

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第9期

Vol.39 No.9

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角区域非道路移动机械排放清单及预测	黄成, 安静宇, 鲁君 (3965)
基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率	李荔, 张洁, 赵秋月, 李慧鹏, 韩军赞 (3976)
上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析	杨静, 陈龙, 刘敏, 孟祥周, 张希 (3987)
广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单	孙西勃, 廖程浩, 曾武涛, 张永波, 梁小明, 叶代启 (3995)
重庆市北碚城区气溶胶中水溶性无机离子的质量浓度及其粒径分布	李彦沛, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 江长胜 (4002)
济南市夏、冬季 PM _{2.5} 中化学组分的季节变化特征及来源解析	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 李静, 邢继钊, 魏本杰, 张二勋, 刘加珍, 董杰 (4014)
聊城冬季一重污染过程 PM _{2.5} 污染特征及成因分析	张敬巧, 吴亚君, 张萌, 王涵, 陈振兴, 胡君, 李慧, 范晓龙, 柴发合, 王淑兰 (4026)
夏季青岛大气气溶胶中不同形态磷的浓度、来源及沉降通量	王楠, 马森, 石金辉, 高会旺, 姚小红 (4034)
晋城市冬季环境空气中挥发性有机物的污染特征及来源解析	杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 李如梅, 李颖慧, 余化龙, 彭林 (4042)
北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价	熊秋林, 赵文吉, 李大军, 周涛 (4051)
合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析	孟凡昊, 秦敏, 梁帅西, 谢品华, 夏晖晖, 段俊, 方武, 唐科, 李昂, 魏桢, 王凤 (4060)
填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质	李昊, 刘彦君, 陈坦, 闫秋鹤, 代辉祥, 王洪涛, 陆文静 (4070)
北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征	李贝贝, 韩凯丽, 秦建平, 王鑫, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (4078)
基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析	高翔, 左锐, 郭学茹, 孟利, 刘鑫, 王膜, 滕彦国, 王金生 (4086)
透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估	官曼莉, 左俊杰, 任心欣, 赵洪涛, 罗茜, 廖云杰, 李叙勇 (4096)
黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析	赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 谢晓芸 (4105)
黄河干流宁蒙段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性	席玥, 王婷, 倪晋仁, 韩鹏, 仪马兰, 郑彤, 蒋咏, 马若绮, 崔锋 (4114)
伊洛河和浑太河春季水体光学吸收特征的对比	李柳阳, 邵田田, 张鑫, 宋炎炎, 苏东辉, 王涛 (4122)
马莲河流域化学风化的季节变化和影响因素	王雨山, 韩双宝, 邓启军, 祁晓凡 (4132)
柳江盆地浅层地下水硝化型水特征和成因分析	徐进, 何江涛, 彭毅, 曾颖 (4142)
地下水氮污染原位修复缓释碳源材料的研发与物化-生境协同特性	张雯, 尹琳, 周念清 (4150)
三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征	张志永, 万成炎, 胡红青, 彭建华, 侯娟, 丁庆秋, 袁玉洁 (4161)
蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算	刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 李欣, 黄佳维, 赵冲, 唐咏春, 平明明 (4169)
锆改性沸石添加对重污染河道底泥磷释放和钝化的影响	何思琪, 张薇, 林建伟, 詹艳慧, 李娟英, 邢云青, 高春梅, 黄宏, 梁舒静 (4179)
洱海流域乡镇尺度上人类活动对净氮输入量的影响	李影, 刘宏斌, 雷秋良, 胡万里, 王洪媛, 翟丽梅, 任天志, 连慧妹 (4189)
我国典型潮间带沉积物-水界面无机氮源汇效应	聂家琴, 王东启, 陈杰, 李杨杰, 陈姝, 陈振楼 (4199)
东太湖水产养殖对沉积物中氨氧化原核生物的影响	储瑜, 何肖微, 曾巾, 赵大勇, 孙强, 曹萍, 吴庆龙 (4206)
处理采矿废水湿地沉积物中厌氧氨氧化过程	汪海波, 马丁, 岳正波, 陶巍, 陈天虎, 王进 (4215)
华东地区某饮用水源地中磺胺类抗性基因的分布特征	胡亚茹, 姜蕾, 张天阳, 雷丹丹, 姜巍巍, 张东, 林匡飞, 崔长征 (4222)
制革废水处理过程中磺胺类抗生素和抗性细菌的分布特征	花莉, 李璐, 杨春燕 (4229)
人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较	赵林丽, 邵学新, 吴明, 姜小三, 陆琳莹 (4236)
城市污水管网中不同生化作用的基质流向	姚翔译, 石烜, 桑浪涛, 金鹏康, 王晓昌 (4242)
微絮凝对腐殖酸超滤过程膜污染减缓特性	王旭东, 石彩霞, 廖正伟, 贺毓淑, 王磊 (4249)
UV 强化草酸络合 Fe ³⁺ 活化过硫酸盐氧化降解苯胺	韩东晖, 李瑛, 李开明, 应光国 (4257)
焦化废水 A/O ² 和 A/O/H/O 处理工艺中多环芳烃的削减行为分析	吴海珍, 孙胜利, 刘国新, 韦景悦, 吴超飞, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (4265)
长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响	俞小军, 李杰, 周猛, 宋璐, 李维维, 王亚娥, 马娟, 吕慧 (4274)
NaCl 盐度对 A ² /O 工艺缺氧区胞外聚合物及生物絮凝性的影响	张兰河, 田蕊, 郭静波, 贾艳萍, 张海丰, 李正, 陈子成 (4281)
温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响	陈方敏, 金润, 袁琨, 李祥, 黄勇, 顾澄伟 (4289)
游离氨 (FA) 对氨氧化菌 (AOB) 活性抑制动力学试验	孙洪伟, 于雪, 高宇学, 李维维, 祁国平, 许涓 (4294)
HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响	安芳娇, 赵智超, 黄利, 黄剑明, 邵兆伟, 陈永志 (4302)
长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复	李田, 魏凡凯, 汪裕昌, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (4310)
广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析	宋波, 张云霞, 庞瑞, 杨子杰, 宾娟, 周子阳, 陈同斌 (4317)
紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应	罗梅, 田冬, 高明, 黄容 (4327)
秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响	李娇, 田冬, 黄容, 徐国鑫, 黎嘉成, 高明, 王子芳 (4338)
低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力	谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 黄宇, 黄小辉 (4348)
臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响	周慧敏, 李品, 高峰, 冯兆忠, 张殷波 (4359)
再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响	韩洋, 李平, 齐学斌, 崔丙健, 常迪, 马欢欢 (4366)
黄淮海地区鸡粪有机肥重金属含量特征及环境风险	李发, 徐应明, 王林, 梁学峰, 孙约兵, 纪艺凝, 栾润宇 (4375)
村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析	靳琪, 高红, 岳波, 黄启飞, 王瑜堂, 吴小丹, 於俊颖, 杨惠媛 (4385)
《环境科学》征订启事 (3986)	《环境科学》征稿简则 (4050) 信息 (4085, 4104, 4337)

再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响

韩洋^{1,2}, 李平^{1,3}, 齐学斌^{1,3*}, 崔丙健^{1,3}, 常迪^{1,2}, 马欢欢^{1,2}

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 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, 新乡 453003)

摘要: 为了探讨再生水不同灌水水平对土壤酶活性和环境污染指示菌耐热大肠菌群分布的影响, 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酶活性和耐热大肠菌群分布的影响. 结果表明: ① 在土壤酶活性方面, 相同灌水水平下, 与自来水处理相比, 再生水灌溉处理提高了土壤脲酶和蔗糖酶活性; 再生水不同灌水水平对比分析表明, 充分灌水处理显著提高了土壤蔗糖酶活性和深层土壤过氧化氢酶活性. ② 在土壤耐热大肠菌群分布方面, 相同灌水水平下, 与自来水灌溉处理相比, 再生水灌溉显著提高了土壤耐热大肠菌群数量; 再生水不同灌水水平对比分析表明, 充分灌水处理显著增加了土壤耐热大肠菌群数量; 4个处理的表层土壤耐热大肠菌群数量均显著高于深层, 且随着灌溉时间的推移, 0~60 cm各土层的土壤耐热大肠菌群数量存在降低趋势. ③ 通过对土壤耐热大肠菌群数量与土壤酶活性的相关性分析表明, 土壤耐热大肠菌群数量与土壤脲酶和蔗糖酶活性呈极显著正相关, 与土壤过氧化氢酶活性呈显著正相关. 因此, 再生水灌溉促进了土壤C、N循环转化酶的活性, 合理控制再生水灌水水平可以有效阻控土壤耐热大肠菌群的数量.

