

城市再生水农田灌溉水质标准及灌溉规范研究

师荣光^{1,2}, 周启星¹, 刘凤枝², 赵玉杰², 郑向群², 蔡彦明², 王德荣²

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津市城市生态环境修复与污染防治重点实验室, 天津 300071; 2. 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要:城市再生水灌溉农田是再生水回用的一个重要方面。本文概述了城市再生水农田灌溉控制项目和指标的制定原则,对城市再生水农田灌溉用水的水质控制项目、水质及处理要求进行了详细分析和阐述。将城市再生水用于农业灌溉的水质要求与国内外农田灌溉水质控制项目和指标进行了对比。结合我国农业灌溉的实际情况,提出了城市再生水农田安全灌溉的控制规范和要求。
关键词:城市再生水;农田灌溉;控制项目;水质要求
中图分类号:X703.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)03-0839-05

Water Quality Standard and Irrigation Regulation of Reclaimed Water from Municipal Wastewater for Farmland Irrigation

SHI Rong-guang^{1,2}, ZHOU Qi-xing¹, LIU Feng-zhi², ZHAO Yu-jie², ZHENG Xiang-qun², CAI Yan-ming², WANG De-rong²
(1.Tianjin Key Laboratory of Environmental Remediation and Pollution Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. Agro-environmental Protecting Institute, MOA, Tianjin 300191, China)

Abstract: Agricultural irrigation of reclaimed water from municipal wastewater is an important aspect of reclaimed water reuse. Enacting principles of control items and indexes of reclaimed water from municipal wastewater for farmland irrigation were summarized. Water quality control items, water quality and treatment requirements of reclaimed water from municipal wastewater for farmland irrigation were analyzed and expounded in detail. Comparison in water quality requirements of reclaimed water from municipal wastewater for farmland irrigation between domestic and foreign countries was made. Taking account of the status of municipal wastewater for farmland irrigation in homeland, the safe irrigation regulation and requirements of municipal reclaimed wastewater for farmland were suggested.
Keywords: reclaimed water from municipal wastewater; farmland irrigation; control items; water quality requirements

自上世纪 70 年代以来, 经过处理的城市污水回用农业引起世界各国广泛的重视,许多国家把污水回用农业看作是消除污染、解决农业淡水资源不足和促进农业增产的有效措施^[1-2]。据估计,目前世界上约有 1/10 的人口食用利用再生水灌溉的农产品^[3]。美国目前已建成 3 400 多座污水再利用工程,处理后的污水

绝大部分用于农业,全国 50 个州中有 45 个州采用污水回用农业的工程。以色列自 1972 年就开始规模化污水再利用,其将污水作为水资源的一部分加以管理和利用,并作为国家的一项基本政策实施^[4]。目前以色列污水利用率已达 70%以上,全国 1/3 的农业灌溉使用城市再生水,农业灌溉用量占其污水处理总量的 46%^[5]。其他国家如新加坡、意大利、瑞典、法国等也纷纷进行了城市再生水灌溉农田的相关研究和实践。针对再生水农田灌溉,国外发达国家和地区都出台了相关的水质标准或控制指标^[6,7],用以控制再生水的水质,保障农业灌溉的安全^[8]。我国水资源匮乏,农业用水严重不足,农业生产每年缺水达 300 亿 m³^[9],再生水已成为我国农灌水的一个主要来源。然而,由于我国对城市再生水的利用和研究都极为缺乏,对再生水

收稿日期:2007-08-07
基金项目:国家标准制定计划项目“城市污水再生利用农田灌溉用水水质国家标准制定”(20030118-Q-333);天津市科技攻关项目“再生水农田利用安全性检验与评估技术研究”(05ZHGCNC01600)
作者简介:师荣光(1980—),男,在读博士,主要研究方向为土壤污染评价,城市污水回灌农田技术等。
E-mail:winsomesky@163.com
通讯作者:周启星 E-mail:zhouqx@nankai.edu.cn

