

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析 刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝 (3239)

1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析 刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕 (3247)

瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征 刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章 (3256)

上海城区PM_{2.5}中有机碳和元素碳变化特征及来源分析 张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳 (3263)

亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布 王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟 (3271)

无锡市冬季典型天气PM_{2.5}中碳组分的污染特征 云龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国 (3280)

高炉炼铁工艺细颗粒物PM_{2.5}排放特性分析 范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军 (3287)

重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究 祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜 (3293)

双组分VOCs的催化氧化及动力学分析 卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙 (3302)

汽车排放超细微颗粒物浓度及粒径谱特征的实验研究 陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊 (3309)

疏勒河上游地表水化学主离子特征及其控制因素 周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲 (3315)

河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量 陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴 (3325)

大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价 张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶 (3336)

雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价 柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力 (3346)

北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析 李海燕,石安邦,瞿杨晨,岳靖淋 (3352)

黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布 李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园 (3358)

合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征 李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤 (3365)

基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究 刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥 (3373)

杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态 邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅 (3381)

基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演 李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅 (3389)

天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例 高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐 (3397)

利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度 李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮 (3408)

Cu₂O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究 王冉,周雪峰,胡学香,胡春 (3417)

不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究 李欢旋,王金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅 (3422)

还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸 周红艺,曾思思,梁思,韩鉴 (3430)

多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较 宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程 (3436)

不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究 金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌 (3443)

气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响 李祥,张大林,黄勇,陈宗炬,袁怡 (3449)

微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究 刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚炜 (3455)

“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究 吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶 (3461)

温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (3466)

污水处理厂尾水细菌群落结构分析 徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩 (3473)

沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究 国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑 (3480)

内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析 李志华,张芹,白旭丽,刘毅 (3487)

基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析 李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博 (3492)

S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响 陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君 (3498)

影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析 李艳利,李艳粉,徐宗学 (3504)

河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系 马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿 (3513)

Fontibacter sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究 马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂 (3522)

基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析 艾建超,王宁,杨净 (3530)

石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究 杨涵,熊黑钢,陈学刚 (3537)

不同施磷量(KH₂PO₄)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化 郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳 (3546)

硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中形态影响 杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集 (3553)

硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响 刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青 (3564)

再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响 龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈 (3572)

西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征 秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平 (3580)

黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ¹³C值的影响 杜雪莲,王世杰,罗绪强 (3587)

碳底物含量对厌氧条件下水稻土N₂、N₂O、NO、CO₂和CH₄排放的影响 陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂, Klaus Butterbach-Bahl (3595)

北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM_{2.5}能力研究 梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂 (3605)

污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响 刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹 (3612)

京津冀区域生产和消费CO₂排放的时空特点分析 汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉 (3619)

水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究 任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁 (3632)

《环境科学》征稿简则(3279) 《环境科学》征订启事(3545) 信息(3364,3486,3552,3563)

再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响

龚雪, 王继华*, 关健飞, 杨雪辰, 陈黛慈

(哈尔滨师范大学生命科学与技术学院, 微生物实验室, 哈尔滨 150025)

摘要: 通过室内土柱模拟实验, 探讨再生水灌溉对土壤化学性质和可培养微生物的影响, 从而为再生水回用评价提供数据支持。结果表明, 在土壤化学性质方面, 再生水灌溉可显著提高土壤有机质(OM)和全氮(TN)含量, 而对土壤总磷(TP)、速效磷(AP)和pH值无显著影响。在微生物数量方面, 再生水灌溉可显著提高表层0~20 cm细菌和放线菌数量, 而对20~40 cm和40~60 cm土层三大微生物类群数量影响较小。在微生物种类方面, 不动杆菌属(*Acinetobacter*)是再生水灌区的优势菌属, 芽孢杆菌属(*Bacillus*)是自来水灌区的优势菌属; 自来水灌区特有种属4个, 再生水灌区特有种属6个; 再生水灌溉对表层0~20 cm土壤微生物群落Shannon多样性无影响, 使土壤微生物群落Pielou均匀度降低, 可提高土壤微生物群落Margalef丰富度。通过SPSS 17.0对土壤微生物数量和土壤化学性质进行相关性分析表明, 土壤微生物数量与OM、TN、TP和AP含量呈正相关, 与土壤pH值、含水量(SWC)呈负相关; 通过CANOCO 4.5对土壤微生物种类与土壤化学性质进行DCA去趋势分析和RDA冗余分析表明, AP含量与微生物群落相关性最强($P=0.002$), TP和TN对链球菌属(*Streptococcus*)、气球菌属(*Aerococcus*)和奈瑟氏球菌属(*Neisseria*)的影响较大, OM和AP对气单胞菌属(*Aeromonas*)、动性球菌属(*Planococcus*)和盐杆菌属(*Halobacterium*)影响较大。

关键词: 再生水; 化学性质; 可培养微生物; DCA; RDA

中图分类号: X144; X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3572-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.09.045

Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms

GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, YANG Xue-chen, CHEN Dai-ci

(Microbiology Laboratory, College of Life Science and Technology, Harbin Normal University, Harbin 150025, China)

Abstract: This research used batch soil column experiment to study the effects of irrigating with reclaimed water and tap water on the soil chemical properties and culturable microorganisms. The results indicated that reclaimed water could markedly increase the soil organic material (OM) and total nitrogen (TN) content, but it had no obvious effect on total phosphorus (TP), available phosphorus (AP) and pH value. Reclaimed water irrigation could significantly enhance the amounts of surface soil bacteria and actinomycetes at a depth of 0-20 cm, but it had little effect on the biomass of 20-40 cm and 40-60 cm soil layers. The dominant bacteria in tap water irrigation area was the genus *Bacillus* whereas that of reclaimed water irrigation area was the genus *Acinetobacter*. Tap water irrigation area had four endemic genera and reclaimed water irrigation area had six endemic genera. Reclaimed water had no obvious effect on the microbial community Shannon diversity of 0-20 cm soil layer, while it decreased Pielou evenness index, and improved Margalef richness index. Through SPSS 17.0 correlation analysis between soil microbes quantity and soil chemical properties, it was shown that the soil microbes quantity was positively correlated with OM, TN, TP and AP, but negatively correlated with soil water content (SWC) and pH value. Based on CANOCO 4.5 detrended correspondence analysis (DCA) and redundancy analysis (RDA) between soil microbes species and soil chemical properties, it was shown that AP had the strongest correlation with the microbial community ($P=0.002$). TN and TP had larger impact on *Streptococcus*, *Aeromonas* and *Neisseria*. OM and AP had larger impact on *Aerococcus*, *Planococcus* and *Halobacterium*.

