

# 再生水灌水水平对土壤重金属及致病菌分布的影响

韩 洋<sup>1,2</sup>, 李 平<sup>1,3</sup>, 齐学斌<sup>1,3\*</sup>, 郭 魏<sup>1,3</sup>, 崔丙健<sup>1,3</sup>, 陆红飞<sup>1,3</sup> (1.中国农业科学院农田灌溉研究所,河南 新乡 453003; 2.中国农业科学院研究生院,北京 100081; 3.农业部农产品质量安全水环境因子风险评估实验室,河南 新乡 453003)

**摘要:** 为了探讨再生水不同灌水水平对土壤重金属、活性微生物和典型环境致病菌分布的影响,采用室内土柱灌水实验,研究再生水、自来水不同灌水水平对土壤重金属 Cd、Pb、Cu、Zn 和土壤细菌、真菌、大肠菌群、大肠埃希氏菌分布的影响.结果表明:相同灌水水平下,与自来水灌溉处理相比,再生水灌溉处理下土壤重金属含量略有提高,但仍远低于《土壤环境质量标准》[GB15618-1995]限值,因此短期再生水灌溉不会造成土壤重金属污染;再生水不同灌水水平对比分析表明,充分灌溉相比非充分灌溉提高了表层土壤 Cd、Pb 含量,Cu、Zn 含量无明显差异.此外,相同灌水水平下,再生水灌溉相比自来水显著提高了表层土壤细菌总数和大肠菌群、大肠埃希氏菌数量,对土壤真菌总数影响不大;再生水不同灌水水平对比分析表明,充分灌溉相比非充分灌溉显著提高了表层土壤细菌和真菌总数及大肠菌群、大肠埃希氏菌数量.土壤重金属与土壤活性微生物及典型环境致病菌之间的相关性分析表明,土壤 Cd、Pb、Zn 含量与土壤细菌、真菌总数及大肠菌群、大肠埃希氏菌数量之间呈正相关性,推断较低含量重金属对土壤活性微生物及典型致病菌的生长繁殖存在一定程度上的刺激作用.因此,再生水灌溉促进了土壤活性微生物的繁衍,并且在一定程度上增加了土壤重金属和环境致病菌的污染风险;合理控制再生水灌水水平可以有效阻控土壤重金属和致病菌含量.

**关键词:** 再生水; 土柱; 灌水水平; 重金属; 活性微生物; 环境致病菌

**中图分类号:** X703.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2019)02-0723-09

## Effects of different irrigation levels of reclaimed water on the distribution of soil heavy metals and typical pathogenic bacteria.

HAN Yang<sup>1,2</sup>, LI Ping<sup>1,3</sup>, QI Xue-bin<sup>1,3\*</sup>, GUO Wei<sup>1,3</sup>, CUI Bing-jian<sup>1,3</sup>, LU Hong-fei<sup>1,3</sup> (1.Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453003, China; 2.Graduate University of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3.The Ministry of Agriculture Water Environment Factor Risk Assessment Laboratory of Agricultural Products Quality and Safety, Xinxiang 453003, China). *China Environmental Science*, 2019,39(2): 723~731

**Abstract:** This study aimed to discern the effect of different levels of irrigation with reclaimed water on soil heavy metals and the distribution of soil active microorganisms and typical environmental pathogenic bacteria. The effects of two irrigation water qualities (reclaimed water and tap water) and two irrigation levels (full irrigation and insufficient irrigation) on soil heavy metals and the distribution of soil active microorganisms and typical environmental pathogenic bacteria were studied through indoor soil column irrigation. Results indicated that reclaimed water irrigation increased the content of heavy metals in soil, but according to the soil environmental quality standard, soil after irrigated by reclaimed water did not exceed the standard. Therefore, reclaimed water irrigation could not cause soil heavy metals pollution. Compared with insufficient irrigation with reclaimed water, full irrigation with reclaimed water significantly increased the content of Cd and Pb in surface soil, there was no significant difference in the content of Cu and Zn. At the same irrigation level, the number of bacteria, coliform group and *Escherichia coli* in surface soil significantly increased with reclaimed water irrigation, there was no significant difference in the number of soil fungi at two irrigation water quality. The number of bacteria, fungi, coliform group and *Escherichia coli* in surface soil under full irrigation with reclaimed water was significantly higher than with insufficient irrigation using reclaimed water. There was a positive correlation between the content of heavy metals (Cd, Pb, Zn) and the quantity of bacteria and fungi, and between the content of heavy metals and the quantity of coliform group and *Escherichia coli*. Reclaimed water therefore promoted the reproduction of active microorganisms in surface soil, and increased the risk of soil heavy metals and environmental pathogens pollution. Reasonable irrigation with reclaimed water can therefore effectively control the content of heavy metals and the quantity of soil pathogens in soil.

**Key words:** reclaimed water; soil column; irrigation level; heavy metals; active microorganisms; environmental pathogenic bacteria

随着水资源供需矛盾的不断加剧,作为替代水资源的再生水农业利用日益受到重视<sup>[1]</sup>.再生水作为边界水源,具有量大、面广、输水方便、工艺处理成本低等特点<sup>[2]</sup>,与海水淡化、跨流域调水相比,具有明显优势<sup>[3]</sup>;将其用于农业灌溉一方面可缓解水资源

紧缺之态势,另一方面,水体当中富含的多种营养

收稿日期: 2018-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679241,51709265,51879268); 国家重点研发计划(2017YFD0800403)

