

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2014.01.002

再生水灌溉研究进展

代志远¹,高宝珠²

(1. 华北水利水电大学水利学院,河南 郑州 450011; 2. 夏邑县农业技术推广中心,河南 商丘 476400)

摘要:从再生水灌溉对土壤、作物、地下水和土壤斥水性 4 个方面简述国内外再生水灌溉的发展概况和研究进展。已有研究表明:再生水灌溉对土壤肥力和土壤酶活性的影响尚未有定论;再生水对农作物生长的影响尚有分歧;再生水灌溉对地下水水质具有一定的影响,并显著影响地下水水环境;长期的再生水灌溉会引发土壤斥水性的产生,且土壤斥水持续时间与土壤有机质质量分数呈正相关。目前存在的问题有:再生水灌溉对土壤和农作物的影响研究不一致,如何消除再生水灌溉对地下水和土壤斥水性的影响。认为由于再生水中含有作物正常生长的必要营养元素,若能克服再生水灌溉存在的问题,可缓解淡水资源的压力和减少化肥的使用,避免环境的污染。

关键词:再生水灌溉;水资源;研究进展

中图分类号:S152.7 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2014)01-0008-06

Research advances in reclaimed water irrigation

DAI Zhiyuan¹, GAO Baozhu²

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China;

2. Xiayi County Agricultural Technology Promotion Center, Shangqiu 476400, China)

Abstract: Development progress and research advances in reclaimed water irrigation at home and abroad are summarized according to the effects of reclaimed water on soil, crops, groundwater, and soil water repellency. There is no definite conclusion about the effects of reclaimed water irrigation on soil fertilizer and soil enzyme activity, and reclaimed water's effect on crop growth is still controversial. Reclaimed water irrigation has a certain impact on groundwater quality and a significant impact on the groundwater environment. Long-term reclaimed water irrigation may cause soil water repellency, and there is a positive correlation between the soil water repellent duration and soil organic matter content. Existing problems include the difference of opinions upon the effects of reclaimed water irrigation on soil and crops, and determination of a way to eliminate the effects of reclaimed water irrigation on groundwater and soil water repellency. Due to the presence of necessary nutrient elements for crop growth in reclaimed water, reclaimed water irrigation could narrow the gap between the supply and demand of fresh water resources and reduce the use of chemical fertilizer in order to avoid environmental pollution, if the problems mentioned above can be overcome.

Key words: reclaimed water irrigation; water resources; research advances

我国水资源总量丰富,居世界第 6 位,但由于我国人口基数大,人均水资源占有量仅是世界平均水平的 1/4 左右,因此,我国是世界水资源极度匮乏的国家之一。近年来经济的迅速发展和人口的急剧增长,极大地刺激了工农业及生活的耗水,加剧了淡水资源的匮乏。用水量增加的同时也带来了污水排放量过大的问题,合理回收利用再生水可以缓解淡水资源需求的压力,但我国再生水处理技术还尚不成熟,有待进一步的提高。

再生水灌溉是指工业废水和生活污水经过无害

作者简介:代志远(1990—),男,大学本科,再生水应用专业。E-mail:xiaoqi0612@126.com
通信作者:高宝珠,高级农艺师。E-mail:xygcz@126.com

化处理后,直接或间接地用于农田灌溉、园林灌溉以及地下水库回灌等。一方面,再生水灌溉可以提高水资源的利用率,减轻淡水资源的需求;再生水中含有作物生长所需要的 N、P 等营养物质,再生水灌溉可降低化肥的使用量,减少化肥生产及使用过程带来的各种污染;再生水灌溉可以给污水处理厂带来一定的经济效益。另一方面,再生水灌溉制度的不合理和灌溉年限的增加可能会导致再生水中的有毒、有害物质在土壤中积累,这些物质被作物吸收、人类食用后的生物富集作用,可能会威胁到人体健康;再生水中的有机物和重金属可能会对土壤和地下水产生污染,进而导致农业生产环境的恶化;再生水灌溉可能使土壤产生一定的土壤斥水性,进而改变土壤入渗性能,降低作物产量。再生水灌溉犹如一面双刃剑,合理利用可以带来经济效益和社会效益。因此,再生水灌溉引起了世界各国的重视,对其做了大量的研究工作。笔者对再生水灌溉的发展概况和研究进展作阐述,并对再生水灌溉中存在的问题进行分析,以期为更好地利用再生水提供借鉴。