Key words: reclaimed water; chemical properties; culturable microorganism; DCA; RDA

随着城市发展进程的加速, 城市对水资源的需求进一步加大, 污水再生回用是解决城市水资源紧缺与水体污染矛盾的有效途径, 也是建设可持续发展城市的重要环节^[1]。再生水是指经过城市污水再生处理系统充分可靠的净化处理、满足特定用途水质标准的净化处理水, 其已广泛应用于地下水回灌、农业灌溉、工业利用、景观用水, 城市杂用等多个方面^[2,3]。早在20世纪70年代初美国就开始大规模兴建污水处理厂并开始将污水再生回用^[4], 近年

来随着水资源危机加剧, 越来越多的国家开始重视对再生水的利用^[5-7]。但是再生水灌溉的环境安全性^[8]和长期生态风险却一直以来备受人们的关注,

收稿日期: 2014-04-13; 修订日期: 2014-05-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108145); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07301001-05); 黑龙江省教育厅科学技术研究重点项目(12521A010); 黑龙江省研究生创新科研项目(YJSCX2012-190HLJ)

作者简介: 龚雪(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为微生物遗传学和环境微生物学, E-mail: fygongxue@126.com

* 通讯联系人, E-mail: wangjihua333@hotmail.com

并成为学术界争论的焦点和限制再生水灌溉的关键因素。

目前关于再生水研究已有很多方面,主要包括再生水水质的研究^[9,10]、再生水灌溉对植物的影响研究^[11,12]、再生水灌溉对土壤环境的影响研究^[13,14]和再生水回用的健康风险^[15,16]等。哈尔滨地区关于再生水研究极少,为验证哈尔滨地区再生水灌溉对土壤生态环境的影响,本研究采用室内灌溉土柱模拟的方法,探讨再生水灌溉对土壤化学性质和土壤微生物的影响,以期对再生水回用评价提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

实验用水取自哈尔滨市太平污水处理厂,水质指标(表1)在地下水质量标准^[17]和城市污水再生利用城市杂用水水质^[18]范围内。实验用土取自哈尔滨市松北区南京路松花江支流河岸,采用五点法 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 分层取土,用 28 cm

×40 cm 灭菌自封袋分装并带回实验室,部分样品经室温自然风干、过 1 mm 孔筛后用于土壤化学性质测试分析,其余样品去除石块、植物根部等杂物后用于装柱。再生水中可培养细菌种属见表 2。

表 1 实验所用再生水及自来水水质指标

项目	测试值	
	再生水	自来水
外观	无不快感	无不快感
pH 值	7.2	7.6
色度	20	5
臭味	无不快感	无不快感
浊度(NTU)	5	1
溶解性固体/mg·L ⁻¹	500	320
悬浮固体/mg·L ⁻¹	5	2
BOD ₅ /mg·L ⁻¹	2.8	0.4
COD/mg·L ⁻¹	30	28
总氮/mg·L ⁻¹	25	7.8
总磷/mg·L ⁻¹	1.67	0.05
氯化物/mg·L ⁻¹	250	100
总硬度/mg·L ⁻¹	450	300
细菌总数/个·L ⁻¹	780	20

表 2 实验所用再生水中可培养细菌种属

Table 2 Culturable bacteria species in reclaimed water

细菌属名	分离频率/%	细菌属名	分离频率/%
芽孢杆菌属(<i>Bacillus</i> sp.)	58.21	不动杆菌属(<i>Acinetobacter</i> sp.)	17.16
微球菌属(<i>Micrococcus</i> sp.)	20.15	动性球菌属(<i>Planococcus</i> sp.)	2.99
芽孢八叠球菌属(<i>Sporosarcina</i> sp.)	1.49		

1.2 实验设计

以再生水为实验组,自来水为对照组进行土柱(有机玻璃材质,内径×高=20 cm×80 cm,柱底有孔可渗水,在柱体 20 cm、40 cm、60 cm 高度处四周分别设置取样口,柱子下方设有布水器,布水器与 6850 型防腐泵相连)灌溉实验。土壤分层取回后,以容重为 1.4 g·cm⁻³ 分层装填,柱体从下至上依次是粒状石块、40~60 cm 土壤、20~40 cm 土壤、0~20 cm 土壤。在灌溉前,测试各土层化学性质、定量分析各土层微生物数量和定性解析 0~20 cm 土层微生物群落结构,作为空白参照值。模拟装置分别用再生水和自来水进行灌溉处理,每次灌溉量为 500 mL,每 10 d 灌溉一次,在灌溉量为 5 L 和 10 L 时分别按土层取样(取样时间在下一轮灌溉之前),分析各土层化学性质、定量分析各土层微生物数量和定性解析 0~20 cm 土层微生物群落结构。

1.3 测定方法

有机质(OM)含量采用重铬酸钾-外加热法测定,pH 值采用电位测定法测定,全氮含量采用半微

量开氏定氮法测定,全磷和速效磷含量采用钼锑抗比色法测定^[19,20];微生物定量分析采用平板涂布计数法;微生物群落结构定性分析采用微生物传统培养法,经菌株分离、纯化、形态学观察和生理生化实验,最终参照文献[21]进行菌属鉴定。

1.4 数据分析

微生物种群的 Shannon 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)和 Margalef 丰富度指数(R)计算公式如下:

$$H' = - \sum p_i \ln p_i \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

$$J = H' / \ln S$$

$$R = (S - 1) / \ln N$$

式中, p_i 是第 i 种微生物的个体数占总个体数的比例,可以用 N_i/N 求出, N_i 为第 i 种物种个体数, N 为总个体数, S 为每个样品中的物种总数。