农业灌溉的管理和控制也不规范,从而造成我国许多地区因再生水灌溉使得土壤和农产品中有害物质含量超标。因此,城市再生水农田灌溉水质标准及灌溉规范研究,无疑对于缓解我国农业用水,保障农业生态健康和农产品质量安全、促进我国农业生产的可持续发展具有极其重要的意义^[10,11]。

1 城市再生水农田灌溉水质标准的制定原则及水质要求

1.1 城市再生水农田灌溉水质标准的制定原则

城市再生水灌溉农田控制项目和水质要求的制定主要基于以下原则:一是城市再生水灌溉农田不会对公众健康造成危害,不会明显影响农作物正常生长和产量;二是与我国农田灌溉水质标准、地表水质标准等相关水质标准相衔接,但又充分考虑再生水农田灌溉的特性。由于我国城镇污水收集系统中,除生活污水外,还含有部分工业废水,这部分废水水质复杂,其有毒有害物质的组成以及演变过程还不太清楚,因此在参照国外发达国家(美国、以色列等国)水质标准的基础上,与我国农田灌溉水质标准、地表水质标准等相关水标准相衔接,同时由于城市污水是污染物较为集中的载体,在制定城市再生水灌溉农田控制指标时,比国家农田灌溉水质标准更为严格;三是生食蔬菜用水的水质要求较高,城市污水二级处理后,还需要进行深度处理,再生水的成本较高,应用有一定困

难,因此不提倡用城市再生水灌溉生食蔬菜;四是根据灌溉作物的不同,对水质要求进行调整。灌溉纤维作物、旱地谷物以我国城镇污水处理厂水污染物排放标准中的三级标准和农田灌溉水质标准为制定依据,灌溉露地大田蔬菜及水田谷物以我国城镇污水处理厂水污染物排放标准中的二级标准和农田灌溉水质标准为制定依据;五是适时、适量灌溉不会对农产品、土壤肥力性状、理化性质及地下水造成不良影响。

1.2 城市再生水灌溉农田的水质要求

根据我国城市再生水的水质特点、农田灌溉方式以及同我国农业灌溉水质标准、地表水环境质量和城镇污水处理厂污水排放标准相衔接,城市再生水农田灌溉水质标准中将水质要求分为常规控制项目、一类污染物控制项目和选择性控制项目。其中常规控制项目包括 pH、生化需氧量 (BOD)、化学需氧量 (COD)、悬浮物(SS)、石油类、挥发酚、阴离子表面活性剂、溶解性总固体、粪大肠菌群数、游离余氯等;一类污染物控制项目包括痕量元素汞、镉、砷、铬(六价)和铅等;选择性控制项目包括铍、钴、铜、氟化物、铁、锰、钼、镍、硒、锌、硼、钒、氰化物、氯化物、硫化物、三氯乙醛、丙烯醛、甲醛和苯等。城市再生水农田灌溉水质标准中,常规控制项目水质限值和处理、灌溉要求见表 1 所示,标准中规定的一类污染物控制项目和选择性控制项目的最大限值见表 2 所示。