1 国内外再生水灌溉发展概况

随着经济和城市化的迅速发展,工业废水和城市生活污水排放量日益增加,国内外高度重视污水的处理。将处理的污水进行农田灌溉已有近百年历史。

1.1 国外概况

国外许多国家和地区都有再生水灌溉的历史,其中美国、日本、以色列和南非等国家的再生水灌溉技术水平较为成熟。在水资源极度匮乏的以色列,91% 的工业和生活污水经过收集、处理后,超过一半的污水用于灌溉农业和园林草地。日本从 1997 年开始对农村污水进行处理,建成了约 2 000 个小型污水处理厂,处理过的再生水水质稳定性较好,用于农田水稻和果园灌溉,缓解了淡水资源的压力,改进了农村生活环境和水源水质;且污水处理装置成本低,易于操作,适用于农村。西班牙用再生水灌溉果树,面积达 0.8 万 hm^2 ,虽然再生水灌溉影响芒果的大小,但是产量最高。捷克将经过生化曝气池和机械处理相结合的方法处理后的污水用于农田灌溉,取得良好的效果。美国的污水回用,最初主要用于农业灌溉,后来逐步在农业、工业和城市生活用水方面均有应用,且回用水的标准很严格,处理率达到 100%。印度每年城市污水量的一半用于农田灌溉。墨西哥利用城市污水灌溉农田的面积约 9 万 hm^2 。其他诸如巴西、希腊等国家也有成功应用再生水灌溉农田的经验。

1.2 国内概况

我国再生水灌溉的发展包括自发灌溉时期(1957 年以前)、初步发展时期(1957—1972 年)、迅速发展时期(1972 年至今)3 个阶段^[1]。全国再生水灌溉面积由 4.2 万 hm^2 (20 世纪 60 年代)增加到 9.3 万 hm^2 (20 世纪 70 年代)。水资源的短缺和污水排放量增加,加速了再生水灌溉的应用。目前,我国再生水灌溉面积占全国总农田灌溉面积的 7.3%,主要分布在我国北方水资源严重短缺的黄淮海辽 4 大流域,约占全国再生水灌溉面积的 85%,大部分集中分布在相应大中城市的近郊区或工矿区,其中包括北京、天津武宝宁污、辽宁沈抚、山西整明、新疆石河子等全国 5 大污灌区。从再生水农业利用特点来看,黄淮海辽 4 大流域地区属于水肥并重的再生水灌溉区,秦岭、淮河以南和青藏高原以东为我国再生水灌溉中的重肥再生水灌溉区。

我国的再生水灌溉具有明显的特殊性:①由于再生水处理技术水平低、经费投入不足、管理不到位等问题,我国再生水灌溉水质污染物超标严重,而美国、日本等发达国家的再生水灌溉水基本以处理达标后的再生水为主,水中有害物质含量低。②由于再生水以汇合排放为主,使得再生水成分复杂,进而导致土壤呈现复合污染^[2-13]。③再生水灌溉点数量进一步增加。这是因为近年来随着城市化进程的加快及污染产业向中小城市转移,矿山开采加速,工矿废污水排放量日益增多且呈现面广量多的趋势。