\* 责任作者, 研究员, qxb6301@sina.cn

元素还可提高土壤肥力和农作物产量<sup>[4-5]</sup>。然而,除有益成分外,再生水中往往还含有一些无机污染物、有机污染物、盐分、痕量重金属、病原菌等会对生态环境和人畜健康构成潜在威胁的物质,特别是再生水中重金属和病原菌在随灌溉进入土壤后,会导致土壤环境急速恶化,降低作物品质,危害人体健康<sup>[6-8]</sup>。再生水中部分重金属含量高于清水,因此再生水灌溉后土壤重金属残留量往往也相对较高。研究表明,短期再生水灌溉下土壤重金属在一定程度上存在积累现象,但并未超出限值<sup>[9-12]</sup>;长期再生水灌溉下土壤重金属累积效应明显<sup>[13-14]</sup>。再生水灌溉下,土壤Cu、Cr和Zn等重金属元素主要富集于表层0~20cm土壤,深层土壤含量甚微<sup>[15]</sup>。再生水灌溉下表层土壤重金属含量高于清水灌溉,并且会影响重金属在土壤中的迁移和累积<sup>[16]</sup>;但也有研究指出,再生水灌溉对土壤重金属迁移无显著影响<sup>[17]</sup>。再生水中除含有一系列有益于土壤环境发展的活性微生物外,往往还携带大量致病菌,在一定条件下可产生毒性物质,造成宿主感染,与人体接触极易导致肠道线虫类疾病、腹泻、痢疾、伤寒、肠胃炎、肝炎等疾病发生<sup>[18]</sup>。大肠埃希氏菌通常被作为环境污染指示菌所提出,同时其检出也标志着环境中贾第虫属和隐孢子虫的存在,特别是部分血清型的大肠埃希氏菌诸如肠致病性大肠埃希氏菌、肠产毒性大肠埃希氏菌、肠侵袭性大肠埃希氏菌、肠出血性大肠埃希氏菌等具有严重致病性,能够引起败血症及出血性腹泻等疾病,其危害不容小觑<sup>[19]</sup>。有研究指出,灌溉水中大肠杆菌浓度的高低会对土壤中大肠杆菌的分布造成直接影响<sup>[20]</sup>;再生水灌溉作物收获后土壤大肠杆菌浓度较首次灌水后的数量有明显降低趋势,认为再生水灌溉不会导致大肠杆菌在土壤中发生累积<sup>[21]</sup>;相似的研究中也表明,频繁使用再生水灌溉会导致短期内土壤大肠杆菌污染,但长期土壤大肠杆菌浓度呈下降趋势<sup>[22]</sup>。截至目前,关于再生水灌溉下土壤重金属及致病菌的相关研究多集中于短期、长期累积效应的观测,但从再生水灌水量调控角度出发,研究其不同灌水水平下土壤重金属和致病菌分布差异性及其二者间潜在关联性的报道较少。为此,通过室内土柱灌水实验,以再生水和自来水不同灌水水平条件下的土壤为研究对象,探讨不同灌水处理对土壤重金属(Cd、Pb、Cu、Zn)、活性微生物(细菌、真

菌)及典型致病菌(大肠埃希氏菌、总大肠菌群)分布的影响,以期为非常规水农业利用的环境安全效应研究工作提供数据支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与实验用水

实验用土采自中国农业科学院农业水土环境野外科学观测试验站附近0~20cm耕层土壤,质地为砂壤土。供试土样基本理化指标如下:土壤干容重1.42g/cm<sup>3</sup>,有机质含量8.682g/kg,全氮含量0.207g/kg,全磷含量0.376g/kg,全盐量(EC值)150.57ds/m,pH值8.62,重金属Cd含量0.055mg/kg,Pb含量5.357mg/kg,Cu含量10.026mg/kg,Zn含量42.971mg/kg。土样经自然风干后过5mm筛,混合均匀后取小部分土样装入无菌密封袋中,带回实验室用于测定土壤基本理化性质,剩余土样用于填装土柱。

实验用再生水取自河南省新乡市骆驼湾污水处理厂,污水主要来源于城市生活污水,污水处理工艺为A/O反硝化生物滤池和臭氧氧化组合工艺。实验用再生水常规水质指标完全符合农田灌溉水质标准[GB 5084-2005]、再生水水质标准[SL368-2006]和城市污水再生利用农田灌溉用水水质标准[GB 20922-2007]规定,实验用再生水及自来水水质指标详见表1。

表 1 试验用再生水及自来水水质  
Table 1 Quality of reclaimed water and tap water

| 水质类型 | pH 值 | 总含盐量(g/L) | Cd (μg/L) | Pb (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | 大肠菌群 (cfu/L)         |
|------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------|
| 再生水  | 7.64 | 2.64      | 2.121     | 0.026     | 0.035     | 0.772     | 1.28×10 <sup>6</sup> |
| 自来水  | 7.90 | 0.62      | 0.42      | 0.005     | 0.006     | 0.016     | —                    |

1.2 实验设计

实验设自来水(CK)、再生水(RW)2种灌溉水质,充分灌水(DI)、非充分灌水(FI)2种灌水水平,充分灌水处理保持土壤含水率为田间质量持水率(FH)的90%,非充分灌水处理保持土壤含水率为充分灌水处理的70%。共计4个处理:自来水非充分灌溉(CKDI)、自来水充分灌溉(CKFI)、再生水非充分灌溉(RWDI)、再生水充分灌溉(RWFI),每个处理设3个重复。实验用土柱材质为硬质PVC,外径40cm,高70cm,壁厚0.98cm。土柱底部(反滤层位置处)设有排

水孔,柱体上方布设管道式灌水系统,每个土柱均于土壤表层等间距插入 4 个滴头,以保证灌溉水均匀、稳定入渗.柱体由下至上依次是 3cm 反滤层、40~60cm 土壤、20~40cm 土壤、0~20cm 土壤.土柱顶部预留 7cm 高度以备灌水时利用.分别在柱体各个深度土层埋设土壤负压计,用于监测土柱不同深度土壤水分情况.实验共用土柱 12 根,所有土柱填装完毕后统一用清水灌溉 20d,待土壤形成稳定结构后开始实验.实验从 2017 年 8 月 1 日~2018 年 3 月 29 日于室内进行,充分灌水处理每次灌水量为 9.70L,非充分灌水处理每次灌水量为 6.80L.灌水周期为 20d,于实验开始后的第 241d 进行土壤分层取样,分析化验 0~10、10~20、20~30、30~40、40~60cm 各土层土壤重金属(Cd、Pb、Cu、Zn)含量、活性微生物(细菌、真菌)及典型致病菌(大肠埃希氏菌、总大肠菌群)数量.

### 1.3 测试指标与方法

土壤基本理化性质测定:土壤 pH 值采用 PHS-1 型酸度计测定;土壤盐分采用电导法(DDB-303A 型便携式电导率仪,上海雷磁)测定;土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法-外加热法测定;土壤全氮、全磷含量采用流动分析仪(德国 BRAN LUEBBE AA3)测定.土壤 Cd、Pb、Cu、Zn 含量通过王水-高氯酸消解后采用原子吸收分光光度计法测定.土壤活性微生物及典型致病菌数量采用稀释涂布平板计数法测定.

### 1.4 数据分析

应用 Excel 2010 和 SAS 9.2 进行数据的方差分析和相关性分析;选取 95 %置信水平,应用最小显著差异法(LSD)进行不同处理间的多重比较分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 再生水不同灌水水平对土壤重金属分布的影响

不同处理不同土层深度土壤重金属含量见表 2.在土壤 Cd 分布方面,经灌溉 240d 后,RWDI 处理下 30~40cm 土层 Cd 含量显著高于 CKDI 处理( $P<0.05$ ),而在其他土层,除 20~30cm 外,RWDI 处理下土壤 Cd 含量均略高于 CKDI 处理,但差异不显著( $P>0.05$ ).RWFI 处理下 0~60cm 土层 Cd 含量均显著高于 CKFI 处理( $P<0.05$ ).这表明相同灌水水平下,相比自来水,再生水灌溉在一定程度上提高了土壤 Cd 含量,且于较高灌水水平条件下二者差异显著,但仍远低

于《土壤环境质量标准》[GB15618-1995]中 Cd 含量限值(1.0mg/kg),说明再生水灌溉不会引起土壤 Cd 污染.RWFI 处理下 0~30cm 土层土壤 Cd 含量显著高于 RWDI 处理( $P<0.05$ ),而在 30~60cm 土层无显著性差异,说明再生水充分灌溉相比非充分灌溉提高了表层土壤 Cd 含量.