关键词: 再生水; 土柱; 灌水水平; 酶活性; 耐热大肠菌群

中图分类号: X144; X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)09-4366-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201801126

Effects of Different Levels of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Enzyme Activity and Distribution of Thermotolerant Coliforms

HAN Yang^{1,2}, LI Ping^{1,3}, QI Xue-bin^{1,3*}, CUI Bing-jian^{1,3}, CHANG Di^{1,2}, MA Huan-huan^{1,2}

(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. Water Environment Factor Risk Assessment Laboratory of Agricultural Products Quality and Safety, Ministry of Agriculture, Xinxiang 453003, China)

Abstract: This study aimed to discern the effect of different levels of irrigation with reclaimed water on soil enzyme activities and on the distribution of thermotolerant coliforms. The effects of two irrigation water qualities (reclaimed water and tap water) and two irrigation levels (full irrigation and insufficient irrigation) on soil enzyme activity and distribution of thermotolerant coliforms were studied through indoor soil column irrigation. Results indicated that: ① Reclaimed water irrigation increased soil urease and invertase activity compared with tap water under the same irrigation conditions. Compared with insufficient irrigation with reclaimed water, full irrigation with reclaimed water significantly increased soil invertase activity and deep soil catalase activity. ② At the same irrigation level, the number of thermotolerant coliforms in soil significantly increased with reclaimed water irrigation. The number of thermotolerant coliforms in soil under full irrigation with reclaimed water was significantly higher than with insufficient irrigation using reclaimed water. The number of thermotolerant coliforms in surface soil of the four irrigated treatments was significantly higher than in the deep soil layer, and with progression of irrigation, the number of thermotolerant coliforms in the 0-60 cm soil layer decreased. ③ There was a significant positive correlation between the quantity of thermotolerant coliforms and the activity of soil urease and invertase, and between the quantity of thermotolerant coliforms and the activity of soil catalase. Reclaimed water therefore promoted enzyme activity that can promote transformation of C and N in soil. Reasonable irrigation with reclaimed water can therefore effectively control the number of thermotolerant coliforms in soil.

Key words: reclaimed water; soil column; irrigation level; enzyme activity; thermotolerant coliforms

城市污水再生回用不但对于缓解当前我国水资源短缺问题具有重要的现实意义, 而且可以大大降低生活、工业废水排放对区域生态环境造成的污染^[1-3]. 再生水作为一种新型水源, 近年来逐渐被应用于农田和城市绿地灌溉等行业^[4]; 不仅缓解了常规水资源的供需矛盾, 而且其本身所富含的氮、

磷和有机质等营养物质的输入也使土壤肥力得以提

收稿日期: 2018-01-14; 修订日期: 2018-03-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679241); 国家重点研发计划项目(2017YFD0800403)

作者简介: 韩洋(1993~)男, 硕士研究生, 主要研究方向为非常规水资源安全高效利用, E-mail: 1515507632@qq.com

* 通信作者, E-mail: qxb6301@sina.cn

高,从而减少人工施肥量^[5,6].因此,合理利用再生水进行农田灌溉是实现废弃污水资源化,降低污水排放率的有效途径.土壤酶活性是评价土壤养分和土壤环境质量的一项重要指标,在整个土壤生物化学反应过程当中扮演着重要的驱动角色^[7].土壤酶主要来源于土壤微生物,同时也促进土壤微生物代谢过程并影响其活性,与土壤微生物共同在土壤物质循环、环境改善等方面发挥重要作用^[8].因此,通过研究再生水灌溉下土壤酶活性的动态变化情况,可以间接了解土壤营养物质的转化、土壤肥力的演化以及土壤微生物的动态变化情况.再生水灌溉对土壤致病菌分布的影响已成为评价再生水灌溉环境安全性的重要卫生学标准之一^[9].近年来,耐热大肠菌群被许多国家作为一种环境污染指示菌所提出,受到广泛关注.与大肠菌群相比,耐热大肠菌群在人畜粪便中所占比例更大,其在环境中的检出情况能更科学地反映出环境受致病菌污染的程度^[10].以往有关再生水灌溉对土壤环境效应的研究多集中在表征土壤养分、酶活性以及一系列环境污染物的变化.如潘能等^[11]研究了再生水灌溉对绿地土壤酶活性的影响,结果表明,与清水相比,经再生水灌溉的绿地土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶活性均得到了显著提高. Adrover 等^[12]的研究表明,再生水灌溉使土壤葡萄糖苷酶和脲酶活性得到了显著提高.李阳等^[13]的研究表明,再生水灌溉的土壤蔗糖酶活性呈先降低后升高的趋势,磷酸酶活性高于清水对照.仇振杰等^[14]的研究表明,再生水地下滴灌可使 0~50 cm 土层脲酶活性得到提高,且土壤脲酶活性受土壤水分的影响

很大,再生水灌溉后土壤大肠杆菌浓度均随土层深度的增加而递减,未产生数量级的变动.但是,目前关于再生水不同灌水水平对土壤酶活性和耐热大肠菌群分布以及二者之间关系的影响研究尚不多见.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,探讨不同处理对土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶活性及土壤耐热大肠菌群分布的影响,以期为非常规水农业利用的环境效应研究工作提供数据支撑.

1 材料与方法

1.1 供试土壤与实验用水

供试土壤采自中国农业科学院新乡市农业水土环境野外科学观测试验站周边 0~20 cm 耕层土壤,土壤质地为砂壤.试验站位于北纬 35°19",东经 113°53",海拔 73.2 m,年均气温 14.1℃,年均降水量约 588.8 mm,无霜期 210 d,日照时间 2 398.8 h.土样经自然风干,剔除肉眼可见的动植物残体、细根和石块,过 5 mm 筛,混合均匀后取一部分土样装入密封袋,带回实验室用于测定土壤基本理化性质,其余土样保存用于装填土柱,供试土壤基本理化性质详见表 1.

本实验用再生水取自河南省新乡市骆驼湾污水处理厂,污水来源主要为城市生活污水,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,再生水常规水质指标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)的规定,出水水质详见表 2.

