

再生水灌溉引发土壤次生盐渍化的研究进展

赵守强^{1,2}, 宋纪斌^{1,2}, 刘春成¹, 李晓彤^{1,2}, 刘源¹, 黄鹏飞¹, 李中阳^{1,3*}

(1.中国农业科学院 农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002; 2.中国农业科学院 研究生院, 北京 100081; 3.河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站, 河南 商丘 476000)

摘要: 中国水资源供需矛盾突出, 在农业用水上尤为严重, 合理利用再生水灌溉对于缓解我国农业用水紧张具有重要的现实意义。然而, 再生水中含有盐分, 存在引发土壤次生盐渍化的潜在风险。本文以国内外再生水灌溉相关文献为基础, 从灌溉方式、土壤类型、作物种植、灌溉年限及其他处理模式共 5 个方面对再生水灌溉引发土壤次生盐渍化的风险进行分析与总结。研究认为, 长期再生水灌溉下引发土壤次生盐渍化的研究不足, 缺乏交互因子的影响研究, 系统化不强, 改良再生水措施对土壤次生盐渍化研究相对较少。研究建议, 加强开展长期再生水灌溉下灌溉方式、土壤类型、作物种植、农艺措施等方面结合对土壤次生盐渍化影响的大田试验研究; 还要加强改良再生水灌溉对引发土壤次生盐渍化风险调控等方面的研究。

关键词: 再生水; 灌溉; 次生盐渍化; 影响因素

中图分类号: S273.5

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023065

OSID: 

赵守强, 宋纪斌, 刘春成, 等. 再生水灌溉引发土壤次生盐渍化的研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(2): 47-53.

ZHAO Shouqiang, SONG Jibin, LIU Chuncheng, et al. A review on secondary soil salinization caused by reclaimed water irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(2): 47-53.

0 引言

【研究意义】我国水资源紧缺, 人均水资源占有量仅为世界平均水平的 1/4^[1], 预计到 2030 年全国缺水量将达 130 亿 m³^[2]。我国还是农业生产大国, 农业在我国经济发展中占有十分重要的地位, 而灌溉对于农业的生产发展起到重要作用, 目前, 农业用水已达全国总用水量的 60%以上^[3]。水资源紧缺已成为我国农业生产亟待解决的重要问题之一, 而水资源的开发利用几乎也达到了临界状态, 利用非常规水资源进行灌溉将成为未来发展的趋势。再生水作为非常规水资源的一种, 是指城镇污水、工业废水以及截留雨水等经过处理后, 能够再次使用的水源^[4], 利用再生水灌溉, 既可以减少污水直灌对土壤环境的污染, 又能促进农业生产发展, 对缓解我国水资源紧缺具有重要意义。【研究进展】再生水农业回用存在着污染农业生态环境的潜在风险, 目前, 研究主要集中在土壤重金

属超标^[5-6]、病原微生物污染^[7]、新型有机污染物^[8-9]等方面, 而对土壤次生盐渍化问题虽有研究, 但关注度不高。由于处理成本原因, 工厂在处理过程中往往会降低盐分的去除率, 导致出厂后再生水中含有较高盐分, 不合理使用或长期使用再生水灌溉具有引发土壤次生盐渍化的风险。据调查, 北京某污水处理厂二级处理再生水含盐量约为 623 mg/L, 虽未超过农田灌溉水质全盐量限值 (非盐渍土为 1 000 mg/L), 但达到了当地地下水含盐量的 2 倍左右^[10], 必须对此引起足够的重视。再生水灌溉存在较高土壤次生盐渍化风险, 已被频频报道^[11-16], Qian 等^[17]研究发现, 利用再生水 ($EC=840 \mu S/cm$) 灌溉草地 4~5 a 后电导率 (Electrical Conductivity, EC) 显著增加, 与地表水灌溉土壤 ($EC=1 500 \mu S/cm$) 相比, 再生水灌溉土壤 EC 为 4 300 $\mu S/cm$, 增加了 187%。但也有学者认为, 再生水灌溉对土壤次生盐渍化影响较小^[18-19]。Sparling 等^[20]用三级处理再生水灌溉 5 a 后, 土壤盐分的累积并不明显。郑汝等^[21]对有 7 a 再生水 ($pH \approx 6.5 \sim 8.5$) 灌溉历史的草坪土壤分析, 再生水灌溉下各土层土壤 pH 与对照组之间差异不显著, 且土壤 pH 均低于 8.5。【切入点】再生水灌溉引发土壤次生盐渍化问题还存在争议, 再生水灌溉方式、灌溉土壤类型、作物种植种类、灌溉时间等差异可能会伴有不同程度的盐分累积, 造成不同风险的土壤次生盐渍化问题。【拟解决的关键问题】基于此, 本文从不同灌溉方式、

收稿日期: 2023-02-25 修回日期: 2023-11-13

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1700900); 中国农业科学院创新工程经费; 中国农业科学院基本科研业务费专项 (FIRI2022-14, FIRI2022-04, Y2022LM29); 中国农业科学院农科英才特殊支持计划 (NKYCQN-2021-028)

作者简介: 赵守强 (1997-), 男。硕士研究生, 主要从事非常规水资源安全利用研究。E-mail: zsq1997001@163.com

通信作者: 李中阳 (1980-), 男。研究员, 主要从事农业水资源与水环境研究。E-mail: lizhongyang1980@163.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

土壤类型、作物种植、灌溉年限及其他处理模式共 5 个方面分析再生水灌溉对土壤次生盐渍化的影响特征,旨在为我国再生水安全利用、土壤盐渍化预防与治理提供一定理论支撑。