在土壤 Pb 分布方面,RWDI 处理下 0~20cm 土层 Pb 含量显著高于 CKDI 处理( $P<0.05$ ),而在 20~60cm 土层, RWDI 处理土壤 Pb 含量略高于 CKDI 处理,无显著性差异( $P>0.05$ ).RWFI 处理下 0~20cm、30~40cm 土层 Pb 含量显著高于 CKFI 处理( $P<0.05$ ),20~30cm、40~60cm 土层略高于 CKFI 处理,但差异不显著( $P>0.05$ ).说明在相同灌水水平下,再生水灌溉相比自来水提高了土壤中 Pb 含量,且表层土壤提高显著,但仍远低于《土壤环境质量标准》[GB15618-1995]中 Pb 含量限值(350mg/kg),说明再生水灌溉不会引起土壤 Pb 污染.RWFI 处理下 0~10cm 土层 Pb 含量显著高于 RWDI 处理( $P<0.05$ ),10~60cm 土层差异不显著,表明再生水充分灌溉相比非充分灌溉可显著提高表层土壤 Pb 含量.

在土壤 Cu 分布方面,RWDI 处理下 0~40cm 土层 Cu 含量显著高于 CKDI 处理( $P<0.05$ ),40~60cm 土层差异不显著( $P>0.05$ ).RWFI 处理下 0~60cm 土层 Cu 含量略高于 CKFI 处理,但均无显著性差异( $P>0.05$ ).这表明相同灌水水平下,相比自来水,再生水灌溉可在一定程度上提高土壤 Cu 含量,且于非充分灌溉条件下,表层土壤二者之间差异显著,但仍远低于《土壤环境质量标准》[GB15618-1995]中 Cu 含量限值(100mg/kg),说明再生水灌溉不会引起土壤 Cu 污染.RWFI 处理 0~60cm 土层 Cu 含量略高于 RWDI 处理,但均无显著性差异( $P>0.05$ ),这说明再生水不同灌水水平对土壤 Cu 含量差异性影响不大.

在土壤 Zn 分布方面,RWDI 处理下 0~10cm、20~40cm 土层 Zn 含量显著高于 CKDI 处理( $P<0.05$ ),10~20cm、40~60cm 土层无显著性差异( $P>0.05$ ).RWFI 处理下 30~40cm 土层 Zn 含量显著高于 CKFI 处理( $P<0.05$ ),其他土层差异不显著.土壤 Zn 含量远低于《土壤环境质量标准》[GB15618-1995]中 Zn 含量限值(300mg/kg),说明再生水灌溉不会引起土壤 Zn 污染.RWFI 处理与 RWDI 处理下的 0~60cm 土层 Zn 含量均无显著性差异( $P>0.05$ ),这说明再生

水 2 种灌水水平下的土壤 Zn 含量差异不明显.

表 2 不同处理下土壤重金属含量  
Table 2 Heavy metal content in soil under different treatments

| 土层深度<br>(cm) | 不同处理 | Cd(mg/kg) | Pb(mg/kg) | Cu(mg/kg) | Zn(mg/kg) |
|--------------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0~10         | CKDI | 0.081b    | 5.402d    | 11.337b   | 44.620b   |
|              | CKFI | 0.087b    | 6.125c    | 12.193ab  | 45.183ab  |
|              | RWDI | 0.086b    | 6.741b    | 12.511a   | 46.549a   |
|              | RWFI | 0.114a    | 7.893a    | 12.929a   | 46.353a   |
| 10~20        | CKDI | 0.076b    | 5.335b    | 11.226b   | 43.793b   |
|              | CKFI | 0.074b    | 5.961b    | 12.231ab  | 45.554a   |
|              | RWDI | 0.079b    | 6.826a    | 12.350a   | 45.034ab  |
|              | RWFI | 0.111a    | 6.884a    | 12.775a   | 45.546a   |
| 20~30        | CKDI | 0.052c    | 5.083b    | 10.800b   | 43.460b   |
|              | CKFI | 0.064b    | 5.979ab   | 11.309ab  | 44.384ab  |
|              | RWDI | 0.049c    | 5.976ab   | 12.289a   | 45.882a   |
|              | RWFI | 0.089a    | 6.363a    | 12.032ab  | 45.724a   |
| 30~40        | CKDI | 0.042b    | 5.161b    | 9.848c    | 43.525b   |
|              | CKFI | 0.048b    | 5.453b    | 11.198b   | 43.019b   |
|              | RWDI | 0.065a    | 5.821ab   | 12.199a   | 44.471ab  |
|              | RWFI | 0.067a    | 6.501a    | 11.553ab  | 45.545a   |
| 40~60        | CKDI | 0.056ab   | 4.851b    | 10.067b   | 43.191a   |
|              | CKFI | 0.052b    | 5.859a    | 11.032ab  | 43.679a   |
|              | RWDI | 0.061a    | 5.552ab   | 10.968ab  | 44.635a   |
|              | RWFI | 0.064a    | 6.267a    | 11.463a   | 44.062a   |

注:表中不同字母表示同一土层不同处理之间存在显著性差异( $P<0.05$ ).

2.2 再生水不同灌水水平对土壤活性微生物分布的影响

2.2.1 再生水不同灌水水平对土壤细菌分布的影响 不同灌水处理下土壤细菌分布见图 1.相同灌水水平不同灌水水质下土壤细菌分布差异表明,经灌溉 240d 后,RWDI 处理下 0~10cm、10~20cm 土层细菌总数显著高于 CKDI 处理( $P<0.05$ ), 20~60cm 土层差异不显著( $P>0.05$ );RWFI 处理下 0~10cm、10~20cm、30~40cm 土层细菌总数显著高于 CKFI 处理,其他土层无显著性差异.其中,RWDI 处理下 0~10cm、10~20cm 土层细菌总数分别是 CKDI 处理的 1.19、1.34 倍;RWFI 处理下 0~10cm、10~20cm 土层细菌总数分别是 CKFI 处理的 1.37、1.33 倍.表明再生水灌溉相比自来水显著提高了表层土壤细菌数量,但对深层土壤细菌数量影响不大.相同灌水水质不同灌水水平下土壤细菌分布差异表明,经灌溉 240d 后, RWFI 处理 0~10cm 土层细菌总数显著高于 RWDI 处理( $P<0.05$ ),10~60cm 土层均无显著性差异( $P>0.05$ ).这表明再生水不同灌水水平对表层土壤细

菌数量和活性存在较为显著的影响,但于深层土壤影响甚微;灌水量越高,土壤水分条件越充足,表层土壤细菌数量则越高.