应用 EXCEL 2003 和 SPSS 17.0 进行数据的方差分析和相关性分析,使用 NTSYS-PC 进行各土样细菌的聚类分析,通过 CANOCO 4.5 进行去趋势对应分析(DCA)和冗余分析(RDA)。

2 结果与分析

2.1 再生水灌溉对土壤化学性质的影响

由表 3 可知,再生水灌区 0~20 cm 土层 OM 含量随灌溉量的增加有升高趋势,且 4 和 5 显著高于 1 ($P < 0.05$),20~40 cm 和 40~60 cm 土层 OM 含量随灌溉量的增加也呈升高趋势,5 与 1 之间差异

显著 ($P < 0.05$);再生水灌区各土层 TN 含量随灌溉量的增加而升高,0~20 cm 土层 4 和 5 的 TN 含量显著高于 1 ($P < 0.05$),20~40 cm 和 40~60 cm 土层 5 的 TN 含量显著高于 4 和 1 ($P < 0.05$);在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层全磷和速效磷含量随再生水灌溉量的增加也呈现升高趋势,5 与 1 之间差异显著 ($P < 0.05$).

表 3 不同土壤样品的化学性质比较¹⁾

Table 3 Comparison of chemical properties of different soil samples

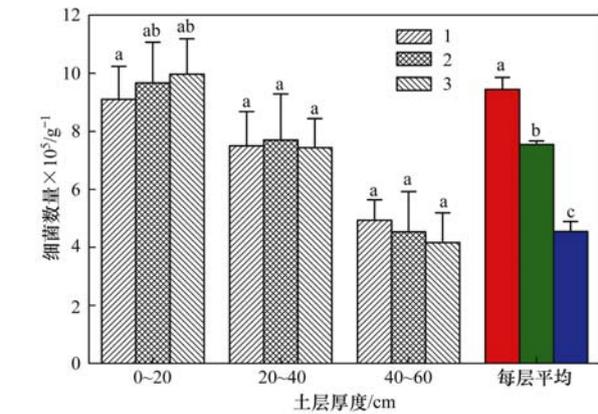
深度/cm	土壤类型	OM /g·kg ⁻¹	TN /g·kg ⁻¹	TP /g·kg ⁻¹	AP /mg·kg ⁻¹	pH 值	SWC /%
0~20	1	7.949 ± 0.13a	0.728 ± 0.04a	0.402 ± 0.04ab	4.786 ± 0.29ab	7.33 ± 0.03a	15.52 ± 0.46a
	2	8.447 ± 0.48a	0.756 ± 0.05ab	0.414 ± 0.02ab	4.638 ± 0.37a	7.32 ± 0.03a	17.94 ± 1.07b
	3	7.949 ± 0.42a	0.672 ± 0.07a	0.369 ± 0.04a	4.737 ± 0.38ab	7.36 ± 0.02a	15.31 ± 1.49a
	4	10.931 ± 0.98b	0.840 ± 0.05bc	0.418 ± 0.03ab	5.225 ± 0.35ab	7.36 ± 0.03a	16.83 ± 1.59ab
	5	11.925 ± 0.61b	0.896 ± 0.05c	0.445 ± 0.02b	5.39 ± 0.29b	7.38 ± 0.02a	14.78 ± 1.14a
20~40	1	6.459 ± 0.56b	0.700 ± 0.07ab	0.332 ± 0.02a	4.191 ± 0.30a	7.35 ± 0.02a	17.35 ± 0.78ab
	2	6.956 ± 0.65b	0.644 ± 0.07a	0.376 ± 0.04ab	4.122 ± 0.18ab	7.37 ± 0.03a	20.54 ± 0.73c
	3	5.466 ± 0.19a	0.644 ± 0.06a	0.363 ± 0.02ab	3.867 ± 0.37a	7.40 ± 0.02a	16.43 ± 1.36a
	4	6.956 ± 0.33b	0.756 ± 0.04b	0.353 ± 0.03ab	4.628 ± 0.40ab	7.38 ± 0.02a	18.54 ± 1.16b
	5	8.944 ± 0.51c	0.868 ± 0.04c	0.388 ± 0.03b	5.045 ± 0.25b	7.41 ± 0.04a	16.35 ± 1.03a
40~60	1	5.466 ± 0.53b	0.644 ± 0.05a	0.258 ± 0.04a	2.155 ± 0.33a	7.51 ± 0.02a	19.98 ± 1.03ab
	2	4.969 ± 0.46b	0.646 ± 0.06a	0.247 ± 0.02a	2.452 ± 0.23a	7.48 ± 0.03a	21.32 ± 1.40b
	3	3.975 ± 0.48a	0.616 ± 0.08a	0.211 ± 0.02a	2.297 ± 0.24a	7.50 ± 0.04a	19.35 ± 1.47ab
	4	6.459 ± 0.60c	0.672 ± 0.04ab	0.274 ± 0.05a	2.306 ± 0.24a	7.49 ± 0.02a	20.62 ± 1.42ab
	5	7.453 ± 0.53d	0.756 ± 0.03b	0.277 ± 0.03a	2.559 ± 0.27a	7.53 ± 0.02a	18.47 ± 1.71a

1) 不同字母之间表示数值之间存在显著性差异 $P < 0.05$; 土壤类型: 1. 原土样, 2. 自来水灌溉量为 5 L 土样, 3. 自来水灌溉量为 10 L 土样, 4. 再生水灌溉量为 5 L 土样, 5. 再生水灌溉量为 10 L 土样; OM. 有机质, TN. 总氮, TP. 总磷, AP. 速效磷, SWC. 含水量, 下同

2.2 再生水灌溉对土壤微生物数量的影响

由图 1 和图 2 每层细菌平均数量可知,自来水和再生水灌区细菌数量均随着土层深度的增加而递减,表现为 0~20 cm > 20~40 cm > 40~60 cm,并且各土层之间差异显著 ($P < 0.05$). 从灌区的各土层来看,自来水和再生水灌区 0~20 cm 土层细菌数量均随灌溉量的增加呈升高趋势,其中 5 与 1 之间差异显著 ($P < 0.05$);自来水和再生水灌区 20~40 cm 和 40~60 cm 土层细菌数量随灌溉量的增加无明显的变化趋势 ($P > 0.05$).