表 1 常规控制项目最大限值

Table 1 The maximum limit value of routine control items

灌溉的作物	污水处理要求	水质规定	其他要求
1. 纤维作物	一级强化处理消毒	pH 5.5~8.5, BOD≤100 mg·L ⁻¹ , COD≤200 mg·L ⁻¹ , SS≤100 mg·L ⁻¹ , 石油类≤10 mg·L ⁻¹ , 挥发酚≤1.0 mg·L ⁻¹ , 阴离子表面活性剂≤8.0 mg·L ⁻¹ , 溶解性总固体≤1 000 mg·L ⁻¹ , 粪大肠菌群数≤40 000 个·L ⁻¹ , 余氯≤1.5 mg·L ⁻¹ , 蛔虫卵≤2 个·L ⁻¹	1.距饮用水井 90 m 2.不宜采用喷灌方式 3.苗期: 余氯≤1.0 mg·L ⁻¹ 4.盐碱地地区: 溶解性总固体≤2 000 mg·L ⁻¹
2. 旱地谷物、油料作物	一级强化处理消毒	pH 5.5~8.5, BOD≤80 mg·L ⁻¹ , COD≤180 mg·L ⁻¹ , SS≤90 mg·L ⁻¹ , 石油类≤10 mg·L ⁻¹ , 挥发酚≤1.0 mg·L ⁻¹ , 阴离子表面活性剂≤8.0 mg·L ⁻¹ , 溶解性总固体≤1 000 mg·L ⁻¹ , 粪大肠菌群数≤40 000 个·L ⁻¹ , 余氯≤1.5 mg·L ⁻¹ , 蛔虫卵≤2 个·L ⁻¹	1.距饮用水井 90 m 2.若采用喷灌方式: SS≤30 mg·L ⁻¹ 3.苗期: 余氯≤1.0 mg·L ⁻¹ 4.盐碱地地区: 溶解性总固体≤2 000 mg·L ⁻¹ 5.油料作物可参照此指标
3. 水田谷物	二级强化处理消毒	pH 5.5~8.5, BOD≤60 mg·L ⁻¹ , COD≤150 mg·L ⁻¹ , SS≤80 mg·L ⁻¹ , 石油类≤5.0 mg·L ⁻¹ , 挥发酚≤1.0 mg·L ⁻¹ , 阴离子表面活性剂≤5.0 mg·L ⁻¹ , 溶解性总固体≤1 000 mg·L ⁻¹ , 粪大肠菌群数≤40 000 个·L ⁻¹ , 蛔虫卵≤2 个·L ⁻¹ , 余氯≤1.0 mg·L ⁻¹	1.距饮用水井 90 m 2.不宜采用喷灌方式 3.苗期: 余氯≤1.0 mg·L ⁻¹ 4.盐碱地地区: 溶解性总固体≤2 000 mg·L ⁻¹ 5.水田谷物用水量大, 硫化物的含量应≤1.0 mg·L ⁻¹
4. 露地蔬菜	二级强化处理消毒	pH 5.5~8.5, BOD≤40 mg·L ⁻¹ , COD≤100 mg·L ⁻¹ , SS≤60 mg·L ⁻¹ , 石油类≤1.0 mg·L ⁻¹ , 挥发酚≤1.0 mg·L ⁻¹ , 阴离子表面活性剂≤5.0 mg·L ⁻¹ , 溶解性总固体≤1 000 mg·L ⁻¹ , 粪大肠菌群数≤2 000 个·100 mL ⁻¹ , 蛔虫卵≤2 个·L ⁻¹ , 余氯≤1.0 mg·L ⁻¹	1.距饮用水井 90 m 2.不宜采用喷灌方式 3.苗期: 余氯≤1.0 mg·L ⁻¹ 4.盐碱地地区: 溶解性总固体≤2 000 mg·L ⁻¹ 5.蔬菜周期短, 但转茬快, 用水量大, 硫化物的含量应≤1.0 mg·L ⁻¹

表 2 一类污染物控制项目和选择性控制项目最大限值(mg·L⁻¹)

Table 2 The maximum limit value of the prime control items and selective control items	
一类污染物控制项目	选择控制项目
汞≤0.001, 镉≤0.01, 砷≤0.1 (纤维作物、旱地谷物)、砷≤0.05 (水田谷物、露地蔬菜), 铬 (六价) ≤0.1,铅≤0.2	铍≤0.002, 钴≤1.0, 铜≤1.0, 氟化物≤2.0, 铁≤1.5, 锰≤0.3, 钼≤0.5, 镍≤0.1, 硒≤0.02, 锌≤2.0, 硼≤1.0, 钒≤0.1, 氰化物≤0.5, 氯化物≤350, 硫化物≤1.0, 三氯乙醛≤0.5, 丙烯醛≤0.5, 甲醛≤1.0, 苯≤2.5