1 再生水农业回用概况

不同来源及不同处理工艺出厂的再生水水质差异大,且不同用途的再生水对水质的要求也不相同。所以,笼统地以“再生水”表述,在进行再生水的优化配置、农业利用等方面会产生较大分歧,尤其是在再生水农业安全利用试验研究方面,可能会得出完全不同或相反的结论。基于此,我国在对不同用途再生水水质的要求上,出台了不同再生水水质对应不同用途的标准规范^[22],做到由“以用定质”转变为“以质定用”,极大解决了日益增长的再生水利用需求。考虑到再生水水质及处理工艺,再生水主要分为 A、B、C 3 个等级,在此基础上又细化为 10 个小级别^[22]。A 级再生水可用于 B、C 级再生水所对应的用途, B 级再生水可用于 C 级再生水所对应的用途。对于农业灌溉,主要是利用 B、C 级再生水,但对 B、C 级再生水小级别的不严格区分,造成了再生水农业回用的不当利用,甚至影响试验研究结果。再生水用于农业灌溉,水中含有的重金属离子、无机盐、病原微生物、新型有机污染物等带来的风险不容忽视,会涉及作物生长、食品安全、土壤及地下水等一系列环境问题。我国《农田灌溉水质标准》GB5084-2021 对不同作物类型制定了不同的灌溉水质标准,规定了 pH、全盐量、氯化物、硫化物、重金属、有机物、微生物等 16 项水质基本控制指标^[22],例如, pH 的要求范围为 5.5~8.5;非盐碱地区,总溶解性固体物质小于 1 000 mg/L,盐碱地区小于 2 000 mg/L,标准的出台为再生水农业回用提供了依据。在土壤灌溉水质方面,研究表明,一定范围内,水溶液含盐量与电导率呈明显的正相关关系^[23],因此,电导率可作为含盐量的反映指标。美国盐土实验室将电导率作为灌溉用水产生盐分危害的指标之一, EC 处于 100~250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 属于低盐再生水,高于 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 属于高盐再生水^[24]。出厂水质含盐量不同,直接导致了灌溉过程中不同风险程度的土壤次生盐渍化问题,苗战霞等^[25]采用盆栽试验研究玉米根际土壤特性,发现土壤 pH、EC 与灌溉再生水 pH、EC 呈显著正相关(pH、EC 测定土水比分别为 1:2.5、1:5);莫宇等^[26]研究发现,试验地 pH、EC 随再生水灌溉都有一定增加,耕层土壤 pH 由本底值 7.69 增加到了 8.3 左右(测定土水比为 1:5);而 Wu 等^[27]利用湖南省某污水处理厂二级再生水(EC: 1 659.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$)灌溉红壤及潮土 1 a 后发现,再生水

灌溉对不同土壤类型 EC (测定土水比为 1:5) 的变化不同,灌溉红壤 EC 由 46.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 增加到了 101.07 $\mu\text{S}/\text{cm}$,而灌溉潮土 EC 由 157.05 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 下降到了 123.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

2 再生水灌溉模式对土壤次生盐渍化的影响

滴灌是再生水灌溉利用的主要方式,对再生水滴灌下开展的研究相对较多^[28-31]。滴灌能控制土壤次生盐渍化,其主要原因是滴灌属于节水灌溉,灌水量少,水分蒸发后产生的盐碱物质较常规灌溉要少得多;滴灌还会在作物根系附近形成一定的盐分淡化区,有利于减轻作物盐分胁迫。许多学者还对再生水连续灌溉、再生水-清水交替灌溉、再生水-清水混合灌溉等灌溉模式展开了研究,但结果存在一定分歧。唐立军等^[32]、左海涛等^[33]、王齐^[34]均认为,再生水-清水交替灌溉比连续再生水单一灌溉,土壤产生盐渍化的几率小。再生水交替灌溉下,高盐分再生水在低盐分清水的淋洗下,盐分下移明显,降低了土壤耕层的含盐量。而薛彦东等^[35]却发现,再生水-清水交替灌溉土壤表层含盐量大于再生水单一灌溉。结果出现差异的原因可能是不同种植作物(草地与蔬菜地)导致灌溉水与土壤盐离子发生作用不同。在南方红壤地区也发现,再生水与蒸馏水交替灌溉下,土壤的碱化度要高于同条件下再生水单一灌溉,表现出一定弱碱性,但均在 10% 以下^[36],未超过碱化度阈值^[37]。说明再生水交替灌溉对土壤次生盐渍化的影响程度还与作物种植、土壤特性等有很大关系。对于再生水混合灌溉要注意再生水的混合比例,裴亮等^[38]通过再生水与地下水混合滴灌大田试验发现,再生水滴灌条件下土壤 pH 与对照无显著差异,但再生水滴灌增加了表层土壤 EC。刘春成等^[39]利用盆栽试验探究了再生水与不同比例微咸水混合灌溉对土壤盐分的影响,发现,混合溶液中微咸水占比越高,土壤含盐量越高,这主要是由于试验所选微咸水相比再生水含有更高的盐分。另外,优化再生水灌溉时期有利于降低土壤次生盐渍化风险,薛彦东等^[35]通过田间试验发现,作物的开花坐果期用清水灌溉,其他生育期采用再生水灌溉,灌溉后的土壤表层含盐量均低于再生水与清水交替灌溉、再生水灌溉、清水灌溉,说明重要时期灌清水能够有效控制盐分累积,在再生水灌溉的实际应用中可以作为一种有益的尝试。吕斯丹等^[40]通过 ENVIRO-GRO 模型模拟研究了灌溉措施对土壤水盐动态变化及盐分累积的影响,发现低灌溉频率下土壤中盐分的累积有所减少,这与 Shalhevet^[41]的研究结果相似。另外,灌水量也是影响土壤次生盐渍化发生的重要因素。韩洋等^[42]通过土柱模拟试验发现,0~20 cm 土层含盐量,

