

# 再生水灌溉对作物和土壤的影响

李一<sup>1</sup>, 刘宏权<sup>1\*</sup>, 陈任强<sup>1</sup>, 柴春岭<sup>1</sup>, 王鑫鑫<sup>2,3,4\*</sup>

(1.河北农业大学 城乡建设学院, 河北 保定 071001; 2.河北省山区农业技术创新中心, 河北 保定 071001; 3.国家北方山区农业工程技术研究中心, 河北 保定 071001; 4.河北农业大学 河北省山区研究所, 河北 保定 071001)

**摘要:** 由于水资源短缺问题日益严峻, 处理废水作为新的水资源加以利用是有效手段之一。农业灌溉用水占据了水资源利用的巨大比重, 尤其对于水资源利用效率低的发展中国家, 再生水灌溉也就成为缓解水资源压力的有效节水技术。以往的研究主要集中于再生水灌溉对单独某种作物的影响, 现在从再生水灌溉对作物产量、品质的影响, 再生水灌溉对土壤的影响以及再生水灌溉存在的问题, 总结了再生水在草本作物和木本作物灌溉中应用的优劣, 并提出几点建议, 以期再生水灌溉对农业生产的节水增产更加高效。

**关键词:** 再生水灌溉; 草本植物; 木本植物; 产量和品质; 土壤

中图分类号: S273.5

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022084

李一, 刘宏权, 陈任强, 等. 再生水灌溉对作物和土壤的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(Supp.1): 26-33, 43.

LI Yi, LIU Hongquan, CHEN Renqiang, et al. Effects of Reclaimed Water Irrigation on Crops and Soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(Supp.1): 26-33, 43.

## 0 引言

水资源是人类发展中不可或缺的战略资源。地球拥有丰富的水, 陆地面积仅有 28%, 其余面积以江、河、湖、海的形式存在, 但是地球淡水资源却相当短缺, 而其中大部分保存在人类难以获取的极地冰川和土壤中, 最终支持人类生产生活的淡水资源仅占全球的 0.26%。我国水资源短缺严重, 正常年份缺水量达  $50 \times 10^{10} \text{ m}^3$ , 人均水资源量仅是世界平均水平的 1/4, 是世界 13 个贫水国家之一。除此之外, 还存在水资源的时空分配与耕地资源、人口数量不均衡, 水资源利用效率低等问题, 如何增产减耗是我们不断努力的目标。

再生水是废水经过处理达到某种水质要求的水资源。2017 年水利部门规定的非常规水源包含了再生水这一新型水资源。我国的农业水资源缺水量高达

$30 \times 10^{10} \text{ m}^3$ , 对于对水质要求低的农业灌溉用水来说, 再生水来源稳定、水量充足, 极大地减轻了水资源短缺的压力。大部分西方发达国家都广泛应用再生水灌溉。学者还广泛认为, 再生水中富含的氮(N)、磷(P)等营养物质可以减少肥料施用, 增加土壤养分, 同时降低了肥料对环境的污染影响。截至 2014 年, 我国再生水灌溉面积占全国总农田灌溉面积的 7.3%, 其中以黄、淮、海、辽等水资源问题严峻的流域分布最广<sup>[1]</sup>。与多数发达国家相比, 我国对再生水灌溉的应用仍存在一定差距, 我国对再生水的应用正处于飞速发展阶段, 农业灌溉需水量巨大<sup>[2]</sup>。再生水灌可能会对灌区作物和灌区土壤产生影响, 由于草本作物与木本作物生理、生长特性的不同, 再生水灌溉对 2 类作物及其土壤环境的影响也存在差异。我国的水资源短缺问题不容乐观, 农业生产的节水增产效率亟待提高, 因此, 有必要研究不同作物对再生水灌溉的适应性, 优化再生水灌溉的方法与技术。

## 1 再生水灌溉对作物产量和品质的影响

灌溉水质直接影响了作物的产量和品质<sup>[3]</sup>, 再生水中富含营养物质, 再生水灌溉似乎能够提高作物的产量和品质。区分其对不同类别作物的影响, 利于人们选择何种再生水和何种再生水处理, 确定效益最高的灌溉制度。