2 我国城市再生水农田灌溉水质标准与国内外其他标准的比较

由于城市污水往往含有一些有害成分如盐分、重金属、病菌、有机污染物等^[10,12],若使用不当,会造成灌溉农区的环境恶化和农产品污染,造成土壤结构的破坏,地下水源的污染,病菌的流行等问题^[1,8,13-15]。为了促进污水回用农业的健康发展,避免污染农田,许多国家包括美、英、澳大利亚、墨西哥、以色列等国家纷纷制定了适合本国特点的农田灌溉水质标准和再生

水农业利用的回用标准。

由于灌溉方式、灌溉制度和国情等情况的不同,各国对农业灌溉的水质控制项目和指标的制定并不一致,各国有机污染物、卫生学控制项目及指标如表 3 所示,痕量(无机)污染物控制项目及指标如表 4 所示。

我国城市再生水农田灌溉的水质标准与国内外其他标准有着较大的区别。由于目前我国工业废水预处理控制还不是很严格,城市污水厂出水水质有较大波动,为了保证安全利用,在制定控制项目时,比国外

表 3 有机污染物、卫生学控制项目及指标

Table 3 Organic contamination and hygienic control items and their standards	
标准名称	控制项目及指标
美国	pH=6~9;BOD<30 mg·L ⁻¹ ;FC<2 000 个·L ⁻¹ ;SS<30 mg·L ⁻¹ ;Cl ₂ 余氯<1 mg·min ⁻¹
WHO	肠线虫<1 个
中国	pH=5.5~8.5;BOD ₅ <80 ~100 mg·L ⁻¹ (旱作);COD _{Cr} <150 mg·L ⁻¹ (水作),COD _{Cr} <180~200 mg·L ⁻¹ (旱作),COD _{Cr} <100 mg·L ⁻¹ (蔬菜);LAS<5.0 mg·L ⁻¹ ;LAS<8.0 mg·L ⁻¹ (旱作);SS<150 mg·L ⁻¹ (水作),SS<90~100 mg·L ⁻¹ (蔬菜);挥发酚<1.0 mg·L ⁻¹ ;苯<2.5 mg·L ⁻¹ ;丙烯醛<0.5 mg·L ⁻¹ ;粪大肠菌群<10 000 个·L ⁻¹ ;蛔虫卵数<2 个·L ⁻¹
GB 5084 ^[16]	
日本	COD _{Mn} <5.0 mg·L ⁻¹ ;BOD<8 mg·L ⁻¹ ;SS<100 mg·L ⁻¹ ;DO>2 mg·L ⁻¹ ;N<1 mg·L ⁻¹ ;P<0.1 mg·L ⁻¹
加拿大	BOD<45 mg·L ⁻¹ ;TSS<45 mg·L ⁻¹ ;FC<2 000 个·L ⁻¹ ;pH=6~9;挥发酚<0.9 mg·L ⁻¹
以色列	BOD<60 mg·L ⁻¹ (棉花、谷物)、BOD<45 mg·L ⁻¹ (青饲料、花生)、BOD<35 mg·L ⁻¹ (去皮蔬菜)、BOD<15 mg·L ⁻¹ (生食蔬菜);SS<50 mg·L ⁻¹ (棉花、谷物)、SS <40 mg·L ⁻¹ (青饲料、花生)、SS<30 mg·L ⁻¹ (去皮蔬菜)、SS <15 mg·L ⁻¹ (生食蔬菜);DO>0.5 mg·L ⁻¹
中国台湾	油脂 5.0 mg·L ⁻¹ ;pH=6~9;SS<100 mg·L ⁻¹ ;TN<1 mg·L ⁻¹ ;ABS<5.0 mg·L ⁻¹
FAO ^[17]	pH=6.5~8.5
赛普路斯	BOD<20 mg·L ⁻¹ ;SS<30 mg·L ⁻¹ ;FC<2 000 个·L ⁻¹