充分灌溉显著低于非充分灌溉; 20~60 cm 土层含盐量, 充分灌溉则显著高于非充分灌溉。

再生水灌溉主要以滴灌为主, 但土壤次生盐渍化问题也不可忽视。再生水单一灌溉、再生水交替灌溉、再生水混合灌溉的结论存在差异, 这与研究者的研究条件有很大关系。针对再生水灌溉引发土壤次生盐渍化问题, 大部分学者认为, 再生水交替灌溉对土壤盐分的淋洗效果显著, 降低了土壤次生盐渍化的潜在风险, 但由于土壤类型及性质的多样性、交替灌溉水质差异、灌水量的不同、种植作物的差异等也会出现再生水交替灌溉增加土壤次生盐渍化风险的现象。

3 再生水灌溉对不同类型土壤次生盐渍化的影响

再生水中含有较多的颗粒悬浮物质, 长期灌溉下可能会改变土壤结构, 导致土壤水力性能降低, 盐分淋洗效果差, 易引发土壤次生盐渍化^[43]。杨林林等^[44]发现, 随着再生水灌溉次数的增加, 土壤水分扩散率和饱和导水率表现为先减小后增大, 但总体表现为降低作用。郑顺安等^[45]认为, 再生水灌溉促进了土壤耕层大于 2 mm 的大粒径团聚体向小粒径转化, 有利于增加土壤的黏粒量。在土壤体积质量方面, 夏江宝等^[46]认为, 再生水灌溉降低了土壤体积质量, 增加了土壤孔隙度。但也有研究^[47]表明, 再生水灌溉会增加土壤的分散程度, 增加土壤的体积质量, 降低土壤的孔隙度。结果产生差异的原因可能是由于灌溉水质的不同。在再生水灌溉适宜的土壤类型方面, 已有很多研究成果。吕斯丹等^[48]运用 ENVIRO-GRO 模型探究了不同土壤质地对再生水灌溉水盐运移的影响, 经过 5 a 模拟, 最终达到平衡后发现, 100 cm 深度土层中的 EC, 表现为黏壤土>壤土>砂壤土, 壤土、黏壤土土壤出现了轻微盐分累积。说明砂性土壤更适合再生水灌溉, 黏性土壤不利于盐分的淋洗, 更容易造成土壤次生盐渍化问题。但 Gao 等^[49]通过 Meta 分析却发现, 土壤质地越砂质, 含盐量越高。说明土壤含盐量高低, 不能仅根据砂性土壤还是黏性土壤简单判断。还有学者^[50]认为, 再生水灌溉时间越长对于含有 HCO₃⁻较多且以粉粒为主的土壤的入渗等理化性质影响更为不利。商放泽等^[51]通过研究再生水灌溉对深层包气带土壤盐分迁移分布、累积的影响, 结果表明, 再生水中可溶性 K⁺和 Cl⁻的土层分布不同, K⁺主要在 0~450 cm 土层波动, 而 Cl⁻主要分布在 0~250 cm 土层, 其中, 壤土土层有阻碍盐分离子向下层土壤迁移的趋势。此外, 王辉等^[52]利用土柱模拟试验发现, 再生水灌溉改变了红壤的土壤结构特性, 再生水中的盐分离子与红壤持水性具有显著相关关系。潘能等^[53]通过研

究再生水长期灌溉下城区公园绿地与城郊农田表层土壤盐分的累积情况, 发现再生水灌溉下城市绿地和农田土壤 EC 和钠吸附比 (Sodium Adsorption Ration, SAR) 均显著高于对照区, 公园与农田中再生水灌溉土壤 EC 较对照分别升高了 12.4% 和 84.2%; 土壤 SAR 分别升高了 64.5% 和 145.8%, 差异在农田中更加显著。

目前, 再生水及高矿化度非常规水利用主要集中在北方干旱、半干旱地区, 对南方偏酸性的红壤地区研究较少, 且灌溉土壤性质主要为砂性土以及略偏碱性的壤土^[54-55]。干旱、半干旱地区土壤蒸发强度大, 盐分累积明显, 再生水不合理利用容易产生土壤次生盐渍化的风险。就当前研究结果来看, 再生水灌溉相对适合在偏砂性土壤上进行, 有利于盐分的淋洗, 对于偏黏性的土壤要考虑通过其他灌溉措施来降低发生土壤次生盐渍化的风险, 或施加土壤改良剂等降低土壤盐分, 从根源上减少土壤次生盐渍化出现的可能。

4 不同种植模式下再生水灌溉对土壤次生盐渍化的影响

根据作物抗盐性的不同, 作物可分为盐生作物和非盐生作物。对盐生作物而言, 根据其抗盐特性, 又可分为聚盐性作物、泌盐性作物、抗盐性作物。聚盐性作物对盐分的适应性非常强, 可以将土壤中大量可溶性盐分吸收、聚集在作物体内, 常见作物有碱蓬、盐角草等^[56], 对于盐碱地的改良具有重要作用。泌盐性作物也能从土壤中吸收过多的盐分, 但并不会聚集在作物体内, 主要由茎、叶表面的盐腺细胞将吸收的盐分排出体外, 典型作物如大米草、柽柳等^[57]。而抗盐性作物体内的大量可溶性有机物使得细胞的渗透压非常高, 对盐分具有明显的抵抗作用, 可以生长在盐碱土上, 常见作物有獐茅、碱菀等^[57]。某些作物在再生水灌溉上是具有明显的种植优势的, 李晓娜等^[47]研究了再生水灌溉 6 种草坪草对土壤性质的影响, 结果发现, 6 种草坪草的根系对盐分的吸收、累积不同, 黑麦草和结缕草能够对土壤盐分进行吸收, 从而减少了再生水灌溉引发土壤次生盐渍化的风险, 比较适宜进行再生水灌溉。郑伟等^[58]通过田间小区试验研究了再生水灌溉对高羊茅和早熟禾两种不同类型土壤次生盐渍化的影响, 结果表明, 种植高羊茅耕层土壤要比早熟禾引发土壤盐渍化的风险小, 但增加了深层土壤的盐分累积, 原因可能是不同草种根系土壤的阴阳离子比例不同, 高羊茅根系离子比例更为合理。