收稿日期: 2022-02-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0300503); 河北省重点研发计划项目(21327002D); 河北省节水灌溉装备产业技术研究院科研基金项目(SC2018005); 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-08-G-22); 河北省重点研发计划项目(21327005D)

作者简介: 李一(1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事大田水肥调控方面研究。E-mail: 2306850482@qq.com

通信作者: 刘宏权(1979-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事农业水土资源高效利用、水肥调控方面的教学科研工作。E-mail: lhq@hebau.cn  
王鑫鑫(1984-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事养分高效利用、土壤生态、可持续农业等研究。E-mail: sywxx@hebau.edu.cn

### 1.1 再生水灌溉对草本作物产量和品质的影响

再生水灌溉对草本作物产量和品质的影响可以通过观测干鲜质量、叶绿素量、水分利用效率、光合指标等参数表现。王璐璐等<sup>[4]</sup>采用中水厂再生水和清水对黄瓜 (*Cucumis sativus* L.) 进行了灌溉试验, 结果表明, 再生水处理的有机物积累更多, 糖和维生素等营养物质均较清水高, 而黄瓜酸总量则显著降低。Cakmakci 等<sup>[5]</sup>对比了清水和城市再生水在不同定额下利用不同灌溉方式对青储玉米 (*Zea mays* L.) 蒸散量、干鲜质量和叶片指标的影响, 得出了使用再生水进行地下滴灌的蒸散量最低, 其他指标较高的结论。王丽学等<sup>[6]</sup>则基于 3 种水源和水源是否磁化处理进行了生菜 (*Lactuca sativa* L.) 盆栽实验, 表明再生水加磁处理得到的生菜水分利用效率和品质更优。除此之外, 徐桂红等<sup>[7]</sup>、吴卫熊等<sup>[8]</sup>、刘惠青等<sup>[9]</sup>分别针对番茄 (*Solanum lycopersicum*)、甘蔗 (*Saccharum officinarum* L.) 和苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 的研究也得到了类似的结论。

再生水灌溉对草本作物产量品质无显著影响。Chaganti 等<sup>[10]</sup>对比了城市再生水和清水在有土壤改良剂的情况下, 生物能源高粱 (*Sorghum bicolor* L. Moench) 的产量和质量, 结果表明, 生物能源高粱的产量无显著变化, 生物木质素和生物灰分量分别 4.4~7.3 g/100 g 和 8.3~11 g/100 g, 仅随时间减少或增加。廖林仙等<sup>[11]</sup>发现, 生活再生水灌溉对小白菜 (*Brassica chinensis* L.) 产量的影响较小, 对小白菜吸收氮、磷等营养物质的能力影响不显著。Shannag 等<sup>[12]</sup>研究了不同再生水对蚕豆 (*Vicia faba* L.) 的影响, 对比了再生水和清水灌溉下的蚕豆干鲜质量和叶面积, 结果也无显著差异。

此外, 研究人员将再生水和其他水资源结合灌溉, 进一步优化了灌溉效益。刘春成等<sup>[13]</sup>研究表明, 生活再生水与微咸水混灌能够提高上海青 (*Pakchoi*) 的地上部鲜质量, 同时在不影响作物生理指标的情况下, 显著提高超氧化物歧化酶 (SOD) 的活性。于辉等<sup>[14]</sup>发现, 城市再生水和清水添加保水剂混灌能够减少灌水用量, 同时, 再生水和清水以 2:1 混合灌溉甜高粱 (*Sorghum dochna*) 能够提高 39.7% 产量, 是最优的增产混灌比例, 而 1:1 混灌处理则对作物品质的提升更加有效, 显著提高了粗蛋白和可溶性糖量, 减少了中性和酸性的洗涤纤维量。刘增进等<sup>[15]</sup>采用不同比例的水源混合灌溉冬小麦 (*Triticum aestivum* L.), 发现混灌更能促进冬小麦的生长发育, 并较清水灌溉提高了 42.1% 的产量。

