

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.20.012

成都市“环城生态区”再生水用于农业灌溉符合性研究

朱 钢, 郑轶丽, 王 黎, 刘 鑫, 谢 鲁, 魏 婷

(成都市市政工程设计研究院有限公司, 四川 成都 610023)

摘 要: 成都市规划了以城市中心公园带“环城生态区”为主的一系列城市生态农业景观体系,为城市发展提供绿色生态隔离空间的屏障。农田面积的增加势必加剧城市生活、工业与环境用水的矛盾,因此利用再生水进行农田灌溉是水资源可持续利用的有效途径。对再生水利用于成都市“环城生态区”农业灌溉的可行性和实施策略等进行了研究。系统地整理和分析了再生水处理厂的工艺、出水水质等,得出了研究区域再生水用于农业灌溉的可行性和风险点;区域主要再生水厂出水水质符合相关规范标准要求,出厂水水质相对稳定,但需要重点关注总氮、总磷、氯化物、无机盐和重金属等污染项目,防止该类污染物富集对环境造成不利影响;同时结合研究区域的水环境、土壤环境和农作物种类,提出了相应的实施策略和监管体系。

关键词: 环城生态区; 水资源; 再生水; 农业灌溉

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)20-0065-08

Study on the Compliance of Reclaimed Water for Agricultural Irrigation in the “Eco-Zone around the City” of Chengdu

ZHU Gang, ZHENG Yi-li, WANG Li, LIU Xin, XIE Lu, WEI Ting

(Chengdu Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Chengdu 610023, China)

Abstract: Chengdu has planned a series of urban ecological agricultural landscape systems dominated by urban central park “eco-zone around the city”, which provide green ecological barriers for urban development. The increase in farmland area is bound to aggravate the contradiction between urban life, industry and environmental water use, so the use of reclaimed water for farmland irrigation is an effective way of sustainable utilization of water resources. This paper investigated the feasibility and implementation strategy of reusing reclaimed water resources for agricultural irrigation in the “eco-zone around the city” of Chengdu. The technologies and effluent quality of reclaimed water treatment plant were systematically organized and analyzed, and the feasibility and risk of reclaimed water used for agricultural irrigation in the study area were obtained. The effluent quality of the main reclaimed water plants in the region met the requirements of relevant specifications and standards, and the effluent quality was relatively stable. However, it is necessary to focus on indicators such as total nitrogen, total phosphorus, chloride, inorganic salts and heavy metals to prevent the adverse impact of enrichment of such pollutants on the environment. In addition, corresponding implementation strategies and supervision system were proposed combined with the water environment, soil environment and crop species in the

study area.

Key words: eco-zone around the city; water resources; reclaimed water; agricultural irrigation

成都是成渝地区双城经济圈的中心城市,是践行新发展理念的公园城市示范区。成都市是全国400多个缺水城市之一,多年平均水资源总量为 $82.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,年人均占有量为 558.9 m^3 ,约为全省人均占有量的30%、全国人均占有量的40%、世界人均占有量的10%,低于人均水资源年占有量 $1\,700 \text{ m}^3$ 的国际缺水警告线。

“环城生态区”是沿成都市中心城区绕城高速公路两侧各500 m范围,以及周边七大楔形地块内的生态用地和建设所构成的控制区,区域总面积为 187.15 km^2 ,其中生态用地(由农业用地和园林绿地构成)占比约为71%,农业用地占比最高,因此“环城生态区”为再生水的合理利用提供了有利条件。

再生水作为一种再利用资源,对缓解水资源供需矛盾、推动可再生资源持续利用、减少污染物排放起着重要作用。通过对成都市“环城生态区”环境本底进行调查,以及对区域相关再生水厂生产工艺和出厂水质数据进行分析,总结成都市“环城生态区”再生水用于农业灌溉的符合性,并提出相关实施策略和体系,以便为未来成都市再生水的更广泛利用提供支撑。

1 再生水农业灌溉现状

再生水在世界各国的主要利用途径包括农业灌溉、景观用水、城市杂用和工业用水,其中农业灌溉占比最高,达到了33%^[1],部分国家农业再生水使用比例可达到60%,特别是在一些干旱缺水地区,农业再生水使用比例高达80%^[2],全球再生水利用率分布见图1。国内再生水用于农业灌溉的比例较小,目前暂无再生水大面积直接用于农业灌溉,部分实验田主要分布于我国北方水资源严重短缺的黄淮海辽4大流域^[3],西南地区再生水用于农业灌溉方面的研究较少。