表 4 痕量(无机)污染物控制项目及指标

Table 4 Trace (inorganic) contamination control items and their standards	
标准名称	控制项目及指标/mg · L ⁻¹
美国	铝 5.0; 铁 5.0; 砷 0.10; 铅 5.0; 铍 0.1; 锰 0.2; 镉 0.01; 钼 0.01; 铬 0.10; 镍 0.2; 钴 0.05; 硒 0.02; 铜 0.20; 钒 0.1; 氟 1.0; 锌 2.0
中国	氯化物<250; 硫化物<1.0; 总汞<0.001; 总镉<0.005; 总砷<0.05; 总砷<0.1 (水作); 铬 (六价) <0.1; 总铅<0.1; 总铜<1.0; 总
GB 5084	锌<2.0; 总硒<0.02; 氰化物<0.5
中国台湾	钴 0.05 ; 铜 0.2; 铅 0.1; 锂 2.5; 锰 2.0; 汞 0.000 5; 钼 0.01; 镍 0.5; 硒 0.02; 钠吸着率 6.0; 残余碳酸钠 2.5; 氯化物(Cl ⁻) 175; 硫酸盐 (SO ₄ ²⁻) 200; 铝 5.0; 砷 1.0; 铍 0.5; 硼 0.75; 镉 0.01; 总铬 0.1
FAO	氯化物=6~16; 总镉<0.01; 总砷<0.1; 总铅<5.0; 六价铬<0.1; 总铜<0.2; 总锌<2.0; 镍<0.2; 总硒<0.02; 氟化物<1.0; 铝<5.0; 铁<5.0; 锰<0.2; 钼<0.01
日本	氯化物<250; 总砷<0.05; 总铅<5.0; 六价铬<1.0; 总锌<0.04; 镍<1.0; 锰<5.0
南澳大利亚	总汞<0.002; 总镉<0.01; 总砷<0.1; 总铅<0.2; 总铜<0.2; 总锌<2.0; 镍<0.2; 总硒<0.02; 氟化物<1.0
加拿大	总镉<0.005 1; 总砷<0.1; 总铅<0.2; 六价铬<0.008; 总铜<0.2~1.0; 总锌<1~5; 镍<0.2; 硼<0.5~6.0; 总硒<0.02~0.05; 氟化物<1.0; 铝<5.0; 铁<5.0; 锰<0.2; 钼<0.01~0.05

多。同时,我国再生水农业利用水质标准的制定是按灌溉作物的种类而区分水质的,有的作物对水质要求较宽(如棉花、亚麻等,不进入食物链),有的作物对水质要求严(如蔬菜,生长期短)。

同国内其他水质标准相比,由于适用范围的不同,制定控制指标的要求就有所不同。地表水环境质量标准适用于我国江河、湖泊、运河、水库等具有使用功能的地表水水域。本标准仅适用于城市污水处理厂出水用于灌溉的水。前者控制严格,后者控制指标相对较宽(仅为限值指标);与国家农田灌溉水质标准(GB5084—2005)相比,农田灌溉水质标准适用于全国地表水、地下水和处理后的养殖业废水以及农产品为原料的加工废水为水源的农田灌溉用水,而本标准更突出了城市污水再生利用的特点,适用于以城市污水处理厂出水为水源的农田灌溉用水,仅为单一行业废水的再生利用,因此其在控制项目和灌溉作物上就有所区别。

3 我国城市再生水农田灌溉要求和控制规范

3.1 城市再生水农田灌溉的安全性探讨

城市再生水不是天然淡水,其化学成分与天然淡水有本质区别,因此要保证城市再生水农田灌溉对土壤、地下水、农产品以及人体健康的安全,仅靠标准值的限值规定是远远不够的。因此,还应结合地方特点制定农田灌溉水的灌溉要求和灌溉规划,加强再生水农田灌溉的监测,建立监测站或观测站对再生水长期灌溉后的安全性进行长期监测和管理。