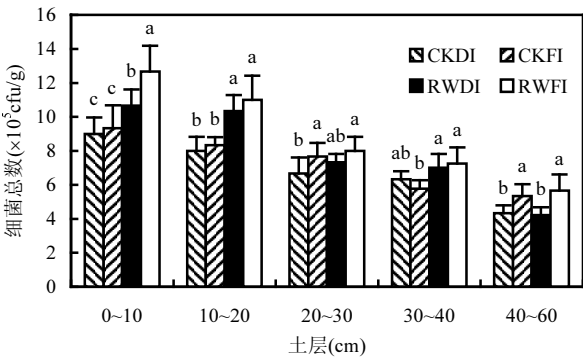


图 1 不同灌水处理下土壤细菌分布比较  
Fig.1 Distribution of soil bacteria under different treatments  
同一土层不同字母表示不同处理间存在显著性差异( $P<0.05$ ),下同

2.2.2 再生水不同灌水水平对土壤真菌分布的影响 不同灌水处理下土壤真菌分布见图 2.相同灌水水平不同灌水水质下土壤真菌分布差异表明,经灌溉 240d 后,RWDI 处理 0~60cm 各土层真菌总数与 CKDI 处理均无显著性差异( $P>0.05$ ),而 RWFI 处理除 40~60cm 土层外,其他土层与 CKFI 处理均差异不显著.这表明与自来水相比,再生水灌溉对于土壤真菌数量影响不大.相同灌水水质不同灌水水平下土壤真菌分布差异表明,经灌溉 240d 后,RWFI 处理 0~10cm 土层真菌总数显著高于 RWDI 处理( $P<0.05$ ),而 10~60cm 土层均无显著性差异( $P>0.05$ ).相比之下,CKFI 与 CKDI 处理下各土层土壤真菌数量均差异不显著( $P>0.05$ ).这说明相比自来水,再生水不同灌水水平对表层土壤真菌数量和活性影响显著,但对深层土壤影响甚微;灌水量越高,土壤水分越充足,表层土壤真菌数量则相对越高.

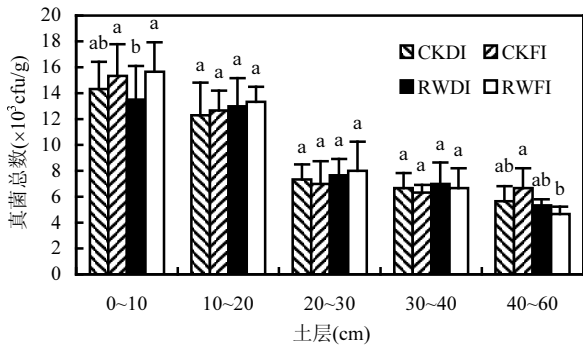


图 2 不同灌水处理下土壤真菌分布比较  
Fig.2 Distribution of soil fungus under different treatments

**2.3 再生水不同灌水水平对土壤致病菌分布的影响**

**2.3.1 再生水不同灌水水平对土壤大肠菌群分布的影响** 不同灌水处理下土壤大肠菌群分布见图 3。相同灌水水平不同灌水水质下土壤大肠菌群分布差异表明,RWDI 处理 0~20cm 土层大肠菌群总数显著高于 CKDI 处理( $P<0.05$ ),20~60cm 土层无显著差异;RWFI 处理 0~30cm 土层大肠菌群总数显著高于 CKFI 处理( $P<0.05$ ),30~60cm 土层无显著差异。其中,RWDI 处理下 0~10cm、10~20cm 土层大肠菌群总数分别是 CKDI 处理的 1.15、1.09 倍;RWFI 处理下 0~10cm、10~20cm 土层大肠菌群总数分别是 CKFI 处理的 1.26、1.22 倍。这表明与自来水相比,再生水灌溉显著提高了表层土壤大肠菌群数量,但对深层土壤大肠菌群数量影响不大。相同灌水水质不同灌水水平下土壤大肠菌群分布差异表明,RWFI 处理 0~30cm 土层大肠菌群总数显著高于 RWDI 处理( $P<0.05$ ),30~60cm 土层差异不显著( $P>0.05$ )。这表明再生水不同灌水水平对表层土壤大肠菌群数量和活性存在较为显著的影响,对深层土壤影响不大;灌水水平越高,表层土壤大肠菌群数量则相对越高。

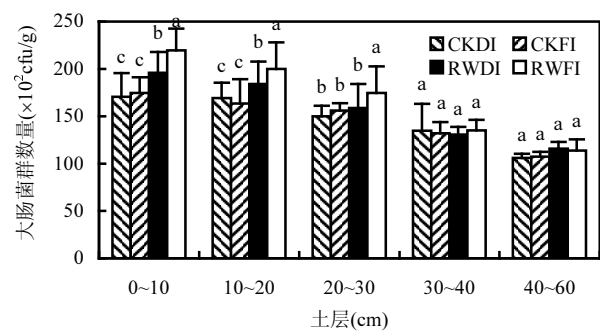


图 3 不同灌水处理下土壤大肠菌群分布比较  
Fig.3 Distribution of soil coliform group under different treatments

**2.3.2 再生水不同灌水水平对土壤大肠埃希氏菌分布的影响** 不同灌水处理下土壤大肠埃希氏菌分布见图 4。相同灌水水平不同灌水水质下土壤大肠埃希氏菌分布差异表明,RWDI、RWFI 处理下的 0~20cm 土层大肠埃希氏菌数量均显著高于 CKDI 和 CKFI 处理( $P<0.05$ ),20~60cm 土层无显著差异。其中,RWDI 处理 0~10cm、10~20cm 土层大肠埃希氏菌数量分别是 CKDI 处理的 1.22、1.14 倍;RWFI 处理 0~10cm、10~20cm 土层大肠埃希氏菌数量分别是 CKFI 处理的 1.43、1.27 倍。这表明相比自来水,再生水灌溉显著提高了表层土壤大肠埃希氏菌数量,但对于深层土壤大肠埃希氏菌数量影响不大。相同灌水水质不同灌水水平下土壤大肠埃希氏菌的分布差异表明,RWFI 处理 0~20cm 土层大肠埃希氏菌数量显著高于 RWDI 处理( $P<0.05$ ),20~60cm 土层无显著性差异( $P>0.05$ )。说明再生水不同灌水水平对表层土壤大肠埃希氏菌数量与活性影响显著;灌水水平越高,表层土壤大肠埃希氏菌的数量则相对越高。