国外以美国加州为例,2020年再生水利用率达到40%以上,农业和城市绿地灌溉是其主要用途,约占再生水利用总量的70%,其中农业用水占比为45.9%,在加州再生水水质管理标准体系中,尤其对污水处理水平及消毒效果(总大肠菌群的数量)进

行了严格限定;以色列是典型的缺水国家,其再生水利用率达到83%以上,其中大部分应用于农业灌溉(46%),并用于地下水回灌(33.3%)以及河道补给(20%)^[4],以色列对城市污水厂进水进行严格控制,同时对农作物、蔬菜、果树的灌溉水质均制定了较为严格的水质标准^[5];在澳大利亚,人们对再生水利用的需求逐渐增加,2012年澳大利亚开始进行再生水用于农业灌溉的田间实验,并对不同盐度下的长期利用再生水灌溉的玉米生产进行了模拟,模拟灌溉50年后没有发现明显的产量下降^[6]。

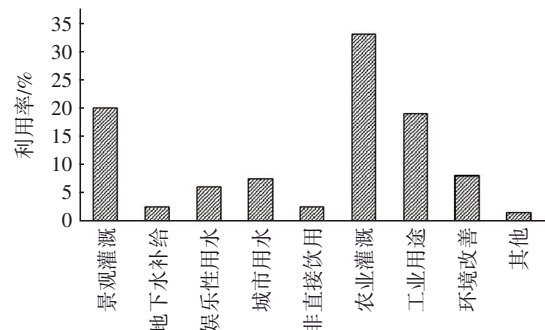


图1 全球再生水利用率分布和用途分类

Fig.1 Distribution of global reclaimed water utilisation rate and use classification

反观国内,北京市是我国最早采用再生水进行大面积灌溉实践的地区之一,但目前北京市暂无大面积再生水灌区,仅有小部分灌区曾采用再生水进行长时间灌溉。有研究指出,北京市通过再生水灌溉途径带入的重金属总量与地下水灌溉相当,低于大气沉降等途径带入的重金属总量,但并不排除再生水中重金属的长期积累导致的超标^[7]。同时北京市部分再生水灌区地下水水位比其他条件相仿地区地下水水位下降幅度小,主要是由于该地区利用再生水灌溉以来,减少了地下水资源的开采量^[8]。

2 “环城生态区”环境概述

2.1 区域位置及地理环境

成都市“环城生态区”涵盖沿成都市绕城高速公路两侧500 m范围,整体环绕成都市布局,具体如图2所示。区域地处四川盆地西部,分为东、西、南三个分区。



图2 成都市“环城生态区”用地布局

Fig.2 Land use layout of the “eco-zone around the city” of Chengdu

区域占地总面积约为 187.15 km²,其中生态用地由农业用地和园林绿地构成,总面积为 133.11

表1 “环城生态区”土壤重金属检测结果统计分析

Tab.1 Statistical analysis of soil heavy metal test results in the “eco-zone around the city”

项 目	铬	镍	铜	锌	砷	镉	铅	汞
检测点位数/个	314	314	314	314	314	314	314	314
最小值 ^① /(mg·kg ⁻¹)	19.9	13.0	14.0	34.3	3.47	0.09	10.38	0.010
最大值/(mg·kg ⁻¹)	383	224.8	2 040	3 220	224.9	18.46	793.9	5.760
平均值 ^② /(mg·kg ⁻¹)	46.8	32.8	47.5	117.4	10.8	0.45	34.9	0.169
标准值 ^③ /(mg·kg ⁻¹)	150/150/	150/150/	150/150/	150/150/	150/150/	150/150/	150/150/	150/150/
	60/70	60/70	60/70	60/70	60/70	60/70	60/70	60/70
超标点位数/个	4	2	11	4	3	76	5	1
点位超标率/%	1.27	0.64	3.50	1.27	0.96	24.20	1.59	0.32
最大超标倍数/倍	0.53	0.18	19.4	9.73	8.00	29.77	3.67	0.69
注: ①最小值未包含未检出样品数据;②未检出数据按照 1/2 检出限计算;③标准值分别是 pH 在<5.5/5.5~6.5/6.5~7.5/>7.5 时所对应的重金属含量。								