3.2 城市再生水农田灌溉的要求

由于我国城市污水成分复杂,有害物质较多,因此城市污水经处理再生用于农田灌溉,在灌溉之前,应根据灌溉当地的气候条件,拟灌溉作物的种植种类及土壤类别以及其他重要生态因子进行灌溉试验,建立适合当地的灌溉制度,确定城市再生水的灌水定额、灌水次数及灌溉方式等。城市再生水用于纤维作物和旱地谷物要求城市污水达到一级强化处理,用于水田谷物和露地蔬菜要求城市污水达到二级处理。由于生食蔬菜卫生要求条件较高,一般不建议采用城市再生水进行生食蔬菜的灌溉。同时,城市再生水在用于农田灌溉时应保证最近的灌溉取水点的水质应符合国家标准的规定,旱地作物在灌浆期应改用清水灌溉,避免再生水中的微量污染物进入子粒或可食部位。

由于农业用水是季节性用水,而城市再生水每天

都会流出,因此必须建有储存塘,储存塘的功能一是储存,二是使水质稳定。因此,城市污水处理厂出水和住宅区生活污水处理后的出水,必须经过储存净化达到城市污水再生回用农田水质要求后方可用于灌溉。在灌溉中出现作物生长异常、地下水中污染物增多,应立即停灌,查明原因。灌溉区的农产品质量,应达到国家食品中污染物限量标准。达不到要求应立即停灌查明原因。同时,城市再生水在输水过程中,主渠道应有防渗措施,防止地下水污染。

3.3 城市再生水农田灌溉的规划要求

城市再生水农田灌溉是一项系统工程,因此在对拟采用城市再生水进行灌溉的地区必须进行城市再生水农田灌溉的合理规划。规划的内容包含城市污水的水量,水质及再生工艺;城市再生水的输送,储存及净化措施,农田灌溉管网的配制等。根据城市污水的处理水量和灌区的灌溉制度,确定灌区的灌溉面积和储存塘的容量。

为了确保城市再生水的安全灌溉,在城市再生水用于灌溉之前,应对拟定的灌溉区农田土壤进行调查、取样、分析、评价,若已被污染,该地不能作为城市再生水的农业灌区。灌溉区与居民区之间应有200 m的卫生防护带,喷灌区应距离居民区500 m以上,避免水雾中的病原体向居民区扩散。同时,在集中式水源保护区、泉水出露区、岩石裂隙及碳酸岩溶发育区、淡水的地下水位距地表小于1 m的地区、经常受淹的河滩和洼涝地,不允许设置城市污水再生利用的灌溉区。

3.4 城市再生水农田灌溉的监测要求

一类污染物Hg、Cd、Pb、As、Cr等重金属污染物,其毒性较强,对人类健康危害较大,同时由于这类污染物容易在土壤和农产品中富集,因此一类污染物为必须监测的项目,灌溉露地蔬菜每月监测一次,灌溉纤维、旱地、水田为每两月监测一次。

常规污染物的水质监测见表5所示。

选择性控制项目由地方市政和农业行政主管部门,根据污水处理厂接纳的工业污染物类别和农业用水水质要求,进行选择控制。选择的项目每月监测一次(日均值)。

4 结论

(1) 我国水资源短缺的现状决定了必须从城市再生水开辟农业灌溉的用水水源,虽然城市再生水用于农田灌溉的国家标准已经制定,但由于城市再生水水

表 5 城市再生水农田灌溉常规污染物的监测

Table 5 Monitoring of routine pollutants in reclaimed water from municipal wastewater for farmland irrigation