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of tested soil							
质地	干容重 /g·cm ⁻³	有机质 OM /g·kg ⁻¹	总氮 TN /g·kg ⁻¹	总磷 TP /g·kg ⁻¹	EC 值 /dS·m ⁻¹	pH 值	耐热大肠菌群总数 /MPN·g ⁻¹
砂壤	1.42	8.691	0.205	0.376	148.63	8.56	26

表 2 实验用再生水及自来水水质

Table 2 Quality index of reclaimed water and tap water					
灌溉水类型	总氮 TN /mg·L ⁻¹	总磷 TP /mg·L ⁻¹	pH 值	总含盐量 TDS /g·L ⁻¹	耐热大肠菌群总数 /MPN·L ⁻¹
自来水	4.63	0.23	7.91	0.62	<300
再生水	29.57	1.95	7.64	2.37	4 300

1.2 实验设计

本实验设置自来水、再生水两种灌溉水质,充分灌溉、非充分灌溉两种灌水水平,充分灌溉处理保持土壤含水率为田间质量持水率(FH)的 90%,

非充分灌溉处理保持土壤含水率为充分灌溉处理的 70%,设定依据详见参考文献[15,16].共计 4 个处理,分别为: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), 每个处理设置 3 个重复. 实验用土柱为硬质 PVC 管材, 外径 $\times$ 高 = 40 cm $\times$ 70 cm, 壁厚 0.98 cm (图 1). 土柱底部 (反滤层位置处) 设有排水孔, 用于收集尾水, 柱体上方布设有管道式灌溉系统, 每个土柱均在土面上方等间距插入 4 个滴头, 灌溉过程中土面上方始终保持一层薄水层, 以保证灌溉水均匀、稳定下渗. 供试土壤经自然风干、筛分后, 以容重 $1.42 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 计算每 5 cm 土层所需填装的土壤质量, 土壤分层由下至上装入 PVC 柱内, 每个土柱均分 12 次填装, 每次填装均保证土壤颗粒分布均匀. 在土壤填装过程中, 严格将土柱内壁边缘土壤压实, 以保证灌水时无贴壁水流入渗, 尽量避免边缘效应发生. 柱体由下至上依次是 3 cm 反滤层、40 ~ 60 cm 土壤、20 ~ 40 cm 土壤、0 ~ 20 cm 土壤. 土柱顶部预留 7 cm 高度不填土以备灌水时利用. 实验共装填土柱 24 根, 采取批量报废的形式, 即每取一批土样则废弃土柱 12 根. 所有土柱填装完毕后统一用清水灌溉 20 d, 待土壤形成稳定结构后开始实验. 本实验从 2017 年 8 月 1 日至 2017 年 11 月 29 日于室内进行, 充分灌水处理每次灌水量为 9.70 L, 非充分灌水处理每次灌水量为 6.80 L. 灌水周期为 20 d, 分别在实验开始后的第 1 d、第 21 d、第 41 d、第 61 d、第 81 d、第 101 d 进行灌水, 在第 61 d、第 121 d 进行取样 (每次取样均在下一次灌水之前), 分析化验各土层土壤酶活性及耐热大肠菌群总数.

1.3 测试项目与方法

土壤基本理化性质测定^[17]: pH 值采用 PHS-1 型酸度计测定; 土壤可溶性盐采用电导法 (DDB-303A 型便携式电导率仪, 上海雷磁) 测定; 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. 土壤酶测定方法^[8]: 土壤脲酶活性采用苯酚钠比色法测定, 其活性以反应 24 h 后 1 g 土壤中释放的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的毫克数表示; 土壤蔗糖

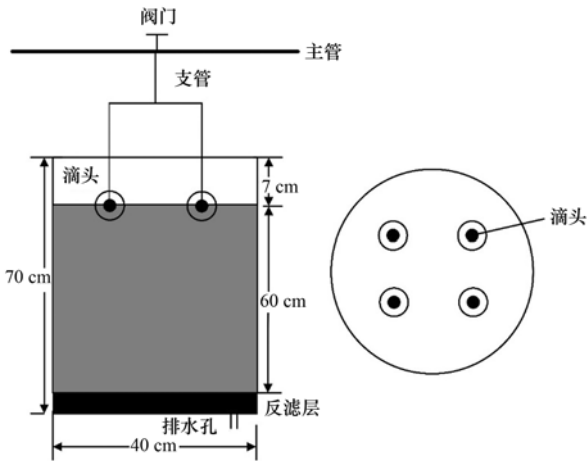


图 1 土柱装置示意

Fig. 1 Simplified general view of soil column

酶活性采用 3, 5-二硝基水杨酸比色法测定, 其活性以 24 h 后 1 g 土壤释放的葡萄糖毫克数表示; 土壤过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定, 其活性以 1 g 土壤消耗 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KMnO}_4$ 的体积 (mL) 表示. 土壤耐热大肠菌群总数采用多管发酵法测定^[18].

1.4 数据处理

应用 Excel 2010 和 SAS 9.2 进行数据的方差分析和相关性分析.

2 结果与分析

2.1 再生水不同灌水水平对土壤脲酶活性的影响

不同处理不同土层深度土壤脲酶活性见表 3. 灌溉 60 d 后, RWDI、RWFI 处理 0 ~ 10、20 ~ 30、40 ~ 60 cm 土层脲酶活性显著高于 CKDI、CKFI 处理 ($P < 0.05$); 120 d 后, RWDI、RWFI 处理 0 ~ 30 cm、40 ~ 60 cm 土层脲酶活性显著高于 CKDI、CKFI 处理. 说明相同灌水水平下, 再生水灌溉相比自来水提高了土壤脲酶活性. 灌溉 60 d、120 d 后, RWFI 与 RWDI 处理 0 ~ 60 cm 各土层脲酶活性均无显著差异. 这说明短期内再生水两种灌水水平对土壤脲酶活性的影响不显著.

表 3 不同处理土壤脲酶活性

Table 3 Activity of soil urease in different treatments

土层深度 /cm	土壤脲酶活性/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$							
	CKDI ¹⁾	CKFI	RWDI	RWFI	CKDI ²⁾	CKFI ²⁾	RWDI ²⁾	RWFI ²⁾
0 ~ 10	0.81e ²⁾	0.79e	0.90cd	0.97bc	0.85de	0.87de	1.02ab	1.08a
10 ~ 20	0.73de	0.79cd	0.80cd	0.84bc	0.70e	0.79cd	0.87ab	0.93a
20 ~ 30	0.63c	0.62c	0.76b	0.74b	0.61c	0.65c	0.77ab	0.82a
30 ~ 40	0.57b	0.65a	0.63ab	0.63ab	0.58b	0.61ab	0.63ab	0.66a
40 ~ 60	0.46d	0.44d	0.61a	0.59ab	0.47d	0.44d	0.57bc	0.53c

1) 1 表示灌溉 60 d 后土样, 2 表示灌溉 120 d 后土样; 2) 同行数据后不同字母表示同一土层不同处理之间存在显著性差异 ($P < 0.05$), 下同

2.2 再生水不同灌水水平对土壤蔗糖酶活性的影响

不同处理不同土层深度土壤蔗糖酶活性见表 4。灌溉 60 d 后, RWDI 处理 20 ~ 60 cm 土层蔗糖酶活性显著高于 CKDI 处理, RWFI 处理 10 ~ 60 cm 土层蔗糖酶活性显著高于 CKFI 处理; 120 d 后, RWDI 处理 10 ~ 60 cm 土层蔗糖酶活性显著高于 CKDI 处理, RWFI 处理 0 ~ 60 cm 土层蔗糖酶活性

显著高于 CKFI 处理。说明相同灌水水平下, 再生水灌溉相比自来水显著提高了土壤蔗糖酶活性。灌溉 60 d 后, RWDI 与 RWFI 处理 0 ~ 60 cm 土层蔗糖酶活性均差异不显著; 120 d 后, RWFI 处理 0 ~ 20 cm、30 ~ 60 cm 土层蔗糖酶活性显著高于 RWDI 处理。这表明在灌溉中期, 再生水两种灌水水平对土壤蔗糖酶活性影响不显著; 而随灌溉时间的推移, 充分灌溉在末期显著高于非充分灌溉。

表 4 不同处理土壤蔗糖酶活性
Table 4 Activity of soil invertase in different treatments

土层深度 /cm	土壤蔗糖酶活性/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$							
	CKDI1	CKFI1	RWDI1	RWFI1	CKDI2	CKFI2	RWDI2	RWFI2
0 ~ 10	1.15ab	1.13abc	1.15ab	1.12abc	1.10bc	1.07c	1.07c	1.18a
10 ~ 20	0.93d	0.91d	0.98cd	1.02bc	0.96d	1.04b	1.05b	1.14a
20 ~ 30	0.84c	0.82c	0.95ab	0.96ab	0.89bc	0.85c	0.98a	0.99a
30 ~ 40	0.72d	0.73d	0.77bc	0.81b	0.75cd	0.75cd	0.81b	0.86a
40 ~ 60	0.62c	0.64bc	0.73a	0.76a	0.62c	0.65bc	0.68b	0.73a