2.3 水环境及水资源

“环城生态区”内现有府河、清水河、江安河、锦江、东风渠 5 条主要河流穿过,并有北湖、锦城湖和青龙湖三处主要湖泊。湖泊水系整体为轻度污染,主要污染河段出现在岷江水系的府河、沙河、江安河和沱江水系的毗河,主要污染指标为氨氮、总磷,部分水体呈现富营养化特征。

区域地下水富含孔隙水,水位埋深一般都较浅,地下水位年变化幅度 1.5~3 m。就整个成都市而言,浅层地下水水质超标面积占成都市总面积的 59.5%。西部地区浅层地下水水质较好,东部、中部较差。地下水水质超标指标主要为铁、锰、铅、亚硝酸,区域地下水脆弱性主要为低脆弱性区、中等脆弱性区^[10]。

km²。研究区域属于亚热带湿润季风气候区,年平均气温在 15.2~16.6℃左右,年平均降水量 873~1 265 mm。

2.2 地质土壤环境

成都平原在构造上是成都断陷盆地(又称为成都凹陷),中心城区西部山地地带为粗粒相沉积,卵石粒径大、空隙性好;东部及南部扇缘地带主要为细粒相沉积,泥质含量增加,空隙性较差^[9]。

根据《“环城生态区”项目景观农业土壤环境质量评价报告》,“环城生态区”景观农业土壤各等级肥力均有占比,其中中等肥力以上占比 63.69%;土壤 pH 平均值 7.46,有 63.69% 的土壤 pH>7.5,呈弱碱性;同时铬、镍、铜、锌、砷、镉、铅、汞均有不同程度超标。

具体的重金属检测结果见表 1。

区域总需水量为 14 326×10⁴ m³/a,其中农业灌溉需水量为 3 200 m³/a,需要利用再生水进行补充以达到水资源供需平衡。

2.4 农业种植环境

研究区域总计约有 57.3 km² 的集中农用地、8.1 km² 的零散农用地及 34.6 km² 的生态林地,农业需水总量为 2 952.9×10⁴ m³/a。区域规划在东、南、西片区 13 个点位种植油菜、苜蓿、三叶草等农作物 223 hm²。区域农作物主要以玉米、红薯、大豆、油菜和花卉等为主,农田生态系统受人为干扰较大,且随着季节变化,生态系统群落结构变化非常大。

3 再生水用于环生区农业灌溉水质符合性

3.1 生产工艺

我国常用的处理工艺中,适用于农业灌溉的处

理方式主要为氧化沟、人工湿地等二级处理方法及混凝/过滤/消毒的三级处理方式。作为生食的蔬菜、水果等作物的再生水水质要求较高,需要进一步采用深度处理,处理成本较高,作物污染风险较大,因此不推荐使用再生水进行灌溉。不同农作物对应的不同建议工艺如表2所示。

表2 各类作物灌溉用水建议工艺
Tab.2 Recommended processes for irrigation water for all types of crops

作物类型	工艺	处理效果	特点
直接食用作物(水田谷物、旱地蔬菜等)	城镇污水→二级处理/二级强化处理→(混凝沉淀)→过滤→臭氧消毒	使用介质过滤对SS有一定去除效果;使用臭氧消毒可以除色除嗅,强化有机物和病原微生物的去除	投资运行成本较高
	城镇污水→二级处理/二级强化处理→(混凝)→膜滤→(臭氧)消毒	使用膜滤法可以有效去除SS和病原微生物,臭氧消毒可以除色除嗅	投资运营成本较高,需要注意膜污染和膜寿命
	城镇污水→膜生物反应器→臭氧消毒	对SS有较高去除率,同时有效去除有机污染物和病原微生物,可除色除嗅	投资运营成本较高,占地面积小,运营要求较高
间接食用作物(旱地作物、油料作物等)	城镇污水→二级处理/二级强化处理→过滤→消毒	对SS有明显去除效果	投资运行成本较低
	城镇污水→膜生物反应器→消毒	对SS、有机污染物和病原微生物有明显去除效果	投资运营成本较高,占地面积小,运营要求较高
非食用作物(纤维作物等)	城镇污水→二级处理/二级强化处理→消毒	仅去除部分病原微生物	运行成本低
	城镇污水→膜生物反应器→消毒	对SS、有机污染物和病原微生物有明显去除效果	投资运营成本较高,占地面积小,运营要求较高