就目前的研究来看, 大部分草本作物, 使用再生水灌溉, 均不会对产量品质产生不良影响。其中的差

异与灌溉方式、再生水处理水平和附加的种植因素等有关, 确定最为经济高效的灌溉方法有待进一步研究。

### 1.2 再生水灌溉对木本作物产量、品质的影响

相比于草本作物较为乐观的结果, 再生水灌溉对木本作物的影响要更为复杂。有大量关于橄榄树 (*Canarium album* L.) 的研究表明, 在适当的浓度处理下, 工业再生水灌溉减少了橄榄油中具有不良特性 (辛醛和乙酸) 的挥发性化合物, 同时保留了提供良好特性 (如水果气味) 的挥发性化合物<sup>[16]</sup>, 还能诱导植物组织富含大量和微量营养素, 显著增加光合作用活性、可溶性糖分<sup>[17]</sup>, 再生水的有机物和植物营养提高了橄榄树的产量、品质<sup>[18]</sup>。董思琼等<sup>[19]</sup>研究发现, 再生水灌溉能够提高辣椒 (*Capsicum annuum* L.) 的株高和茎粗等生长指标, 水分利用效率和光合速率等光合指标, 以及产量和肥料偏生产力, 且硝酸盐量, 重金属砷、铅、铬量远远低于标准限值<sup>[20]</sup>。朱永福等<sup>[21]</sup>发现, 生活再生水灌溉较黄河水灌溉能有效提高苹果 (*Malus pumila* Mill.) 的新梢长、新梢径粗、光合指标 ( $P_n$ 、 $Tr$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ ) 和产量, 表现出了再生水灌溉的有利影响。此外, 再生水灌溉对油桃树 (*Prunus persica*) 也有着提高其产量和品质的效果<sup>[22]</sup>。

然而, 并非所有木本作物受再生水灌溉的影响都是正向的。Pedrero 等<sup>[23]</sup>表明, 用再生水灌溉的柠檬 (*Citrus limon* L.) 外部颜色、质量、可溶性固形物、酸碱度和成熟度指数等果实品质指标较高, 但总产量较低。在以色列进行的一项长期再生水滴灌研究发现, 再生水灌溉会降低鳄梨树 (*Persea americana* Mill.) 的气孔导度和叶片水力传导力<sup>[24]</sup>, 从而降低鳄梨树的产量<sup>[25]</sup>。戚至辉等<sup>[26]</sup>研究发现, 再生水灌溉会降低枸杞 (*Lycium barbarum* L.) 的产量。陈治江等<sup>[27]</sup>发现, 再生水灌溉对棉花的 (*Gossypium spp*) 品质产生消极影响, 观测到棉绒长度、马克隆值和棉绒可纺系数均小于清水灌溉。在黏土土壤种植园种植葡萄柚 (*Citrus paradisi Macfad*) 的报告中也指出, 生活再生水灌溉对树木生长、水分吸收和果实产量有消极影响, 研究表明, 是再生水中的  $Na^+$  和  $Cl^-$  离子过多, 降低了果树性能所致<sup>[28]</sup>。

上述研究体现了再生水中的营养物质对木本作物的影响的显著差异。因此, 对于木本作物, 需要我们更为细致的探究适合其灌溉的再生水成分, 研究更适合的养分供需关系, 减少损失。

## 2 再生水灌溉对土壤的影响

再生水富含氮、磷等作物生长所需的养分, 能够减少肥料施用, 降低肥料对土壤的污染, 同时, 经过处理的污水, 化学污染物量很低, 对土壤影响小, 既

能节约淡水灌溉用水,又能实现污水的回收利用,还能对地下水起到补充作用。因此,分析再生水灌溉对土壤产生的影响,对提高再生水利用效率,减少环境污染有着重要意义。目前,再生水灌溉对土壤孔隙度、土壤团聚体等物理性质,重金属、盐碱性等化学性质,以及对土壤酶和微生物的影响等方面是学者们研究的重点<sup>[29]</sup>。