2.3 再生水不同灌水水平对土壤过氧化氢酶活性的影响

不同处理不同土层深度土壤过氧化氢酶活性见表 5。灌溉 60 d、120 d 后, RWDI、RWFI 与 CKDI、CKFI 处理 0 ~ 60 cm 各土层过氧化氢酶活性均无显

著差异。说明相同灌水水平下, 短期内再生水和自来水对土壤过氧化氢酶活性影响差异不明显。灌溉 60 d、120 d 后, RWFI 处理 30 ~ 60 cm 土层过氧化氢酶活性显著高于 RWDI 处理。说明再生水充分灌溉相比非充分灌溉提高了深层土壤过氧化氢酶活性。

表 5 不同处理土壤过氧化氢酶活性
Table 5 Activity of soil catalase in different treatments

土层深度 /cm	土壤过氧化氢酶活性/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$							
	CKDI1	CKFI1	RWDI1	RWFI1	CKDI2	CKFI2	RWDI2	RWFI2
0 ~ 10	0.741c	0.756bc	0.749bc	0.769abc	0.759bc	0.779ab	0.763abc	0.792a
10 ~ 20	0.688d	0.711cd	0.702cd	0.725bc	0.748ab	0.768a	0.754ab	0.778a
20 ~ 30	0.704d	0.735bcd	0.710cd	0.743bc	0.765ab	0.783a	0.766ab	0.799a
30 ~ 40	0.642c	0.704b	0.638c	0.692b	0.719b	0.780a	0.725b	0.766a
40 ~ 60	0.636d	0.682c	0.640d	0.684c	0.724b	0.753a	0.721b	0.767a

2.4 再生水不同灌水水平对土壤耐热大肠菌群分布的影响

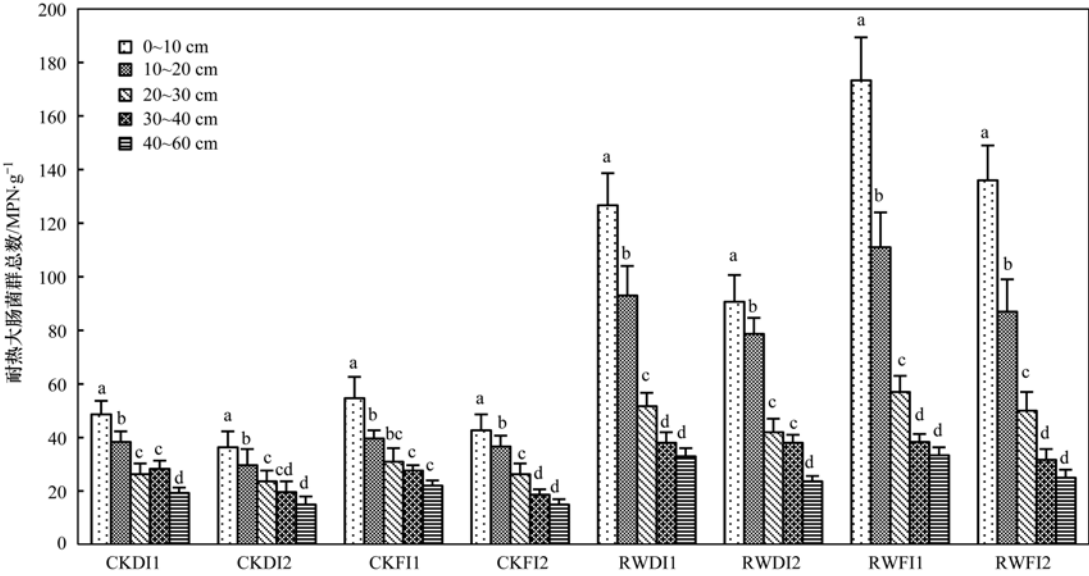
由图 2 可知, CKDI、CKFI、RWDI、RWFI 这 4 个处理经灌溉 60 d、120 d 后的土壤耐热大肠菌群数量均随土层深度的增加而递减, 表现为: 0 ~ 10 cm > 10 ~ 20 cm > 20 ~ 30 cm > 30 ~ 40 cm > 40 ~ 60 cm, 并且表层土壤数量与深层之间差异显著。

相同灌水水平不同灌水水质下土壤耐热大肠菌群分布见图 3 ~ 4。灌溉 60 d、120 d 后, RWDI、RWFI 处理 0 ~ 60 cm 各土层耐热大肠菌群总数均显著高于 CKDI、CKFI 处理。其中, RWDI 处理在 60 d、120 d 后的 0 ~ 10、10 ~ 20 cm 土层耐热大肠菌群总数分别是 CKDI 处理的 2.62、2.45、2.50、2.68 倍; RWFI 处理在 60 d、120 d 后的 0 ~ 10、10 ~ 20 cm 土层耐热大肠菌群总数分别是 CKFI 处理

的 3.20、2.85、3.24、2.41 倍。说明相比自来水, 再生水灌溉显著提高了土壤耐热大肠菌群数量, 并且对表层土壤数量的影响最大。

相同灌水水质不同灌水水平下土壤耐热大肠菌群分布见图 5 ~ 6。灌溉 60 d 后, RWFI 处理 0 ~ 20 cm 土层耐热大肠菌群总数显著高于 RWDI 处理; 120 d 后, RWFI 处理 0 ~ 10 cm 土层耐热大肠菌群总数显著高于 RWDI 处理, 深层土壤二者间无显著差异。说明再生水两种灌水水平对表层土壤耐热大肠菌群数量的分布存在一定影响, 但深层土壤差异不显著; 灌水量越高, 土壤水分条件越充足, 表层土壤耐热大肠菌群数量越高。

另外, 由图 3 ~ 6 还可看出, CKDI、CKFI、RWDI、RWFI 这 4 个处理经灌溉 120 d 后, 0 ~ 60 cm 土层耐热大肠菌群总数相比 60 d 后的数



横坐标中 1 表示灌溉 60 d 后土样, 2 表示灌溉 120 d 后土样, 下同

图 2 不同处理不同时间的土壤耐热大肠菌群分布

Fig. 2 Distribution of soil thermotolerant coliforms at different times with different treatments

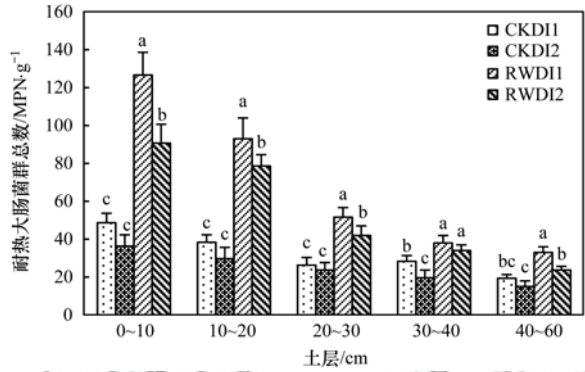


图 3 非充分灌溉下不同灌水水质耐热大肠菌群分布比较

Fig. 3 Distribution of soil thermotolerant coliforms with different water quality conditions under insufficient irrigation

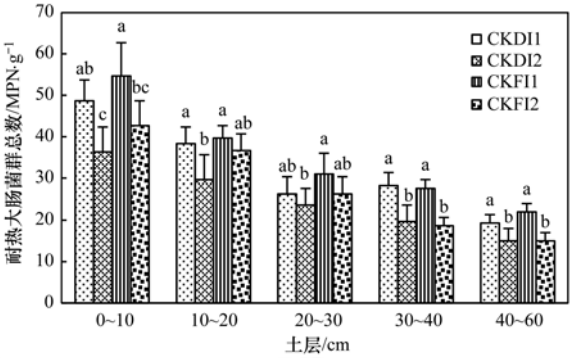


图 5 自来水灌溉下不同灌水水平耐热大肠菌群分布比较

Fig. 5 Distribution of soil Thermotolerant coliforms in different irrigation levels under tap water