“环城生态区”相关主要再生水厂为第五、第六、第七、第八和第九再生水厂,其中第六、七再生水厂设计采用多段A/O+高密度沉淀池+反硝化滤池工艺,基本满足除直接食用农作物外的其他农作物灌溉水质的工艺要求;第九再生水厂设计采用A²/O+高密度沉淀池+反硝化滤池工艺,基本满足大部分农作物灌溉水质工艺要求;第五、第八再生水厂采用曝气沉砂池+改良A²/O+MBR膜池+紫外消毒工艺,满足农业灌溉再生水用水水质的较高要求。目前,第六、七、八再生水厂建设有接触消毒池,需要结合出厂水水质及灌区农作物种类等因素,综合考虑工艺优化。

“环城生态区”主要再生水厂中,第五、第八厂已建有深度处理设施,六、七、九厂正在进行提标改造,出水水质满足或即将满足《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB 51/2311—2016)。其中区域主要再生水厂采用了高密度沉淀池和MBR等深度处理工艺,理论上出厂水水质可达到农业灌溉的要求;部分再生水厂具有紫外消毒等再生水出厂前处理工艺,出厂水水质较好,病原微生物数量得到有效控制,满足农业灌溉水质要求。

3.2 再生水水质
3.2.1 BOD₅、COD和SS

2018年—2019年第五~九再生水厂的出水水质见图3。可见,BOD₅、COD、SS检测结果均符合《城市污水再生利用 农田灌溉用水水质》(GB 20922—2007)与《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)中要求的最严值(生食类蔬菜,分别为15、60和15 mg/L)。

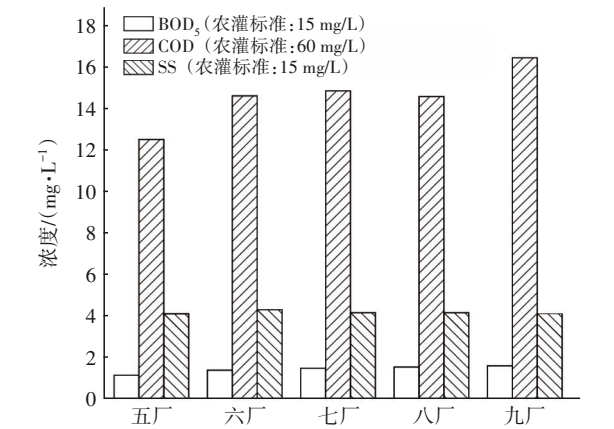


图3 再生水厂出厂水BOD₅、COD、SS平均值
Fig.3 Average values of effluent BOD₅, COD, SS of reclaimed water plants

整体来看,各再生水厂出厂水的BOD₅、COD、SS三项指标相差不大,第五再生水厂出厂水水质相对较好,第九再生水厂BOD₅、COD两项指标相对较高。

3.2.2 TN

2018年1月—2019年12月各再生水厂出厂水TN见图4。可见,6月—7月再生水厂出水中TN含量较低,10月—11月出现峰值,总体来说秋冬季节出水TN含量较高,春夏季节较低,需根据时令结合再生水水质进行施肥和再生水、清水交替灌溉。

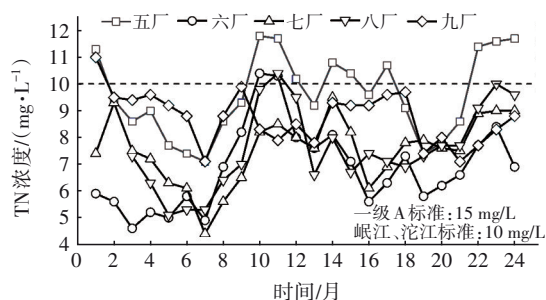


图4 再生水厂出厂水TN变化

Fig.4 Changes of effluent TN of reclaimed water plants

各再生水厂出厂水TN分析见图5。可见,TN浓度整体低于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级A标准(15 mg/L),各水厂出厂水的平均值低于《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB 51/2311—2016)中规定的10 mg/L,但除第七再生水厂外的其他水厂在水质波动时出现了超标情况。《城市污水再生利用 农田灌溉用水水质》(GB 20922—2007)与《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)等规范对TN未作要求。五厂平均TN较高,为9.6 mg/L,出水TN存在一定波动;六厂平均TN较低,为6.85 mg/L,出水TN较不稳定;七厂、九厂出厂水TN较稳定,波动幅度较小。

