

再生水农业灌溉的利用现状和影响分析

李乾龙, 张文莉*, 李继国, 负晓玲
云南水利水电职业学院, 云南 昆明 650000
DOI: 10.61369/SSSD.2026090031

摘 要 : 我国的人均水资源量不足世界平均水平的 1/4, 是严重缺水国家。利用再生水灌溉是解决我国水资源匮乏的有效途径, 但再生水灌溉对农作物和土壤的影响是复杂的。文章主要针对再生水灌溉对土壤、农作物、人体和地下水的影响, 系统地总结了近年来的研究进展, 目前学界关于再生水灌溉对土壤及作物的影响尚未形成一致结论, 争议主要源于试验可比性不足、相关概念界定不统一等问题。多数研究表明, 再生水灌溉对人体健康影响尚可接受, 但长期采用再生水灌溉农田仍会对土壤水质产生一定负面效应。针对我国再生水灌溉现存的问题与短板, 未来应进一步强化相关理论研究, 并持续开展长期、系统的原位监测与评价工作, 以期对我国再生水灌溉利用提供更加科学的理论指导。

关 键 词 : 再生水; 农业灌溉; 现状; 影响

The Current Situation and Impact Analysis of Reclaimed Water for Agricultural Irrigation

Li Qianlong, Zhang Wenli*, Li Jiguo, Yun Xiaoling

Yunnan Water Conservancy and Hydropower Vocational College, Kunming, Yunnan 650000

Abstract : China's per capita water resources are less than one-fourth of the global average, classifying the country as severely water-scarce. Regenerated water irrigation serves as an effective solution to address water scarcity, yet its impacts on crops and soil are complex. This study systematically reviews recent research progress on the effects of regenerated water irrigation on soil, crops, human health, and groundwater. Current academic consensus remains elusive regarding soil and crop impacts, with controversies primarily stemming from challenges such as experimental incomparability and inconsistent conceptual definitions. Most studies indicate that reclaimed water irrigation has acceptable impacts on human health, but long-term application in agricultural fields may still exert certain negative effects on soil water quality. To address existing challenges and shortcomings in China's reclaimed water irrigation practices, future efforts should focus on strengthening theoretical research and conducting sustained, systematic in-situ monitoring and evaluation. These measures aim to provide more scientifically grounded guidance for optimizing reclaimed water utilization in China's agricultural systems.

Keywords : reclaimed water; agricultural irrigation; current situation; impact.

水资源属于不可再生资源, 联合国在 2020 年发布的《世界水资源发展报告》中指出, 预计到 2030 年, 农业灌溉用水将占据全球淡水资源总量的 70% 以上^[1]。我国作为农业大国, 农业灌溉用水需求量长期处于较高水平, 相关统计数据显示, 2023 年我国农业用水量达 3672.4 亿立方米, 占全国总用水量的 62.2%^[2]。

再生水农田灌溉, 具体是指将城市范围内收集的生活及生产废水, 经过深度净化处理, 使其水质达到农田灌溉用水的限值标准后, 依据农作物不同生育期的需水规律, 通过输配水工程系统输送至田间, 用于农业灌溉的一种水资源调配方式。再生水中含有丰富的氮、磷、钾及有机质等植物生长所必需的营养成分, 应用于农田灌溉不仅能有效减少化肥的施用量、降低农业生产成本, 还可提升水资源的综合利用效率。

一、再生水灌溉利用现状

(一) 国外再生水灌溉利用现状

在再生水灌溉领域, 国外的发展历程远早于我国, 积累了长

期且丰富的实践经验。其中, 美国、新加坡、澳大利亚、日本、以色列等国家, 已构建起较为健全的再生水灌溉标准规范体系, 再生水灌溉回用技术的社会认可度与实际应用率均处于较高水准, 相关灌溉技术已趋于成熟, 应用场景不断延伸, 再生水已逐

