



土壤渗滤系统处理农村黑灰水对庭院菜地土壤环境的影响

王淞民, 刘丽媛, 魏孝承, 彭皓, 张春雪, 柳博, 郑向群

引用本文:

王淞民, 刘丽媛, 魏孝承, 彭皓, 张春雪, 柳博, 郑向群. 土壤渗滤系统处理农村黑灰水对庭院菜地土壤环境的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(2): 305–318.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0404>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

3种耐盐植物对滨海盐土化学性质及微生物群落结构的影响

刘雅辉, 孙建平, 马佳, 姚玉涛, 吕晶晶, 张宏伟

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 28–35 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0049>

土壤微生物敏感菌及信号调节途径对邻苯二甲酸二甲酯的响应

王春龙, 王志刚, 由义敏, 吕智航, 刘泽平, 陈文晶, 史一然

农业资源与环境学报. 2018, 35(3): 215–221 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0325>

长期有机无机肥配施对红壤性水稻土微生物生物量和有机质结构的影响

蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 吕真真, 冀建华, 冯兆滨, 刘秀梅

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 810–819 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0584>

硒对油菜根际土壤微生物的影响

程勤, 胡承孝, 明佳佳, 蔡苗苗, 刘康, 汤艳妮, 赵小虎

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 104–110 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0061>

生态与常规种植对土壤养分、微生物及重金属的影响

王玉梅, 张雪华, 盛虎, 陈能场

农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 361–367 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0202>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王淞民, 刘丽媛, 魏孝承, 等. 土壤渗滤系统处理农村黑灰水对庭院菜地土壤环境的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(2): 305–318.

WANG S M, LIU L Y, WEI X C, et al. Effects of rural black-gray water treatment by soil infiltration system on the soil environment of vegetable garden[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(2): 305–318.



开放科学 OSID

土壤渗滤系统处理农村黑灰水对庭院菜地土壤环境的影响

王淞民, 刘丽媛, 魏孝承, 彭皓, 张春雪*, 柳博, 郑向群*

(农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要:为探究土壤渗滤系统处理农村黑灰水对庭院菜地土壤环境的影响,以天津市宁河区张老仁庄一农户为示范户,于2020年7月13日在其庭院外建造三格化粪池+渗滤沟式土壤渗滤系统,同时在土壤渗滤系统上方建造菜园,设置4个处理组:空白对照组(CK)、白菜组(BC)、黄瓜组(HG)、水萝卜组(SLB),探究土壤渗滤系统处理农村黑灰水对庭院菜地土壤理化指标[全氮(TN)和全磷(TP)]、卫生学指标(粪大肠菌值和蛔虫卵死亡率)、微生物群落及蔬菜卫生学指标的影响。结果表明,在土壤理化指标方面,菜地各处理组两土层TN含量总体呈先上升后下降的趋势。对于BC、HG和SLB,从蔬菜种植到收割,表层土(0~20 cm)TN含量分别提高589.77%、356.93%和70.00%,深层土(20~40 cm)TN含量分别提高266.46%、718.22%和148.70%。菜地各处理组两土层TP含量呈先上升后下降再上升的趋势,整体上对于表层土而言,除了CK下降9.66%外,其余3个处理组TP含量分别提高了0.14%、4.53%、3.09%;对于深层土,4个处理组TP含量均有下降,分别下降16.63%、8.65%、18.89%和4.35%。在微生物群落方面,土壤渗滤系统处理农村黑灰水对菜地深层土壤细菌群落多样性和丰富度均有显著促进作用($P < 0.05$),同时降低了致病微生物相对丰度。在卫生学指标方面,庭院菜地土壤粪大肠菌值和蛔虫卵死亡率均符合《粪便无害化卫生要求》(GB 7959—2012)。在蔬菜卫生学指标方面,三种蔬菜粪大肠菌群数均低于 $3 \text{ MPN} \cdot \text{g}^{-1}$,蛔虫卵死亡率均达到100%。研究表明,在蔬菜种植期间,土壤渗滤系统处理农村黑灰水会显著提高菜地TN、TP含量,经土壤渗滤系统处理农村黑灰水前后的菜地土壤卫生学指标均达到无害化要求,土壤渗滤系统处理农村黑灰水可改善菜地土壤微生物生长繁殖环境,同时降低致病微生物对环境的风险,在土壤渗滤系统上方建造菜园合理且不会影响蔬菜食用安全性。

关键词:土壤渗滤系统;农村黑灰水;菜地;土壤环境

中图分类号:X53;S63

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)02-0305-14

doi: 10.13254/j.jare.2021.0404

Effects of rural black-gray water treatment by soil infiltration system on the soil environment of vegetable garden

WANG Songmin, LIU Liyuan, WEI Xiaocheng, PENG Hao, ZHANG Chunxue*, LIU Bo, ZHENG Xiangqun*

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

Abstract: To explore the effect of rural black-gray water treatment by a soil infiltration system on the soil environment of garden vegetable fields, a three-compartment septic tank+infiltration trench infiltration system was established in Zhanglaorenzhuang in the Ninghe District of Tianjin City on 13 July 2020. Vegetable garden with four treatment groups, namely, control (CK), cabbage (BC), cucumber (HG), summer radish (SLB), were built above the soil infiltration system simultaneously to explore the influences of infiltration trench system on the following physical and chemical indicators: the total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) content, a hygienic index using fecal

收稿日期:2021-06-30 录用日期:2021-09-02

作者简介:王淞民(1997—),男,辽宁沈阳人,硕士研究生,主要研究方向为农业废弃物资源化利用。E-mail:wangsongmin731@163.com

*通信作者:张春雪 E-mail:zhangchunxue215@163.com; 郑向群 E-mail:zhengxiangqun@126.com

基金项目:中国农业科学院基本科研业务费专项院级统筹项目(2020年度和2021年度)

Project supported: Special Institute-Level Coordinating Project of Basic Scientific Research Business Expenses of Chinese Academy of Agricultural Sciences (2020 and 2021)

coliforms and ascaris egg mortality, a biological index, and indicators of vegetable hygiene. Results showed that the TN content in two soil layers of the vegetable field in each treatment group showed an increasing and then decreasing trend for the physical and chemical indicators. For the BC, HG, and SLB groups, the TN content in the topsoil increased by 589.77%, 356.93%, and 70.00%, respectively, and in the deep soil by 266.46%, 718.22%, and 148.70%, respectively, from planting to harvesting. The TP content in the vegetable fields of all treatment groups showed an increasing, then decreasing, and then increasing trend. For the topsoil, the TP content of the CK group decreased by 9.66% but increased in the other three treatment groups by 0.14%, 4.53%, and 3.09%. For deep soil, the TP content in four treatment groups decreased by 16.63%, 8.65%, 18.89%, and 4.35%, respectively. In terms of biological indicators, the treatment of rural black-gray water by the soil filtration system promoted the diversity and richness of the soil bacterial community in deep vegetable fields ($P < 0.05$) and decreased the relative abundance of pathogenic microorganisms. Moreover, the fecal coliforms and mortality of ascarid eggs of the garden vegetable soil met the *Hygienic requirements for harmless disposal of night soil* (GB 7959—2012). In addition, the fecal coliform content of the three types of vegetables was less than $3 \text{ MPN} \cdot \text{g}^{-1}$, whereas the ascarid egg mortality was 100%. In conclusion, the soil infiltration system treatment of rural black-gray water can significantly increase the soil TN and TP content in vegetable fields during vegetable planting. The soil hygiene indicators of vegetable fields before and after the treatment of rural black ash water by the soil infiltration system meet the harmless requirement. The treatment of rural black-gray water by a soil infiltration system can improve the growth and reproduction environment of soil microorganisms in vegetable fields, reducing the risk of disease-treating microorganisms to the environment. Thus, building a garden on top of a soil infiltration system is possible without compromising vegetable safety.

Keywords: soil infiltration system; rural black-gray water; vegetable field; soil environment

三格式化粪池具有原理简单、建造速度快、无害化效果好、产物肥效高、造价低廉等优势,在我国农村“厕所革命”推进过程中发挥着重要作用^[1],但三格化粪池出水处理不当会对周边环境造成危害^[2]。目前,常见的三格化粪池出水处理方式主要有两种:一是直接还田,就地肥料化;二是集中清掏,统一转运。三格化粪池出水虽经无害化处理,但其中的致病微生物、蛔虫卵和大肠菌群等并未被完全杀灭,若将三格化粪池出水直接进行农田灌溉,尾水中的致病菌会造成土壤环境污染^[3]。集中清掏、统一转运主要用于城郊附近或经济条件较好的农村地区,局限性较高。新型三格化粪池出水处理方式——土壤渗滤系统^[4],由于其低耗高效、运行简易、对尾水中污染物无害化处理效果好等优点^[5-6]在我国农村地区广泛使用。

土壤渗滤系统具体用法是将三格化粪池出水有控制地投配到土壤渗滤系统中,利用土壤-微生物-植物系统的自净和自我调节能力,通过一系列物理、化学、生物等过程^[7],去除三格化粪池出水中污染物^[8]。但土壤渗滤系统未能对三格化粪池出水中氮、磷等营养物质进行资源化利用,造成氮、磷等营养元素的浪费。而在土壤渗滤系统上方种植作物,不仅可以作物吸收三格化粪池中的氮、磷等营养元素^[9],降低土壤渗滤系统的处理负荷,还能提高经济效益^[10]。