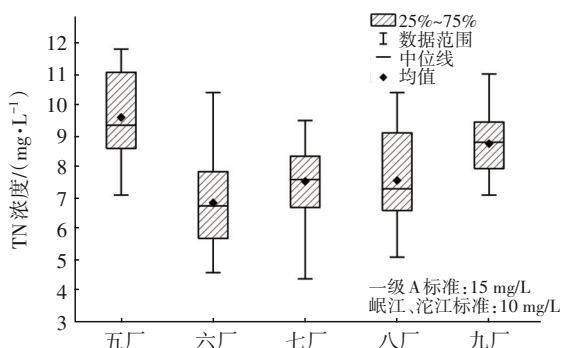


图5 再生水厂出厂水TN分析

Fig.5 Analysis of effluent TN of reclaimed water plants

3.2.3 TP

2018年1月—2019年12月再生水厂出厂水TP见图6。可见,TP浓度随季节变化较小,总体来说秋冬季节出水TP较高,春夏季节较低,整体具有一定的波动性,需注意灌溉时序和比例。

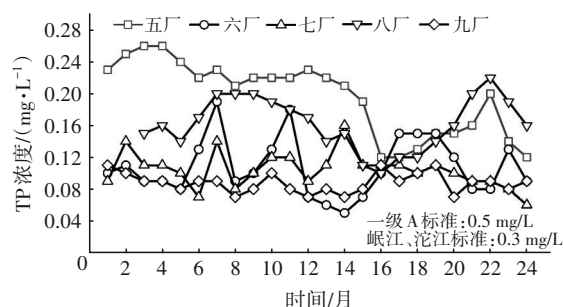


图6 再生水厂出厂水TP变化

Fig.6 Changes of effluent TP of reclaimed water plants

对各再生水厂出厂水TP的分析见图7。总体看来,出厂水TP低于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级A标准(0.5 mg/L),同时也低于《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB 51/2311—2016)中0.3 mg/L的要求,而《城市污水再生利用 农田灌溉用水水质》(GB 20922—2007)与《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)对TP浓度同样未作要求。五厂平均TP较高,为0.196 mg/L,出水TP波动较大;九厂平均TP较低,为0.087 mg/L,出水TP较稳定;六厂、七厂TP较低,存在一定波动;八厂出水TP较高,存在一定波动。

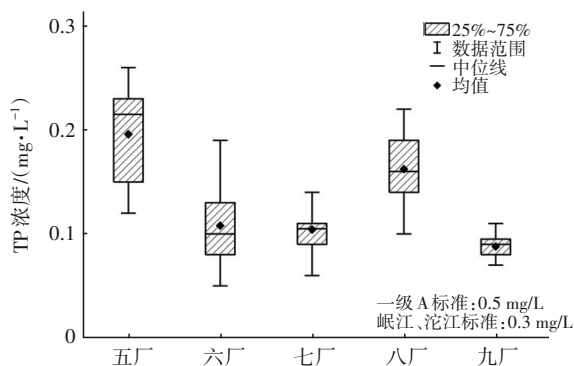


图7 再生水厂出厂水TP分析

Fig.7 Analysis of effluent TP of reclaimed water plants

3.2.4 氯化物

氯化物是植物平衡离子电荷和渗透调节所必需的营养物质,在植物体内的阳离子转运中起到反离子的作用,有助于作物生长。植物对氯化物浓度

的敏感性差异很大,ISO 国际标准 *Guidelines for Treated Wastewater Use for Irrigation Projects* (ISO 16075—1)中对再生水灌溉利用的氯化物浓度有相应的限值规定,要求氯化物最高浓度为250 mg/L,严于《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)中对氯化物的要求(350 mg/L)。“环城生态区”各再生水厂出厂水氯化物浓度见图8。可见,各再生水厂出厂水氯化物浓度均符合规范要求,冬季出水氯化物浓度较高,夏季较低,整体随季节有一定波动,除五厂外都在12~15个月时出现过特殊峰值,五厂~九厂出厂水最大氯化物浓度分别为65.4、125、126、137、108 mg/L,最小氯化物浓度分别为22.0、24.4、19.0、37.8、50.9 mg/L。