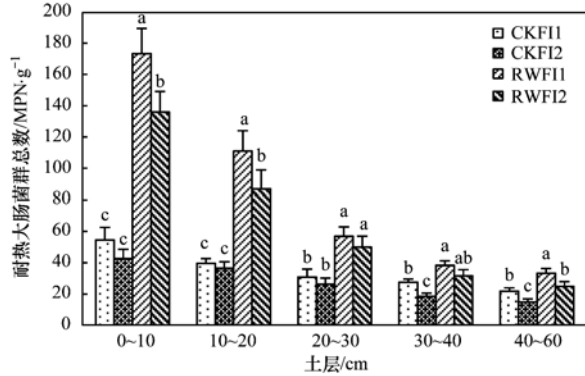


图 4 充分灌溉下不同灌水水质耐热大肠菌群分布比较

Fig. 4 Distribution of soil thermotolerant coliforms with different water quality conditions under sufficient irrigation

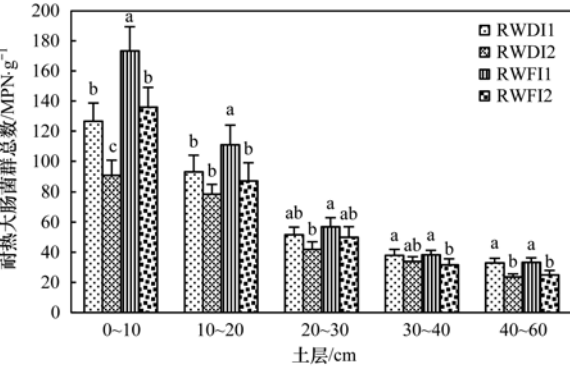


图 6 再生水灌溉下不同灌水水平耐热大肠菌群分布比较

Fig. 6 Distribution of soil thermotolerant coliforms with different irrigation levels under reclaimed water

量均表现出下降趋势, 且 RWDI 处理 0 ~ 30 cm 土层和 RWF1 处理 0 ~ 20 cm 土层两次取样所测得的数量间存在显著差异, 这说明随着灌溉时间

的推移, 土壤耐热大肠菌群数量并不会发生累积, 反而出现降低的趋势, 且表层土壤数量显著降低.

2.5 土壤酶活性与耐热大肠菌群数量之间的相关性分析

土壤酶活性与耐热大肠菌群数量之间的相关性见表 6。土壤耐热大肠菌群数量与土壤脲酶活性、蔗糖酶活性呈极显著正相关($P < 0.01$)，与土壤过氧化氢酶活性呈显著正相关($P < 0.05$)，相关系数分别为：0.901、0.774、0.548。另外，土壤过氧化

氢酶活性与土壤脲酶活性和蔗糖酶活性均具有显著的正相关性，相关系数分别为：0.551 和 0.563；土壤脲酶活性与蔗糖酶活性呈极显著正相关，相关系数为 0.941。土壤耐热大肠菌群数量与脲酶活性、蔗糖酶活性的相关系数较高；可见脲酶和蔗糖酶活性高，供氮和供碳能力强的土壤更有利于耐热大肠菌群的生长和繁殖。

表 6 土壤酶活性与耐热大肠菌群数量的相关矩阵¹⁾

Table 6 Correlation matrix of soil enzyme activity and number of thermotolerant coliforms				
	脲酶活性	蔗糖酶活性	过氧化氢酶活性	耐热大肠菌群数量
脲酶活性	1.000			
蔗糖酶活性	0.941 **	1.000		
过氧化氢酶活性	0.551 *	0.563 *	1.000	
耐热大肠菌群数量	0.901 **	0.774 **	0.548 *	1.000

1) * 表示 $0.01 < P < 0.05$ ，** 表示 $P < 0.01$

3 讨论

3.1 再生水不同灌水水平对土壤酶活性的影响

土壤微生物几乎在一切土壤生化反应过程中起主要作用，而土壤酶主要来源于土壤微生物和植物根系的分泌释放^[8]。以往相关研究表明，与清水灌溉相比，再生水灌溉显著提高了土壤脲酶活性^[19, 20]；再生水灌溉的农田和公园绿地土壤脲酶活性和蔗糖酶活性也有所提高^[11]，而再生水灌溉对土壤过氧化氢酶活性影响并不明显^[21]。本实验研究结果表明，经灌溉 120 d 后，再生水灌溉下的 0 ~ 30 cm、40 ~ 60 cm 土层脲酶活性得到显著提高；再生水非充分灌溉处理 10 ~ 60 cm 土层蔗糖酶活性均显著高于自来水非充分灌溉处理，再生水充分灌溉处理 0 ~ 60 cm 土层蔗糖酶活性均显著高于自来水充分灌溉处理。特别是本实验中土柱不种植作物，因此土壤酶的主要来源是土壤中活体微生物的分泌释放以及残体的分解。相比自来水，再生水中含有更加丰富的氮、磷、有机质等营养物质以及数量更多、种类更加丰富的细菌和真菌等微生物群体，这些营养物质和微生物在随灌溉进入土壤中后使得土壤微生物数量和活性均在一定程度上得到提高^[22]，从而使得土壤脲酶活性和蔗糖酶活性得到了提升。过氧化氢酶的主要作用是降低生物体代谢过程中产生的过氧化氢对微生物及作物根系的毒害程度^[8]，再生水灌溉后的土壤过氧化氢酶活性较自来水差异不大，这可能是由于短期内再生水灌溉还未使土壤中过氧化氢的累积到达一定程度，并未引起土壤过氧化氢酶活性产生显著变化。再生水不同

灌水水平的差异表明，相比非充分灌溉，一方面，充分灌溉条件下土壤水分供给充足，更能刺激土壤微生物活性，促进土壤酶的分泌^[23]；另一方面，较高的灌水水平也伴随着相对丰富的养分输入，充足的土壤养分和水分条件也为土壤中的酶促反应提供了更加充足的反应基质^[24]。4 个处理的土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶(20 ~ 30 cm 除外)活性均随土层深度的增加呈递减趋势，这主要是因为与水分的水平扩散相比，灌溉水垂直入渗的速度较为缓慢，表层土壤的水分和养分较深层土壤更加充足，微生物的数量和活性相对更高，导致表层土壤酶活性显著高于深层^[25]。

3.2 再生水不同灌水水平对土壤耐热大肠菌群分布的影响

耐热大肠菌群是指在乳糖培养基中于 $(37 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 下培养，48 h 内能够产酸产气；且在 $(44.5 \pm 0.25)^\circ\text{C}$ 下培养，24 h 内仍能够产酸产气的细菌。通常情况下，与大肠菌群相比，耐热大肠菌群在人畜排泄物中所占的比例更大，因此其检出可在一定程度上说明环境受到了肠道致病菌的污染。耐热大肠菌群属于一类好氧及兼性厌氧型菌，与人体接触后极有可能导致腹泻、伤寒、痢疾等疾病的发生，其中部分菌种可释放毒素，引发带血性腹泻和急性肾病等疾病。在养分和水分条件充足的环境下，耐热大肠菌群可迅速繁殖扩散^[26~29]。

CKDI、CKFI、RWDI、RWFI 这 4 个处理经灌溉 60 d、120 d 后的耐热大肠菌群数量均随土层深度的增加而递减，且表层土壤耐热大肠菌群数量显著高于深层土壤。究其原因，一是土壤本身就是一个