基于此,本研究将三格化粪池与土壤渗滤系统联用,并在土壤渗滤系统上方种植3种不种类型蔬

菜,通过化粪池+渗滤沟式土壤渗滤系统这一模式,探究土壤渗滤系统处理农村黑灰水对庭院菜园土壤环境的影响,以及在土壤渗滤系统上方种植蔬菜的合理性及安全性,为土壤渗滤系统工艺模式优化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区域概况

本研究选择天津市宁河区东棘坨镇张老仁村作为试验区域,该村位于天津市东北部(北纬 $39^{\circ}44'$,东经 $117^{\circ}49'$),年平均气温 11.6°C ,年平均降水量 580.7 mm ,相对湿度 66% 。该村缺少三格化粪池尾水处理设施,尾水就地还田,易导致周围水体污染^[11]。该村土壤理化指标、卫生指标背景值(BJ)和三格化粪池第三格出水水质指标分别如表1、表2所示,土壤渗滤系统中各污染物单位面积每日负荷量如表3所示。

1.2 试验设计

依据张老仁村的地势条件,设计了“化粪池+土壤渗滤系统”技术模式,其设计思路(图1)如下:

(1)污水通过排水管道进入三格化粪池。

(2)污水在三格化粪池内停留足够长的时间,使得固体沉降到底部形成污泥^[12]。

(3)三格化粪池尾水通过水泵从三格化粪池流出,经布水系统,定时定量排放至土壤渗滤系统。

(4)尾水进入土壤渗滤系统经过一定处理后进入自然土壤系统。

表1 施工前各土层土壤理化指标和卫生指标背景值

Table 1 Background values of soil physicochemical and sanitary indexes in the different soil layer before construction

指标 Index	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	80~100 cm
pH	8.06	8.49	8.21	8.09	8.26
含水率 Moisture content/%	23.1	22.5	22.7	23.2	22.9
阳离子交换量 CEC/(cmol·kg ⁻¹)	13.5	20.7	26.6	27.5	23.0
全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	1.08	1.03	0.63	0.60	0.75
全磷 TP/(g·kg ⁻¹)	0.81	0.97	0.78	0.85	0.77
硝态氮 NO ₃ ⁻ /(mg·kg ⁻¹)	806	991	550	445	380
铵态氮 NH ₄ ⁺ /(mg·kg ⁻¹)	2.85	7.40	5.50	4.45	2.60
氟化物 Fluoride/(mg·kg ⁻¹)	364	468	484	492	477
粪大肠菌值 Fecal coliform value	400	1 100	1 100	430	1 100
蛔虫卵死亡率 Mortality of ascaris egg/%	100	100	100	100	100

表2 三格化粪池第三格出水水质指标

Table 2 The effluent water quality index of the third compartment of three septic tanks

指标 Index	范围 Range	平均值 Average value
pH	7.74~8.21	7.93
铵态氮 NH ₄ ⁺ /(mg·L ⁻¹)	72.5~76.5	74.70
硝态氮 NO ₃ ⁻ /(mg·L ⁻¹)	0.24~0.60	0.37
全氮 TN/(mg·L ⁻¹)	87.5~96.0	93.0
全磷 TP/(mg·L ⁻¹)	8.75~9.15	8.98
全盐量 Total salt content/(mg·L ⁻¹)	590~744	663.67
氟化物 Fluoride/(mg·L ⁻¹)	0.36~0.42	0.40
化学需氧量 COD/(mg·L ⁻¹)	336~452	403
生化需氧量 BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	169~209	183.33
阴离子表面活性剂 Anionic surfactant/(mg·L ⁻¹)	2.36~2.57	2.48
粪大肠菌群数 Fecal coliform/(CFU·L ⁻¹)	200	200

表3 土壤渗滤系统中各污染物单位面积日负荷(mg·m⁻²·d⁻¹)

Table 3 Daily load per unit area of pollutants in soil infiltration system(mg·m⁻²·d⁻¹)

指标 Index	范围 Range	平均值 Average value
铵态氮 NH ₄ ⁺	116.9~123.3	120.4
硝态氮 NO ₃ ⁻	0.386~0.967	0.596
全氮 TN	141.1~154.8	150.0
全磷 TP	14.1~14.7	14.4
全盐量 Total salt content	951.6~1 200.0	1 070.4
氟化物 Fluoride	0.58~0.67	0.64
化学需氧量 COD	541.9~729.0	650.0
生化需氧量 BOD ₅	272.5~337.0	295.6
阴离子表面活性剂 Anionic surfactant	3.80~4.14	4.00

(5)当污水渗透到自然土壤系统后,经过土壤的吸收、沉淀作用以及微生物处理净化,清除污水中的有害细菌和病毒。

(6)净化后的水最终汇入地下水。

1.3 土壤渗滤系统的建设

2020年7月13日在天津市宁河区张老仁庄一农户庭院外建设化粪池+渗滤沟式土壤渗滤系统(施工图如图2所示)。其中布水区+处理区为一长6.2 m、

宽2.5 m、深0.6 m的长方体土坑,布水系统由4根直径为32 mm穿孔管组成,穿孔管每个孔之间的距离为100 mm,4根穿孔管将布水区平均分为3部分,每部分宽度为700 mm,穿孔管的孔径为5 mm。在穿孔管上添加粗细不同的填料,填料深约300 mm,在填料上方覆盖约300 mm的土壤。布水区距三格化粪池第三格直线距离约3 m,污水通过三格化粪池第三格中吸污泵定时定量地投放到土壤渗滤系统中。吸污泵设置每日工作1 h,工作时段为每日上午8:00—9:00,吸污泵工作流量为25 L·h⁻¹,每日向土壤渗滤系统中

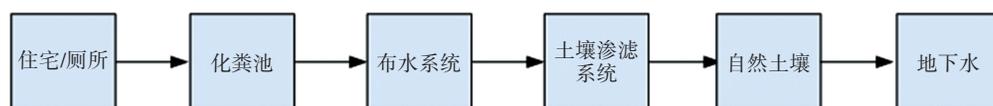


图1 化粪池+土壤渗滤系统技术模式设计

Figure 1 Design of septic tank+soil infiltration system technical mode

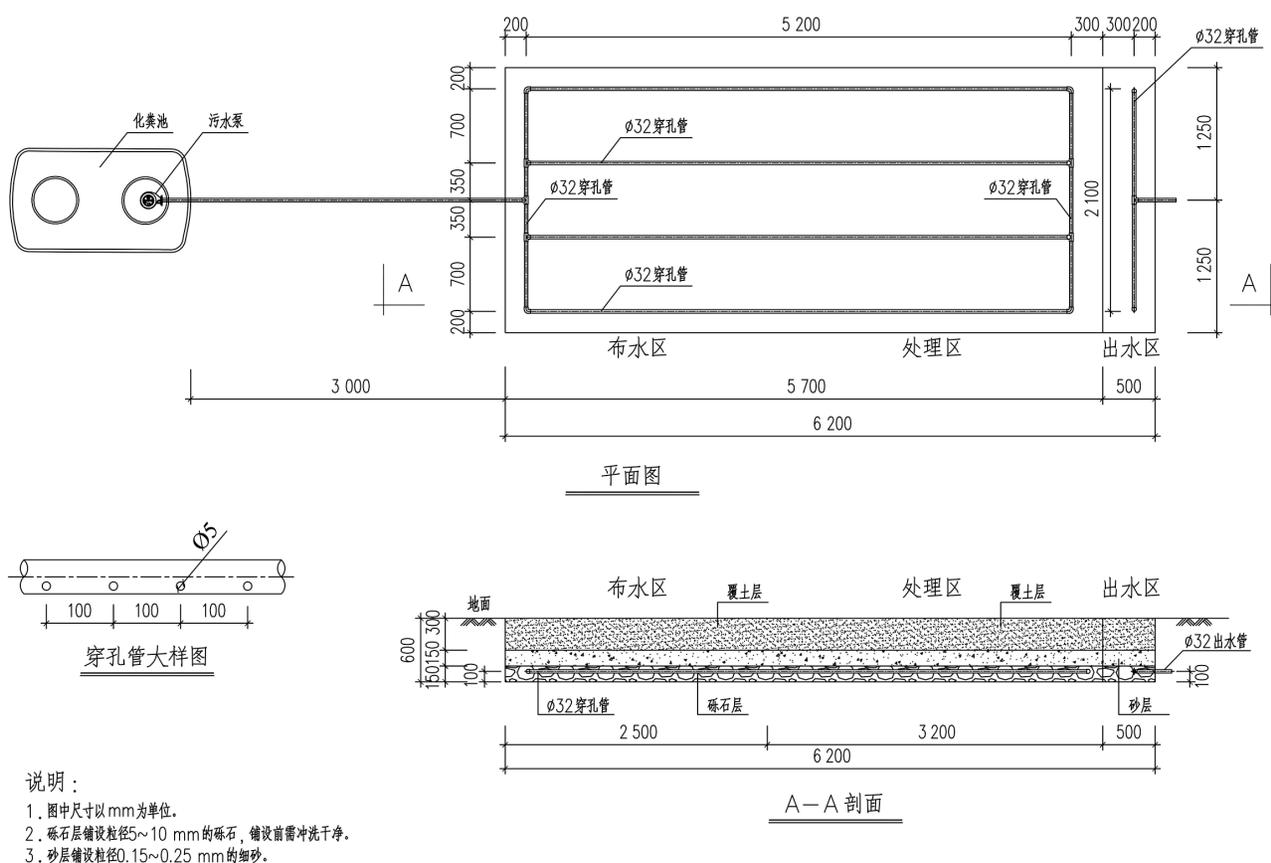


图2 化粪池+土壤渗滤系统施工图

Figure 2 The construction drawing of septic tank+soil infiltration system

投放污水 25 L。最后在土壤渗滤系统上方建造菜园并种植蔬菜,设置4个处理组:空白对照组(CK)、白菜组(BC)、黄瓜组(HG)和水萝卜组(SLB),蔬菜于2020年7月13日种植。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 样品采集