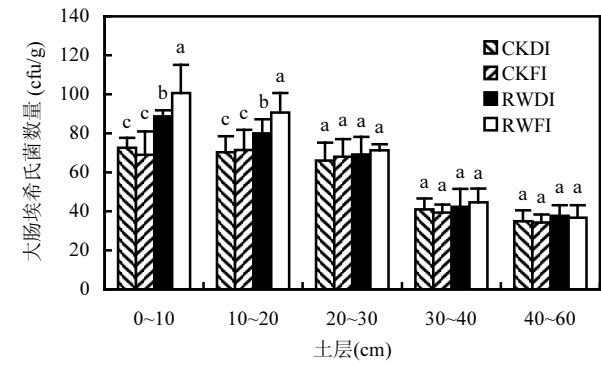


图 4 不同灌水处理下土壤大肠埃希氏菌分布比较  
Fig.4 Distribution of soil *Escherichia coli* under different treatments

表 3 土壤重金属与活性微生物、典型致病菌之间相关矩阵

Table 3 Correlation matrix of soil heavy metal and active microorganism and typical pathogenic bacteria

| 项目  | Cd      | Pb      | Cu      | Zn     | Bac     | Fun    | TC      | E.C |
|-----|---------|---------|---------|--------|---------|--------|---------|-----|
| Cd  | 1       |         |         |        |         |        |         |     |
| Pb  | 0.615** | 1       |         |        |         |        |         |     |
| Cu  | 0.667** | 0.640** | 1       |        |         |        |         |     |
| Zn  | 0.551** | 0.655** | 0.632** | 1      |         |        |         |     |
| Bac | 0.422*  | 0.405*  | 0.282   | 0.428* | 1       |        |         |     |
| Fun | 0.368*  | 0.413*  | 0.301   | 0.382* | 0.419*  | 1      |         |     |
| TC  | 0.443*  | 0.374*  | 0.258   | 0.436* | 0.847** | 0.437* | 1       |     |
| E.C | 0.407*  | 0.359*  | 0.284   | 0.422* | 0.866** | 0.425* | 0.915** | 1   |

注:表中Bac表示细菌;Fun表示真菌;TC表示总大肠菌群;E.C表示大肠埃希氏菌,\*表示相关性达到显著或极显著水平。

2.4 土壤重金属与活性微生物、典型致病菌之间相关性分析土壤重金属与活性微生物、典型致病菌之间的相关性见表 3. 重金属 Cd、Pb、Zn 含量与细菌总数、真菌总数、大肠菌群总数、大肠埃希氏菌数量均呈显著正相关( $P<0.05$ ), 说明较低含量的重金属对土壤中活性微生物及致病菌的生长繁殖具有一定程度上的刺激作用. 此外, 细菌总数与真菌总数之间具有显著正相关性( $P<0.05$ ); 细菌总数与大肠菌群总数、大肠埃希氏菌数量之间具有极显著正相关性( $P<0.01$ ); 大肠菌群总数与大肠埃希氏菌数量之间具有极显著正相关性( $P<0.01$ ). 可见土壤当中不同类群微生物在生长繁殖过程中具有不同程度上的协同生存作用.

### 3 讨论

#### 3.1 再生水不同灌水水平对土壤重金属分布的影响

Cd 会阻碍土壤微生物的物质、能量循环过程, 对作物形态、生理及结构等诸多方面均会造成严重负面影响; Pb 对作物根系生长具有严重的抑制和毒害作用, 尤其会导致作物根系对养分吸收过程受阻, 致使产量下降<sup>[23]</sup>. 此两种重金属元素在土壤中的含量水平在农业生产和灌溉过程中均受到严格限制. 以往相关研究表明, 短期再生水灌溉下土壤 Cd、Pb 含量与清水相比无显著差异<sup>[9-10]</sup>, 再生水长期灌溉下土壤重金属累积效应明显<sup>[24]</sup>. 本项试验结果表明, 再生水灌溉相比自来水在一定程度上提高了土壤 Cd、Pb 含量; 且于不同灌水水平下, 经 2 种水质灌溉后的土壤 Cd、Pb 含量均呈现出不同程度上的差异性. 分析原因, 一是再生水中重金属离子含量高于自来水, 灌溉过程中向土壤中输入了更高浓度的 Cd、Pb 离子; 二是与自来水相比, 再生水富含更高浓度的碳、氮等营养元素, 灌溉后提高了土壤养分和有机质含量, 有机质含量越高的土壤对水体当中重金属离子的吸附能力则越强, 进而提高了土壤重金属有机形态比例和含量<sup>[16]</sup>; 三是本实验中土柱不种植作物, 通过再生水灌溉输入的外源重金属元素主要累积于土壤, 无法通过植物根系的吸收转移过程来降低土壤重金属含量. 本研究中经再生水灌溉后的土壤重金属存在一定程度上的积累现象, 但仍远低于《土壤环境质量标准》[GB15618-1995]中重金属含量限值, 说明短期再生水灌溉不会引起土壤重金属污染. 再生水不同灌水水平

下表层土壤 Cd、Pb 含量差异性表明, 相比非充分灌溉, 一方面, 充分灌溉条件下的灌水量高, 灌溉过程中向土壤输送的重金属离子含量相对较高; 另一方面, 重金属离子在随水向下迁移的过程中因受到土壤有机质的吸附固定而被截留在有机质相对丰富的表层土壤<sup>[16,25]</sup>, 从而导致再生水充分灌溉下表层土壤 Cd、Pb 含量略高于非充分灌溉.