项目信息: 云南省教育厅科学研究基金项目: 再生水灌溉对土壤及叶类蔬菜的影响研究 (2024J1832)。

作者简介: 李乾龙 (1989—), 男, 硕士, 讲师。研究方向: 水利工程农田水利灌溉。

通讯作者: 张文莉 (1988—), 女, 硕士, 讲师。研究方向: 环境污染控制与修复。

渐成为这些国家农业灌溉的主导水源^[3]。

就全球再生水回用情况而言,美国当前的再生水回用量位居世界首位,其回用量占全球再生水总回用量的比例约为62.68%^[4]。早在20世纪初,美国加利福尼亚州就率先开展再生水农田补给实践,实现了再生水灌溉的规模化应用。新加坡现阶段已建成五座再生水处理场站,年净化水量可达5.42亿立方米,依托先进的污水资源化处置技术,该国成功摆脱了水资源匮乏的困境,转型为国际水务发展领域的核心地区。

日本于1962年启动再生水开发利用的相关探索,到20世纪80年代进入行业快速发展阶段,截至目前,已建成近两千座小型污水净化设备,经处理合格后的再生水,有超过六成用于稻田栽种与林果培育工作。以色列则从20世纪60年代开始,将污水循环回用纳入国家层面的发展规划,2020年已实现城镇生活污水回收净化的全面覆盖,所产出的再生水能够弥补当地农业种植领域半数的用水缺口。

除上述国家外,巴西、法国、意大利等多个国家,也针对再生水在绿植管护、农田浇灌中的应用价值,陆续开展了理论研究与实际工程的落地推进。但从全球再生水灌溉的整体发展情况来看,多数地区仍承受着经济建设与水资源短缺的双重压力,加之再生水开发项目普遍存在资金短缺、核心技术尚未完善等现实瓶颈,极大地阻碍了污水资源化灌溉模式的广泛普及与长效推进。

(二) 国内再生水灌溉利用现状

自20世纪70年代起,我国便开启了再生水用于农业灌溉的探索之路,相关科研工作持续推进。业内学者围绕再生水灌溉对作物生长状况、土壤物理化学特征及重金属累积污染等核心议题,展开了全面且深入的专项研究,为技术应用奠定了早期理论基础。

政策层面的完善为再生水利用事业提供了制度保障。《国务院关于全面加强城市供水节水和水污染防治工作的通知》(国发〔2000〕36号)、《中华人民共和国水法》与《中华人民共和国循环经济促进法》等法规的相继颁布,从宏观层面明确了再生水开发利用与管理的发展方向。2017年,《水利部关于非常规水源纳入水资源统一配置的指导意见》(水资源〔2017〕274号)正式印发,将“完善顶层设计,推动再生水纳入水资源统一配置体系”列为核心任务,直接推动我国再生水利用进入跨越式发展阶段,开发利用规模迅速扩大,原本以污水、初级处理水为主的农业灌溉模式逐步被再生水替代。2021年,《水回用导则》系列国家标准正式发布,进一步为污水资源化利用的标准化、规范化发展提供了关键技术依据^[5]。

尽管我国再生水农业灌溉政策与标准体系逐步完善,但该领域的实践应用整体仍处于发展初期。再生水体中富集的盐分、重金属、致病微生物、农药残留及环境激素等多种污染物,在灌溉过程中会持续对农作物正常生长、耕作土壤理化性质与结构稳定、地下水资源安全构成潜在威胁,同时还可能通过食物链传递对人体健康产生长期不良影响。当前,针对再生水灌溉引发的各类环境风险与健康隐患的专项研究仍较为薄弱,这些未知的风险因素成为制约再生水农业灌溉规模化推广与可持续发展的关键