2020年7月至2021年3月每隔30 d在土壤渗滤系统上方的4个处理组菜地采集试验样品,用土钻分别采取表层(深度0~20 cm)和深层(深度20~40 cm)土壤样品共8个,每个样品3次重复,共计24个样品,采样点如图3所示。

1.4.2 指标测定

本试验测定的土壤指标(全氮、全磷、粪大肠菌值和蛔虫卵死亡率)和蔬菜指标(亚硝酸盐、维生素C、铁、还原糖、pH、粪大肠菌群数和可溶性糖)检测方法及标准分别如表4、表5所示。

1.4.3 数据分析

理化指标数据采用IBM SPSS Statistics 22.0进行

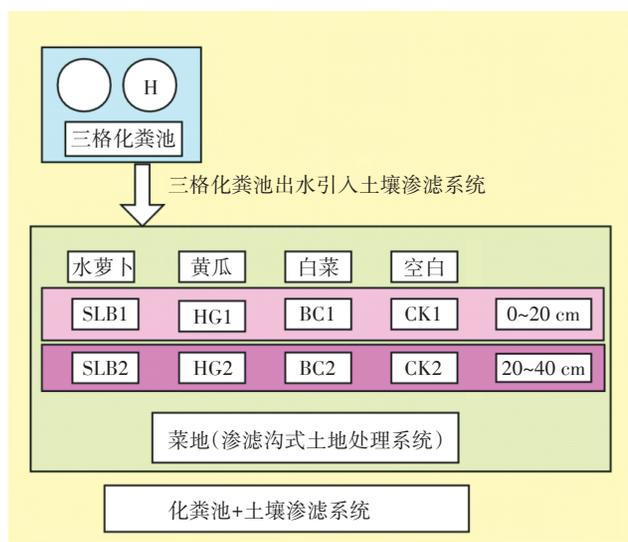


图3 采样点平面示意图

Figure 3 Schematic diagram graph of sampling points

单因素方差分析(ANOVA),利用最小显著差法(LSD)检验试验数据的差异显著性($P<0.05$)^[13],并采

表4 土壤指标检测方法及标准

Table 4 Soil sample index detection methods and standards

检测项目 Index	分析方法 Analysis method	标准 Standard
全氮	《土壤质量 全氮的测定 凯氏法》	HJ 717—2014
全磷	《土壤 总磷的测定 碱熔-钼锑抗分光光度法》	HJ 632—2011
粪大肠菌值	《城市污水处理厂污泥检验方法》	CJ/T 221—2005
蛔虫卵死亡率	《水质 蛔虫卵的测定 沉淀集卵法》	HJ 775—2015

表5 蔬菜指标检测方法及标准

Table 5 Vegetable sample index detection methods and standards

检测项目 Index	分析方法 Analysis method	标准 Standard
亚硝酸盐	《食品安全国家标准 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定》	GB 5009.33—2016
维生素C	《食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定》	GB 5009.86—2016
铁	《食品安全国家标准 食品中铁的测定》	GB 5009.90—2016
还原糖	《食品安全国家标准 食品中还原糖的测定》	GB 5009.7—2016
pH	《食品安全国家标准 食品pH值的测定》	GB 5009.237—2016
粪大肠菌群数	《食品安全国家标准 食品微生物学检验 大肠菌群计数》	GB 4789.3—2016
可溶性糖	《蔬菜及其制品中可溶性糖的测定 铜还原碘量法》	NY/T 1278—2007

用Origin 2018进行绘图;土壤微生物高通量测序数据利用Majorbio云平台制图并分析。

2 结果与讨论

2.1 土壤渗滤系统处理农村黑灰水对庭院菜地土壤理化性质的影响

2.1.1 TN

4个处理组不同土层TN含量如图4所示。各处理组表层土与深层土TN含量在试验期间总体上均呈现先上升后下降的趋势,其中空白对照组、黄瓜组和水萝卜组在2020年11月TN含量达到顶峰,并与2020年7月和2021年3月TN含量相比差异显著($P < 0.05$),这可能是由于该村农户在11月时粪污排泄量增加而导致污水中污染物负荷增大^[14],进而导致菜地土壤吸附的氮素量升高。

对于白菜组、黄瓜组和水萝卜组,从2020年7月开始种植蔬菜到2020年11月收割蔬菜,表层土TN含量分别提高了589.77%、356.93%和70.00%,深层土分别提高了266.46%、718.22%和148.70%。表明土壤渗滤系统处理农村黑灰水使庭院菜地表层与深层土壤TN含量提高。有研究表明土壤渗滤系统从建设到运行稳定需要一个稳定周期^[15],孔刚等^[16]研究发现渗滤沟式土壤渗滤系统运行是否稳定可通过系统对TN的去除效率来判断,其研究结果表明土壤渗滤系统对TN的去除存在两个阶段。前期TN去除率低,仅

为40%~50%,系统不稳定;后期TN去除率提高,达70%~95%,表明系统已稳定,从不稳定到稳定共经历约60 d。而本研究从2020年7月至9月系统处于不稳定期,系统对TN去除率低,土壤对TN的吸附也较少,此外7月至9月蔬菜处于幼苗期,其对土壤氮素的吸收能力较弱。而2020年10月至11月,土壤渗滤系统运行稳定,系统对TN的去除率逐渐提升,菜地土壤对氮素的吸附也逐渐增强,运行后期,土壤优势微生物数量迅速增长且比例协调,生物脱氮能力也得到大幅提升^[17],蔬菜对氮素的吸收也随之增强。

进入2020年11月后,温度逐渐降低,但是系统仍然保持稳定运行。从2020年11月(收割蔬菜)至12月,除白菜组外,对照组、黄瓜组和水萝卜组两土层TN含量均出现下降,3个处理组表层土分别下降了68.70%、64.07%和2.50%,深层土分别下降了84.07%、74.54%和7.43%,白菜组两土层TN含量则分别提高10.05%、133.61%。这可能是由于收割蔬菜之后蔬菜根系被移出菜地土壤,土壤渗滤系统反硝化反应中被植物根系所吸收的NO₃较少,导致大部分NO₃在微生物的反硝化反应作用下排至系统外部^[18]。此外,李娜^[19]的研究表明无论是在冻结温度变化还是冻融循环模式改变的条件下,土壤TN含量均随土壤深度的增加而降低,这与本研究结论一致。而白菜组两土层TN含量上升可能是由于土壤冻融作用使白菜根系土壤矿化氮含量增加^[19]。