5 再生水灌溉年限对土壤次生盐渍化的影响

短期再生水灌溉对土壤次生盐渍化影响较小, 但长期再生水灌溉容易产生土壤次生盐渍化的风险问

题^[59]。郑伟等^[58]通过 2 a 再生水灌溉草坪试验发现, 2 种草坪土壤虽没有达到盐害水平, 但均表现出一定的盐分累积。郭逍宇^[60]通过对 4 a 再生水灌溉历史的草坪灌区和自来水草坪灌区进行对比研究, 发现再生水灌溉土壤盐分有明显的累积, 尤其是 Na^+ 、 Cl^- 。高军等^[61]通过对 5~6 a 再生水灌溉土壤进行分析并对相似条件的井灌区土壤, 结果表明, 再生水灌溉耕层土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 等质量分数显著增加, 且再生水灌溉土壤 SAR 较井灌区增加明显, 再生水灌溉增加了耕层土壤的盐分累积。尹剑^[62]通过田间试验与模型模拟对再生水灌溉 10 a 的土壤进行分析, 也发现再生水灌溉土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 等含量显著增加, 其中, 对 Na^+ 的影响程度最大, 再生水灌溉相对井灌大幅提高了土壤 SAR, 盐分累积效应显著。通过不同灌溉年限可以发现, 长期再生水灌溉下易引发土壤次生盐渍化, 随着灌溉年限的延长, 影响效果更加明显。但也有学者认为, 再生水灌溉对土壤次生盐渍化的影响不大且再生水灌溉年限对土壤次生盐渍化累积效应没有显著影响, 侯贤贵等^[63]通过田间再生水灌溉试验发现, 再生水灌溉 1 a 以后, 土壤 pH、EC 绝大部分都有所下降, 土壤盐分不但没有累积, 反而出现了降低趋势。Sparling 等^[20]研究表明, 用三级处理水灌溉 5 a 后土壤盐分累积不明显。郑汐等^[21]对再生水 (pH $\approx$ 6.5~8.5) 灌溉 7 a 的草坪土壤分析发现, 再生水灌溉下, 各土层土壤 pH (测定土水比为 1:2.5) 与对照处理差异均不显著, 且土壤 pH 均小于 8.5。

由于再生水处理工艺的不同, 灌溉过程中给土壤带来的盐分也不一致。具体再生水灌溉年限对土壤次生盐渍化风险问题, 应综合考量再生水本身含盐量、土壤性质是否适合再生水灌溉、再生水灌溉方式、排水设施是否健全以及种植作物种类等多种因素的影响。

6 改良再生水灌溉对土壤次生盐渍化的影响

通过对再生水进行改良处理, 使再生水在灌溉过程中对土壤性质及作物生长产生一定影响, 可能会对降低土壤次生盐渍化及作物盐分胁迫等具有一定的促进作用。根据常规水源的改良方法, 再生水改良处理也具备相应的措施, 如磁化、电解、加臭氧等。

刘春成等^[64]发现, 中强度 (3 000、5 000 Gs) 磁化再生水和磁化清水灌溉对土壤盐分具有明显的累积作用。而王全九等^[65]认为, 磁场强度是影响磁化自来水入渗和土壤水盐分布的重要因素, 土壤脱盐率随磁场强度表现为先上升后降低, 4 000 Gs 左右脱盐效果最好。结果不一致的原因可能是由于不同试验环境 (玉米盆栽、土柱模拟) 造成的。其他的一些研究表明, 磁化 (600 Gs) 地下水灌溉增加了土壤孔隙, 降

低了土壤体积质量, 改善了土壤特性^[66]; 磁化 (3 000 Gs) 自来水灌溉加速了水、盐向下层土壤的运移, 减少了耕层土壤含盐量^[67]; 磁化 (磁化器 A400p) 地下水灌溉, 显著降低了盐渍化土壤 0~60 cm 含盐量^[68], 说明磁化地下水、自来水灌溉会使土壤中盐分离子进行重新分布, 具有平衡盐分的作用。目前, 对电解水、臭氧水的研究多注重作物生长及病虫害防治等方面, 缺乏对土壤性质及围绕土壤-植物-大气连续体 (Soil-Plant-Atmosphere-Continuum, SPAC) 展开研究。改良水用于农业灌溉, 主要针对常规水源的改良, 缺乏对再生水的改良。

7 结论与建议

再生水作为灌溉水源对于缓解我国水资源短缺具有重要意义, 目前, 关于再生水灌溉对土壤次生盐渍化的影响多数为短期室内模拟试验, 长期定位条件下再生水灌溉对土壤次生盐渍化的影响尚无定论, 需要进一步深入探究。多数研究表明, 长期再生水灌溉可能会增加土壤次生盐渍化风险, 并且灌溉水质、灌溉方式、土壤及作物类型、灌溉年限等因素都会影响土壤次生盐渍化程度, 其中, 再生水中含盐量过高是导致灌溉过程土壤次生盐渍化的主要因素, 因此, 再生水的功能性改良 (磁化、电解、加臭氧) 可能是减缓再生水灌溉引发土壤次生盐渍化风险的解决方案。