#### 3.2 再生水不同灌水水平对土壤活性微生物分布的影响

土壤微生物作为土壤中的活性胶体, 具有比表面积大、代谢活动强等特点, 几乎参与土壤中一切生化反应过程, 在土壤结构组成、物质循环、腐殖质形成、毒性物质降解、微环境净化等方面均起到重要推动作用<sup>[26-28]</sup>. 细菌与真菌作为土壤环境中两大活性微生物类群, 其数量分布一定程度上可反映土壤微环境状况. 细菌主要包括自养、兼性自养与异养型菌, 其中一些自养型菌如氨化、硝化细菌可促进土壤氮素循环, 在土壤肥力演变过程中作用尤为显著<sup>[29]</sup>. 真菌对土壤中诸多有害成分均可起到降解作用, 此外在土壤病理解析、有机体早期分解、促进土壤物质循环和能量转化等方面均具有重要驱动作用, 是评价土壤环境质量的重要指标之一<sup>[30-32]</sup>. 本研究结果表明, 与自来水相比, 再生水灌溉显著提高了表层土壤细菌数量, 深层土壤差异不显著. 究其原因, 一是再生水本身细菌含量高于自来水; 二是再生水相比自来水富含更高的碳、氮等营养元素, 可提供细菌代谢繁殖所必需的能量来源, 促进其生长<sup>[33]</sup>; 三是再生水水质异质性较强, 不能排除其中含有部分与细菌具有协同生存能力的菌种, 加速细菌繁殖<sup>[34]</sup>. 再生水灌溉对深层土壤细菌数量无显著影响, 原因可能是土柱深层的密闭缺氧环境不利于好氧及兼性好养型细菌的生长, 使其代谢繁殖受限. 再生水灌溉下的土壤真菌数量与自来水相比无显著差异, 这与龚雪等<sup>[33]</sup>的研究结果相似. 后者研究表明, 再生水灌溉显著提高了表层土壤细菌数量, 但对真菌数量影响不大; 张娟等<sup>[35]</sup>的研究也表明, 经再生水灌溉的土壤细菌数量存在显著提高, 而真菌数量与清水灌溉相比差异不明显. 此外, 裴亮等<sup>[36]</sup>研究表明, 再生水灌溉显著提高了土壤真菌数量; 郭魏等<sup>[37]</sup>研究指出, 低氮水平下, 再生水灌溉促进土壤真菌生长, 高氮水平下, 再生水灌溉抑制土壤真菌生长; 与本实验结果均不一

致.推断可能与再生水水质的时空变异性、土质差异性、作物种植情况和灌溉条件等因素相关.再生水充分灌溉相比非充分灌溉显著提高了表层土壤细菌和真菌数量,原因可能是再生水充分灌溉向土壤中输送的营养物质含量相对更高,导致表层土壤水分和养分条件更为充足,更有利于刺激微生物的代谢繁殖;此外,较高的灌水水平也伴随着相对更高的微生物输入量,从而使得土壤细菌和真菌数量得到了提高.

### 3.3 再生水不同灌水水平对土壤典型致病菌分布的影响

大肠菌群是指在37℃下能够分解乳糖从而产酸产气的革兰氏阴性无芽孢杆菌,主要包括大肠埃希氏菌、柠檬酸杆菌、产气克雷伯氏菌及阴沟肠杆菌;其作为人畜排泄物中数量最多的一类细菌,被许多国家作为粪便污染指示菌所提出.大肠埃希氏菌为大肠菌群中的一类菌属,往往能够较好地指示人类肠道病毒;在温度适中和营养物质丰富的地表水体中可迅速增生、扩散,并在受污染土壤中大量繁殖<sup>[38-39]</sup>.本项实验结果表明,再生水灌溉相比自来水显著提高了表层土壤大肠菌群、大肠埃希氏菌数量.原因可能是再生水本身大肠菌群、大肠埃希氏菌浓度高于自来水,灌溉过程中随水进入土壤中的大肠菌群和大肠埃希氏菌数量相对更多;且由于土壤本身的吸附性能较强<sup>[40-41]</sup>,微生物在向深层土壤迁移的过程中速度极为缓慢,致使再生水中大肠菌群和大肠埃希氏菌主要宿集于表层土壤,从而使得表层土壤大肠菌群、大肠埃希氏菌数量得到了显著提高.此外,再生水中往往还含有部分可与大肠菌群、大肠埃希氏菌协同生长的微生物和病毒;加之水体中营养成分输入土壤,给大肠菌群和大肠埃希氏菌提供了相对更为充足的养分和水分条件,促进其生长<sup>[42]</sup>.Forslund 等<sup>[43]</sup>研究表明,灌溉水中大肠杆菌浓度对土壤中大肠杆菌数量存在一定影响;当水体中大肠杆菌浓度较高时,土壤中大肠杆菌数量也相对较高,与本研究结果相似.再生水不同灌水水平对比分析结果表明,再生水充分灌溉下表层土壤大肠菌群、大肠埃希氏菌数量显著高于非充分灌溉,深层土壤二者之间无显著差异.Wen 等<sup>[44]</sup>研究表明,地表滴灌条件下,灌水量越大,表层土壤大肠杆菌含量则相对越多;Libutti 等<sup>[45]</sup>的研究中也指出,应用二级处理水灌

溉时,通过采用滴灌和减少灌水量的方式可有效降低表层土壤和作物体中病原菌的污染风险,以上均与本实验结果相似.而造成此结果的主要原因是再生水充分灌溉相比非充分灌溉向土壤中输送的大肠菌群和大肠埃希氏菌数量更高;此外,再生水充分灌溉向土壤中输入的营养物质含量相对更高,充足的土壤水分和养分条件更有利于致病菌的生长繁殖.

### 3.4 土壤重金属与活性微生物、典型致病菌之间相关性分析

相关性分析表明,土壤重金属 Cd、Pb、Zn 含量与土壤细菌、真菌、大肠菌群、大肠埃希氏菌数量之间均具有显著正相关性.刁展等<sup>[46]</sup>研究表明,土壤 Cd、Pb 含量较低时可刺激土壤微生物的生长繁殖并提高土壤微生物量碳水平,但随着重金属浓度的不断提高,刺激作用逐渐转变为抑制效果;朱红梅等<sup>[47]</sup>研究中指出,低浓度重金属可刺激土壤微生物量碳提高,与本研究结果相似.而 Deng 等<sup>[48]</sup>研究表明,较高浓度重金属污染显著降低了土壤细菌和真菌丰度,并且对微生物群落结构产生一定影响.Xie 等<sup>[49]</sup>研究也表明,土壤微生物活性、丰度和多样性均随土壤重金属浓度的升高而降低,与本研究结果相悖.主要原因是土壤微生物对重金属的响应取决于土壤中重金属的浓度和有效性,本研究中土壤重金属含量甚微,远低于《土壤环境质量标准》[GB15618-1995]限值;此外,微生物的生长受土壤介质当中多种因素影响,如土壤水分、温度条件和有机质含量等,土壤环境中诸多因素间的交互作用对土壤微生物代谢繁殖的影响同样不可忽视<sup>[50]</sup>.

## 4 结论

4.1 与自来水相比,再生水灌溉在一定程度上提高了土壤重金属含量,但仍远低于《土壤环境质量标准》[GB15618-1995]限值;再生水充分灌溉相比非充分灌溉提高了表层土壤 Cd、Pb 含量,Cu、Zn 含量无显著差异.

4.2 与自来水相比,再生水灌溉显著提高了表层土壤细菌、大肠菌群、大肠埃希氏菌数量,对土壤真菌数量影响不大;再生水充分灌溉相比非充分灌溉显著提高了表层土壤细菌、真菌、大肠菌群及大肠埃希氏菌数量.