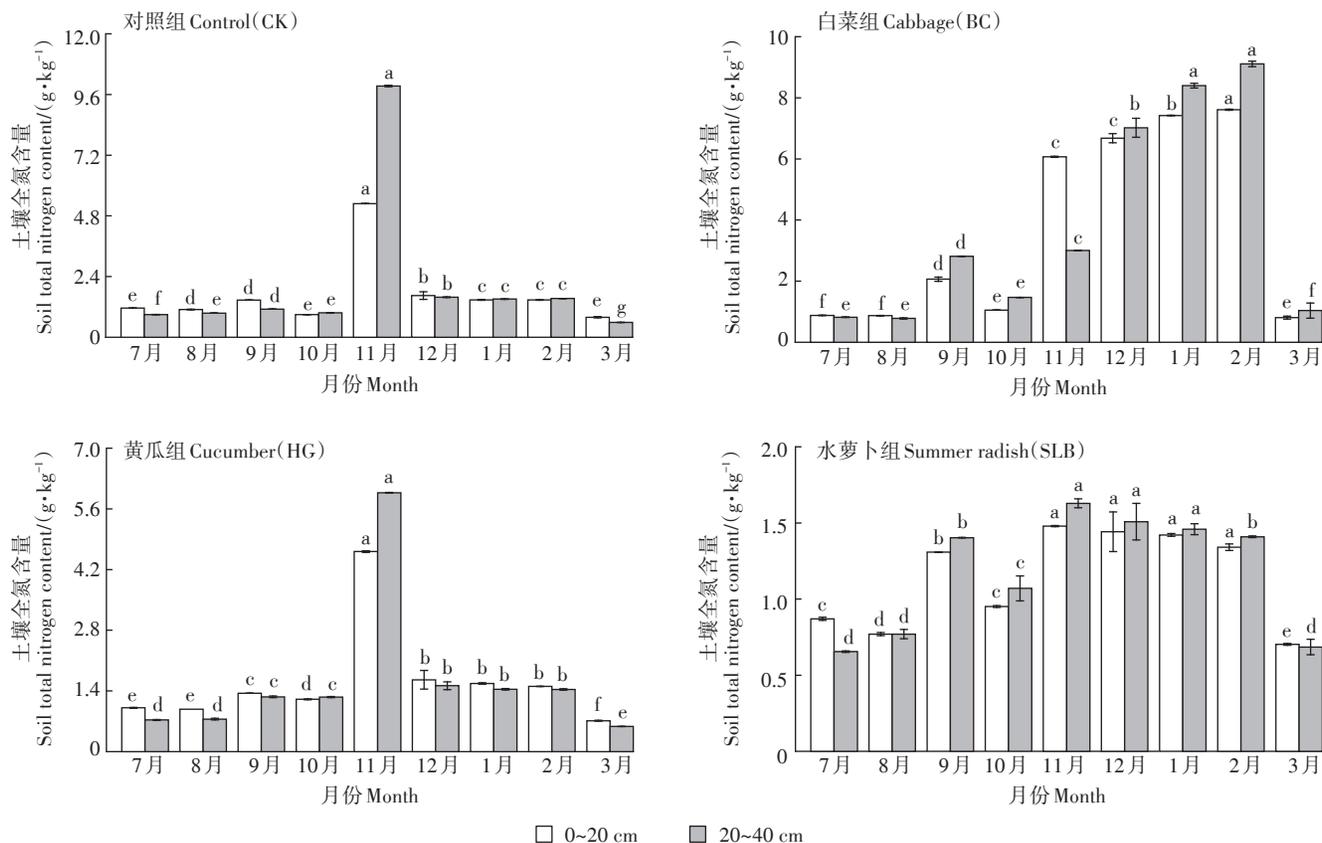


图4 不同月份不同处理组各土层全氮(TN)含量

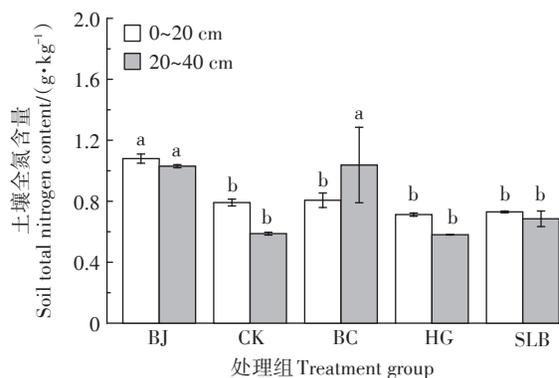
Figure 4 Total nitrogen content in different soil layers in different treatment groups in different months

如图5所示,与未经农村黑灰水处理过的土壤TN含量相比,除了3月白菜组深层TN含量无显著差异外($P>0.05$),其余处理组各土层TN含量与之均有

显著差异($P<0.05$),这表明土壤渗滤系统处理农村黑灰水对菜地土壤两土层TN含量均有显著影响。

2.1.2 TP

4个处理组不同土层TP含量如图6所示,整体上各处理不同时期土壤TP含量波动幅度较小。对于表层土而言,试验期间4个处理组整体上呈先上升后下降再上升的趋势。其中从2020年7月(种植蔬菜)开始至2020年11月(收割蔬菜)结束,4个处理组TP含量均呈上升趋势,且在11月时除CK外其余3个处理组表层土TP含量均高于深层土,这可能是由于生活污水中磷经过土壤渗滤系统的吸附、沉淀和微生物同化作用后被植物根系吸收利用,最终以有机物残留体的形式积累于表层土壤^[20],使得表层土壤TP含量高于深层土壤,这与唐文忠^[11]等的研究结果一致。而从2020年11月至2021年2月4个处理组表层土TP含量均呈下降趋势,到了3月均开始出现上升趋势。整体上从2020年7月至2021年3月,对于表层土而言,除了CK下降9.66%外,其余3个处理组TP含量分别提高了0.14%、4.53%和3.09%。对于深层土,4个处理组TP含量均有所下降,分别下降16.63%、8.65%、



BJ代表处理前的土壤;CK代表空白对照组;BC代表白菜组;HG代表黄瓜组;SLB代表水萝卜组。下同

BJ represents soil before infiltration treatment;CK represents the blank control group;BC represents the cabbage group;HG represents the cucumber group;SLB represents the summer radish group. The same below

图5 处理前后各处理组各土层全氮(TN)含量

Figure 5 The total nitrogen content of each soil layer in each treatment group before and after infiltration treatment

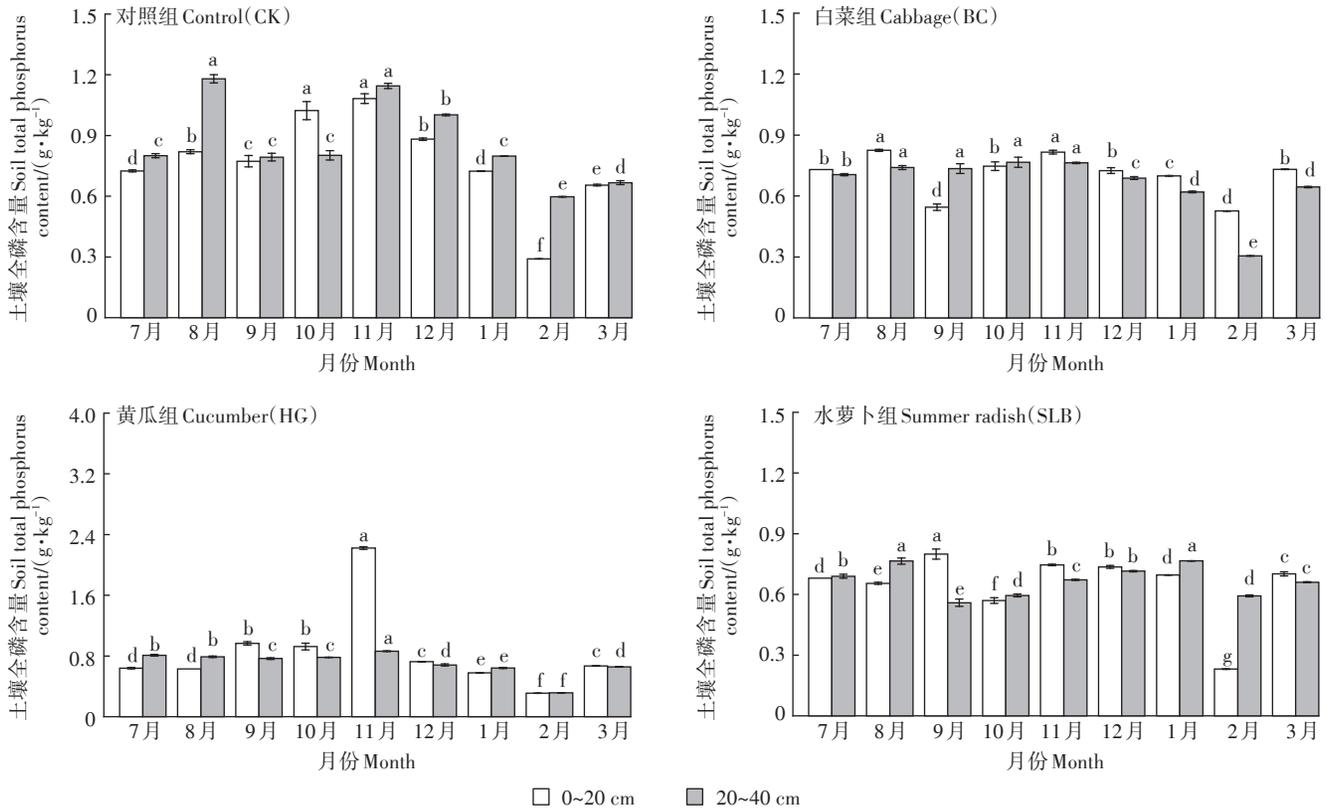


图6 不同月份不同处理组各土层全磷(TP)含量

Figure 6 Total phosphorus content in different soil layers in different treatment groups in different months

18.89%和4.35%。

有研究^[21-22]表明土壤中磷的迁移与温度有关,温度升高,土壤吸附磷的作用增强^[23]。本研究中从2020年7月至11月,蔬菜根系对TP的吸附使得表层土壤TP含量高于深层土壤。而从2020年11月收割蔬菜结束至2021年2月,随着温度的降低,4个处理组两土层TP含量均显著下降($P<0.05$),而从2021年2月至3月随着温度的提升,4个处理组两土层TP含量均显著上升,这与此前研究^[21-22]结论一致。

从2020年7月(种植蔬菜)至2020年11月(收割蔬菜),各处理组表层土TP含量分别提高了49.24%、11.78%、248.91%和9.71%,深层土TP含量除了水萝卜组降低了2.61%以外,其余处理组分别提高了43.13%、8.23%和6.54%。对于表层土而言,在7月种植蔬菜后,相较于CK,白菜组TP含量提高0.69%,黄瓜组与水萝卜组分别下降11.72%和6.21%;对于深层土而言,黄瓜组TP含量较CK提高了1.25%,白菜组和水萝卜组分别下降11.88%和13.75%。

而在2020年11月(收割蔬菜)时,对表层土而言,相较于CK,黄瓜组TP含量下降106.38%,白菜组和水萝卜组分别提高24.58%、31.05%。而对深层土而言,

3个菜地处理组TP含量均较CK有所提高,分别提高33.36%、24.63%和41.31%,这表明土壤渗滤系统对庭院菜地表层土与深层土TP含量均有影响。有研究表明,土壤渗滤系统去除TP的途径为土壤吸附、化学沉淀及植物吸收作用^[24],其中最重要的是土壤吸附及磷的化学沉淀作用,而该作用主要受土壤的物理化学特性影响,如pH值、氧化还原状态和土壤中金属离子(Ca^{2+} 、 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 等)含量等^[25-26]。李海波等^[27]、秦伟等^[28]研究发现,土壤渗滤系统对污水中TP的去除效果很好,去除率始终保持在95%左右,表明土壤渗滤系统对磷具有良好的持留作用,这与本研究结果一致。