项目	pH	COD _{Cr}	SS	TDS	DO	石油类	挥发酚	余氯	粪大肠菌群数	蛔虫卵
纤维作物	每月	每月	每月	两月	—	—	—	—	—	—
旱地谷物	每月	每月	每月	两月	—		—	—	—	—
水田谷物	每月	每月	每月	两月	每月	每月	每月	每月	每月	每月
露地蔬菜	每月	每月	每月	两月	每月	15 d	15 d	15 d	每月	每月

注:①若采用喷灌方式,SS 需 2 d 测一次;②灌溉水田的 BOD₅、硫化物、氯化物可每 3 个月监测一次;③灌溉纤维、旱地作物的石油类、挥发酚、余氯在作物苗期监测一次;④以上取样样品为日均值计;⑤以上项目为必测的项目。

质复杂,各地区种植作物、土壤类型、地形地质和生态条件不一,因此还必须制定适合当地的城市再生水灌溉制度、监测要求和控制规范。

(2)不同的种植作物对污水的处理要求和水质要求并不一致,应根据各地作物种植的特点,合理选用处理工艺,以达到经济效益最大化,又不至造成灌区环境质量的恶化和农产品的污染。生食蔬菜用水的水质要求较高,城市污水二级处理后,还需要进行深度处理,再生水的成本较高,因此不建议使用再生水进行生食蔬菜的灌溉。

(3)城市再生水农田灌溉涉及到农田土壤、大气、地下水,涉及到灌区农产品的质量 and 人群健康,因此还必须对城市再生水农田灌溉的安全性进行长期和深入的研究,从而达到既不浪费有限的水资源又能保证农业的安全灌溉。

参考文献:

[1] Thaddeus K, Graczyk T K, Lucy F E. Quality of reclaimed waters: a public health need for source tracking of wastewater-derived protozoan enteropathogens in engineered wetlands [J]. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 2007, 101(6): 532–533.

[2] 周启星. 从第二届世界水资源论坛看辽宁的水资源危机及对策[J]. 生态学杂志, 2002, 21(2): 36–39.

[3] 程先军. 污水资源灌溉利用分析[J]. 中国水利, 2003, (6)A: 35–37.

[4] 陈竹君, 周建斌. 污水灌溉在以色列农业中的应用 [J]. 农业环境保

护, 2001, 20(6): 462–464.

[5] 张雅玲, 邵辉煌, 方先金. 国内外污水回用的发展状况及发展方向[C]/中国环境工程领域回顾与展望研讨会, 2002.

[6] 周陆波, 韩烈保. 再生水灌溉草坪绿地的研究进展 [J]. 节水灌溉, 2004, 5: 17–20.

[7] FAO. 排灌文集 29, 农用水质[M]. 北京: 中国农业科技出版, 1998.

[8] Petala M, Samaras P, Kungolos A, et al. The effect of coagulation on the toxicity and mutagenicity of reclaimed municipal effluents [J]. *Chemosphere*, 2006, 65(6): 1007–1018.

[9] 周 彤. 污水回用决策与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.

[10] Weber S, Khan S, Hollender J. Human risk assessment of organic contaminants in reclaimed wastewater used for irrigation [J]. *Desalination*, 2006, 187(1–3): 53–64.

[11] 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.

[12] 吴 婧, 朱 坦. 再生水的环境安全管理机制研究[J]. 安全与环境学报, 2004, 6: 14–16.

[13] 廖日红. 北京市再生水综合利用策略研究 [J]. 水利发展研究, 2004, 1: 32–34.

[14] Drewes J E, Jekel M. Simulation of groundwater recharge with advanced treated municipal wastewater [J]. *Water Science and Technology*, 1996, 33(11): 409–418.

[15] 魏东斌, 胡洪营. 污水再生回用的水质安全指标体系[J]. 中国给水排水, 2004, 20(1): 36–39.

[16] GB5084—92 农田灌溉水质标准[S].

[17] FAO. Water quality for agriculture[M]. Rome Italy, 1985.