由图 3 和图 4 每层放线菌平均数量可知,自来水和再生水灌区放线菌数量均随着土层深度的增加而递减,0~20 cm 土层与其他两层差异显著 ($P < 0.05$),20~40 cm 土层放线菌数量大于 40~60 cm 土层但未达到显著差异 ($P > 0.05$). 从灌区的各土层来看,再生水灌区 0~20 cm 土层放线菌数量呈增加趋势,并且 5 与 1 差异显著 ($P < 0.05$);再生水灌区 20~40 cm 土层放线菌数量随灌溉量的增加有升高趋势但未达到显著水平 ($P > 0.05$); 40~60 cm



图例土壤类型说明表 3, 下同

图 1 自来水灌溉下土壤细菌的数量变化

Fig. 1 Number of bacteria under tap water irrigation

土层放线菌数量随再生水灌溉量的增加无明显的变化趋势 ($P > 0.05$).

由图 5 和图 6 每层真菌平均数量可知,自来水和再生水灌区真菌数量均随着土层深度的增加也呈降低趋势,0~20 cm 土层与其他两层之间差异显著

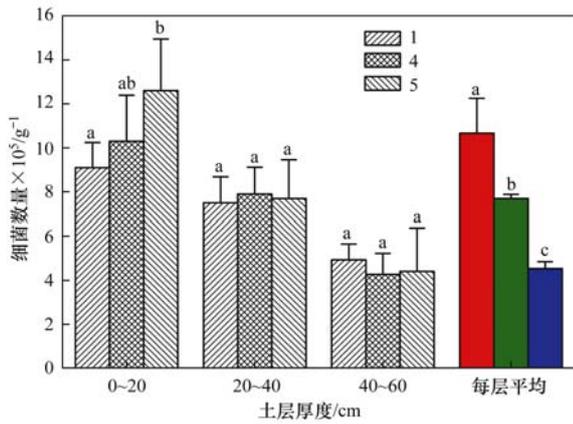


图 2 再生水灌溉下土壤细菌的数量变化

Fig. 2 Number of bacteria under reclaimed water irrigation

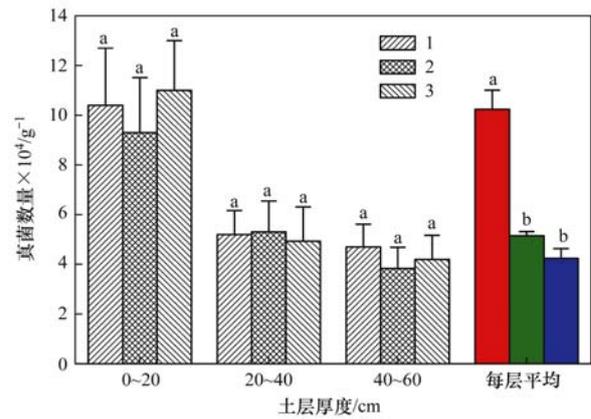


图 5 自来水灌溉下土壤真菌的数量变化

Fig. 5 Number of fungi under tap water irrigation

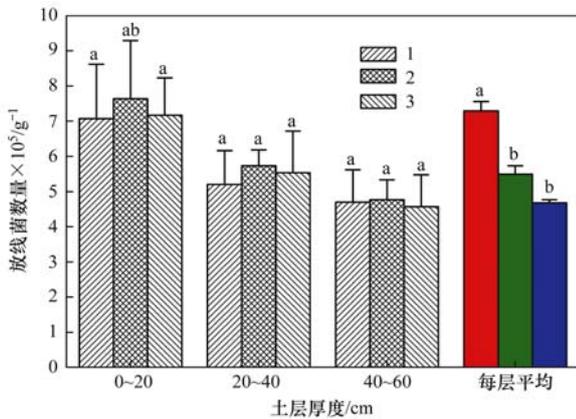


图 3 自来水灌溉下土壤放线菌的数量变化

Fig. 3 Number of actinomycetes under tap water irrigation

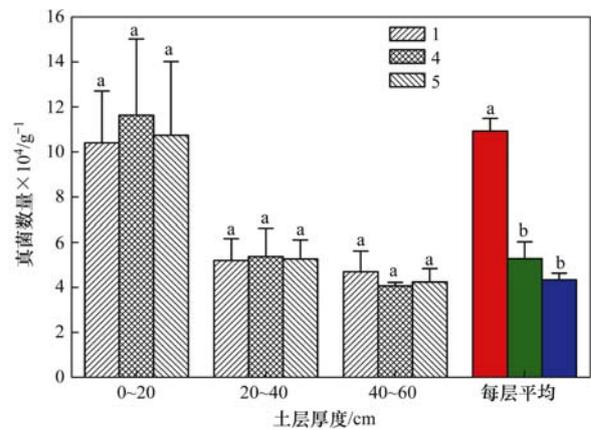


图 6 再生水灌溉下土壤真菌的数量变化

Fig. 6 Number of fungi under reclaimed water irrigation

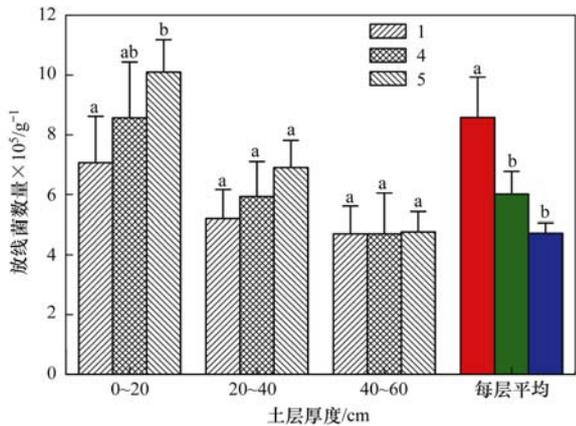


图 4 再生水灌溉下土壤放线菌的数量变化

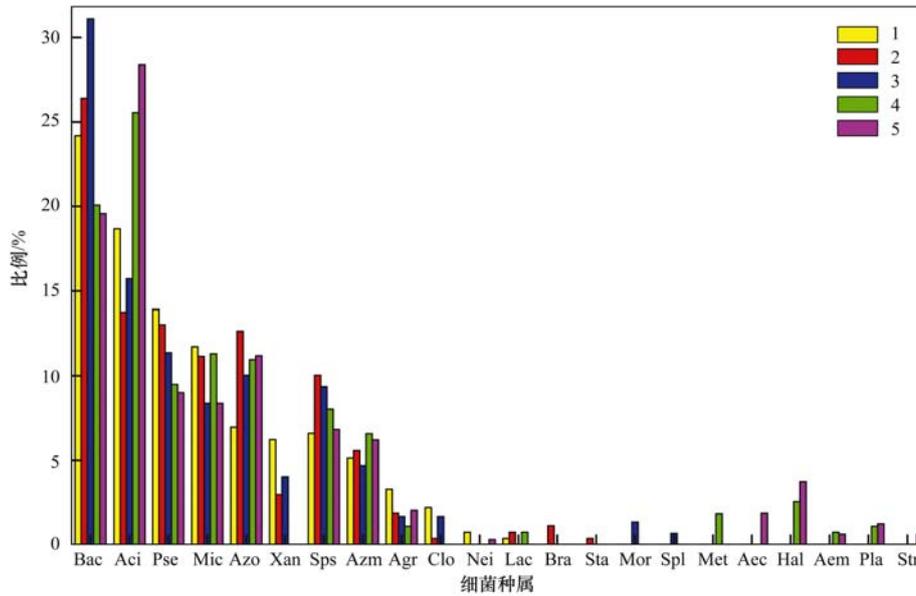
Fig. 4 Number of actinomycetes under reclaimed water irrigation

($P < 0.05$). 从灌区的各土层来看, 自来水和再生水灌区每个土层真菌数量随灌溉量的增加无明显变化趋势($P > 0.05$), 可见再生水灌溉对土壤真菌数量影响较小.

2.3 再生水灌溉对土壤微生物种类的影响

由图 7 可知, 原土样可培养细菌分属于 12 个