瓶颈。

二、再生水农业灌溉的影响

(一) 再生水灌溉对土壤性质的影响

土壤孔隙是土壤水分、空气的主要储存场所,同时也为植物根系生长、土壤动物及微生物活动提供了必要空间^[6]。土壤孔隙度可直观体现土壤结构好坏与土体密实程度,是评判土壤理化性质的核心指标之一。再生水灌溉会引发土壤物理性质发生改变,其中以土壤孔隙度^[7]、渗透速率等参数的变化最为突出,而土壤物理性质的改变,会进一步打破土壤生态平衡,扰乱土壤生物群落结构,甚至诱发一系列生态环境问题。相较于常规清水灌溉,再生水内部有机质、悬浮物、金属离子、盐分离子等物质含量更高^[8-9],这些物质随灌溉水进入土壤后,会直接改变土壤原有理化性质^[10],进而引发土壤孔隙结构发生变化,最终造成土壤水力特性出现相应改变。因此,深入剖析再生水灌溉模式对土壤孔隙结构及基础理化指标的作用机制,具有十分迫切的现实必要性。通过研究证实,再生水灌溉会提升土壤盐度与碱度,促使土壤粘粒出现膨胀、分散现象,进而降低土壤孔隙结构的稳定性;也有相关研究表明,再生水中高含量的固体悬浮物,会堵塞土壤孔隙通道,改变土壤结构形态,甚至导致土壤饱和导水率下降。除此之外,长期开展再生水农业灌溉,水中有机质等成分会在土壤表层不断富集,引发地表结皮现象加剧,使得土壤容重增大、孔隙分布不均程度提升,同时重塑土壤微生物群落结构,最终对土壤孔隙结构产生显著影响。综上,对土壤孔隙特征开展定量研究,是探明再生水灌溉条件下土壤基础理化指标变化规律的重要手段与关键表征方式。

(二) 再生水灌溉对土壤肥力的影响

再生水富含氮、磷、钾及有机质等多种作物生长必需的营养元素,这些营养物质会随灌溉过程持续输入耕作层土壤,补充土壤养分储量,从而对土壤肥力水平起到调控作用。土壤肥力直接决定了土壤为作物生长供应养分的综合能力,其中有机质、氮、磷、钾等养分含量,是评估土壤肥力水平的核心依据。当前学界围绕再生水灌溉对土壤肥力的影响展开了大量研究,但尚未形成一致的研究结论。部分学者研究表明,再生水灌溉有助于提升土壤肥力,采用野外调查与采样分析相结合的方法,针对不同再生水灌溉年限的农田土壤养分变化展开研究,结果显示,不同灌溉时长下,再生水灌区土壤有机质含量均高于清水灌溉区域。但也有部分研究提出,再生水灌溉对土壤肥力并未产生显著影响。研究结论出现分歧,主要是因为土壤肥力的变化并非仅受再生水灌溉单一因素影响,还与土壤类型、作物种植种类、田间生长环境等多重因素密切相关。因此,后续相关研究除了要开展更全面、规范的室内模拟试验,还需综合考量各类影响因素,重点开展多因子耦合条件下的田间定位试验研究。

(三) 再生水灌溉对土壤环境的影响

通常情况下,土壤自身具备一定的自净能力,但其环境承载力与污染物净化效能均存在一定阈值。若长期将再生水用于农田

灌溉，极易导致各类污染物在土壤体系中持续累积，进而对地下水、作物植株及果实产生次生污染，埋下生态安全隐患。当前，国内外针对再生水灌溉对农田生态环境影响的相关研究，主要聚焦于土壤重金属富集、微生物活性变化等核心领域。

现有多数研究结果显示，短期采用再生水进行农田灌溉，一般不会对土壤环境造成明显污染，但当土壤中已有其他来源的重金属负荷处于较高水平时，需定期开展土壤污染物监测与风险评估，以此防控重金属过度累积带来的环境风险。另外，通过对比多种灌溉模式可知，滴灌技术不仅能有效节约灌溉用水量，还能减少土壤中重金属的累积量，相关研究也证实，再生水滴灌模式下，土壤重金属镉含量能够满足相关标准限值要求，这也凸显了选取科学灌溉方式的重要性。与此同时，土壤重金属累积程度不仅受元素自身理化特性影响，还与再生水灌溉年限呈显著相关性，因此，针对再生水灌溉农田区域，必须定期开展环境监测与生态安全评价，还可通过调节土壤理化性质、优化土壤 pH 值等措施，抑制重金属在土壤中的迁移累积，从而降低农田生态环境风险。