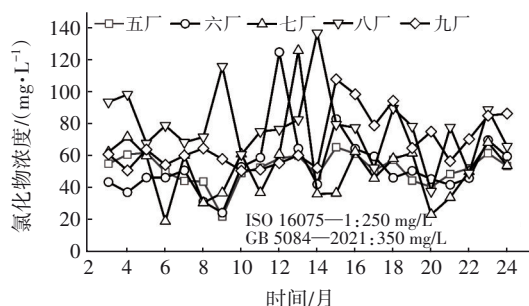


图8 再生水厂出厂水氯化物浓度变化

Fig.8 Changes of effluent chloride of reclaimed water plants

对各再生水厂出厂水的氯化物浓度分析如图9所示。

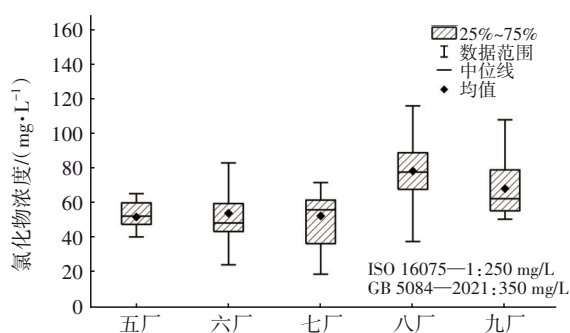


图9 再生水厂出厂水氯化物分析

Fig.9 Analysis of effluent chloride of reclaimed water plants

总体看来,各再生水厂出厂水中的氯化物浓度均低于ISO 16075—1的要求(250 mg/L),平均值在50~80 mg/L之间,其中第八再生水厂出厂水平均氯化物浓度较高,为78.4 mg/L,且波动较大;第五再生水厂出厂水平均氯化物浓度较低,为51.9 mg/L,出

水浓度较稳定;第六、第七、第九再生水厂出厂水中氯化物浓度具有一定波动。

3.2.5 盐类物质

再生水虽经二级及以上处理,但通常出厂水中仍有较高的全盐含量,因此对“环城生态区”各再生水厂出厂水中的K、Ca、Na、Mg四种元素的总量进行了统计,同时分析了电导率,具体分析结果如图10所示。

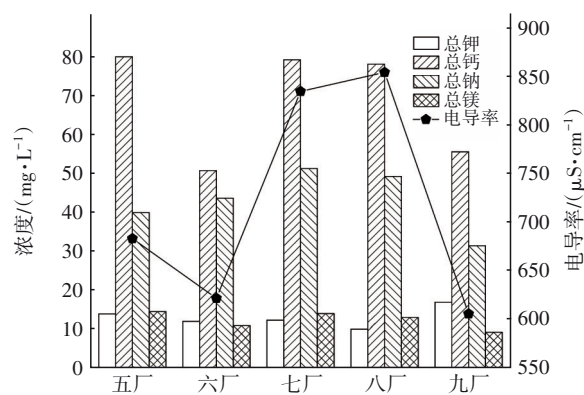


图10 再生水厂出厂水盐类浓度分析

Fig.10 Analysis of the salt content in the effluent of reclaimed water plants

由图10可以看出,大体上,出水K、Ca、Na、Mg浓度由多到少依次为总钙>总钠>总镁>总钾。其中六厂、九厂整体含盐量较低,五厂、七厂、八厂含盐量相当。

3.2.6 重金属

再生水中重金属浓度过高会存在重金属富集的风险,导致土壤、水体乃至农作物受到污染,危害环境和人体健康。

“环城生态区”主要再生水厂出厂水中重金属含量如表3所示。由表3中的数据可见,各指标均符合《城市污水再生利用 农田灌溉用水水质》(GB 20922—2007)与《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)等规范中的最严要求。

同时有研究认为,虽然再生水中重金属含量较低,但通过短期的灌溉试验得到的研究结果说服力不强^[11]。由于目前成都市并无长期的再生水灌溉实例,通过调查很难反映再生水长期灌溉导致的环境风险,因此需进一步比较再生水灌区不同输入途径对土壤重金属的影响,评估再生水灌溉对土壤、水体和农作物的重金属污染风险,为成都市开展大规模的再生水灌溉提供参考依据。

表3 再生水厂出厂水中的重金属含量
Tab.3 Heavy metal content in the effluent of reclaimed water plants mg·L⁻¹