2 再生水灌溉的影响

2.1 对土壤的影响

有机质可以改善土壤的理化性质以利于土壤团粒结构的形成,进而促进作物的正常生长;N、P 是作物正常生长的必要营养元素;土壤中各种生物化学过程都离不开土壤酶的参与。因此,土壤肥力(有机质和全氮)和土壤酶活性在再生水灌溉地区是影响土地生产力的主要因素。再生水灌溉时间的长短,会对土壤肥力和土壤酶活性有着不同的影响。郭晓明等^[13]研究发现,再生水灌区 TN、蔗糖酶、磷酸酶与再生水灌溉时间呈显著正相关,而有机质等与再生水灌溉时间却无显著相关性;土壤肥力、总 Cr、总 Cd 与水解酶呈显著正相关,而交换态 Cr 与脱氢酶则呈显著负相关。多数学者认为再生水灌溉可以提高土壤肥力,诸如 Ramirez 等^[14]、Kiziloglu 等^[15]、Yadav 等^[16],但是再生水灌溉对土壤肥力无显著影响的研究也有发现。同时,再生水灌溉对土壤酶活性的影响也存在着一定的差异,再生水灌溉对土壤肥力和土壤酶活性的影响尚未有定论。

Ndour 等^[17]认为再生水灌溉对酶活性无显著影响,曹靖等^[18]也发现,再生水灌区农田土壤中 Cu、Ni 含量超标,且在有机质和养分充足的土壤中,Cu、Ni 复合污染对酶活性的交互影响表现出一定的屏蔽效应。而张彦等^[19]发现土壤酶活性受土壤养分和重金属污染等因素的综合影响,Cd 含量与多酚氧化酶活性呈极显著负相关,与纤维素酶活性呈极显著正相关,速效钾含量与多酚氧化酶活性呈极显著正相关。同时,长期进行再生水灌溉的农田,再生水中含有的重金属会严重损坏土壤质量^[20]。

此外,对再生水灌区土壤进行分析发现,再生水中过高的悬浮物、有机污染物和盐分可增加土壤体积质量,堵塞土壤孔隙,破坏土壤原有的良好结构,使土壤板结,N、P 在土壤中大量积累,使土壤盐渍化加重,土壤受到污染,土质下降^[21-23]。但如果对再生水水质和水量进行合理控制,就可避免上述土壤污染^[24-26]。

2.2 对农作物的影响

再生水中含有一定的作物生产所需要的氮等营养物质,当土壤中营养物质含量不足时,再生水灌溉可以促进作物生长,增加作物产量。研究^[27]表明,再生水灌溉能增加植株体内氮磷钾盐分积累量,增产效果明显,小麦再生水灌溉比清水灌溉增产 6.99%~19.40%,夏谷增产 3.85%~30.53%;但也有研究表明,再生水灌溉会对作物产生负面影响。邵孝侯等^[28]利用生活再生水灌溉小白菜,89%田间持水率灌水下限条件下,小白菜产量最高,叶绿素含量和水分利用效率较高,硝酸盐和重金属富集程度较低,其他灌水条件下,对小白菜的负面影响较大。

再生水灌溉在一定程度上可以提高氮的利用效率,如有关再生水灌溉条件下夏玉米水分与氮素的利用效率研究^[29]表明,灌溉水质、灌水量、施肥量对夏玉米叶面积指数、株高和产量的影响很小。再生水灌溉后的玉米吸氮量高于清水灌溉的吸氮量,再生水灌溉后的氮利用效率高于清水的,氮的利用效率仅与灌溉水质有关。灌溉方式不同,再生水中的离子在土壤中的残留量不同。研究^[30]表明:再生水渗灌条件下,草坪草根系层土壤中的 TN、速效氮和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量分数低于清水灌溉的,而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的质量分数却明显高于清水灌溉的。植株中的 TN 质量分数也比清水灌溉的高;而滴灌条件下,土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量分数低于再生水渗灌,2 种灌水方式 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量分数有着显著差异。

再生水中的重金属会在植物的根、茎及籽粒中累积,由于生物富集作用,其残留量若是超标会影响人体的健康。研究^[31]表明,小麦植株体内重金属积

累量由大到小为根、茎叶、穗。孙爱华^[32]在再生水灌溉对番茄生长品质的研究中发现,短期再生水灌溉有利于植物的生长,而长期进行再生水灌溉后,再生水中的营养物质无明显促进植物的生长,甚至反而会抑制部分植物的生长;再生水灌溉在一定程度上可以提高番茄 Vc 和可溶性固型物的含量,但对蛋白和酸度的合成无显著影响。另外,据研究^[33],大白菜中 Cu、Zn、Cd 元素的累积效应,可溶性总糖、P 质量分数显著增加,但大白菜中粗蛋白、Vc、和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的质量分数却无显著变化,虽然还尚未发现蔬菜中有害物质超标的情况,但 Cu、Zn 等重金属的累积存在潜在风险。