## 2.1 再生水灌溉对土壤物理性质的影响

再生水灌溉对土壤物理性质影响的研究范围较大,但大多较为浅显,主要探究了再生水灌溉对土壤产生的效应<sup>[30]</sup>。再生水灌溉会改善亚热带地区红壤的干缩裂缝情况,但对潮土、紫色土和水稻土有促进其发育的影响,2种影响都与再生水浓度有关<sup>[31]</sup>。杨林林等<sup>[32]</sup>研究了再生水灌溉对土壤扩散率和饱和导水率的影响,发现二者随再生水灌溉时长的增大先减后增,但总体体现了再生水对水分在土壤中传导的抑制作用。土壤的结构性质、导水性与灌溉模式有关,对于潮土,再生水与清水混灌利于保持土壤结构性质,再生水与清水交替灌溉则能改善其导水能力<sup>[33]</sup>。夏江宝等<sup>[34]</sup>发现,再生水灌溉使土壤容重减小,孔隙度增大,清废轮灌能够有效改善土壤水文物理。唐立军等<sup>[35]</sup>发现,再生水灌溉和其与清水的轮灌对土壤物理性状有着积极的影响,具体表现为土壤孔隙率和离子交换量的显著提高。García-Orenes 等<sup>[36]</sup>指出,再生水灌溉下团聚体稳定性均高于清水灌溉的土壤。盛丰等<sup>[37]</sup>发现,土壤的物理指标受再生水中的阴离子活性以及再生水灌溉频率影响。活性越强、频率越高,土壤容重、地表入渗能力、非毛管孔隙比和土壤团聚体稳定性等指标越小,使农业灌溉管理更加困难,但再生水与清水交替灌溉能够降低土壤斥水性、地表入渗能力等问题带来的不利影响,优化农田灌溉管理。杨鑫等<sup>[38]</sup>表明,土壤性质、灌溉制度以及再生水水质都可能引起土壤孔隙度的变化,土壤团聚体的组成也可能受再生水影响,但相关研究少且不够深入。因此,再生水灌溉对土壤物理性质的影响仍需进一步的研究。

## 2.2 再生水灌溉对土壤化学性质的影响

由于污水中含有重金属、盐分等化学物质,又受到处理技术和经济成本的制约,再生水中会存在重金属、盐分残留,这些化学残留可能对土壤环境乃至作物生长产生不利影响。

姣哈尔红卫等<sup>[39]</sup>发现,在干旱山地地区,与短期灌溉再生水相比,长期灌溉再生水对土壤不同重金属的影响不同,减少了部分重金属对土壤污染的同时,仍有少量重金属量显著增加,可能对土壤环境造成不利影响。郑顺安等<sup>[40]</sup>表明,紫色水稻土中颗粒态有机质(POM)对重金属有较明显的富集作用。Belaid 等<sup>[41]</sup>

也发现,再生水灌溉主要会富集 Cr,而 Cu、Zn 的含量减少,他们还发现,重金属积累主要发生在土壤上层。土壤纵向的积累似乎有规律可循,随土壤深度的增加,重金属量呈先减少,后增加的趋势<sup>[42]</sup>。令人欣慰的是,重金属并未快速地进入土壤深层,短期进行再生水灌溉也不会造成土壤重金属污染<sup>[43-45]</sup>。