属. 自来水灌区可培养细菌共 15 个属, 其中 11 个属是原土样的共有菌属, 其余 4 个属是自来水灌区的特有菌属, 包括 *Branhamella*、*Staphylococcus*、*Moraxella*、*Sporolactobacillus*, 其含量均在 0.37% ~ 1.34% 之间; 再生水灌区可培养细菌共 16 个属, 其中 10 个属是原土样的共有菌属, 其余 6 个属是再生水灌区的特有菌属, 包括 *Methylococcus*、*Aerococcus*、*Halobacterium*、*Aeromonas*、*Planococcus*、*Streptococcus*, 其含量分别在 0.62% ~ 3.73% 之间. 5 个土样共有菌属为 9 个, 其中 *Acinetobacter* 是再生水灌区优势菌属, 随灌溉量的增加有升高趋势, 土样 4 (25.55%) 和土样 5 (28.4%) 比土样 1 (18.68%) 分别增加 36.78% 和 52.03%; *Bacillus* 是自来水灌区的优势菌属, 随灌溉量的增加有升高趋势, 土样 2 (26.39%) 和土样 3 (31.1%) 比土样 1 (24.18%) 分别增加 9.14% 和 28.62%; *Pseudomonas*、*Micrococcus*、*Azotobacter*、*Sporosarcina*、*Azomonas*、*Agrobacterium* 是两灌区共有亚优势菌属.



Bac:芽孢杆菌属(*Bacillus*)、Aci:不动杆菌属(*Acinetobacter*)、Pse:假单胞菌属(*Pseudomona*)、Mic:微球菌属(*Micrococcus*)、Azo:固氮菌属(*Azotobacter*)、Xan:黄单胞菌属(*Xanthomonas*)、Sps:芽孢八叠球菌属(*Sporosarcina*)、Azm:氮单胞菌属(*Azomonas*)、Agr:土壤杆菌属(*Agrobacterium*)、Clo:梭菌属(*Clostridium*)、Nei:奈瑟氏球菌属(*Neisseria*)、Lac:乳杆菌属(*Lactobacillus*)、Bra:布兰汉氏球菌属(*Branhamella*)、Sta:葡萄球菌属(*Staphylococcus*)、Mor:莫拉氏菌属(*Moraxella*)、Spl:芽孢乳杆菌属(*Sporolactobacillus*)、Met:甲基单胞菌属(*Methylococcus*)、Aec:气球菌属(*Aerococcus*)、Hal:盐杆菌属(*Halobacterium*)、Aem:气单胞菌属(*Aeromonas*)、Pla:动性球菌属(*Planococcus*)、Str:链球菌属(*Streptococcus*)

图 7 自来水和再生水灌溉下土壤细菌的种类变化

Fig. 7 Change of soil bacterial species under tap water and reclaimed water irrigation

通过表 4 中 Shannon 多样性指数 (H')、Pielou 均匀度指 (J) 和 Margalef 丰富度指数 (R) 等指标分析自来水和再生水灌溉对土壤微生物群落多样性的影响. 多样性指数和均匀度指数最高的为 1, 丰富度指数最高的为 5. 通过 SPSS 差异显著性分析表明, 5 个土样的微生物群落多样性指数无显著差异 ($P > 0.05$); 自来水和再生水灌区均匀度指数均呈现下降趋势, 5 与 1 之间差异显著 ($P < 0.05$); 再生水灌区丰富度指数呈升高趋势, 5 显著高于 4, 4 显著高于 1 ($P < 0.05$).