2.3 对地下水的影响

由于再生水灌溉相关的管理不完善、水质不达标等因素,土壤及作物受到污染,污染物在土壤中向下迁移进而污染地下水。目前,我国对再生水灌溉造成地下水污染问题的研究尚不足,但是该问题已经引起了研究者的注意与重视,并已有相关的研究。宋晓焱等^[34]进行了土柱淋滤模拟试验,发现再生水灌溉会造成地下水的污染,主要表现在当地浅层地下水 Cl^- 、总硬度以及 TDS 质量浓度的升高。再生水中的污染物质在地下水的转化规律^[35]:由于再生水灌溉对土壤中的亚硝酸盐和硝酸盐的淋洗作用,土壤水中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 会逐层累积;灌溉用再生水中的含氮有机物以及 NH_4^+ 发生硝化作用产生的亚硝酸盐和硝酸盐会随着再生水进入地下水,导致地下水的污染,并随着再生水灌溉持续时间的延长,地下水的污染深度和程度加剧。

再生水灌溉对地下水水质有一定的影响。高红阁等^[36]对比分析了再生水灌区与非再生水灌区的地下水主要水质指标的变化趋势,发现再生水灌溉和化肥使用是再生水灌区地下水水质变差的主要原因,且再生水灌区和非再生水灌区地下水的各种离子和盐的质量分数都有大幅度的增加,且呈现加速增长的趋势,但是再生水灌区的水质明显差于非再生水灌区的水质。也有研究^[37]得出略微差异的结论,并非所有的离子均受再生水灌溉影响较大,如 NH_4^+ 浓度受再生水灌溉的影响较小, NO_3^- 浓度受到的影响较大,长期使用再生水灌溉容易造成地下水中 NO_3^- 的污染,同时地下水中 NH_4^+ 、 NO_3^- 的污染情况可以利用数学模型进行预测。

再生水灌溉显著影响地下水水环境。唐常源等^[38]以石家庄近郊县典型灌区的地下水为例,得出了农业再生水灌溉对区域地下水环境的影响,具体表现为:地下水已有自然状态的重碳酸硫酸钙(钙镁)型向重碳酸氯化钙(钙镁)型水演变,矿化度和

电导率也比较高;长期再生水灌溉使地下水中的NO₃浓度增高,其中区内超过一半的井水中的污染物浓度超标,地下水水环境严重恶化。

2.4 对土壤斥水性的影响

所谓土壤斥水性就是水分很难湿润土壤表面颗粒的一种性质,土壤斥水性的存在严重影响了作物的正常生长与产量。而再生水灌溉有可能会引发土壤斥水性的发生。陈俊英等^[39]基于再生水灌溉对土壤斥水性影响进行试验研究,得出结论:再生水灌溉的水质在很大程度上影响着土壤斥水性,再生水的综合水质指标与土壤斥水性存在显著的正相关;各种水质指标均与土壤斥水性呈正相关,其中影响土壤斥水性最主要的因素是有机物含量指标,可见,长期再生水灌溉农田会引发土壤斥水性的发生。土壤斥水性产生以后,为了减轻它对作物的影响,采用沟种、掺入黏土、作物轮种、宽耕以及应用微生物等有效的物理措施可消除土壤斥水性。虽然暂时消除了土壤斥水性,但是继续进行再生水灌溉是否会再次引发土壤斥水性?基于此问题,陈俊英等^[40]继续深入研究,以生活再生水作为水源对土壤进行滴灌,并以自来水作为对照,发现土壤斥水性会在灌溉一定时间后再次出现,且与灌溉水质和灌溉时长呈显著正相关。有关再生水灌溉与土壤斥水性关系的研究尚不足,再生水中的离子或者有机物等是否会引发土壤斥水性等方面尚不明确,基于此,商艳玲等^[41]研究了再生水灌溉对土壤斥水性的影响,结果发现,再生水灌溉后,不同质地土壤斥水性具有不同程度的增强,以盐碱土最为明显;再生水灌水量越大,引起土壤斥水性差异性越显著,对砂姜黑土斥水性表现最明显;Pearson 秩相关系数法及多元回归分析表明,再生水灌溉条件下有机质变化量与土壤斥水持续时间变化量呈正相关关系,Cl⁻变化量、电导率变化量和土壤斥水持续时间呈负相关关系;再生水灌溉使土壤颗粒黏性增大,斥水性增强,入渗能力降低。黏粒含量高的土壤斥水性受再生水灌溉的影响大于黏粒低的砂土,在砂土上进行再生水灌溉更适合。