针对以上问题, 围绕再生水灌溉可能引发土壤次生盐渍化的风险, 建议今后加强以下 4 个方面的研究: ①严格控制灌溉水质指标, 加强对再生水中盐分的去除, 按照“以用定质”、“以质定用”的标准进行灌溉管理, 从源头上减少再生水中盐分在土壤中的累积。②再生水中含盐量是影响土壤次生盐渍化的主要因素, 但多种影响因素之间可能会发生协同或拮抗作用, 因此, 有必要对再生水灌溉过程中导致土壤次生盐渍化的各因素之间的交互作用进行深入研究, 明确相同灌溉水质下灌溉方式、土壤类型及农艺措施等交互作用对土壤次生盐渍化风险的影响。③寻求有效的再生水改良措施, 并探究改良后的再生水灌溉对土壤次生盐渍化的影响及内在机制。④开展再生水灌溉条件下的长期定位试验, 探究长期的再生水灌溉对土壤次生盐渍化的影响, 并与大气、土壤、作物、地下水等多学科进行交叉, 开展系统性研究工作。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 胡庆芳, 陈秀敏, 高娟, 等. 水平衡与国土空间协调发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 63-74.
HU Qingfang, CHEN Xiumin, GAO Juan, et al. Coordinated development between water balance and territory space[J]. Strategic

- Study of CAE, 2022, 24(5): 63-74.
- [2] 刘昌明, 陈志恺. 中国水资源现状评价和供需发展趋势分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
 - [3] 水利部水资源管理司. 2021 年度《中国水资源公报》发布[J]. 水资源开发与管理, 2022, 8(7): 85.
 - [4] 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.
LU Jiayu, WANG Hui, OUYANG Zan. Effects of low-salinity reclaimed wastewater irrigation on the hydraulic properties and microstructure of subtropical red soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(18): 103-112.
 - [5] 刘梦娟, 王雪梅, 季宏兵. 再生水农业灌溉对重金属累积的研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(S2): 77-80.
LIU Mengjuan, WANG Xuemei, JI Hongbing. Research progress of heavy metal accumulation in reclaimed water agricultural irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(S2): 77-80.
 - [6] 裴亮, 廖晓勇. 再生水滴灌白菜和萝卜生育期内土壤重金属污染试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(S2): 119-122.
PEI Liang, LIAO Xiaoyong. Experimental study on soil heavy metal pollution of Chinese cabbage and radish during the growth period by drip irrigation with reclaimed water[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(S2): 119-122.
 - [7] 崔丙健, 高峰, 胡超, 等. 不同再生水灌溉方式对土壤-辣椒系统中细菌群落多样性及病原菌丰度的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(11): 5 151-5 163.
CUI Bingjian, GAO Feng, HU Chao, et al. Effect of different reclaimed water irrigation methods on bacterial community diversity and pathogen abundance in the soil-pepper ecosystem[J]. Environmental Science, 2019, 40(11): 5 151-5 163.
 - [8] 王龙, 徐雄, 朱丹, 等. 城市再生水厂出水中典型有机污染物的赋存情况及其生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2021, 41(5): 1 910-1 919.
WANG Long, XU Xiong, ZHU Dan, et al. The occurrence and ecological risk assessment of typical organic pollutants in the effluents of urban reclaimed water plants[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(5): 1 910-1 919.
 - [9] 任杰, 马伟芳. 再生水农田灌溉过程中痕量新型有机污染物对土壤-地下的影响及污染阻控技术研究进展[C]// 中国环境科学学会环境工程分会. 中国环境科学学会 2021 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场论文集(一). 北京林业大学环境科学与工程学院, 2021: 6.
 - [10] 刘洪禄, 吴文勇, 郝仲勇, 等. 再生水灌溉水质安全性分析与评价研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(3): 9-12.
LIU Honglu, WU Wenyong, HAO Zhongyong, et al. Analysis and evaluation on water quality safety of reclaimed wastewater for farm irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(3): 9-12.
 - [11] SHAH S H H, WANG J Y, HAO X Y, et al. Modeling the effect of wastewater irrigation on soil salinity using a SALT-DNDC model[J]. Land Degradation & Development, 2022, 33(1): 55-67.
 - [12] BALES C, KOVALSKY P, FLETCHER J, et al. Low cost desalination of brackish groundwaters by Capacitive Deionization (CDI)—Implications for irrigated agriculture[J]. Desalination, 2019, 453: 37-53.
 - [13] BOND W J. Effluent irrigation: An environmental challenge for soil science[J]. Soil Research, 1998, 36(4): 543.
 - [14] AL-LAHHAM O, EL ASSI N M, FAYYAD M. Impact of treated wastewater irrigation on quality attributes and contamination of tomato fruit[J]. Agricultural Water Management, 2003, 61(1): 51-62.
 - [15] 李平, 齐学斌, 亢连强, 等. 不同潜埋深再生水灌溉夏玉米土壤氮素运移研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1 384-1 388.
LI Ping, QI Xuebin, KANG Lianqiang, et al. Soil nitrogen transport and transformation of reclaimed water irrigated summer-maize under different groundwater levels[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(6): 1 384-1 388.
 - [16] 刘源, 崔二苹, 李中阳, 等. 再生水和养殖废水灌溉下土壤-植物系统养分和重金属迁移特征[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(2): 45-51.
LIU Yuan, CUI Erping, LI Zhongyang, et al. Differences of nutrient and heavy metals migration in soil-plant system irrigated by reclaimed water and livestock wastewater[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(2): 45-51.
 - [17] QIAN Y L, MECHAM B. Long-term effects of recycled wastewater irrigation on soil chemical properties on golf course fairways[J]. Agronomy Journal, 2005, 97(3): 717-721.
 - [18] STEVENS D P, MCLAUGHLIN M J, SMART M K. Effects of long-term irrigation with reclaimed water on soils of the Northern Adelaide Plains, South Australia[J]. Soil Research, 2003, 41(5): 933-948.
 - [19] CHEN W P, LU S D, PAN N, et al. Impact of reclaimed water irrigation on soil health in urban green areas[J]. Chemosphere, 2015, 119: 654-661.
 - [20] SPARLING G P, WILLIAMSON J C, MAGESAN G N, et al. Hydraulic conductivity in soils irrigated with wastewaters of differing strengths: Field and laboratory studies[J]. Soil Research, 1999, 37(2): 391-402.
 - [21] 郑汐, 王齐, 孙吉雄. 中水灌溉对草坪绿地土壤理化性状及肥力的影响[J]. 草原与草坪, 2011, 31(2): 61-64.
ZHENG Xi, WANG Qi, SUN Jixiong. Effects of greenbelt irrigation with reclaimed water on soil physicochemical properties and fertility[J]. Grassland and Turf, 2011, 31(2): 61-64.
 - [22] 陈卓, 胡威, 巫寅虎, 等. 《水回用导则 再生水分级》国家标准解读[J]. 给水排水, 2022, 48(2): 152-156.
CHEN Zhuo, HU Wei, WU Yinhu, et al. Interpretation of the Chinese national standard of Water reuse guidelines: Reclaimed water classification[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(2): 152-156.
 - [23] 吴月茹, 王维真, 王海兵, 等. 采用新电导率指标分析土壤盐分变化规律[J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 869-873.
WU Yueru, WANG Weizhen, WANG Haibing, et al. Analysis of variation of soil salt with new electric conductivity index[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(4): 869-873.
 - [24] ALOBAIDY A H M J, AL-SAMERAIY M A, KADHEM A J, et al. Evaluation of treated municipal wastewater quality for irrigation[J]. Journal of Environmental Protection, 2010, 1(3): 216-225.
 - [25] 苗战霞, 黄占斌, 侯利伟, 等. 再生水灌溉对玉米根际土壤特性和微生物的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1): 62-66.
MIAO Zhanxia, HUANG Zhanbin, HOU Liwei, et al. The effect of irrigation with reclaimed water on soil peculiarity and microorganism quantity of maize root zone[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(1): 62-66.
 - [26] 莫宇, 高峰, 王宇, 等. 不同施氮条件下再生水灌溉对土壤理化性质及脲酶活性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(1): 95-100.
MO Yu, GAO Feng, WANG Yu, et al. Changes in soil physicochemical properties and urease activity as affected by reclaimed water irrigation and nitrogen fertilization[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(1): 95-100.
 - [27] WU Y, WANG H, ZHU J B. Influence of reclaimed water quality on infiltration characteristics of typical subtropical zone soils: A case study in South China[J]. Sustainability, 2022, 14(8): 4 390.
 - [28] 董聪慧, 韩启彪, 刘伟宁, 等. 再生水滴灌条件下灌水器生物堵塞的研究概况[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(1): 106-111.
DONG Conghui, HAN Qibiao, LIU Weining, et al. Biological clogging of emitters in drip irrigation using reclaimed water: A review[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(1): 106-111.
 - [29] 郝凯越, 李松旌, 陈相宇, 等. 再生水滴灌研究现状与发展概述[J]. 节水灌溉, 2020(10): 85-90.
HAO Kaiyue, LI Songjing, CHEN Xiangyu, et al. Overview of research status and development of reclaimed water drip irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2020(10): 85-90.
 - [30] 王璐璐, 田军仓, 徐桂红, 等. 再生水滴灌对黄化叶绿素、光合、产量及品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(5): 18-25.
WANG Lulu, TIAN Juncang, XU Guihong, et al. The effects of drip irrigation with reclaimed wastewater on chlorophyll, photosynthesis, yield and quality of cucumber[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(5): 18-25.
 - [31] 李松旌, 樊向阳, 崔二苹, 等. 滴头流量对再生水灌溉作物根区典型微生物群落结构的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(12): 26-35.
LI Songjing, FAN Xiangyang, CUI Erping, et al. Effects of dripping