表 4 不同土壤类型的细菌种群多样性指数¹⁾

土壤类型	多样性指数 (H')	均匀度指数 (J)	丰富度指数 (R)
1	2.125 3a	0.855 3a	1.961 0a
2	2.093 5a	0.816 2b	2.144 9b
3	2.061 6a	0.829 7ab	1.929 7a
4	2.101 7a	0.819 4ab	2.137 8b
5	2.113 7a	0.800 9b	2.251 3c

1) 不同字母之间表示数值之间存在显著性差异 $P < 0.05$

由图 8 可知, 自来水灌溉土样与原土样细菌的种群相似性系数较大, 2, 3 与 1 细菌的种群相似性系数分别是 0.863 6、0.818 2, 而 4, 5 与 1 细菌的种

群相似性系数分别是 0.681 8、0.636 4, 自来水灌溉土样与再生水灌溉土样细菌的种群相似性系数在 0.500 0~0.636 4 之间. 根据 Jaccard 相似性系数原理, 原土样与自来水灌区土样的细菌种群为极相似, 原土样与再生水灌区土样的细菌种群为中等相似.

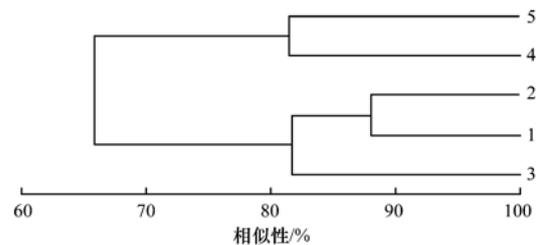


图 8 5 个土样的聚类分析结果

Fig. 8 Clustering analysis result of different soil types

2.4 土壤化学性质和微生物数量之间相关性分析

由表 5 可知, OM、TN、TP、AP 与 pH 值、SWC 呈负相关; OM 与 TP 的相关系数为 0.896, TP 与 AP 的相关系数为 0.948, 两者之间呈显著正相关. 细菌总数、放线菌总数、真菌总数与 OM、TN、TP、AP 呈显著正相关, 与 pH 值、SWC 呈显著负相关, 土壤微生物数量与 OM、TP、AP 的相关系数较高, 可见营养丰富的土壤环境有利于土壤微生物的繁殖.

表 5 土壤化学性质与微生物数量之间相关矩阵¹⁾

Table 5 Correlation matrix between soil chemical properties and soil microbial quantity

	OM	TN	TP	AP	pH	SWC	Bac	Act	Fun
OM	1.000								
TN	0.896 **	1.000							
TP	0.828 **	0.678 **	1.000						
AP	0.783 **	0.691 **	0.948 **	1.000					
pH	-0.522 *	-0.348	-0.856 **	-0.881 **	1.000				
SWC	-0.651 **	-0.590 *	-0.726 **	-0.775 **	0.601 **	1.000			
Bac	0.801 **	0.602 **	0.925 **	0.920 **	-0.826 **	-0.809 **	1.000		
Act	0.816 **	0.638 **	0.829 **	0.813 **	-0.653 **	-0.800 **	0.939 **	1.000	
Fun	0.745 **	0.475 *	0.760 **	0.739 **	-0.694 **	-0.745 **	0.872 **	0.878 **	1.000

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$; Bac 为细菌总数, Act 为放线菌总数, Fun 为真菌总数

2.5 微生物群落与土壤化学性质的对应关系

DCA 排序结果如表 6 所示, 4 个排序抽的长度为 1.661、1.297、0.000、0.000. 第一轴最长, 解释的物种变化率为 32.5%, 但 4 个排序轴的长度都小于 2. Lepš 等^[22]指出, 如果 4 个轴中梯度最大值超过 4, 选择单峰模型比较合适; 小于 3, 线性模型比较

表 6 微生物群落的 DCA 分析结果

Table 6 DCA analysis result of microbial communities

项目	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4	总惯量
特征值	0.325	0.173	0.000	0.000	0.709
梯度长度	1.661	1.297	0.000	0.000	
物种的累计方差比例	45.9	70.3	0.0	0.0	
总和					0.709

表 7 RDA 分析排序轴特征值、物种与环境因子相关系数

Table 7 Eigenvalues for RDA axis and species-environment correlation

项目	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4	总惯量
特征值	0.322	0.145	0.108	0.061	
物种与环境因子相关性	1.000	1.000	1.000	1.000	
物种数据累计变化百分率	32.2	46.7	57.6	63.6	
物种与环境因子数据累计变化百分率	50.7	73.5	90.5	100.0	
特征值总和					1.000
典型特征值总和					0.636

表 8 各环境因子与排序轴相关系数

Table 8 Correlation coefficients of environment factors with the first two axes of RDA

项目	轴 1	轴 2
OM	0.974 8	0.082 8
TN	0.945 1	0.299 8
TP	0.802 4	0.576 5
AP	0.989 3	-0.118 8
pH 值	0.730 4	-0.395 3
SWC	-0.311 0	0.344 8

RDA 排序图 9 中, 箭头表示环境因子; 箭头连线的长短表示微生物物种分布与环境因子相关性的

合适; 介于 3~4 之间, 两种模型均合适. 因此再生水灌区、自来水灌区和原土样对生态梯度的相应是线性的, 适合采用冗余分析(RDA).

由表 7 和表 8 可知, RDA 分析前两轴特征值分别为 0.322 和 0.145, 物种与环境因子排序轴的相关系数均为 1.000. 因此排序图能够反映土壤细菌种群与环境因子之间的关系, 蒙特卡罗置换检验 (Monte Carlo permutation test) 显示环境因子中的 AP 影响最为显著 ($P = 0.002$, $F = 1.400$, permutation number = 499). 前两轴解释了土壤细菌群落变异程度的 46.7%, 轴 1 与 OM、TN、TP、AP、pH 值呈显著正相关, 与 SWC 呈负相关; 而轴 2 与 OM、TP、TP、SWC 呈正相关, 与 AP、pH 值呈负相关.