3 存在的问题与展望

尽管国内外对再生水灌溉的研究已有近百年的历史,但由于再生水中离子成分的复杂性以及区域田间土壤的复杂性等因素,迄今为止对再生水灌溉存在的问题尚无明确的定论与解决的方法,如再生水灌溉对土壤肥力和土壤酶活性的影响尚未有定论,再生水对农作物生长的影响尚有分歧,如何缓解再生水灌溉对地下水水质和水环境的影响以及避免土壤斥水性的产生等。由于再生水中含有作物正常

生长的必要营养元素,若能克服再生水灌溉存在的问题,再生水灌溉可以缓解淡水资源的压力和减少化肥的使用,避免环境的污染。因此,需要进一步深入研究的问题有:

- a. 受到土壤质地、重金属浓度、不同重金属组合方式、水肥等因素的干扰,重金属复合污染对微生物和酶活性等参数的影响较为复杂,故重金属复合污染对土壤质量影响的评价指标探索还有待进一步的深入研究。
- b. 灌溉再生水中 N、P、盐分及重金属等在不同质地土壤、不同农作物及其地下水系统中的相互作用、运移转化规律及其动态特征需要进一步探索研究。
- c. 长期进行再生水灌溉对土壤污染、地表水污染风险程度评价指标的预测理论及其模型研究。
- d. 根据不同农作物对水质的要求,制定不同的灌溉用水水质标准。
- e. 不合理的污水灌溉会造成一定的土壤污染,比如重金属污染,重金属会被作物吸收,被食用后由于生物富集作用,会对人体健康产生不利影响,有必要探索再生水灌溉对环境 and 人体健康的评价指标和方法。
- f. 土壤斥水性严重影响作物的产量,因此,再生水灌溉后是否产生土壤斥水性以及产生的机制有必要进一步开展大量试验研究与探索。

参考文献:

[1] 杨飞,蒋丽娟. 浅议污水灌溉带来的问题及对策[J]. 节水灌溉,2000(2):23-26. (YHANG Fei, JIANG Lijuan. An elementary discuss on problems and countermeasures with waste water irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2000(2):23-26. (in Chinese))

[2] YE Bixiong, ZHANG Zhihuan, MAO Ting. Pollution sources identification of polycyclic aromatic hydrocarbons of soils in Tianjin Area, China [J]. Chemosphere,2006, 64(4):525-534.

[3] 李宗梅. 天津市污灌区土壤-小麦系统重金属污染评价及相关分析[D]. 天津:天津师范大学,2006.

[4] HU K L, ZHANG F R, LI H, et al. Spatial patterns of soil heavy metals in urban-rural transition zone of Beijing [J]. Pedosphere, 2006,16(6):690-698.

[5] YANG J, HUANG Z C, CHEN T B, et al. Predicting the probability distribution of Pb increased lands in sewage irrigated region: a case study in Beijing, China [J]. Geoderma,2008,147(34):192-196.

[6] KHAN S, CAO Q, ZHENG Y M, et al. Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China [J]. Environmental Pollution, 2008,152(3):686-692.