再生水中含有更多的盐分,长期灌溉可能会对土壤产生不利影响<sup>[46]</sup>,产生盐害的环境风险<sup>[47]</sup>。再生水灌溉草坪的试验印证了这一点,短期再生水灌溉并未使土壤达成盐害,但出现了一定盐分积累<sup>[48]</sup>。孔林华等<sup>[49]</sup>研究表明,再生水中富含钠离子和氯离子,盐分增加明显。相较于清水灌溉,再生水灌溉增加了土壤 pH 值<sup>[49]</sup>。在降水多、土壤水分蒸发快的地区,再生水灌溉会加剧盐分的积累,土壤发生盐碱化的可能性更大。究其原因,还可能与再生水水质、土壤性质、作物类型、灌溉制度等因素有关。国外也有研究表明,沙质土壤会保留更多的盐分,而肥沃土壤中的盐分则与不同的离子有关<sup>[50]</sup>。一般情况下,长期再生水灌溉更有可能产生盐分积累,短期再生水灌溉通常不会对土壤造成盐害污染<sup>[51]</sup>。此外,长期再生水灌溉产生的潜在土壤盐分积累风险主要在土壤深层<sup>[52]</sup>。而叶文等<sup>[53]</sup>运用 Hydrus-1D 模型,模拟了再生水灌溉下盐离子在土层中的运移模式,表明再生水中的盐离子主要集中在 50 cm 以内的表层土壤中。由此可见,再生水灌溉会少量增加了土壤盐分,但仍然是风险相对较低的灌溉水源。

再生水中同时会残留丰富的营养物质,许多学者研究了再生水灌溉对土壤肥力的影响,得出的结果各不相同,但再生水灌溉能够提高土壤肥力的观点受到了多数研究人员的认可<sup>[54]</sup>。康轩等<sup>[55]</sup>认为土壤肥力可以通过有机质、氮磷钾等营养元素指标来衡量。再生水灌溉可以增加土壤有机质和液态氮量<sup>[56]</sup>,使得土壤 pH 值、P、K、Mg、Ca 量增加<sup>[57]</sup>,促进较稳定的土壤有机、无机磷组分转化为活性较高的组分<sup>[58]</sup>,这证明了土壤肥力的增加。李竞等<sup>[59]</sup>针对再生水灌溉对土壤特性的影响进行了研究,结果同样表现出了再生水灌溉对土壤养分的提高。再生水灌溉还能改善土壤环境,这是由于再生水灌溉能够更多的溶解土壤中的矿质氮,因此,再生水灌溉能够有效降低土壤的氮污染,减少氮肥用量,增加土壤肥力<sup>[60]</sup>。需要注意的是,再生水中的营养物质也可能造成危害,过量的养分可能会随着水分扩散积累在地表水中,造成水体富营养化,长期灌溉后,还可能会水分下渗,污染地下水,对水循环造成危害<sup>[61]</sup>。

## 2.3 再生水灌溉对土壤酶和微生物群落的影响

土壤酶在土壤物质循环中起着不可或缺的作用,

土壤中的全氮、全磷和有机质等理化性质都影响土壤酶的活性<sup>[62]</sup>。李平<sup>[63]</sup>研究发现,根际土壤脲酶和过氧化氢酶活性与土壤含氮量有关,再生水灌溉下适量追施氮肥能够有效增加其活性,但含氮量过少也会显著降低二者活性。焦志华等<sup>[64]</sup>进行了再生水灌溉大豆(*Glycine max* L.)的试验,结果显示,根际土壤中有有机质、有效磷量显著增加,从而增加了脲酶和碱性磷酸酶活性。García-Orenes 等<sup>[36]</sup>发现,再生水灌溉提高了 $\beta$ -葡萄糖苷酶和脱氢酶等相关酶活性,研究表明,可能与总有机碳和有效磷量较清水灌溉显著增加有关。莫宇<sup>[65]</sup>认为,再生水灌溉下的土壤蔗糖酶活性较清水灌溉显著提高,随着追氮量的增加,土壤蔗糖酶活性呈先增加后降低的趋势。梁伊等<sup>[66]</sup>发现,再生水灌溉能够显著提高小白菜生长中期土壤蔗糖酶量,加Cd处理进一步增加了这一趋势。除此之外,短期再生水灌溉可能会降低土壤中酶的活性,长期灌溉酶活性显著增加<sup>[67]</sup>。如土壤脲酶、过氧化氢酶,它们的活性均随再生水灌溉年份而增强<sup>[68]</sup>。模拟土壤脲酶和过氧化氢酶随再生水灌溉的变化,发现灌溉5 a后较灌溉前,2种土壤酶的活性分别提高了14%和30%以上<sup>[63]</sup>。潘能等<sup>[69]</sup>研究了公园绿地进行再生水灌溉后的土壤酶活性,也得出了土壤酶活性显著提高的结果。