天然过滤器,微生物在随水向深层土壤运移的过程中,因与土壤颗粒之间具有较强的吸附作用而逐渐失去活性,从而在还未迁移到深层土壤之前就已消亡^[30];二是土柱深层土壤通气性较差,耐热大肠菌群是一类好氧及兼性厌氧型菌,虽在有氧和无氧环境中都能生存,但在有氧环境下可进行有氧呼吸并大量繁殖,在无氧环境下进行无氧呼吸仅能维持生存,一般不会繁殖^[27];三是灌溉水中耐热大肠菌群等微生物在随灌溉进入土壤后,其本身的迁移速度非常缓慢,以宿集表层土壤为主^[31]。

无论是在充分灌溉还是非充分灌溉下,再生水灌溉各土层耐热大肠菌群数量均显著高于自来水灌溉,这与 Vergine 等^[32]的研究结果相似,其认为灌溉水中的大肠杆菌数量将对土壤中大肠杆菌的分布产生直接影响,而本实验结果可能是由于再生水本身的耐热大肠菌群浓度高于自来水,灌溉过程中,因水体携带而进入土壤中的耐热大肠菌群数量相对更多;另外,与自来水相比,再生水中富含更高的碳、氮等微生物生长繁殖所不可缺少的营养物质^[33],这些营养物质在随水进入土壤后提高了土壤肥力,使土壤环境得到改善,从而给耐热大肠菌群提供了更充足的养分来源和更适宜的生长繁殖环境。再生水两种灌水水平下的表层土壤耐热大肠菌群数量之间差异显著,这是由于一方面,灌水量越高,灌溉过程中进入土壤中的耐热大肠菌群数量相对越高;另一方面,灌水量越高,随水进入土壤中的营养物质浓度相对越高,从而给耐热大肠菌群的生长繁殖提供了更加充足的养分^[34]。

随着时间的推移,4个处理各土层耐热大肠菌群数量均呈下降趋势。这与 Qiu 等^[35]的研究结果相似,后者研究表明,经再生水灌溉的玉米收获后土壤大肠杆菌浓度较第一次灌水处理后的数量有明显降低的趋势,说明再生水灌溉不会导致大肠杆菌在土壤中发生累积。Li 等^[36]的研究中也表明,频繁的使用再生水灌溉会导致土壤中大肠杆菌的短期污染,但长期土壤中大肠杆菌浓度呈下降趋势。而导致本实验结果产生的原因主要是耐热大肠菌群在土壤中的消亡量大于灌溉输入量和繁殖量。一方面,竞争机制是推动土壤微生物发展和进化的动力^[37];由于土壤本底及灌溉水中的养分物质含量十分有限,加之土柱装置空间封闭,使得本身数量较少的耐热大肠菌群在与土壤中其他微生物争夺有限空间和养分的过程中逐渐受到抑制,阻碍其生长繁殖。但也不能排除每次灌溉过程中,再生水和自来水中

耐热大肠菌群数量不稳定、土壤温度波动等因素的干扰。

3.3 土壤酶活性与耐热大肠菌群的相关性分析

相关性分析表明,土壤耐热大肠菌群数量与土壤脲酶活性、蔗糖酶活性呈极显著正相关,与土壤过氧化氢酶活性呈显著正相关。脲酶可促进土壤中氮素的分解和转化,提高土壤的供氮能力,给耐热大肠菌群的生长繁殖提供必要的氮源^[8];蔗糖酶能加速土壤中蔗糖的分解,生成葡萄糖和果糖,提高土壤的供碳能力,给耐热大肠菌群的生长繁殖提供必要的碳源^[8, 38]。在碳、氮等营养元素充足的环境下,耐热大肠菌群可大量生长繁殖。过氧化氢酶可促进土壤当中过氧化氢的分解,降低土壤因新陈代谢产生的过氧化氢对耐热大肠菌群等微生物体的威胁^[8]。一方面,土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性的提高可改善土壤环境,增强土壤肥力^[39];另一方面,却给耐热大肠菌群等环境致病菌的生长繁殖提供了更充足的养分和更适宜的生长繁殖环境,加速其繁殖。因此,在再生水回用过程中有必要加强对一系列病原菌的去除力度,提高和完善再生水处理过程中的消毒工艺;另外,合理把控再生水灌水水平,控制再生水中碳、氮等元素的含量水平,对于保证再生水回灌过程中的安全性和高效性具有重要的现实意义。

4 结论

(1)与自来水相比,再生水灌溉提高了土壤脲酶和蔗糖酶活性;相比非充分灌溉,再生水充分灌溉显著提高了土壤蔗糖酶活性和深层土壤过氧化氢酶活性。

(2)与自来水相比,再生水灌溉显著提高了土壤耐热大肠菌群数量;相比非充分灌溉,再生水充分灌溉下土壤耐热大肠菌群数量显著提高;表层土壤耐热大肠菌群数量显著高于深层,且随灌溉时间的推移,各土层耐热大肠菌群数量均有所降低。

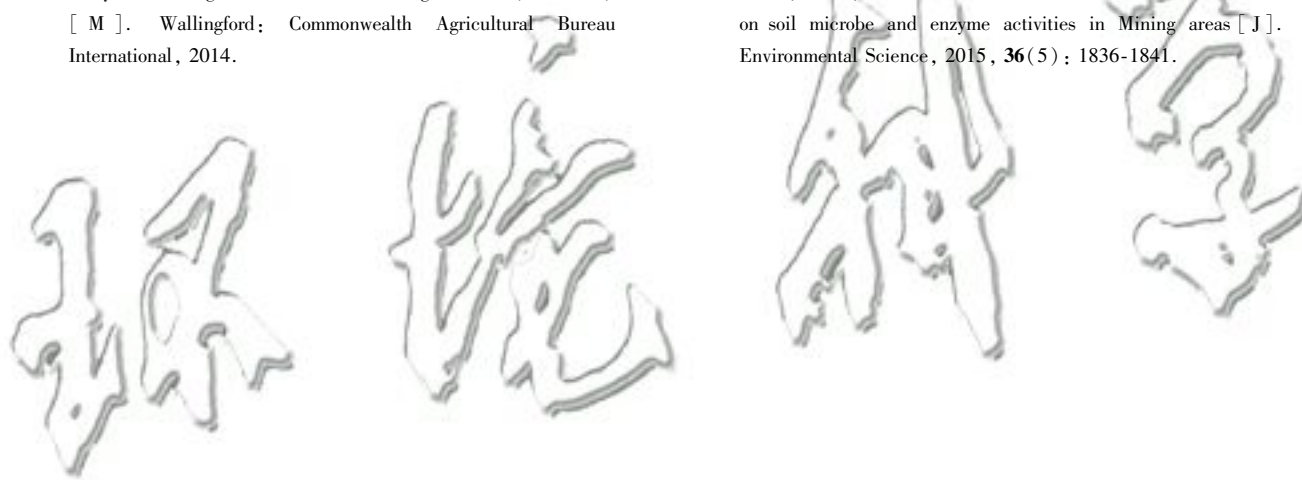
(3)对土壤耐热大肠菌群数量与酶活性的相关性分析表明,土壤耐热大肠菌群数量与土壤脲酶和蔗糖酶活性呈极显著正相关,与土壤过氧化氢酶活性呈显著正相关。

参考文献:

- [1] Chen W P, Lu S D, Jiao W T, *et al.* Reclaimed water: A safe irrigation water source? [J]. *Environmental Development*, 2013, 8: 74-83.
- [2] Chang D H, Ma Z. Wastewater reclamation and reuse in Beijing: Influence factors and policy implications [J]. *Desalination*,