- rate with reclaimed water on typical microbial community structure in the root zone soil of tomato[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(12): 26-35.
- [32] 唐立军, 李东升, 赵晓松. 再生水灌溉草坪对土壤主要性状的影响[J]. *吉林农业大学学报*, 2008, 30(5): 721-724.
TANG Lijun, LI Dongsheng, ZHAO Xiaosong. Effects of reclaimed water irrigation on soil properties of turf-grass[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2008, 30(5): 721-724.
- [33] 左海涛, 武菊英, 温海峰, 等. 再生水灌溉对草坪草生长和土壤的影响[J]. *核农学报*, 2005, 19(6): 474-478.
ZUO Haitao, WU Juying, WEN Haifeng, et al. Influence of reclaimed water irrigation on turfgrass growth and soil[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2005, 19(6): 474-478.
- [34] 王齐. 中水灌溉对城市绿地生态系统的影响及安全性评价[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2010.
WANG Qi. Effect of reclaimed water irrigation on urban greenbelt ecological system and safety evaluation[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2010.
- [35] 薛彦东, 杨培岭, 任树梅, 等. 再生水灌溉对土壤主要盐分离子分布特征及盐碱化的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 234-240.
XUE Yandong, YANG Peiling, REN Shumei, et al. Effects of treated wastewater irrigation strategies on the distribution of salt contents in soils cultivated with tomato and cucumber[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2): 234-240.
- [36] 王辉, 罗丽澎, 刘常, 等. 再生水水质和灌溉模式对红壤阳离子交换性能的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2022, 40(1): 80-86.
WANG Hui, LUO Lipeng, LIU Chang, et al. Effect of reclaimed water quality and irrigation modes on cation exchange performances of red soil[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2022, 40(1): 80-86.
- [37] 万洪富, 俞仁培, 王遵亲. 黄淮海平原土壤碱化分级的初步研究[J]. *土壤学报*, 1983, 20(2): 129-139.
WAN Hongfu, YU Renpei, WANG Zunqin. A primary study on subdivision of degree of soil alkalization in Huang-Huai-Hai plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1983, 20(2): 129-139.
- [38] 裴亮, 张体彬, 陈永莲, 等. 农村生活污水再生水滴灌对根际土壤特性的影响研究[J]. *灌溉排水学报*, 2012, 31(4): 42-45.
PEI Liang, ZHANG Tibin, CHEN Yonglian, et al. Influence of reclaimed water drip irrigation with rural domestic sewage on soil peculiarity in rhizosphere[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(4): 42-45.
- [39] 刘春成, 崔丙健, 胡超, 等. 微咸水与再生水混灌对土壤特性的影响与灌溉效应评估[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(1): 255-262.
LIU Chuncheng, CUI Bingjian, HU Chao, et al. Effect of mixed irrigation of brackish water and reclaimed water on soil properties and irrigation effect evaluation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(1): 255-262.
- [40] 吕斯丹, 陈卫平, 王美娥. 模型模拟再生水灌溉对土壤水盐运动的影响[J]. *环境科学*, 2012, 33(12): 4 100-4 107.
LYU Sidan, CHEN Weiping, WANG Meie. Simulation of effect of irrigation with reclaimed water on soil water-salt movement by ENVIRO-GRO model[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(12): 4 100-4 107.
- [41] SHALHEVET J. Using water of marginal quality for crop production: Major issues[J]. *Agricultural Water Management*, 1994, 25(3): 233-269.
- [42] 韩洋, 乔冬梅, 齐学斌, 等. 再生水灌溉水平对土壤盐分累积与细菌群落组成的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(4): 106-117.
HAN Yang, QIAO Dongmei, QI Xuebin, et al. Effects of reclaimed water irrigation levels on soil salinity and composition of soil bacteria community[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(4): 106-117.
- [43] LADO M, BEN-HUR M. Effects of irrigation with different effluents on saturated hydraulic conductivity of arid and semiarid soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(1): 23-32.
- [44] 杨林林, 杨培岭, 任树梅, 等. 再生水灌溉对土壤理化性质影响的试验研究[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(2): 82-85.
YANG Linlin, YANG Peiling, REN Shumei, et al. Experimental studies on effects of reclaimed water irrigation on soil physicochemical properties[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2): 82-85.
- [45] 郑顺安, 陈春, 郑向群, 等. 再生水灌溉对土壤团聚体中有机碳、氮和磷的形态及分布的影响[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(11): 2 053-2 059.
ZHENG Shun'an, CHEN Chun, ZHENG Xiangqun, et al. Effect of reclaimed water irrigation on the distribution of organic carbon, nitrogen and phosphorus in different size of aggregates in sandy purple soil[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(11): 2 053-2 059.
- [46] 夏江宝, 谢文军, 陆兆华, 等. 再生水浇灌方式对芦苇地土壤水文生态特性的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(15): 4 137-4 143.
XIA Jiangbao, XIE Wenjun, LU Zhaohua, et al. Effects of different irrigation modes with reclaimed water on soil eco-hydrological characteristics of reed land[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(15): 4 137-4 143.
- [47] 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.
LI Xiaona, WU Juying, XU Biao, et al. Influence of reclaimed water irrigation on soil quality on lawn soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3): 245-249.
- [48] 吕斯丹, 陈卫平, 王美娥. 模型模拟土壤性质和植被种类对再生水灌溉水盐运移的影响[J]. *环境科学*, 2012, 33(12): 4 108-4 114.
LYU Sidan, CHEN Weiping, WANG Meie. Simulation of effects of soil properties and plants on soil water-salt movement with reclaimed water irrigation by ENVIRO-GRO model[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(12): 4108-4114.
- [49] GAO Y, SHAO G C, WU S Q, et al. Changes in soil salinity under treated wastewater irrigation: A meta-analysis[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 255: 106986.
- [50] 宝哲, 杨培岭, 任树梅, 等. 模拟再生水灌溉下污灌土壤中盐分离子交换运移的试验研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(1): 101-106.
BAO Zhe, YANG Peiling, REN Shumei, et al. Experimental research on soil salinity and ion exchange and transport in sewage irrigated soil under simulated recycled water irrigation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1): 101-106.
- [51] 商放泽, 杨培岭, 任树梅. 再生水灌溉对深层包气带土壤盐分离子的影响[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(7): 98-106, 97.
SHANG Fangze, YANG Peiling, REN Shumei. Effects of reclaimed water irrigation on soil salinity in deep vadose zone[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(7): 98-106, 97.
- [52] 王辉, 黄正忠, 谭帅, 等. 再生水灌溉对红壤水力特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(17): 120-127.
WANG Hui, HUANG Zhengzhong, TAN Shuai, et al. Effects of irrigation with reclaimed water on hydraulic characteristics of red soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(17): 120-127.
- [53] 潘能, 陈卫平, 焦文涛, 等. 绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析[J]. *环境科学*, 2012, 33(12): 4 088-4 093.
PAN Neng, CHEN Weiping, JIAO Wentao, et al. Soil salinity in Greenland irrigated with reclaimed water and risk assessment[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(12): 4 088-4 093.
- [54] 刘静妍, 毕远杰, 孙西欢, 等. 交替供水条件下土壤入渗特性与水盐分布特征研究[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(4): 55-60.
LIU Jingyan, BI Yuanjie, SUN Xihuan, et al. Characteristics of soil infiltration and water-salt distribution under alternate irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(4): 55-60.
- [55] 张珂萌, 牛文全, 汪有科, 等. 微咸水微润灌溉下土壤水盐运移特性研究[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(1): 175-182.
ZHANG Kemeng, NIU Wenquan, WANG Youke, et al. Characteristics of water and salt movement in soil under moistube-irrigation with brackish water[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(1): 175-182.
- [56] 王宁, 赵振勇, 张心怡, 等. 几种藜科盐生植物吸盐能力及生态学意义[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(6): 1 104-1 112.
WANG Ning, ZHAO Zhenyong, ZHANG Xinyi, et al. Salt absorption capacity and ecological significance of selected Chenopodiaceae halophytes[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(6): 1 104-1 112.