项目	五厂	六厂	七厂	八厂	九厂	农灌标准
总锌	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	2.0
总铁	0.44	0.22	0.25	0.29	0.33	1.5
总锰	<0.01	0.03	0.05	<0.01	0.07	0.3
总铍	<2×10 ⁻⁵	<2×10 ⁻⁵	<2×10 ⁻⁵	<2×10 ⁻⁵	<2×10 ⁻⁵	0.002
总银	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.1
总镍	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.1
总铜	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	1.0
总镉	5×10 ⁻⁵	<4×10 ⁻⁵	<4×10 ⁻⁵	8×10 ⁻⁵	<4×10 ⁻⁵	0.01
总铬	0.026	0.020	0.023	0.021	0.020	0.1
总汞	3.7×10 ⁻⁴	3.6×10 ⁻⁴	4.2×10 ⁻⁴	4.4×10 ⁻⁴	4.2×10 ⁻⁴	0.001
总铅	<2.65×10 ⁻³	<2.65×10 ⁻³	<2.65×10 ⁻³	<2.65×10 ⁻³	<2.65×10 ⁻³	0.2
总砷	6×10 ⁻⁴	6×10 ⁻⁴	5×10 ⁻⁴	8×10 ⁻⁴	8×10 ⁻⁴	0.05

4 研究结论

4.1 可行性与风险点

4.1.1 可行性

虽然“环城生态区”主要再生水厂出水水质符合规范要求,且水质较为稳定,但仍需重点关注TN、TP、氯化物、无机盐和重金属等污染项目,防止长期积累导致环境污染。若采用再生水进行灌溉,建议加强再生水厂消毒工艺,同时采用再生水、清水结合的形式进行灌溉;灌溉方式建议结合湿地、沟渠进行调蓄,采用滴灌等低风险灌溉方式。总体而言,成都市“环城生态区”具备采用再生水进行农业灌溉的可行性,再生水用于农业灌溉规划过程可以参考各水厂的水质、不同区域的环境承载力及农作物的要求进行总体布局,为未来成都市再生水在农业灌溉方面的探索打下一定基础。

4.1.2 风险点

主要风险点包括:①决策过程中由于主、客观因素导致实施过程出现未能预见的后果,如决策过程未考虑灌溉区域现状环境特点,导致再生水回灌过程环境污染等风险;②民众对再生水农灌、农产品安全性会有一定疑虑;③再生水灌溉可能会将有害物质残留在作物表面,对食用根、茎、叶的蔬菜及瓜果等农产品造成污染;④“环城生态区”水环境存在局部的高污染风险区,污染物可能通过渗漏和水的淋溶作用造成地下水污染;⑤区域土壤存在局部重金属超标区域,同时灌溉用水可能造成土壤板结;⑥区域再生水厂出水水质较为稳定,但仍存在一定的波动,可能因为水质波动导致污染事件。

4.2 实施策略与监管体系

4.2.1 实施策略

①优化灌区选择,根据“环城生态区”环境概况,结合再生水厂的生产工艺及出厂水水质和水厂布局,优先对低风险灌区采用再生水灌溉,优先对监管体系完善的灌区进行灌溉。②进行灌溉实验,在不同灌区,结合灌区范围内合格的再生水厂出水,进行分区域实验。③采用合理、先进、科学的再生水灌溉方式,常用的灌溉方式有地下滴灌(SDI)、地表滴灌(DI)和喷灌(PI)等。④为了确保城市再生水的安全灌溉,在用于灌溉之前,应对拟定的灌区进行调查、取样、分析、评价,以确定该地区是否适合再生水灌溉。⑤如区域适合灌溉,为防止再生水灌溉过程中污染物对地表水源、地下水源以及公众健康的影响,应设置相应的缓冲区。

4.2.2 监管体系

①保障再生水生产与水质,城市污水经处理再生后用于农田灌溉之前,需要对用于农业灌溉的再生水进行一段时间的检测,保证出水水质稳定且符合农田灌溉水质要求。②持续监测地表水与地下水,应在灌溉区及周边范围内设定监测点,监测地下水中各类污染物含量,监测频率不少于1次/a。③重点关注土壤环境,宜使用再生水和清水轮流灌溉的方式来减轻污染物在土壤中的累积,建议雨季减少井水灌溉频率,尽量采用再生水进行农业灌溉,进行土壤监测时监测频率不能少于1次/a。④把控农产品质量,加强对再生水灌区的跟踪监测,定期监测灌区农产品超标情况,农作物出产前必须