- [7] SUN L, ZHANG Y, SUN T, et al. Temporal-spatial distribution and variability of cadmium contamination in soils in Shenyang Zhangshi Irrigation Area, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, 18 (6) : 1241-1246.
- [8] SUN D, LI X, LOU L. On the research of adsorption of polycyclic aromatic hydrocarbons (phenanthrene) in soil: groundwater in Zhangshi Irrigation District [J]. Procedia Environmental Sciences, 2010 (2) : 824-831.
- [9] 汤少华, 邢承玉. 太原市污灌区土壤重金属污染状况及控制的途径和对策 [J]. 农业技术与装备, 2007 (8) : 48-49. (THANG Shaohua, XIN Chengyu. The situation and control of earth heavy metal pollution [J]. Agricultural Technology & Equipment, 2007 (8) : 48-49. (in Chinese))
- [10] 杜斌, 龚娟, 李佳乐. 太原市污水灌溉对水土环境的有机污染研究 [J]. 人民长江, 2010, 41 (17) : 58-61. (DU Bin, GONG Juan, LI Jiale. Study on organic pollution of soil and water environment by sewage irrigation in Taiyuan City [J]. Yangtze River, 2010, 41 (17) : 58-61. (in Chinese))
- [11] 冀秉信. 太原市污灌现状分析 [J]. 山西水利科技, 1996 (A12) : 92-95. (JI Bingxin. Analysis of waste water irrigation situation in Taiyuan [J]. Shanxi Hydrotechnics, 1996 (A12) : 92-95. (in Chinese))
- [12] 常锋, 梁兰英. 张掖市某污灌区土壤环境质量调查 [J]. 环境研究与监测, 2006, 19 (4) : 13-14. (CHANG Feng, LIANG Lanying. Investigation of soil environmental quality in a waste water irrigation district in Zhangye City [J]. Research and Monitoring of Environment, 2006, 19 (4) : 13-14. (in Chinese))
- [13] 郭晓明, 马腾, 崔亚辉, 等. 污灌时间对土壤肥力及土壤酶活性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2012, 31 (4) : 750-756. (GUO Xiaoming, MA Teng, CUI Yahui, et al. Effect of sewage irrigation time on soil fertility and the enzyme activity [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31 (4) : 750-756. (in Chinese))
- [14] RAMIREZ F E, LUCHO C C, ESACAMILLA S E, et al. Characteristics, and carbon and nitrogen dynamics in soil irrigated with wastewater for different lengths of time [J]. Bioresource Technology, 2002, 85 (2) : 179-187.
- [15] KIZILOGLU F M, TURAN M, SSHIN U, et al. Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. botrytis) and red cabbage (*Brassica oleracea* L. var. rubra) grown on calcareous soil in Turkey [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95 : 716-724.
- [16] YADAV R K, GOYAL B, SHRMA R K, et al. Post-irrigation impact of domestic sewage effluent on composition of soils, crops, and groundwater : a case study [J]. Environment International, 2002, 28 : 481-486.