此外,如图7所示,与未经农村黑灰水处理过的土壤TP含量相比,2021年3月各处理组各土层TP含量均有显著差异($P<0.05$),这表明土壤渗滤系统处理农村黑灰水对菜地土壤两土层TP含量均有显著影响。

2.2 土壤渗滤系统处理农村黑灰水对庭院菜地土壤细菌群落的影响

2.2.1 生态学指数

对于菜地土壤细菌群落,不同处理抽平后的有效序列数为:30个土壤样本共获得7089个OTUs,物种分类统计包括:48个门、155个纲、372个目、602个科

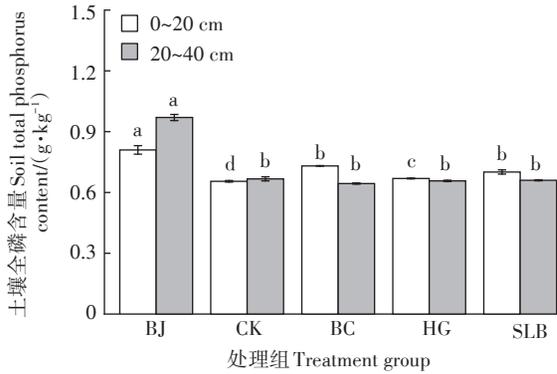


图7 处理前后各处理组各土层全磷(TP)含量

Figure 7 The total phosphorus content of each soil layer in each treatment group before and after infiltration treatment

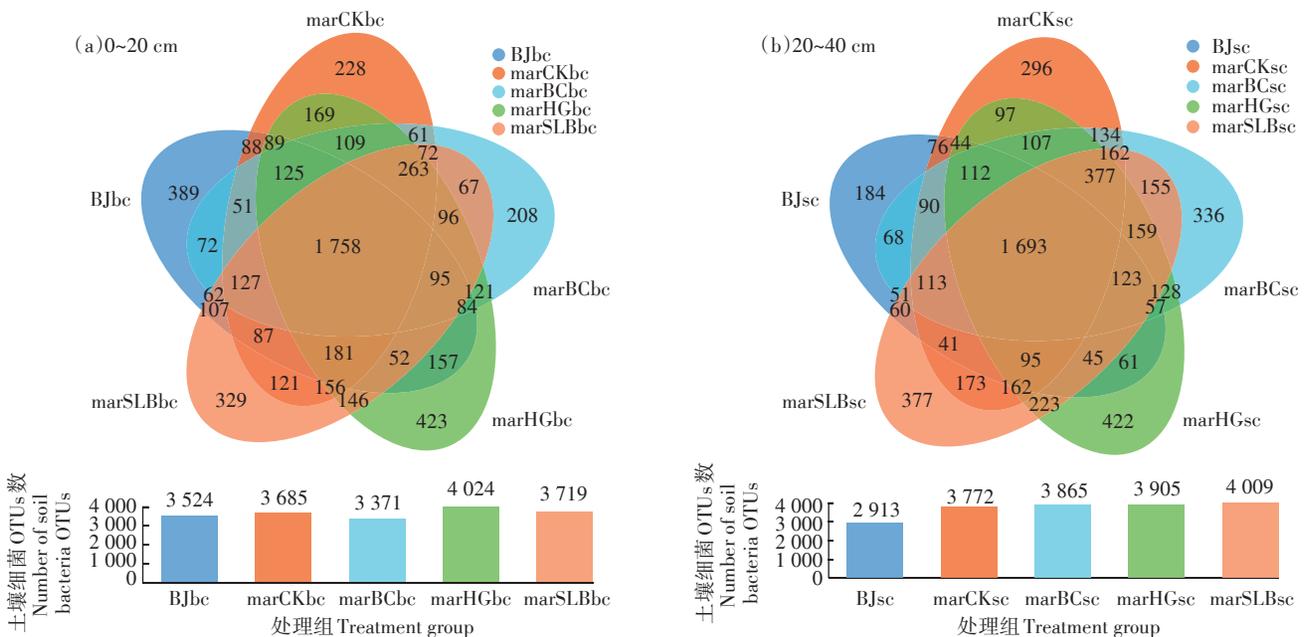
和1 159个属。由图8a可以看出,对于表层土而言,7月菜地背景土壤与3月菜地各处理组样本共有的OTUs总数为1 758,7月菜地背景土壤与3月菜地各处理组OTUs总数分别为3 524、3 685、3 371、4 024和3 719。由图8b可以看出,对于深层土而言,7月菜地背景土壤与3月菜地各处理组样本共有的OTUs总数为1 693,7月菜地背景土壤与3月菜地各处理组OTUs总数分别为2 913、3 772、3 865、3 905和4 009。

菜地土壤表层土与深层土不同处理土壤微生物细菌群落α多样性指数分别如表6和表7所示。对于

表层土而言,相较于7月菜地背景土壤,3月4个处理组中只有白菜组 Shannon、Ace 和 Shannoneven 指数均低于7月菜地背景土壤。3月其余3个处理组 Shannon 和 Shannoneven 指数均高于7月菜地背景土壤,且差异显著($P<0.05$),Ace 指数则无显著差异($P>0.05$)。对于深层土而言,相较于7月菜地背景土壤,3月4个处理组 Shannon、Ace 和 Shannoneven 指数均高于7月菜地背景土壤,且差异显著($P<0.05$),其中3月菜地各处理组 Shannon 和 Ace 指数均无显著差异。这表明土壤渗滤系统处理农村黑灰水对菜地深层土壤细菌群落多样性与丰富度均有促进作用,但对表层土壤细菌群落丰富度无显著影响。

2.2.2 土壤细菌群落组成

2020年7月菜地背景土壤表层和2021年3月菜地各处理表层土壤细菌属水平的群落组成如图9a所示。各处理在属水平上的细菌群落结构高度相似,主要优势菌群为节杆菌属(*Arthrobacter*, 1.93%~9.16%)、硫杆菌属(*Thiobacillus*, 3.02%~7.68%)、溶杆菌属(*Lysobacter*, 1.40%~3.58%)、*Gaiella* (1.30%~1.99%)、鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*, 0.53%~1.94%)、类诺卡氏属(*Nocardioides*, 0.70%~2.21%)、MND1 (0.75%~1.22%)、*Galbitalea* (0.07%~5.11%)、RB41 (0.10%~1.90%)、链霉菌属(*Streptomyces*, 0.65%~1.10%)。相



BJ代表7月背景土;mar代表3月处理后的土壤;bc代表表层土;sc代表深层土。下同

BJ stand for July background soil;mar for March treated soil;bc for topsoil and sc for deep soil. The same below

图8 各土层不同处理组土壤细菌群落 OTUs 数

Figure 8 OTUs number of soil bacterial communities in different treatment groups in each soil layers

表6 处理前后不同处理组表层土细菌群落多样性指数

Table 6 Bacterial community diversity index of topsoil in different treatment groups before and after infiltration treatment

处理 Treatment	Shannon	Ace	Shannoneven
BJ	6.184±0.139b	3 758.57±428.34a	0.804 1±0.124 0b
CK	6.607±0.060a	4 017.65±298.15a	0.847 1±0.005 3a
BC	5.945±0.220c	3 658.23±151.71a	0.775 7±0.022 7c
HG	6.713±0.091a	3 945.15±324.38a	0.853 1±0.007 9a
SLB	6.493±0.098a	3 944.56±216.07a	0.832 7±0.009 7a

注:BJ代表处理前的土壤;CK代表空白对照组;BC代表白菜组;HG代表黄瓜组;SLB代表水萝卜组。同列不同小写字母表示在0.05水平差异显著。下同。

Note: BJ represents soil before infiltration treatment; CK represents the blank control group; BC represents the cabbage group; HG represents the cucumber group; SLB represents the summer radish group. Different lowercase letters in a column indicate significant differences at the 0.05 level. The same below.