土壤微生物生物量是推动土壤生物地球化学循环、有机质分解转化的核心载体，对维持土壤生物肥力起着关键性作用。相较于地下水灌溉，再生水灌溉会从微生物多样性、种群结构等方面，对土壤微生物群落造成直接影响。相关农业灌溉研究表明，再生水灌溉能够提升土壤微生物的丰度与种类数量，同时增强土壤微生物整体活性。但另一方面，再生水灌溉带来的土壤重金属累积问题，也会干扰土壤微生物的生理功能，降低土壤微生物活性；除此之外，再生水还可能将外源微生物带入土壤环境，打破本土微生物群落的原有结构平衡。有学者以辣椒为研究对象，通过温室盆栽试验探究不同灌溉模式对土壤性状的影响，研究结果证实，再生水具备农田灌溉水源的利用条件，可应用于农业生产灌溉，但不同灌溉模式均会引发不同程度的微生物污染风险，其中条件致病菌、植物病原微生物的潜在危害需重点防控。该研究结论，能为再生水在辣椒种植灌溉中的安全应用与规模化推广，提供详实的理论依据与数据支撑。

（四）再生水灌溉对农作物的影响

诸多研究结果显示，和常规灌溉水源相比，运用再生水实施农田灌溉，可在一定程度上提高农作物的产量。相关试验研究发现，再生水灌溉下水稻产量明显高于河道水灌溉处理组，同时能优化水稻干物质的积累与分配方式，对水稻种群生长指标起到一定的促进效果，不过对水稻株高的生长无明显作用；该试验同时表明，在中水位调控模式下，农村生活污水二级处理出水灌溉水稻，其生理生长状态达到最优。

在我国北方水资源紧缺地区，再生水农田灌溉的相关理论与实践应用更为普及。有研究以宁夏中卫市沙坡头区为试验区，针对六年生枸杞和番茄开展再生水灌溉试验，确定了适配两种作物的节水灌溉施肥制度，为枸杞、番茄的增产提质提供了理论参考与技术支撑。

但再生水灌溉对作物生长的影响并非全部为正向，当再生水输入的养分含量超过作物生长需求阈值时，反而会对作物正常生

长发育产生抑制作用。

有学者针对再生水灌溉冬小麦开展长期监测试验，对连续 10 年灌溉的土壤取样分析后发现，再生水灌溉对土壤钠离子含量的影响最为显著，加大了土壤次生盐渍化的发生风险；现有研究也证实，长期采用污水灌溉的区域，土壤中镉、锌、汞等重金属污染问题较为突出。因此，需要不断优化污水处理技术，降低再生水中有害物质浓度，减少重金属在作物体内的富集风险，从而降低其对农田土壤、作物生长及人体健康的不利影响。当前，国内外针对再生水农田灌溉的研究，大多集中在作物生理代谢、产量、光合特性及品质等方面，针对再生水灌溉下人体健康潜在风险的系统性评估研究仍较为欠缺。

（五）再生水灌溉对人体健康的影响

人体健康安全隐，是再生水推行农田灌溉模式亟需解决的首要问题。尽管污水处理厂处理后的再生水水质能够达到既定排放标准，但水体中依旧残存大量营养物、盐分、有机污染物及重金属，这类物质既是河湖水体的潜在污染源，也会通过河湖生态补水、农业灌溉等路径，对生态环境与人体健康埋下多重潜在风险。相关研究针对城市再生水中 16 种多环芳烃进行跟踪监测后发现，将再生水用于城市绿化、农田灌溉、景观休闲等场景时，人体直接接触引发的致癌、非致癌风险数值，均低于美国国家科学院提出的安全阈值，整体健康风险处于可接受区间，该研究并未针对其深层次潜在健康风险展开全面评估。另有研究指出，水体中的药物与个人护理品（PPCPs），可经由再生水灌溉、污泥资源化还田等方式，进入土壤—植物生态系统，再通过食物链逐级传递，对人体造成慢性毒性损伤。

再生水灌溉对人体健康的影响途径较为多元，既包含人体皮肤直接接触、空气呼吸吸入带来的直接风险，也涵盖土壤污染、农产品污染、地下水污染引发的间接健康风险。想要有效防控此类风险，需多措并举：一方面优化再生水处理工艺技术，提升水质净化效果；另一方面建立科学合理的灌溉制度，强化全流程水质监管与动态监测，同时选育推广耐盐作物品种、配套土壤改良措施，从多维度降低生态与健康风险。