- [17] NDOUR N Y B, BAUDOUIN E, GUISSSE A, et al. Impact of irrigation water quality on soil nitrifying and total bacterial communities [J]. Biology and Fertility of Soils, 2008, 44 (5) : 793-803.
- [18] 曹靖, 贾红磊, 徐海燕, 等. 干旱区污灌农田土壤 Cu、Ni 复合污染与土壤酶活性的关系 [J]. 农业环境科学学报, 2008, 27 (5) : 1809-1814. (CAO Jing, JIA Honglei, XU Haiyan, et al. Relationships between soil enzymatic activities and Cu-Ni compounds pollution in the wastewater irrigated farmland in arid region [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27 (5) : 1809-1814. (in Chinese))
- [19] 张彦, 张惠文, 苏振成, 等. 污水灌溉对土壤重金属含量、酶活性和微生物类群分布的影响 [J]. 安全与环境学报, 2006, 6 (6) : 44-50. (ZHANG Yan, ZHANG Huiwen, SU Zhencheng, et al. Effect of sewage irrigation on the distribution of heavy metal, enzyme activities and microbial population in the soil [J]. Journal of Safety and Environment, 2006, 6 (6) : 44-50. (in Chinese))
- [20] BHATTACHARYYA P, TRIPATHY S, CHAKRABARTI K, et al. Fractionation and bioavailability of metals and their impacts on microbial properties in sewage irrigated soil [J]. Chemosphere, 2008, 72 (4) : 543-550.
- [21] 段飞舟, 何江, 高吉喜, 等. 城市污水灌溉对农田土壤环境影响的调查分析 [J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2005, 22 (增刊 1) : 181-192. (DUAN Feizhou, HE Jiang, GAO Jixi, et al. Study on the impact of urban sewage irrigation on farmland soil environment [J]. J of HUST: Urban Science Edition, 2005, 22 (S1) : 181-192. (in Chinese))
- [22] 周秀艳, 李培军, 孙红雨. 辽宁典型工矿区与污灌区土壤重金属污染状况及原因 [J]. 土壤, 2006, 38 (2) : 92-95. (ZHOU Xiuyan, LI Peijun, SUN Hongyu. Status and causes of heavy metal pollution of the soils in typical industrial and mining areas and wastewater irrigation zones in Liaoning [J]. Soils, 2006, 38 (2) : 92-95. (in Chinese))
- [23] 孙正风, 王金保, 马京军, 等. 宁夏污水灌溉对土壤和农产品质量的影响 [J]. 宁夏农林科技, 1999 (4) : 7-11. (SUN Zhengfeng, WANG Jinbao, MA Jingjun, et al. Effects of sewage water irrigation on soil and quality of product [J]. Ningxia Agriculture and Forest Technology, 1999 (4) : 7-11. (in Chinese))
- [24] 李家业, 李光伦, 王玉军, 等. 造纸污水灌溉对地下水及土壤的影响研究 [J]. 节水灌溉, 2010 (6) : 42-44. (LI Jiaye, LI Guanglun, WANG Yujun, et al. Influences of papermaking sewage polluted irrigation water on groundwater and soil [J]. Water Saving Irrigation, 2010 (6) : 42-44. (in Chinese))
- [25] WANG J F, WANG G X, WAN Y H. Treated wastewater irrigation effect on soil, crop and environment: wastewater

