] GHOSH A, BHATTACHARYYA R, DWIVEDI B S, et al. Temperature sensitivity of soil organic carbon decomposition as affected by long-term fertilization under a soybean based cropping system in a sub-tropical Alfisol[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 233:202-213.
- [51] 桑文, 赵亚光, 张凤华. 化肥减量配施有机液体肥对土壤微生物群落结构多样性的影响[J]. *西南农业学报*, 2020, 33(11):2584-2590. SANG W, ZHAO Y G, ZHANG F H. Effect of fertilizer reduction with organic liquid fertilizer on the structural diversity of soil microbial communities[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sci-*



- ences, 2020, 33(11):2584–2590.
- [52] DING L, SU J, SUN G, et al. Increased microbial functional diversity under long-term organic and integrated fertilization in a paddy soil[J]. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 2018, 102:1969–1982.
- [53] LI P, KONG D, ZHANG H, et al. Different regulation of soil structure and resource chemistry under animal- and plant-derived organic fertilizers changed soil bacterial communities[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 165:104020.
- [54] CUI H, SUN W, DELGADO B M, et al. The effects of mowing and multi-level N fertilization on soil bacterial and fungal communities in a semiarid grassland are year-dependent[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 151:108040.
- [55] WANG X, ZHANG W, LIU Y, et al. Identification of microbial strategies for labile substrate utilization at phylogenetic classification using a microcosm approach[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 153:107970.
- [56] SHA M, XU J, ZHENG Z, et al. Enhanced atmospheric nitrogen deposition triggered little change in soil microbial diversity and structure in a desert ecosystem[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 31:e01879.
- [57] WANG C, LIU S, ZHANG Y, et al. Bacterial communities and their predicted functions explain the sediment nitrogen changes along with submerged macrophyte restoration[J]. *Microbial Ecology*, 2018, 76(3):625–636.
- [58] 张婷, 聂晶晶, 李海燕, 等. 设施蔬菜土壤细菌群落结构及多样性分析[J]. *农村经济与科技*, 2022, 33(5):13–15. ZHANG T, NIE J J, LI H Y, et al. Analysis of soil bacterial community structure and diversity of vegetables in facilities[J]. *Rural Economy and Science-Technology*, 2022, 33(5):13–15.
- [59] YU W J, LEE J W, NGUYEN N L, et al. The characteristics and comparative analysis of methanotrophs reveal genomic insights into *Methylobacterium* sp. enriched from marine sediments[J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2018, 41(5):415–426.

(责任编辑:叶飞)



《农业环境科学学报》公益宣传