对重金属等进行检测,检测合格后方可投入市场。

5 结语

针对再生水处理厂的工艺、出水水质等指标进行了较为系统的整理和分析,结合区域水环境、土壤环境和农作物种类,对再生水用于农业灌溉的可行性和实施策略等进行了系统性研究,进而提出较为具体的实施策略和监管体系,为再生水用于中心城区包括“环城生态区”的农业灌溉提供一定保障,为各类规划、导则及实施方案的编制提供参考。

参考文献:

- [1] 李昆,魏源送,王健行,等. 再生水回用的标准比较与技术经济分析[J]. 环境科学学报, 2014, 34(7): 1635-1653.
LI Kun, WEI Yuansong, WANG Jianxing, *et al.* Water reclamation: standards comparison and cost analysis [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(7): 1635-1653 (in Chinese).
- [2] 杨茂钢,赵树旗,王乾勋,等. 国外再生水利用进展综述[J]. 海河水利, 2013(4): 30-33.
YANG Maogang, ZHAO Shuqi, WANG Qianxun, *et al.* A summary of progress in reclaimed water utilization and its advancement in foreign countries [J]. *Haihe Water Resources*, 2013(4): 30-33 (in Chinese).
- [3] 代志远,高宝珠. 再生水灌溉研究进展[J]. 水资源保护, 2014, 30(1): 8-13.
DAI Zhiyuan, GAO Baozhu. Research advances in reclaimed water irrigation [J]. *Water Resources Protection*, 2014, 30(1): 8-13 (in Chinese).
- [4] 陈卫平. 美国加州再生水利用经验剖析及对我国的启示[J]. 环境工程学报, 2011, 5(5): 961-966.
CHEN Weiping. Analysis of California's reclaimed water utilization experience and its implications for China [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(5): 961-966 (in Chinese).
- [5] 王参民. 以色列水资源问题研究[D]. 郑州:河南大学, 2016.
WANG Canmin. Study on Issues of Water Resources in Israel [D]. Zhengzhou: Henan University, 2016 (in Chinese).
- [6] MOK H F, DASSANAYAKE K B, HEPWORTH G, *et al.* Field comparison and crop production modeling of sweet corn and silage maize (*Zea mays* L.) with treated urban wastewater and freshwater[J]. *Irrigation Science*, 2014, 5(32): 351-368.
- [7] 杨军,陈同斌,雷梅,等. 北京市再生水灌溉对土壤、农作物的重金属污染风险[J]. 自然资源学报, 2011, 26(2): 209-217 (in Chinese).
YANG Jun, CHEN Tongbin, LEI Mei, *et al.* Assessing the effect of irrigation with reclaimed water: the soil and crop pollution risk of heavy metals [J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(2): 209-217 (in Chinese).
- [8] 温先高. 北京南红门灌区再生水灌溉对地下水环境影响研究[D]. 北京:清华大学, 2012.
WEN Xiangao. Study on Groundwater Environment Impact by Reclaimedwater Irrigation in Beijing Nanhongmen [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012 (in Chinese).
- [9] 李霞,何庆成,陈亮,等. 四川成都中心城区地下空间开发利用的地质环境制约因素分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(2): 141-150.
LI Xia, HE Qingcheng, CHEN Liang, *et al.* Analysis on the geo-environmental restrictive factors of underground space development and utilization in the central area of Chengdu, Sichuan Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(2): 141-150 (in Chinese).
- [10] 罗婷. 成都市地下水脆弱性评价[D]. 成都:成都理工大学, 2016.
LUO Ting. Evaluation of Groundwater Vulnerability in Chengdu City [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016 (in Chinese).
- [11] 刘帆. 城市再生水灌区作物重金属健康风险评估研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2008.
LIU Fan. The Study of Health Risk Assessment on Heavy Metals of Crops in City Reclaimed Water Irrigation Area [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008 (in Chinese).

作者简介:朱钢(1970—),男,四川自贡人,硕士,正高级工程师,副总工,兼任设计一院院长,主要从事区域水系统规划研究、城市综合防涝、排水及再生水系统规划等相关研究。

E-mail:16716761@qq.com

收稿日期:2022-05-20

修回日期:2022-06-09

(编辑:孔红春)