大小; 箭头连线与排序轴夹角的大小表示土壤化学性质与排序抽相关性的 大小, 夹角越小说明关系越密切; 箭头所处的象限表示土壤化学性质与排序抽之间的正负相关性; 物种之间的线段距离长短代表了物种间的亲疏关系. 由图 9 可知: *Streptococcus* 和 *Aerococcus* 分布差异较小, *Aeromonas*、*Planococcus* 和 *Halobacterium* 分布差异较小, *Sporolactobacillus* 和 *Moraxella* 分布差异较小, *Clostridium* 和 *Xanthomonas* 分布差异较小, *Branhamella* 和 *Staphylococcus* 分布差异较小, *Bacillus*、*Acinetobacter*、*Pseudomona*、*Sporosarcina*、*Micrococcus*、*Azotobacter*、*Azomonas* 和

Agrobacterium 分布较为集中,其中 TP 和 TN 对 *Streptococcus*、*Aerococcus* 和 *Neisseria* 的影响较大,OM 和 AP 含量对 *Aeromonas*、*Planococcus* 和 *Halobacterium* 影响较大.由 RDA 排序图 10,OM、TN、TP、AP、PH 值对再生水灌区的微生物群落结构影响较大,而对自来水灌区影响较小.

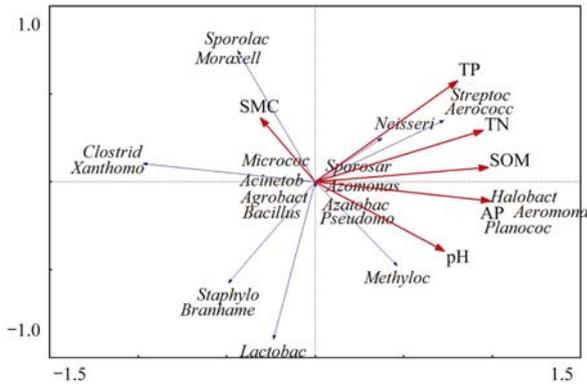


图 9 微生物群落与环境因子冗余分析 (RDA) 结果
(细菌种群与环境因子)

Fig. 9 Results of redundancy analysis
(species and environment variables)

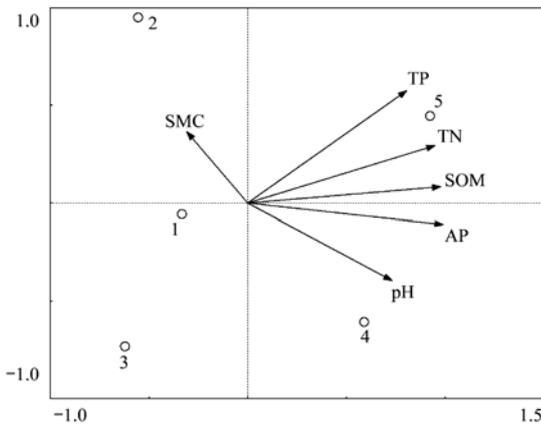


图 10 微生物群落与环境因子冗余分析 (RDA) 结果
(各样地与环境因子)

Fig. 10 Results of redundancy analysis
(samples and environment variables)

3 讨论

3.1 再生水灌溉对土壤化学性质和土壤微生物的影响

土壤 OM 和全氮是土壤养分的源和库,能改善土壤的化学性状,促进土壤生物活性.磷是植物生长发育必需的大量元素之一,土壤速效磷是植物体磷素的直接来源,其含量是评价土壤磷素供应水平的重要指标,它不仅可以反映出土壤磷素状态的动态变化,而且也可以反映土壤的供磷水平.再生水灌溉

可显著提高表层土壤有机质和全氮含量,一方面是再生水中含有大量的氮素所致,另一方面是由于再生水水质的差异,使用再生水灌溉可能会增加土壤 OM 含量,而有机质与氮素的含量具有正相关性^[23].适量的氮素可促进土壤微生物及植物的生长繁殖,而过高的氮含量则会对植物的生长不利,并且影响土壤的健康状况.因此在污水回用过程中应加强对氮元素的去除力度.再生水灌溉对土壤总磷、速效磷和 pH 值无显著影响,均在土壤元素安全含量范围内,说明污水处理过程中去磷率较高,灌溉过程不会造成磷元素的聚集和土壤酸碱化.

再生水灌溉能提高表层 0~20 cm 土壤细菌和放线菌数量,分析原因,一方面是再生水中含有的氮、磷、有机质等营养元素可提供微生物生长和繁殖的能量物质,促进土壤微生物的生长;另一方面再生水中可能含有一些能够与土壤中菌属具有协同生长作用的微生物;再生水灌溉对 20~40 cm 和 40~60 cm 土层微生物无显著影响,一方面可能是再生水中营养元素在土壤中的迁移速度比较缓慢,不能为土壤微生物提供充分的营养;另一方面可能与实验装置的封闭性有关,造成了缺氧和封闭的环境,不利于好氧微生物的生长.各土层微生物的数量为:0~20 cm 土层>20~40 cm 土层>40~60 cm 土层,且差异显著,说明营养物质丰富和空气流通的表层有利于土壤微生物的生长.张娟等^[24]研究表明,再生水灌溉不同程度地促进了土壤微生物数量的增加,其中细菌增加显著,放线菌和真菌数量与对照相比虽有所升高,但并未达到显著水平,与本研究结果相类似;而韩烈保等^[25]对长期再生水灌溉的调查表明,自来水灌溉、二级水和一般三级水灌溉对草坪土壤的细菌总数、放线菌总数和真菌总数都没有显著影响,与本研究结果不一致,可能与再生水的水质指标、处理工艺、灌溉条件等相关.

从本研究细菌种属变化上看,不动杆菌属 (*Acinetobacter*) 是再生水灌区优势菌属,芽孢杆菌属 (*Bacillus*) 是自来水灌区的优势菌属;5 个土壤的聚类分析结果表明,再生水灌区与原土样的细菌种群为极相似,自来水灌区与原土样为中等相似,可见再生水灌溉可丰富细菌群落的多样性;土壤细菌群落结构对再生水的响应不仅仅是基于个别微生物种群对再生水敏感性的反映,同时也是基于种群相互作用的群体性的反映,这种变化主要由优势种群和亚优势种群的含量变化及部分稀有种群的有无来体现;Shannon 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数

是研究微生物多样性的重要指标,它们与土壤环境密切相关,多样性指数是反映群落物种及其个体数与分布均匀度的指标,均匀度指数的变化主要通过群落中优势类群多度的变化来实现,丰富度指数的变化是通过群落中的一部分敏感或偶见类群的有无来实现.本研究结果表明,再生水灌溉对土壤微生物群落多样性无明显影响,使土壤微生物群落均匀度降低,可提高土壤微生物群落丰富度.