4.3 土壤 Cd、Pb、Zn 含量与土壤细菌、真菌、大

肠菌群、大肠埃希氏菌数量之间呈正相关性。

#### 参考文献:

- [1] Wang Z, Li J, Li Y. Using Reclaimed water for agricultural and landscape irrigation in China: a review [J]. *Irrigation and Drainage*, 2017,66(5):672-686.
- [2] Khamisi S A A, Prathapar S A, Ahmed M. Conjunctive use of reclaimed water and groundwater in crop rotations [J]. *Agricultural Water Management*, 2013,116(1):228-234.
- [3] Lyu S, Chen W, Zhang W, et al. Wastewater reclamation and reuse in China: Opportunities and challenges [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016,39:86-96.
- [4] 陈卫平,吕斯丹,张炜铃,等.再生(污)水灌溉生态风险与可持续利用 [J]. *生态学报*, 2014,34(1):163-172.  
Chen W P, Lu S D, Zhang W L, et al. Ecological risks and sustainable utilization of reclaimed water and wastewater irrigation [J]. *ActaEcologicaSinica*, 2014,34(1):163-172.
- [5] Urbano V R, Mendonça T G, Bastos R G, et al. Effects of treated wastewater irrigation on soil properties and lettuce yield [J]. *Agricultural water management*, 2017,181:108-115.
- [6] Trolborg M, Duckett D, Allan R, et al. A risk-based approach for developing standards for irrigation with reclaimed water. [J]. *Water Research*, 2017,126:372-384.
- [7] Al-Jassim N, Ansari M I, Harb M, et al. Removal of bacterial contaminants and antibiotic resistance genes by conventional wastewater treatment processes in Saudi Arabia: Is the treated wastewater safe to reuse for agricultural irrigation? [J]. *Water Research*, 2015,73(1):277-290.
- [8] Pedrero F, Maestre-Valero J F, Mounzer O, et al. Physiological and agronomic mandarin trees performance under saline reclaimed water combined with regulated deficit irrigation [J]. *Agricultural Water Management*, 2014,146:228-237.
- [9] Lu S, Wang J, Pei L. Study on the effects of irrigation with reclaimed water on the content and distribution of heavy metals in soil [J]. *International journal of environmental research and public health*, 2016,13(3):298.
- [10] Chen W, Lu S, Pan N, et al. Impact of reclaimed water irrigation on soil health in urban green areas [J]. *Chemosphere*, 2015,119:654-661.
- [11] 王志超,史海滨,李仙岳,等.回填土下再生水灌溉对玉米生长及土壤理化性质的影响 [J]. *水土保持学报*, 2016,30(1):196-202.  
Wang Z C, Shi H B, Li X Y, et al. Effects of reclaimed water irrigation on the maize growth and physical and chemical properties of soil based on the construction backfill [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016,30(1):196-202.
- [12] 张铁军,宋鑫森,陈莉荣,等.再生水灌溉对土壤盐渍化与重金属累积影响研究 [J]. *节水灌溉*, 2016,(12):72-75.  
Zhang T J, Song C S, Chen L R, et al. Effect on reclaimed water irrigation on soil salinization and accumulation of heavy metals [J]. *Water Saving Irrigation*, 2016(12):72-75.
- [13] 丁光晖,樊贵盛,张 艳.山西省汾河再生水灌区土壤重金属污染及分布特征 [J]. *灌溉排水学报*, 2015,34(2):53-55.  
Ding G Y, Fan G S, Zhang Y. Pollution and Distribution Characteristic of Heavy Metals in Fenhe River Reclaimed Water Irrigation Area of Shanxi Province [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015,34(2):53-55.
- [14] Chen W, Lu S, Peng C, et al. Accumulation of Cd in agricultural soil under long-term reclaimed water irrigation [J]. *Environmental Pollution*, 2013,178(1):294-299.
- [15] 马 闯,杨 军,雷 梅,等.北京市再生水灌溉对地下水的重金属污染风险 [J]. *地理研究*, 2012,31(12):2250-2258.  
Ma C, Yang J, Lei M, et al. Assessing the effect of reclaimed water irrigation on groundwater pollution of heavy metals in Beijing [J]. *Geographical Research*, 2012,31(12):2250-2258.
- [16] 赵忠明,陈卫平,焦文涛,等.再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响 [J]. *环境科学*, 2012,33(12):4094-4099.  
Zhao Z M, Chen W P, Jiao W T, et al. Effect of reclaimed water irrigation on soil properties and vertical distribution of heavy metal [J]. *Environmental Science*, 2012,33(12):4094-4099.
- [17] 刘 源,崔二革,李中阳,等.生物质炭和果胶对再生水灌溉下玉米生长及养分、重金属迁移的影响 [J]. *水土保持学报*, 2017,(6):242-248.  
Liu Y, Cui E P, Li Z Y, et al. Different effects of biochar and pectin on maize growth, nutrient and heavy metals migration irrigated by reclaimed water [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017,(6):242-248.
- [18] Cirelli G L, Consoli S, Licciardello F, et al. Treated municipal wastewater reuse in vegetable production [J]. *Agricultural Water Management*, 2012,104:163-170.
- [19] 滕宝霞.大肠杆菌与大肠菌群关系的实验研究 [J]. *中国药事*, 2004,18(3):170-172.  
Teng B X. An experimental study on the relationship between E.coli and coliform group [J]. *Chinese Medicine*, 2004,18(3):170-172.
- [20] Vergine P, Saliba R, Salerno C, et al. Fate of the fecal indicator *Escherichia coli* in irrigation with partially treated wastewater [J]. *Water research*, 2015,85:66-73.
- [21] Qiu Z, Li J, Zhao W. Effects of lateral depth and irrigation level on nitrate and *Escherichia coli* leaching in the North China Plain for subsurface drip irrigation applying sewage effluent [J]. *Irrigation Science*, 2017,35(6):469-482.
- [22] Li J, Wen J. Effects of water managements on transport of *E. coli* in soil-plant system for drip irrigation applying secondary sewage effluent [J]. *Agricultural Water Management*, 2016,178:12-20.
- [23] 张志华,陈为峰,石岳峰,等.再生水灌溉对苜蓿生长发育和品质的影响 [J]. *应用生态学报*, 2009,20(11):2659-2664.  
Zhang Z H, Chen W F, Shi Y F, et al. Effects of irrigation with regenerated water on the growth and quality of alfalfa [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009,20(11):2659-2664.
- [24] Meng W, Wang Z, Hu B, et al. Heavy metals in soil and plants after long-term sewage irrigation at Tianjin China: A case study assessment [J]. *Agricultural Water Management*, 2016,171:153-161.
- [25] 郑顺安,郑向群,刘书田,等.再生水灌溉下紫色水稻土颗粒态有机质中重金属的富集特征 [J]. *水土保持学报*, 2012,26(2):246-250.  
Zheng S A, Zheng X Q, Liu S T, et al. Heavy metals enrichment in particulate organic matter from reclaimed water irrigated purple paddy soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012,