- [57] 朱莹. 盐城滩涂湿地维管植物群落类型及植物资源调查与分析[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
ZHU Ying. Investigation and analysis of vascular plant community types and plant resources in Yancheng tidal flat wetland[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
- [58] 郑伟, 李晓娜, 杨志新, 等. 再生水灌溉对不同类型草坪土壤盐碱化的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 101-104, 122.
ZHENG Wei, LI Xiaona, YANG Zhixin, et al. Effects of turf-grass irrigation with reclaimed water on soil salinization-alkalization[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(4): 101-104, 122.
- [59] ELGALLAL M, FLETCHER L, EVANS B. Assessment of potential risks associated with chemicals in wastewater used for irrigation in arid and semiarid zones: A review[J]. Agricultural Water Management, 2016, 177: 419-431.
- [60] 郭道宇. 再生水草坪灌溉生态效应及其评价[D]. 北京: 首都师范大学, 2006.
GUO Xiaoyu. Effect and assessment of reclaimed water irrigation on turf-grass[D]. Beijing: Capital Normal University, 2006.
- [61] 高军, 王会肖, 刘海军, 等. 北京市再生水灌溉对土壤质量的影响研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2012, 48(5): 572-576.
GAO Jun, WANG Huixiao, LIU Haijun, et al. Effects of reclaimed water irrigation upon soil quality in Beijing[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2012, 48(5): 572-576.
- [62] 尹剑. 再生水灌溉对冬小麦种植区土壤次生盐渍化的影响[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(36): 57-60.
YIN Jian. Effect of reclaimed water irrigation on soil secondary salinization in winter wheat planting area[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018, 46(36): 57-60.
- [63] 侯贤贵, 杨培岭, 任树梅. 再生水灌溉对土壤盐碱性影响的大田试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(2): 17-20.
HOU Xiangui, YANG Peiling, REN Shumei. Field experimental on effects of soil salification and basification characteristics under irrigation with reclaimed water[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(2): 17-20.
- [64] 刘春成, 荣昊, 李中阳, 等. 磁化再生水对玉米幼苗生长及土壤盐分的影响[J]. 河南农业科学, 2020, 49(12): 24-32.
LIU Chuncheng, RONG Hao, LI Zhongyang, et al. Effect of magnetized reclaimed water on seedling growth of maize and soil salinity[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2020, 49(12): 24-32.
- [65] 王全九, 李宗昱, 张继红, 等. 磁化强度对磁电一体活化土壤水盐运移特征的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 278-284.
WANG Quanjie, LI Zongyu, ZHANG Jihong, et al. Effect of magnetization intensity on characteristics of soil water and salt transport in magnetization-de-electronic activation water[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 278-284.
- [66] 孟诗原, 张瑛, 张志浩, 等. 磁化水灌溉对保护地土壤质量及辣椒品质的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(33): 116-123.
MENG Shiyuan, ZHANG Ying, ZHANG Zhihao, et al. Irrigation with magnetized water: Effects on soil quality of protected field and quality of capsicum frutescens[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(33): 116-123.
- [67] 张瑞喜, 王卫兵, 褚贵新. 磁化水在盐渍化土壤中的入渗和淋洗效应[J]. 中国农业科学, 2014, 47(8): 1 634-1 641.
ZHANG Ruixi, WANG Weibing, CHU Guixin. Impacts of magnetized water irrigation on soil infiltration and soil salt leaching[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(8): 1 634-1 641.
- [68] 王录, 郭建曜, 刘秀梅, 等. 磁化水灌溉对盐渍化土壤生化性质的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(1): 150-156.
WANG Lu, GUO Jianyao, LIU Xiumei, et al. Effects of irrigation with magnetized salty water on biochemical properties of salty soil[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32(1): 150-156.