- p>recycling in the loess area of China [J]. Journal of Environmental Sciences,2007,19(9):1093-1099.
- [26] PALESE A M, PASQULE V, GELANO G, et al. Irrigation of olive groves in southern Italy with treated municipal wastewater: effects on microbiological quality of soil and fruits [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2009,129(1/3):43-51.
- [27] 孟春香,郭建华,韩宝文. 污水灌溉对作物产量及土壤质量的影响[J]. 河北农业科学,1999,3(2):15-17. (MENG Chunxiang, GUO Jianhua, HAN Baowen. Effect of sewage irrigation on crop yield and soil quality [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 1999,3(2):15-17. (in Chinese))
- [28] 邵孝侯,廖林仙,李洪良. 生活污水灌溉小白菜的盆栽试验研究[J]. 农业工程学报,2008,24(1):89-93. (SHAO Xiaohou, LIAO Linxian, LI Hongliang. Pot experiment of treated domestic wastewater re-use for irrigation of Chinese cabbage [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2008,24(1):89-93. (in Chinese))
- [29] 查贵锋,黄冠华,冯绍元,等. 夏玉米污水灌溉时水分与氮素利用效率的研究[J]. 农业工程学报,2003,19(3):63-67. (CHA Guifeng, HUANG Guanhua, FENG Shaoyuan, et al. Water and nitrogen use efficiency for summer corn under condition of irrigation with sewage effluent [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(3):63-67. (in Chinese))
- [30] 黄冠华,杨建国,黄权中. 污水灌溉对草坪土壤与植株氮含量影响的试验研究[J]. 农业工程学报,2002,18(3):22-25. (HUANG Guanhua, YANG Jianguo, HUANG Quanzhong. Effect of irrigation of turfgrass with treated domestic effluent on nitrogen contents in soil and plant [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2002,18(3):22-25. (in Chinese))
- [31] 冯绍元,邵洪波,黄冠华. 重金属在小麦作物体中残留特征的田间试验研究[J]. 农业工程学报,2002,18(4):113-115. (FENG Shaoyuan, SHAO Hongbo, HUANG Guanhua. Field experimental study on the residue of heavy metal in wheat crop [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002,18(4):113-115. (in Chinese))
- [32] 孙爱华. 污水灌溉对番茄生长于品质的影响研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2007.
- [33] 章明奎,刘丽君,黄超. 养殖污水灌溉对蔬菜地土壤质量和蔬菜品质的影响[J]. 水土保持学报,2011,25(1):87-91. (ZHANG Mingkui, LIU Lijun, HUANG Chao. Effects of long-term irrigation of livestock farm wastewater on soil quality and vegetable quality in vegetable soils [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2011,25(1):87-91. (in Chinese))
- [34] 宋晓焱,尹国勋,谭利敏,等. 污水灌溉对地下水污染的机理研究[J]. 安全与环境学报,2006,6(1):136-138. (SONG Xiaoyan, YIN Guoxun, TAN Limin, et al. Study on mechanism of groundwater pollution due to applying sewage water for irrigation condition [J]. Journal of Safety and Environment,2006,6(1):136-138. (in Chinese))
- [35] 方正成,李明武,王磊. 城市污水灌溉对地下水水质的影响分析[J]. 江苏环境科技,2004,17(1):29-31. (FANG Zhengcheng, LI Mingwu, WANG Lei. Influence analysis of municipal sewage irrigation to groundwater quality [J]. Jiangsu Environmental Science and Technology,2004,17(1):29-31. (in Chinese))
- [36] 高红阁,高宗军,李白英. 污灌区与非污灌区的地下水主要水质指标变化趋势及对比研究[J]. 环境污染治理技术与设备,2002,3(6):25-28. (GAO Hongge, GAO Zongjun, LI Baiying. The principle and analysis of groundwater in wastewater irrigation area and in clear water area [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control,2002,3(6):25-28. (in Chinese))
- [37] 刘凌,陆桂华. 含氮污水灌溉实验研究及污染风险分析[J]. 水科学进展,2002,13(5):313-320. (LIU Ling, LU Guihua. Nitrogen wastewater irrigation study and its contamination risk analysis [J]. Advances in Water Science,2002,13(5):313-320. (in Chinese))
- [38] 唐常源,陈建耀,宋献方,等. 农业污水灌溉对石家庄市近郊灌区地下水环境的影响[J]. 资源科学,2006,28(1):29-31. (TANG Changyuan, CHEN Jianyao, SONG Xianfang, et al. Effects of wastewater irrigation on groundwater quantity and quality in the suburbs of Shijiazhuang City, China [J]. Resources Science,2006,28(1):29-31. (in Chinese))
- [39] 陈俊英,张智韬,LEIONID G,等. 不同污染程度的水对土壤斥水性的影响[J]. 节水灌溉,2009(10):13-16. (CHEN Junying, ZHANG Zhitao, LEIONID G, et al. Effect of different contamination domestic waste water on soil water repellency [J]. Water Saving Irrigation, 2009(10):13-16. (in Chinese))
- [40] 陈俊英,张智韬,张宽地,等. 不同水质灌溉对土壤斥水性的影响[J]. 节水灌溉,2010(8):38-41. (CHEN Junying, ZHANG Zhitao, ZHANG Kuandi, et al. Influence of different irrigation water quality on soil water repellency [J]. Water Saving Irrigation,2010(8):38-41. (in Chinese))
- [41] 商艳玲,李毅,朱德兰. 再生水灌溉对土壤斥水性的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(21):1-10. (SHANG Yanling, LI Yi, ZHU Delan. Effects of reclaimed water irrigation on soil water repellency [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(21):1-10. (in Chinese))

(收稿日期:2013-08-08 编辑:徐娟)