表7 处理前后不同处理组深层土细菌群落多样性指数

Table 7 Bacterial community diversity index of deep soil in different treatment groups before and after infiltration treatment

处理 Treatment	Shannon	Ace	Shannoneven
BJ	6.243±0.066b	3 051.90±114.92c	0.828 3±0.005 3b
CK	6.558±0.039a	4 126.78±314.93a	0.841 2±0.004 9a
BC	6.637±0.013a	4 555.95±112.86a	0.848 9±0.000 7a
HG	6.548±0.113a	3 781.61±224.30b	0.839 6±0.007 0a
SLB	6.541±0.066a	3 702.72±181.45b	0.835 3±0.003 5a

较于7月背景土壤,3月4个处理组节杆菌属相对丰度均有上升,分别上升2.54%、7.23%、3.68%和4.48%。节杆菌属是一种革兰氏阳性菌,广泛存在于空气、水、受污染的土壤及人的皮肤中。大量研究^[29-31]表明节杆菌属菌株对污染水体处理和土壤重金属吸附具有重要作用。

2020年7月菜地背景土壤深层和2021年3月菜地各处理深层土壤细菌属水平的群落组成如图9b所示。各处理在属水平上的细菌群落结构相似,主要优势菌群为节杆菌属(*Arthrobacter*, 0.46%~3.43%)、*Gaiella* (1.30%~2.74%)、MND1 (1.06%~2.56%)、鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*, 0.57%~1.66%)、RB41 (0.69%~1.72%)、硫杆菌属(*Thiobacillus*, 0.07%~2.90%)、溶杆菌属(*Lysobacter*, 0.62%~1.20%)、链霉菌属(*Streptomyces*, 0.6%~1.16%)、类诺卡氏属(*Nocardoides*, 0.61%~1.18%)、红杆菌属(*Solirubrobacter*, 0.5%~1.3%)。相较于7月背景土壤,3月4个处理组硫杆菌属相对丰度均有上升,分别上升0.24%、0.75%、1.17%和2.83%。这表明土壤渗滤系统使深层土硫杆菌属丰

度提高。硫杆菌属是土壤和水体中最常见的一种无色硫细菌,其氧化作用可以为植物提供可利用的硫酸态硫素营养。有研究表明硫杆菌属中的一些菌种在去除环境中重金属方面发挥重要作用,如氧化亚铁硫杆菌(*Thiobacillus ferrooxidans*)和氧化硫硫杆菌(*Thiobacillus thiooxidans*),不仅对重金属具有良好的沥滤效果,还可以用于冶炼金属^[32];另外脱氮硫杆菌(*Thiobacillus denitrificans*)也可以在处理工业废水的反硝化过程中起到重要作用^[33]。

整体上2020年7月和2021年3月表层土与深层土Top25菌属高度相似,相较于表层土,深层土只增加了红杆菌属。链霉菌属是一种潜在的致病微生物,虽然其大部分为非致病性污染菌,但是索马里链霉菌除外,该菌可能引起足菌肿病,偶尔还会引发侵袭性感染。虽然在菜地土壤表层土与深层土中发现具有潜在致病风险的链霉菌属,但是长期利用土壤渗滤系统处理菜地会使链霉菌属丰富度降低。本试验中,与2020年7月背景土壤相比,2021年3月经过土壤渗滤系统处理后的菜地各处理组链霉菌属丰度均有下降,分别下降0.24%、0.23%、0.41%和0.56%。

因此,利用土壤渗滤系统处理农村黑灰水不仅会提高硫杆菌属和节杆菌属相对丰度,还可以降低土壤致病微生物链霉菌属相对丰度,缓解土壤致病微生物的环境风险。

2.2.3 土壤养分与土壤微生物相关性分析

如图10a所示,通过相关性热图(Heatmap)分析庭院菜地土壤环境因子对菜地表层土壤细菌属水平群落组成影响。硫杆菌属(*Thiobacillus*)与TN、TP均呈显著正相关($P<0.05$),溶杆菌属(*Lysobacter*)与TN呈极显著正相关($P<0.001$),与TP呈显著正相关($P<0.05$)。马赛菌属(*Massilia*)与TN、TP均呈极显著负相关($P<0.01$)。红杆菌属(*Solirubrobacter*)与TN、TP均呈显著负相关($P<0.05$)。RB41与TN呈极显著负相关($P<0.01$)。如图10b所示,通过相关性热图分析庭院菜地土壤环境因子对菜地深层土壤细菌属水平群落组成影响。节杆菌属(*Arthrobacter*)与TN呈显著负相关($P<0.05$),*Gaiella*与TP呈显著正相关($P<0.05$),MND1与TN呈显著正相关($P<0.05$)。

马赛菌属(*Massilia*)因其菌株分布广泛、适应能力强且具有一定的应用价值而被人们广泛关注,在农业、环境和工业等领域具有较大应用潜力^[34]。溶磷功能是马赛菌属所具有功能中的一种^[35]。由于磷是植物生长的必需元素,但是过多的磷素被土壤中 Ca^{2+} 、

Fe³⁺和Al³⁺固定成植物不可利用的磷形态,而马赛菌属具有溶磷功能,不仅能提高土壤中有效磷含量,还可以改善土壤环境。如图10a所示,马赛菌属在表层土壤中与TN、TP均呈极显著负相关。这可能是由于从2020年7月到2021年3月菜地土壤各处理组TP含量和马赛菌属相对丰度增加,导致TP中其他形态的磷

减少,进而使马赛菌属与TP呈负相关。如图10a所示,溶杆菌属(*Lysobacter*)与TN呈极显著正相关,这表明TN是影响其活性的主要环境因子。溶杆菌属是一种对真菌、革兰氏阴性菌、革兰氏阳性菌和线虫有突出拮抗作用的菌属^[36],具有独特的滑动性和溶菌活性,这使其在生物防治方面具有很大优势^[37],但是土壤中

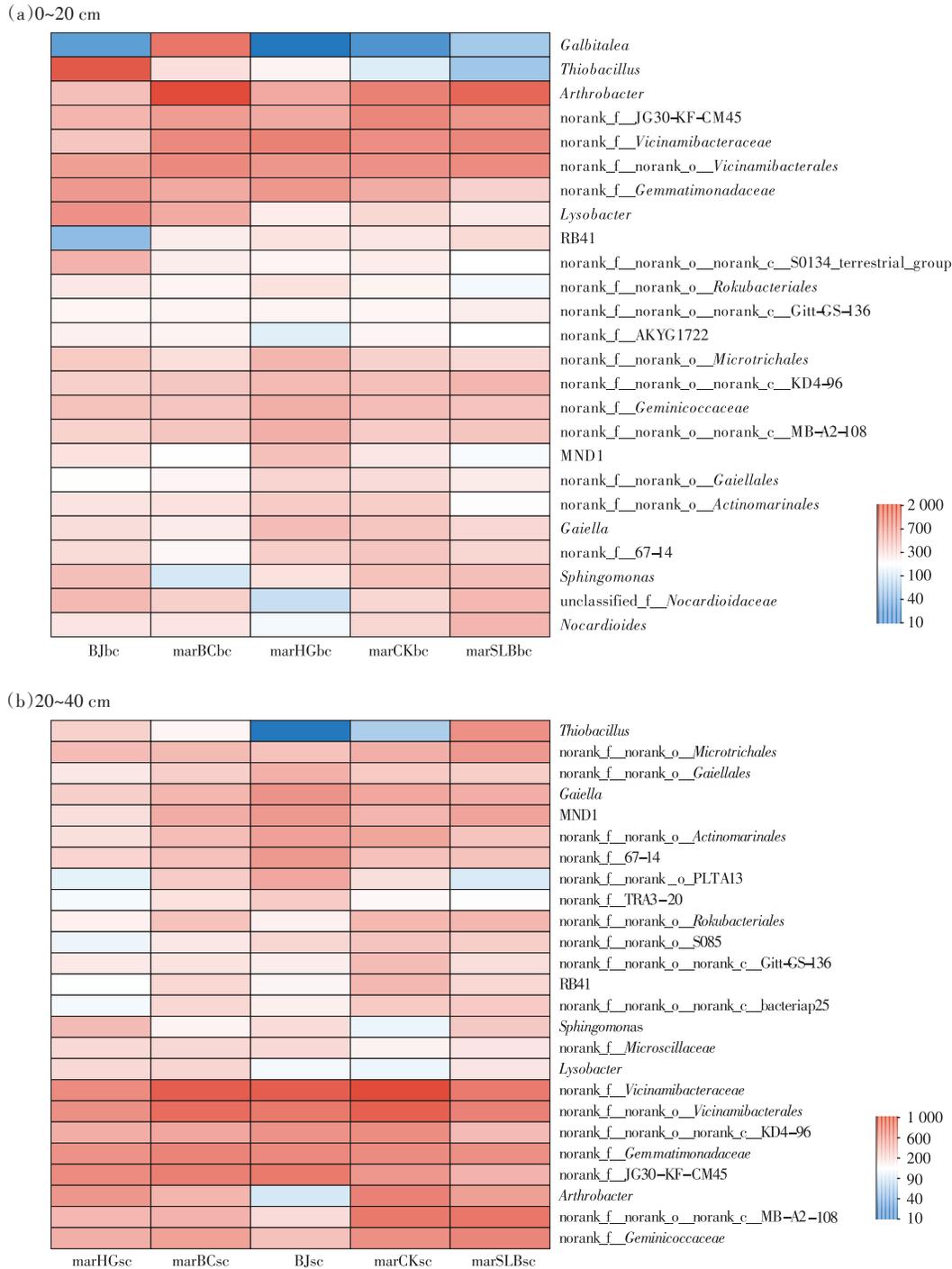


图9 处理前后两土层不同处理组土壤细菌群落属水平上物种相对丰度

Figure 9 The relative species richness of soil bacterial communities in different treatment groups in two soil layers before and after infiltration treatment