- 2012, **297**: 72-78.
- [3] Lyu S D, Chen W P, Zhang W L, *et al.* Wastewater reclamation and reuse in China: Opportunities and challenges[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, **39**: 86-96.
- [4] Wang Z, Li J S, Li Y F. Using reclaimed water for agricultural and landscape irrigation in China: a review[J]. *Irrigation and Drainage*, 2017, **66**(5): 672-686.
- [5] Araviadis R V. The effects of irrigation with treated wastewater on crops and human populations-A Review[J]. *European Journal of Engineering and Natural Sciences*, 2016, **1**(1): 15-22.
- [6] Yi L L, Jiao W T, Chen X N, *et al.* An overview of reclaimed water reuse in China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(10): 1585-1593.
- [7] 解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 等. 滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1404-1412.
- Xie X F, Pu L J, Wang Q Q, *et al.* Response of soil enzyme activities and their relationships with physicochemical properties to different aged coastal reclamation areas, Eastern China[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1404-1412.
- [8] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986. 26-152.
- [9] Harwood V J, Levine A D, Scott T M, *et al.* Validity of the indicator organism paradigm for pathogen reduction in reclaimed water and public health protection [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, **71**(6): 3163-3170.
- [10] Pachepsky Y, Shelton D, Dörner S, *et al.* Can *E. coli* or thermotolerant coliform concentrations predict pathogen presence or prevalence in irrigation waters? [J]. *Critical Reviews in Microbiology*, 2016, **42**(3): 384-393.
- [11] 潘能, 侯振安, 陈卫平, 等. 绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(12): 4081-4087.
- Pan N, Hou Z A, Chen W P, *et al.* Study on soil enzyme activities and microbial biomass carbon in Greenland irrigated with reclaimed water [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(12): 4081-4087.
- [12] Adrover M, Moyà G, Vadell J. Seasonal and depth variation of soil chemical and biological properties in alfalfa crops irrigated with treated wastewater and saline groundwater[J]. *Geoderma*, 2017, **286**: 54-63.
- [13] 李阳, 王文全, 吐尔逊·吐尔洪. 再生水灌溉对葡萄叶片抗氧化酶和土壤酶的影响[J]. *植物生理学报*, 2015, **51**(3): 295-301.
- Li Y, Wang W Q, Tuerhong T. Effect of reclaimed water irrigation on antioxidant enzymes in leaves of *Vitis vinifera* and enzymes in soil [J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, **51**(3): 295-301.
- [14] 仇振杰. 再生水地下滴灌对土壤酶活性和大肠杆菌 (*Escherichia coli*) 迁移的影响[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017.
- [15] 李平, 齐学斌, 樊向阳, 等. 分根区交替灌溉对马铃薯水氮利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, **25**(6): 92-95.
- Li P, Qi X B, Fan X Y, *et al.* Effect of alternate partial root-zone irrigation on nitrogen and water use efficiency of potato[J]. *Transactions of the*, 2009, **25**(6): 92-95.
- [16] Shahnazari A, Liu F L, Andersen M N, *et al.* Effects of partial root-zone drying on yield, tuber size and water use efficiency in potato under field conditions[J]. *Field Crops Research*, 2007, **100**(1): 117-124.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd ed.) [M]. Beijing: Agricultural Press, 2000.
- [18] Foppen J W A, Schijven J F. Evaluation of data from the literature on the transport and survival of *Escherichia coli* and thermotolerant coliforms in aquifers under saturated conditions [J]. *Water Research*, 2006, **40**(3): 401-426.
- [19] 周媛, 李平, 郭魏, 等. 施氮和再生水灌溉对设施土壤酶活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, **30**(4): 268-273.
- Zhou Y, Li P, Guo W, *et al.* Influence of nitrogen application and reclaimed wastewater irrigation on greenhouse soil enzyme activities[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, **30**(4): 268-273.
- [20] García-Orenes F, Caravaca F, Morugán-Coronado A, *et al.* Prolonged irrigation with municipal wastewater promotes a persistent and active soil microbial community in a semiarid agroecosystem[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, **149**: 115-122.
- [21] 焦志华, 黄占斌, 李勇, 等. 再生水灌溉对土壤性能和土壤微生物的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(2): 319-323.
- Jiao Z H, Huang Z B, Li Y, *et al.* The effect of reclaimed water irrigation on Soil Performance and the Microorganism [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, **29**(2): 319-323.
- [22] Adrover M, Farrús E, Moyà G, *et al.* Chemical properties and biological activity in soils of Mallorca following twenty years of treated wastewater irrigation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, **95** Suppl: S188-S192.
- [23] Zhao S C, Li K J, Zhou W, *et al.* Changes in soil microbial community, enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north-central China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, **216**: 82-88.
- [24] Bowles T M, Acosta-Martínez V, Calderón F, *et al.* Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively-managed agricultural landscape [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **68**: 252-262.
- [25] Heinze S, Chen Y N, El-Nahhal Y, *et al.* Small scale stratification of microbial activity parameters in Mediterranean soils under freshwater and treated wastewater irrigation [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **70**: 193-204.
- [26] Hodge J, Chang H H, Boisson S, *et al.* Assessing the association between thermotolerant coliforms in drinking water and diarrhea: An analysis of individual-level data from multiple studies [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2016, **124**(10): 1560-1567.
- [27] Snod C, Nagel C, Bhattacharya A, *et al.* The effectiveness of sanitary inspections as a risk assessment tool for thermotolerant coliform bacteria contamination of rural drinking water: a review of data from West Bengal, India [J]. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 2017, **96**(4): 976-983.
- [28] Mirzaei N, Ghaffari H R, Karimyan K, *et al.* Survey of effective parameters (water sources, seasonal variation and residual

- chlorine) on presence of thermotolerant coliforms bacteria in different drinking water resources [J]. *International Journal of Pharmacy and Technology*, 2015, **7**(3): 9680-9689.
- [29] Maurer C P, Simonetti A B, Staggemeier R, *et al.* Adenovirus, enterovirus and thermotolerant coliforms in recreational waters from Lake Guaíba beaches, Porto Alegre, Brazil [J]. *Journal of Water and Health*, 2015, **13**(4): 1123-1129.
- [30] Ren X Y, Zeng G M, 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, **610-611**: 1154-1163.
- [31] 周利霞. 污水处理水灌溉后土壤中病原菌的代谢与传输 [D]. 保定:河北农业大学, 2010.
- [32] 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.
- [33] Guo W, Andersen M N, Qi X B, *et al.* Effects of reclaimed water irrigation and nitrogen fertilization on the chemical properties and microbial community of soil [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, **16**(3): 679-690.
- [34] Stirling G R. Biological control of plant-parasitic nematodes: soil ecosystem management in sustainable agriculture (2nd ed.) [M]. Wallingford: Commonwealth Agricultural Bureau International, 2014.
- [35] Qiu Z J, Li J S, Zhao W X. 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.
- [36] Li J S, 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.
- [37] Zhou J X, Yang H S, Tang F K, *et al.* Relative roles of competition, environmental selection and spatial processes in structuring soil bacterial communities in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, **117-118**: 223-232.
- [38] 贾曼莉, 郭宏, 李会科. 渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2777-2784.
- Jia M L, Guo H, Li H K. Mineralization of soil organic carbon and its relationship with soil enzyme activities in apple orchard in Weibei [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(7): 2777-2784.
- [39] 李君剑, 刘峰, 周小梅. 矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1836-1841.
- Li J J, Liu F, Zhou X M. Effects of different reclaimed scenarios on soil microbe and enzyme activities in Mining areas [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(5): 1836-1841.