（六）再生水灌溉对地下水的影响

长期采用再生水开展农田灌溉，会对区域地下水水环境产生一定程度的干扰与影响。再生水中含有的有机质、盐分离子、重金属等污染物，会随着土壤水分下渗过程逐渐迁移至地下含水层，进而改变浅层地下水的原有水质特征。现有研究表明，使用经紫外线消毒、且满足当地农业灌溉水质标准的再生水开展农业灌溉，短期内不会对地下水水质及稻田农业生态系统造成显著负面影响，但仍需开展长期跟踪监测。

当前，针对再生水灌溉区域十年以上的长期定位观测研究极为稀缺，对于灌溉区地下水环境长时序时空演变特征与规律，仍缺乏系统性研究分析，这也成为制约再生水农业安全利用的主要瓶颈。国内现有田间灌溉试验大多周期较短，无法获取连续、长效的观测数据，难以支撑长期环境效应的深入研究。除此之外，再生水中的致病微生物、溶解性有机质，会对浅层地下水产生持续性累积污染，这类长期环境作用机制，也是目前该领域亟需深

入探究的核心课题。

三、存在的问题

再生水作为一种替代水源，在淡水资源短缺情况下探索再生水利用具有重要的现实意义。再生水应用于农田灌溉，不仅能够补足农业用水缺口、缓解区域水资源短缺压力，还可实现水资源循环利用，助力节能减排与低碳发展。在科学管控用量与灌溉方式的前提下，合理施用再生水能够促进作物生长发育，有效提升农产品产出水平，也是现代农业灌溉模式转型升级的主流发展方向。现阶段，再生水农用领域的探索已积累一定理论与实践成果，但现有研究表明，该项灌溉利用技术体系仍有待完善，伴随不可忽视的环境隐患，其规模化落地推广仍需开展更为深入的探究。此外，再生水灌溉对农田土壤、农作物品质及地下水环境的

潜在危害评估，以及如何协调生态风险与利用效益之间的平衡，将成为后续科研工作的核心内容。

为推动再生水灌溉模式在国内稳定长效发展，需聚焦农用关键技术攻关，持续研发低成本、高效率的水处理工艺、应用手段与配套设施。同时，结合不同作物品类的生长特性与田间环境差异，制定差异化灌溉方案，并完善配套的水质管控标准与行业规范，以此为再生水农业资源化利用的可持续推进提供制度保障与技术支持。

当前国内诸多城市已逐步推进再生水农用灌溉的科研探索与工程实践工作，再生水资源在农业领域具备广阔的开发前景与利用空间。在再生水灌溉产业的推进过程中，应结合区域自然条件与发展现状进行统筹规划、因地制宜布局，逐步构建适配我国发展实情的行业规范与技术准则，以此保障再生水资源在农业生产中实现稳定、长效的资源化利用。

参考文献

[1] 张红伟, 崔丙健, 刘春成. 再生水农业灌溉中生物污染物研究进展 [J]. 河南农业科学, 2024, 53(3): 1-16.

[2] 中华人民共和国水利部. 2023 年中国水资源公报 [R]. 2024.

[3] 慈教进. 再生水：再利用还是再污染 [J]. 生态经济, 2014, 30(12): 10-13.

[4] 陈梓豪, 许萍. 国外再生水饮用回用的案例分析与启示 [J]. 中国给水排水, 2021, 37(14): 13-22, 31.

[5] 陈卓, 郝姝然, 白雪, 等. 《水回用导则再生水厂水质管理》国家标准解读 [J]. 给水排水, 2022, 48(2): 157-162.

[6] 关连珠. 普通土壤学 [M]. 北京：中国农业大学出版社, 2007.

[7] 王茜, 郇环, 王红瑞, 等. 再生水利用对土壤和地下水的影响研究综述 [J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 104-113.

[8] 李松旌, 樊向阳, 崔二苹, 等. 再生水灌溉不同滴头布置方式下 PPCPs 在土壤和番茄中的累积 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 187-194.

[9] 卢佳宇, 王辉, 欧阳赞. 低盐再生水灌溉对亚热带红壤水力特性及微观结构的影响 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(18): 103-112.

[10] RAHMAN M M, SHAHRIVAR A A, HAGARE D, et al. Impact of recycled water irrigation on soil salinity and its remediation[J]. Soil Systems, 2022, 6(1): 13-34.