A review on secondary soil salinization caused by reclaimed water irrigation

ZHAO Shouqiang^{1,2}, SONG Jibin^{1,2}, LIU Chuncheng¹,
LI Xiaotong^{1,2}, LIU Yuan¹, HUANG Pengfei¹, LI Zhongyang^{1,3*}

(1. Institute of Farmland Irrigation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

3. National Research and Observation Station of Shangqiu Agro-ecology System, Shangqiu 476000, China)

Abstract: Water scarcity is a major challenge facing agricultural production in China. Unconventional water resources such as reclaimed wastewater can be used as a complimentary resource for irrigation. However, reclaimed wastewater is rich in salt and its long-term use for irrigation could lead to secondary soil salinization. In this review, we analyze the factors that have potential effects on accumulation of salt in soil. They include irrigation method, soil texture, crop types and crop variety, irrigation time, and reclaimed wastewater modification. Results show that our current understanding of the effect of long-term reclaimed water irrigation on soil salt accumulation is still unclear. As a result, more systematic studies are needed to elucidate the main factors that affect salt accumulation in soil. While reclaimed water modification is promising, more studies are required before it can be widely implemented. We suggest that future research on reclaimed water irrigation should focus on field experiments to systematically study how irrigation method, soil texture, crops, agronomic management and reclaimed water modification interactively affect salt accumulation in soils irrigated with reclaimed wastewater.

Key words: reclaimed water; irrigation; secondary salinization; influence factor

责任编辑: 赵宇龙