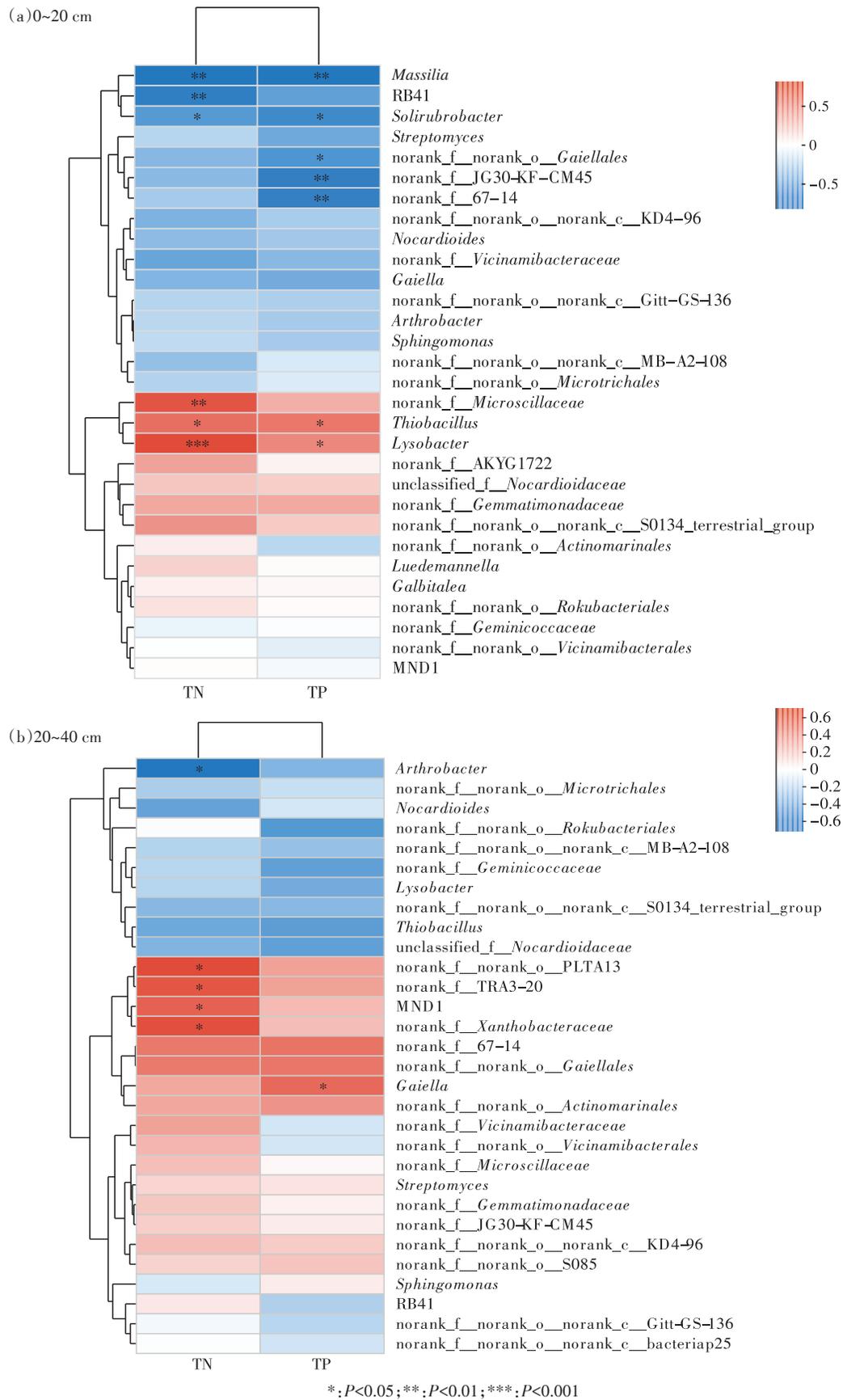


图 10 各土层不同处理组土壤环境因子与土壤细菌群落组成热图

Figure 10 Heatmap of soil environmental factors and soil bacterial community composition in different treatment groups in each soil layer

溶杆菌属对人体的安全性还需要进行严格的风险评估^[38]。

土壤微生物作为土壤生态系统中最重要、最活跃和敏感的组成部分,参与其中的养分转化、物质循环等过程,在改善土壤环境、培肥土壤以及促进植物吸收利用营养物质和生长发育等方面发挥着非常重要的作用。所有土壤微生物中,细菌的丰富度最高,是衡量土壤质量和健康程度、反映土壤环境条件的重要标志之一^[39-40],其数量、多样性以及群落结构组成特征的变化均会影响土壤肥力和农田的可持续生产力。建设土壤渗滤系统会改变庭院菜地土壤性质,影响庭院菜地土壤环境,进而改变庭院菜地土壤细菌的群落结构,对庭院菜地土壤质量和生态系统的稳定性产生一定的影响^[41]。

2.3 土壤渗滤系统处理农村黑灰水对庭院菜地土壤卫生指标的影响

2021年3月时各处理组表层土与深层土卫生学指标如表8所示。各处理组两土层粪大肠菌值均远远大于 10^{-4} 且蛔虫卵死亡率均达到100%,达到《粪便无害化卫生要求》(GB 7959—2012)中兼性厌氧发酵粪大肠菌值和《农村户厕卫生规范》(GB 19379—2012)户厕卫生状况与粪便处理的卫生要求中湿式设施粪大肠菌值最低要求,并且未处理农村黑灰水的土壤粪大肠菌值(表9)也远高于 10^{-4} ,蛔虫卵死亡率达到100%,这表明经过土壤渗滤系统处理农村黑灰水前后的庭院菜地土壤卫生学指标无明显变化且均符合卫生安全要求。

2.4 土壤渗滤系统处理农村黑灰水对蔬菜卫生指标的影响

如表10所示,通过分析示范户菜园白菜、黄瓜、

表8 处理后各处理组各土层卫生指标

Table 8 Hygienic index of soil in each treatment group after infiltration treatment

处理 Treatment	土层 Soil depth/cm	粪大肠菌值 Fecal coliform value	蛔虫卵死亡率 Mortality rate of ascaris eggs/%
CK	0~20	> 1.11	100
	20~40	> 1.11	100
BC	0~20	> 1.11	100
	20~40	> 1.11	100
HG	0~20	> 1.11	100
	20~40	> 1.11	100
SLB	0~20	0.04	100
	20~40	> 1.11	100

表9 处理前菜地土壤各土层卫生指标

Table 9 Hygienic index of each soil layer of vegetable soil before infiltration treatment

土层 Soil layer	粪大肠菌值 Fecal coliform value	蛔虫卵死亡率 Mortality rate of ascaris eggs/%
0~20 cm	400	100
20~40 cm	1 100	100

表10 不同庭院类型不同蔬菜卫生指标对比

Table 10 Comparison of hygienic index of different types of vegetables in differernt gardens

庭院菜园类型 Garden type	粪大肠菌群数 Fecal coliform/(MPN·g ⁻¹)		
	白菜 Cabbage	黄瓜 Cucumber	水萝卜 Radish
普通户	<3	<3	<3
示范户	<3	<3	<3

水萝卜的卫生指标发现,白菜、黄瓜和水萝卜粪大肠菌群数均小于3 MPN·g⁻¹,达到《食品安全国家标准 食品微生物学检验 大肠菌群计数》(GB 4789.3—2016)中大肠菌群数最大可能数(MPN)检索表中最低值,蛔虫卵死亡率也均达到100%。此外,通过选择一未利用土壤渗滤系统处理的菜地种植的蔬菜与此示范户种植的蔬菜进行对比,结果表明两种菜地土壤卫生学指标无显著差异($P>0.05$),粪大肠菌群数和蛔虫卵死亡率同样均达到《食品安全国家标准 食品微生物学检验 大肠菌群计数》要求,这表明土壤渗滤系统处理农村黑灰水对蔬菜卫生学指标无显著影响,蔬菜具有食用安全性。

3 结论

(1)在蔬菜种植期间,土壤渗滤系统处理农村黑灰水会显著提高菜地土壤TN、TP含量。整体上,菜地各处理组两土层(0~20 cm表层和20~40 cm深层)TN含量呈先上升后下降的趋势,TP含量呈先上升后下降再上升的趋势。

(2)土壤渗滤系统处理农村黑灰水对菜地深层土壤细菌群落多样性和丰富度有促进作用,对菜地表层土壤细菌群落丰富度无显著影响;土壤渗滤系统处理农村黑灰水会降低菜地土壤致病微生物相对丰度;土壤渗滤系统处理农村黑灰水会提高硫杆菌属和节杆菌属相对丰度。

(3)土壤渗滤系统处理农村黑灰水对蔬菜粪大肠菌值无显著影响,蔬菜卫生学指标符合《食品安全国家标准 食品微生物学检验 大肠菌群计数》要求,具有

食用安全性。

(4)经土壤渗滤系统处理农村黑灰水前后的菜地土壤粪大肠菌值均大于 10^4 ,蛔虫卵死亡率均为100%,处理前后无明显变化。

参考文献:

- [1] 刘铭辉. 基于全生态链的农村化粪池式厕所系统研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019. LIU M H. Research of rural septic tank toilet system based on whole ecological chain[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2019.
- [2] 黄冬, 蒋松竹, 刘秀红, 等. 我国城市化粪池建设与管理现状及特征研究[J]. 环境卫生工程, 2017, 25(6): 84-88. HUANG D, JIANG S Z, LIU X H, et al. Current status and features of septic tank construction and management in urban areas of China[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2017, 25(6): 84-88.
- [3] 蒯伟, 李厚禹, 高艺, 等. 三格式化粪池出水水质特征及对周边土壤环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(5): 1051-1061. KUAI W, LI H Y, GAO Y, et al. Study on the environmental risk and influencing factors of effluent from three-compartment septic tanks[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(5): 1051-1061.
- [4] YANG S L, ZHENG Y F, MAO Y X, et al. Domestic wastewater treatment for single household via novel subsurface wastewater infiltration systems (SWISs) with NüMi process: Performance and microbial community[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 279: 1-13.
- [5] WU S B, CARVALHO P N, MULLER J A, et al. Sanitation in constructed wetlands: A review on the removal of human pathogens and fecal indicators[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 541: 8-22.
- [6] SUSILAWATI H L, SETYSNTO P, ARIANI M, et al. Influence of water depth and soil amelioration on greenhouse gas emission from peat soil columns[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2015, 62(1): 57-68.
- [7] JIANG Y Y, SUN Y F, PAN J, et al. Use of dewatered sludge as microbial inoculum of a subsurface wastewater infiltration system: Effect on start-up and pollutant removal[J]. *Water SA*, 2017, 43(4): 595-601.
- [8] LIU C J, XIE J Z, SONG M L, et al. Nitrogen removal performance and microbial community changes in subsurface wastewater infiltration system (SWISs) at low temperature with different bioaugmentation strategies[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 250: 603-610.
- [9] KADLEC R, TTANNER C, HALLY V, et al. Nitrogen spiraling in subsurface flow constructed wetlands implication for treatment repines[J]. *Ecological Engineering*, 2005, 25: 365-371.
- [10] 冯冰冰, 王国祥, 王维平. 土地处理系统在尾水处理回用中的应用[J]. 人民长江, 2007, 38(6): 17-19. FENG B B, WANG G X, WANG W P. Application of land treatment system in tailwater treatment and reuse[J]. *Yangtze River*, 2007, 38(6): 17-19.
- [11] 唐文忠, 李楠, 单保庆. 土地处理系统表层土壤中磷赋存形态及其转化过程[J]. 环境工程学报, 2013, 7(6): 2383-2390. TANG W Z, LI N, SHAN B Q. Partitioning and transformation of phosphorus in surface soil of land treatment system[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(6): 2383-2390.
- [12] 马灿明, 毛云峰, 张健, 等. 我国农村厕所革命相关技术标准规范和实施进展[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(20): 215-221. MA C M, MAO Y F, ZHANG J, et al. Related regulations and specifications for China's rural toilet revolution and their implementation progress[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2020, 48(20): 215-221.
- [13] 唐若桐, 李革伟, 孙润, 等. 施用土壤调理剂对酸性土壤中芝麻菜吸收砷的影响[J]. 中国蔬菜, 2020(5): 48-53. TANG R T, LI G W, SUN R, et al. Effect of applying soil conditioner on soil arsenic uptake by *Eruca sativa* Mill.var.*sativa* in acidic soil[J]. *China Vegetables*, 2020(5): 48-53.
- [14] 侯京卫, 范彬, 曲波, 等. 农村生活污水排放特征研究评述[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(2): 964-967. HOU J W, FAN B, QU B, et al. Review about characteristics of rural domestic wastewater discharge [J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2012, 40(2): 964-967.
- [15] CUYK S V, SIEGRIST R, LOGAN A, et al. Hydraulic and purification behaviors and their interactions during wastewater treatment in soil infiltration systems[J]. *Water Research*, 2001, 35(4): 953-964.
- [16] 孔刚, 许昭怡, 王勇, 等. 地下土壤渗滤沟的工艺构造对氮磷去除的影响[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(2): 7-8, 11. KONG G, XU Z Y, WANG Y, et al. Effect of technological structure of subsurface soil infiltration trench on nitrogen and phosphorus removal[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 29(2): 7-8, 11.
- [17] 孙大志, 李绪谦, 潘晓峰. 氨氮在土壤中的吸附/解吸动力学行为的研究[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(8): 16-18. SUN D Z, LI X Q, PAN X F. Study on adsorption/desorption kinetics of ammonia nitrogen in soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 30(8): 16-18.
- [18] 李英华, 李海波, 徐新阳, 等. 进水氮负荷波动地下渗滤系统 N_2O 释放研究[J]. 生态环境学报, 2016, 25(12): 1999-2004. LI Y H, LI H B, XU X Y, et al. Study on N_2O release in subsurface wastewater infiltration system under variable influent nitrogen loading[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(12): 1999-2004.
- [19] 李娜. 冻融作用对吉林西部典型土壤碳氮酶的影响机制及温室气体排放研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012. LI N. Mechanism of soil organic carbon/total nitrogen/soil enzymes and greenhouse gas emission during freezing-thawing period in western Jilin[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [20] 唐海龙. 有机肥与化肥配施对土壤环境质量影响的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012. TANG H L. Research on the efficiency of organic and chemical fertilizers to soil environmental quality[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2012.
- [21] EGHBALL B, BINFORD G D, BALTENSPERGER D D. Phosphorus movement and adsorption in a soil receiving long-term manure and fertilizer application[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25(6): 1339-1343.
- [22] LEHMANN J, ZHONGDONG L, HYLAND C, et al. Long-term dynamics of phosphorus forms and retention in manure amended[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(17): 6672-6680.
- [23] 朱佳悦. 沼灌后氮磷元素在土壤中迁移吸附环境行为[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017. ZHU J Y. Study on the migration and adsorption behavior of nitrogen and phosphorus in soil after biogas slurry irrigation[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.

- [24] 黄玉珠, 万红友. 污水土地处理技术的优势及其应用前景[J]. 环境科学导刊, 2008, 27(6):71-75. HUANG Y S, WAN H Y. Advantages and application prospect of sewage land treatment technology[J]. *Environmental Science Survey*, 2008, 27(6):71-75.
- [25] FORBES M G, DICKSON K L, SALEH F, et al. Recovery and fractionation of phosphorus retained by lightweight expanded shale and masonry sand used as media in subsurface flow treatment wetlands[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(12):4621-4627.
- [26] JAFVERT C T. Sediment and saturated soil-associated reactions involving an anionic surfactant(dodecyl sulfate).2.Partion of PAH compounds among phases[J]. *Environmental Science & Technology*, 1991, 25(6):1039-1045.
- [27] 李海波, 马吉福, 王鑫, 等. 水力负荷对污水地下渗滤系统处理效果的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(2):544-550. LI H B, MA J F, WANG X. Effect of hydraulic loading rate on sewage treatment efficiency of subsurface wastewater infiltration system[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(2):544-550.
- [28] 秦伟, 王志强, 谢建治, 等. 分层填料地下渗滤系统处理农村分散生活污水[J]. 环境工程学报, 2013, 7(11):4269-4274. QIN W, WANG Z Q, XIE J Z, et al. Rural decentralized sewage treatment by layered-filling SWIS[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(11):4268-4274.
- [29] DEY S, PAUL A K. Optimization of cultural conditions for growth associated chromate reduction by *Arthrobacter* sp. SUK 1201 isolated from chromite mine overburden[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 213/214:200-206.
- [30] ZIAGOVA M G, KOUKKOU A I, LIAKOPOULOU K M. Optimization of cultural conditions of *Arthrobacter* sp. Sphe3 for growth-associated chromate(VI) reduction in free and immobilized cell system[J]. *Chemosphere*, 2014, 95(1):535-540.
- [31] NAKAJIMA A. Electron spin resonance study of copper biosorption by bacteria[J]. *Water Research*, 2002, 36(8):2091-2097.
- [32] PATHAK A, DASTIDAR M G, SREEKROSHNAN T R. Bioleaching of heavy metals from sewage sludge by indigenous iron-oxidizing microorganisms using ammonium ferrous sulfate and ferrous sulfate as energy sources: A comparative study[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 171(1/2/3):273-278.
- [33] 车轩, 罗国芝, 谭洪新, 等. 脱氮硫杆菌的分离鉴定和反硝化特性研究[J]. 环境科学, 2008, 29(10):2931-2937. CHE X, LUO G Z, TAN H X, et al. Isolation, identification and denitrification characteristics of *Thiobacillus denitrificans*[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(10):2931-2937.
- [34] 杨恩东, 崔丹曦, 汪维云. 马赛菌属细菌研究进展[J]. 微生物学通报, 2019, 46(6):1537-1548. YANG E D, CUI D X, WANG W Y. Research progress on the genus *Massilia*[J]. *Microbiology China*, 2019, 46(6):1537-1548.
- [35] ZHENG B X, BI Q F, HAO X L, et al. *Massilia phosphatilytica* sp. nov., a phosphate solubilizing bacteria isolated from a long-term fertilized soil[J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2017, 67(8):2514-2519.
- [36] CHRISTENSEN P, COOK F D. *Lysobacter*, a new genus of nonfruiting, gliding bacteria with a high base ratio[J]. *International Journal of Systematic and Bacteriology*, 1978, 28:367-393.
- [37] 王娜, 武坤毅, 崔浪军, 等. 溶杆菌属细菌鉴定及生防机制概况[J]. 西北农林科技大学学报, 2015, 43(5):174-191. WANG N, WU K Y, CUI L J, et al. Advance in bacteria identification and biocontrol mechanism of *Lysobacter* spp.[J]. *Journal of Northwest A&F University*, 2015, 43(5):174-191.
- [38] HAYWARD A C, FEGAN N, FEGAN M, et al. *Stenotrophomonas* and *Lysobacter*: Ubiquitous plant-associated gamma-proteobacteria of developing significance in applied microbiology[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2010, 108(3):756-770.
- [39] NANNIPIERI P, ASCHER J, CECCHERINI M T, et al. Microbial diversity and soil function[J]. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54(4):655-670.
- [40] KENNEDY A C, SMITH K L. Soil microbial diversity and the sustainability of agricultural soils[J]. *Plants and Soil*, 1995, 170:75-86.
- [41] ZHAO J, NI T, LI J J, et al. Effect 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.