CONTENTS

Emission Inventory and Prediction of Non-road Machineries in the Yangtze River Delta Region, China	HUANG Cheng, AN Jing-yu, LU Jun (3965)
Vehicle Exhaust Emission Characteristics and Their Contributions in Jiangsu Province	LI Li, ZHANG Jie, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (3976)
Historical Trends of Atmospheric Pb and Hg Emissions from Fossil Fuel Combustion in Shanghai	YANG Jing, CHEN Long, LIU Min, <i>et al.</i> (3987)
Emission Inventory of Atmospheric Pollutants and VOC Species from Crop Residue Burning in Guangdong Province	SUN Xi-bo, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (3995)
Mass Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing	LI Yan-pei, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (4002)
Analysis of Seasonal Variations in Chemical Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Summer and Winter in Ji'nan City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4014)
PM _{2.5} Pollution Characterization and Cause Analysis of a Winter Heavy Pollution Event, Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, WU Ya-jun, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (4026)
Concentrations, Sources, and Dry Deposition Fluxes of Different Forms of Phosphorus in Qingdao Aerosols in Summer	WANG Nan, MA Miao, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (4034)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Winter in Jincheng	YANG Fan, YAN Yu-long, GE Yun-fei, <i>et al.</i> (4042)
Enrichment Levels and Comprehensive Pollution Assessment of Dust Heavy Metals in Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, LI Da-jun, <i>et al.</i> (4051)
Characteristics of Atmospheric BTX near a Main Road in Hefei City	MENG Fan-hao, QIN Min, LIANG Shuai-xi, <i>et al.</i> (4060)
Ozone Generation Potential and Highly Contributing Substances of NMOCs from Landfill Working Face	LI Hao, LIU Yan-jun, CHEN Tan, <i>et al.</i> (4070)
Emission Characteristics of Wind-Eroded Dust from Concrete Batching Plants in Beijing	LI Bei-bei, HAN Kai-li, QIN Jian-ping, <i>et al.</i> (4078)
Seasonal Variation Characteristics of Pollution Risk in a Riverside Source Area Based on Source Apportionment	GAO Xiang, ZUO Rui, GUO Xue-ru, <i>et al.</i> (4086)
Evaluation of Effect of Urban Non-point Source Pollution Control on Porous Asphalt-Bio-retention Combined Roads	GONG Man-li, ZUO Jun-jie, REN Xin-xin, <i>et al.</i> (4096)
Composition, Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Lanzhou Reach of the Yellow River	 ZHAO Xia-ting, LI Shan, WANG Zhao-wei, <i>et al.</i> (4105)
Characterization of Dissolved Organic Matter Fractions in the Ning-Meng Section of the Yellow River and Relationship with Metal Ions	XI Yue, WANG Ting, NI Jin-ren, <i>et al.</i> (4114)
Comparative Characteristics of Optical Absorption in Waters from Yiluo River and Huntai River in Spring	LI Liu-yang, SHAO Tian-tian, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4122)
Seasonal Variations in River Water Chemical Weathering and Its Influence Factors in the Malian River Basin	WANG Yu-shan, HAN Shuang-bao, DENG Qi-jun, <i>et al.</i> (4132)
Characteristics and Genesis of NO ₃ Type Water in Shallow Groundwater in Liujiang Basin	XU Jin, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (4142)
Development and Evaluation of a Sustainable Long-release Carbon Material Applied for In-Situ Remediation of Groundwater Nitrogen Pollution	 ZHANG Wen, YIN Lin, ZHOU Nian-qing (4150)
Phosphorus Forms and Distribution Characteristics in the Sediment and Soil of the Water-Level-fluctuating Zone in the Main Stream of the Three Gorges Reservoir	 ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, <i>et al.</i> (4161)
Distribution Characteristics and Release Fluxes of Phosphorus Forms in Xiangxi Bay Sediments in the Three Gorges Reservoir Before and After Impoundment	 LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Zirconium-modified Zeolite Addition on Phosphorus Release and Immobilization in Heavily Polluted River Sediment	HE Si-qi, ZHANG Wei, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (4179)
Impact of Human Activities on Net Anthropogenic Nitrogen Inputs (NANI) at Township Scale in Erhai Lake Basin	LI Ying, LIU Hong-bin, LEI Qiu-liang, <i>et al.</i> (4189)
Simulation of Inorganic Nitrogen Fluxes at the Sediment-water Interface in a Typical Intertidal Zone, Eastern China	NIE Jia-qin, WANG Dong-qi, CHEN Jie, <i>et al.</i> (4199)
Effects of Aquaculture on Ammonia-oxidizing Prokaryotes in Sediments of Eastern Lake Taihu	CHU Yu, HE Xiao-wei, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4206)
Transformation of Ammonia in Wetland Sediments for Treatment of Mining Wastewater	WANG Hai-bo, MA Ding, YUE Zheng-bo, <i>et al.</i> (4215)
Distribution Characteristics of Sulfonamide Antibiotic Resistance Genes in a Drinking Water Source in East China	HU Ya-ru, JIANG Lei, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (4222)
Distribution Characteristics of Sulfonamides and Sulfamethoxazole-Resistant Bacteria in Tannery Wastewater Treatment Processes	HUA Li, LI Lu, YANG Chun-yan (4229)
Effects of Different Substrates and Particle Sizes on Wastewater Purification	ZHAO Lin-li, SHAO Xue-xin, WU Ming, <i>et al.</i> (4236)
Substrate Flow by Different Biochemical Activities in the Urban Sewage Network	YAO Xiang-yi, SHI Xuan, SANG Lang-tao, <i>et al.</i> (4242)
Reducing Membrane Fouling from Micro-Flocculation in a Humic Acid Ultrafiltration Process	WANG Xu-dong, SHI Cai-xia, LIAO Zheng-wei, <i>et al.</i> (4249)
Enhanced Degradation of Aniline by PS Oxidation in the Presence of UV and Ferric Oxalate	HAN Dong-hui, LI Ying, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (4257)
Behavior and Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coking Wastewater of A/O ² and A/O/H/O Processes	WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, LIU Guo-xin, <i>et al.</i> (4265)
Effects of Long-term Side Stream Extracton on Phosphorus Removal and Recovery Performance of EBPR System	YU Xiao-jun, LI Jie, ZHOU Meng, <i>et al.</i> (4274)
Effect of NaCl Salinity on Extracellular Polymeric Substances and Bioflocculation of Anoxic Sludge in A ² /O Process	ZHANG Lan-he, TIAN Rui, GUO Jing-bo, <i>et al.</i> (4281)
Effect of Temperature and pH on Nitrogen Conversion in Feammox Process	CHEN Fang-min, JIN Run, YUAN Yan, <i>et al.</i> (4289)
Inhibitory Kinetics of Free Ammonia (FA) on Ammonia-oxidizing Bacteria (AOB)	SUN Hong-wei, YU Xue, GAO Yu-xue, <i>et al.</i> (4294)
Effect of HRT on Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Heterotrophic Denitrification	AN Fang-jiao, ZHAO Zhi-chao, HUANG Li, <i>et al.</i> (4302)
Reactivation Performance of Nitrosation Flocculent Sludge After Long-term Storage	LI Tian, WEI Fan-kai, WANG Yu-chang, <i>et al.</i> (4310)
Analysis of Characteristics and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils in the Xijiang River Draining of Guangxi	SONG Bo, ZHANG Yun-xia, PANG Rui, <i>et al.</i> (4317)
Soil Organic Carbon of Purple Soil as Affected by Different Application of Biochar	LUO Mei, TIAN Dong, GAO Ming, <i>et al.</i> (4327)
Effects of Straw and Biochar Addition on Soil Carbon Balance and Ecological Benefits in a Rape-maize Rotation Planting System	LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4338)
Potential to Ensure Safe Production from Rice Fields Polluted with Heavy Cadmium by Combining a Rice Variety with Low Cadmium Accumulation, Humic Acid, and Sepiolite	 XIE Xiao-mei, FANG Zhi-ping, LIAO Min, <i>et al.</i> (4348)
Interactive Effects of Ozone and Drought on Antioxidant Enzyme Activities of Poplar Leaves	ZHOU Hui-min, LI Pin, GAO Feng, <i>et al.</i> (4359)
Effects of Different Levels of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Enzyme Activity and Distribution of Thermotolerant Coliforms	HAN Yang, LI Ping, QI Xue-bin, <i>et al.</i> (4366)
Characteristics of Heavy Metals in Chicken Manure Organic Fertilizers in the Huang-Huai-Hai Region and related Environmental Risk Assessment	 LI Fa, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (4375)
Heavy Metal Content of Rural Living Solid Waste and Related Source and Distribution Analysis	JIN Qi, GAO Hong, YUE Bo, <i>et al.</i> (4385)