3.2 土壤微生物与土壤化学性质之间的相关性分析

通过 SPSS 17.0 对土壤化学性质和三大微生物类群数量进行相关性分析表明,细菌总数、放线菌总数、真菌总数与 OM、TN、TP、AP 呈正相关,原因可能是再生水中的氮、磷、有机质等营养物质在土壤中积累,从而提高土壤肥力,为微生物创造良好的生存环境,刺激微生物的生长和繁衍;同时微生物在土壤营养物质循环与转化中起到重要作用,可将土壤中有机物质氧化为养料,并且参与土壤 C、N、P 等元素的循环过程,还深刻影响着土壤孔隙度、pH 变化等,土壤微生物对于土壤可持续利用具有至关重要的作用,可见土壤微生物与土壤理化性质之间相互影响、相互促进.

采用 CANOCO 4.5 进行 DCA 和 RDA 表明, AP、TN、OM 是影响再生水灌溉地区的主要因子;土壤微生物的群落结构随着化学指标的变化表现出一定的空间差异,其中 TP 和 TN 对 *Streptococcus*、*Aeromonas* 和 *Neisseria* 的影响较大,OM 和 AP 含量对 *Aerococcus*、*Planococcus* 和 *Halobacterium* 影响较大,土壤的质量状况决定了微生物群落结构特征.

4 结论

(1)本研究中再生水灌溉提高了土壤 OM 和 TN 含量,推断该再生水灌溉在一定程度上会增加土壤肥力.

(2)本研究中再生水灌溉不仅促进表层微生物数量的增加,同时也改变了微生物群落结构.

(3)对土壤微生物与化学性质进行相关性分析和冗余分析表明,土壤化学性质与微生物的结构组成存在一定的相关性,其中速效磷、有机质、全氮是再生水灌溉对土壤影响较大的环境因子.

参考文献:

[1] 徐冬英,何哲波. 城市污水回用及其可持续发展[J]. 中国城市经济, 2012, (2): 332-333.
[2] 翟羽佳,王会肖,王艳阳. 再生水灌溉利用对作物-土壤系统

影响[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(4): 120-124.
[3] 李玲莉,刘华敏. 再生水回用在我国的应用前景[J]. 北方园艺, 2011, (22): 177-179.
[4] 李春光. 美国污水再生利用的借鉴[J]. 城市公用事业, 2009, 23(2): 25-28.
[5] Ammary B Y. Wastewater reuse in Jordan; present status and future plans [J]. Desalination, 2007, 211(1-3): 164-176.
[6] Bixio D, Thoeve C, De Koning J, et al. Wastewater reuse in Europe [J]. Desalination, 2006, 187(1-3): 89-101.
[7] Asano T, Cotruvo J A. Groundwater recharge with reclaimed municipal wastewater; health and regulatory considerations [J]. Water Research, 2004, 38(8): 1941-1951.
[8] Hamilton A J, Boland A M, Stevens D, et al. Position of the Australian horticultural industry with respect to the use of reclaimed water [J]. Agricultural Water Management, 2005, 71(3): 181-209.
[9] 杨丽华,魏建荣,张冬莹,等. 再生水应用现状及其水质特征探讨[J]. 中国卫生检验杂志, 2011, 21(8): 1936-1938.
[10] 周律,刑丽贞,段艳萍,等. 再生水回用于景观水体的水质要求探讨[J]. 给水排水, 2007, 33(4): 38-42.
[11] 梁芳,赖娜娜,田静. 再生水灌溉对园林绿地土壤环境的影响[J]. 北京园林, 2012, 28(2): 40-45.
[12] Fabregat S, Mas J, Candela L, et al. Impact of urban treated wastewater reuse during irrigation of golf courses [J]. EGS XXVII General Assembly Girona-Spain, 2002, 77(3): 21-26.
[13] 焦志华. 再生水灌溉对植物生长及土壤微生物生态系统的影响研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2010.
[14] 李晓娜,武菊英,徐彪,等. 再生水灌溉草坪对土壤质量影响的试验研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 245-249.
[15] 马进军. 城市再生水的风险评价与管理[D]. 北京: 清华大学, 2008.
[16] 高旭阔. 城市再生水资源价值评价研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
[17] GB/T 14848-1993, 地下水质量标准[S].
[18] GB/T 18920-2002, 城市污水再生利用城市杂用水水质[S].
[19] Kemper W D, Rosenau R C. Aggregate stability and size distribution [A]. In: Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods [M]. (2nd ed.). Agronomy Monograph, No. 9, 1986. 425-442.
[20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
[21] Buchanan R E, Gibbens N E, Murray R G E, et al. 伯杰细菌鉴定手册[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
[22] Lepš J, Šmilauer P. Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
[23] 葛晓改,黄志霖,程瑞梅,等. 三峡库区马尾松人工林凋落物和根系输入对土壤理化性质的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(12): 3301-3308.
[24] 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.
[25] 韩烈保,周陆波,甘一萍,等. 再生水灌溉对草坪土壤微生物的影响[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(增刊1): 73-77.

CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i> (3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO ₂ and CH ₄ at Mount Waliguan, China	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i> (3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shanghai Urban Area	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i> (3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i> (3280)
Emission Characteristics of PM _{2.5} from Blast Furnace Iron Making	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i> (3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i> (3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i> (3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i> (3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i> (3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i> (3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i> (3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i> (3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i> (3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i> (3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (3408)
Synthesis of Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i> (3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i> (3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i> (3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i> (3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i> (3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i> (3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i> (3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i> (3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd ²⁺ on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i>	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i> (3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i> (3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(III) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i> (3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing (3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang (3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH ₂ PO ₄	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i> (3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i> (3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i> (3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i> (3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ ¹³ C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang (3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i> (3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM _{2.5}	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i> (3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO ₂ Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region; an Economic Input-Output Analysis	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i> (3632)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@reces. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@reces. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话: 010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行