- 26(2):246–250.
- [26] 沈仁芳,赵学强.土壤微生物在植物获得养分中的作用 [J]. 生态学报, 2015,35(20):6584–6591.
- Shen R F, Zhao X Q. Role of soil microbes in the acquisition of nutrients by Plants [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(20):6584–6591.
- [27] 刘 远,张 辉,熊明华,等.气候变化对土壤微生物多样性及其功能的影响 [J]. 中国环境科学, 2016,36(12):3793–3799.
- Liu Y, Zhang H, Xiong M H, et al. Effect of climate change on soil microbial diversity and function [J]. China Environmental Science, 2016,36(12):3793–3799.
- [28] 刘旻霞,李 瑞,张 灿,等.兰州市南山季节性土壤微生物特征及影响因素 [J]. 中国环境科学, 2018,38(7):2722–2730.
- Liu M X, Li R, Zhang C, et al. Seasonal characteristics and influencing factors of soil microbial in Nanshan, Lanzhou [J]. China Environmental Science, 2018,38(7):2722–2730.
- [29] 赵 彤,蒋跃利,闫 浩,等.土壤氮化过程中微生物作用研究进展 [J]. 应用与环境生物学报, 2014,20(2):315–321.
- Zhao T, Jiang Y L, Yan H, et al. Research advances on microbial function in soil ammonifying process [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2014,20(2):315–321.
- [30] Schadt C W, Rosling A. Comment on “Global diversity and geography of soil fungi” [J]. Science, 2015,348(6242):1438–1438.
- [31] Barbi F, Prudent E, Vallon L, et al. Tree species select diverse soil fungal communities expressing different sets of lignocellulolytic enzyme-encoding genes [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016,100:149–159.
- [32] Tedersoo L, Bahram M, Põlme S, et al. Global diversity and geography of soil fungi [J]. Science, 2014,346(6213):1256688.
- [33] 龚 雪,王继华,关健飞,等.再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响 [J]. 环境科学, 2014,35(9):3572–3579.
- Gong X, Wang J H, Guan J F, et al. Impact of reclaimed water irrigation on soil chemical properties and culturable microorganisms [J]. Environmental Science, 2014,35(9):3572–3579.
- [34] Rendueles O, Amherd M, Velicer G J. Positively frequency-dependent interference competition maintains diversity and pervades a natural population of cooperative microbes [J]. Current Biology, 2015,25(13):1673–1681.
- [35] 张 娟,王艳春.再生水灌溉对植物根际土壤特性和微生物数量的影响 [J]. 节水灌溉, 2009,(3):5–8.
- Zhang J, Wang Y C. Influence of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Peculiarity and Microbes Quantity of Plant Rhizosphere [J]. Water Saving Irrigation, 2009,(3):5–8.
- [36] 裴 亮,孙莉英,张体彬.再生水滴灌对蔬菜根际土壤微生物的影响研究 [J]. 中国农村水利水电, 2015,(11):39–42.
- Pei L, Sun L Y, Zhang T B. Effect of soil microorganism of green with reclaimed water drip irrigation of rural domestic sewage [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015,(11):39–42.
- [37] 郭 魏,齐学斌,李中阳,等.不同施氮水平下再生水灌溉对土壤微环境的影响 [J]. 水土保持学报, 2015,29(3):311–315.
- Guo W, Qi X B, Li Z Y, et al. Impact of reclaimed water on soil microenvironment under different nitrogen levels [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015,29(3):311–315.
- [38] Paruch A M, Mæhlum T. Specific features of *Escherichia coli* that distinguish it from coliform and thermotolerant coliform bacteria and define it as the most accurate indicator of faecal contamination in the environment [J]. Ecological Indicators, 2012,23:140–142.
- [39] 丁程成.欧美水质大肠菌群相关检验标准探究 [J]. 环境科技, 2010,(1):67–69.
- Ding C C. Research on Western relevant inspection standards of coliform group in water body [J]. Environmental Science and Technology, 2010,(1):67–69.
- [40] Ren X, Zeng G, Tang L, et al. Sorption, transport and biodegradation—an insight into bioavailability of persistent organic pollutants in soil [J]. Science of the Total Environment, 2018,610:1154–1163.
- [41] Yang F, Zhang W, Li J, et al. The enhancement of atrazine sorption and microbial transformation in biochars amended black soils [J]. Chemosphere, 2017,189:507–516.
- [42] Bech T B, Johnsen K, Dalsgaard A, et al. Transport and distribution of *Salmonella enterica* serovar Typhimurium in loamy and sandy soil monoliths with applied liquid manure [J]. Applied and environmental microbiology, 2010,76(3):710–714.
- [43] Forslund A, Ensink J H, Markussen B, et al. *Escherichia coli* contamination and health aspects of soil and tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) subsurface drip irrigated with on-site treated domestic wastewater [J]. Water Research, 2012,46(18):5917–5934.
- [44] Wen J, Li J, Li Y. Wetting patterns and bacterial distributions in different soils from a surface point source applying effluents with varying *Escherichia coli* concentrations [J]. Journal of integrative agriculture, 2016,15(7):1625–1637.
- [45] Libutti A, Gatta G, Gagliardi A, et al. Agro-industrial wastewater reuse for irrigation of a vegetable crop succession under Mediterranean conditions [J]. Agricultural Water Management, 2018,196:1–14.
- [46] 刁 展.外源重金属对不同类型土壤养分及微生物活性的影响 [D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016.
- Diao Z. Effects of exogenous heavy metals on nutrients and microbial activities of different soils [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2016.
- [47] 朱红梅,李国华,崔 静,等.重金属铅对土壤微生物活性的影响 [J]. 南京农业大学学报, 2011,34(6):125–128.
- Zhu H M, Li G H, Cui J, et al. Effects of lead on microbial activities in vegetable soil [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2011, 34(6):125–128.
- [48] Deng L, Zeng G, Fan C, et al. Response of rhizosphere microbial community structure and diversity to heavy metal co-pollution in arable soil [J]. Applied microbiology and biotechnology, 2015,99(19):8259–8269.
- [49] Xie Y, Fan J, Zhu W, et al. Effect of heavy metals pollution on soil microbial diversity and bermudagrass genetic variation [J]. Frontiers in plant science, 2016,7:755.
- [50] Dixit R, Malaviya D, Pandiyan K, et al. Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: an overview of principles and criteria of fundamental processes [J]. Sustainability, 2015,7(2):2189–2212.

作者简介: 韩 洋(1993–),男,辽宁沈阳人,中国农业科学院硕士研究生,主要从事农业水资源与水环境方面研究.发表论文 4 篇。