由于再生水中含有微生物、重金属等元素,再生水灌溉也会对微生物的种类、数量和活性产生影响。已有研究表明,长期再生水灌溉可促进土壤微生物群落多样性的增加<sup>[70]</sup>,改变土壤中微生物的优势度<sup>[71]</sup>。不同土壤性质下,土壤微生物群落的构成和分布也不尽相同<sup>[72]</sup>。李松旌等<sup>[73]</sup>发现,不同的滴灌处理影响着土壤的理化性质,根际土壤微生物的群落多样性和结构也随之改变。陈黛慈等<sup>[71]</sup>也发现,有机质、全氮、全磷等元素影响微生物的生命活动,也是再生水灌溉影响土壤环境的重要表现。郭魏等<sup>[70, 74]</sup>认为,再生水灌溉含有的氮元素、有机物等物质促进了土壤中相关微生物的增加,微生物的群落分布也因此而变化。再生水灌溉下追施适当的氮素能够有效提高微生物的活性。再生水灌溉番茄作物的土壤中,大肠杆菌和粪便肠球菌的平均数量显著高于地下水灌溉土壤中的指标,每100 mL中分别达到了4 408个和3 804个,但微生物对作物品质无显著影响<sup>[75]</sup>。韩洋等<sup>[76]</sup>指出,再生水灌溉能够促进土壤微生物的代谢繁殖,显著增加了土壤微生物的数量和活性。但再生水中可能含有重金属,有研究<sup>[67]</sup>发现再生水灌溉使土壤出现了Cd、Cu、Zn和Ni的大量积累,表明再生水灌溉可能对土壤微生物造成威胁。

### 3 总结与建议

#### 3.1 土壤养分

短期再生水灌溉不会显著提高土壤养分<sup>[77]</sup>,再生水灌溉对草本作物和木本植物的产量品质影响的差异也表明,草本作物对再生水灌溉更为适应。木本作物的生长周期长,营养吸收多,再生水灌溉的土壤中养分和微生物丰富,极有可能导致养分过量积累,造成植株疯长却减产、涨势缓慢成熟晚或作物品质降低等不利后果。从这一角度看,再生水灌溉应用的着眼点应在于草本作物以及部分营养需求大的木本植物。但这就让再生水的利用有了较大的局限性,前文表明了再生水和其他水资源结合灌溉对草本作物的增益,在关于枸杞的研究中也发现,虽然再生水灌溉会降低枸杞的产量,但再生水与混灌却能够增加产量<sup>[26]</sup>。因此,研究再生水与不同水源的混灌对木本作物的影响是将再生水应用于木本作物灌溉,增加木本作物产量品质的有效措施。

#### 3.2 重金属

草本作物和木本作物对重金属的敏感度不同,草本作物更容易积累重金属,Almuktar 等<sup>[78]</sup>发现,土壤中无矿物质污染,但蔬菜中检出轻中度污染,而再生水灌溉的苹果树和油桃树,并未在其叶子和果实中发现重金属富集<sup>[79]</sup>。然而,木本作物也并非完全规避了再生水灌溉的重金属富集风险,长期再生水灌溉会在土壤中积累重金属,这些重金属很可能会影响到多年生的木本植物生长,造成植物富集,进而危害人类健康。景若瑶等<sup>[80]</sup>发现,钾肥对重金属在土壤中的分布有着显著的调控作用,有利于降低Cd对土壤和作物的不利影响,达到了增加产量、减少重金属富集的效果。因此,可以通过施肥影响土壤理化性质<sup>[80-82]</sup>,或施加生物质炭、果胶<sup>[83]</sup>等土壤改良剂,降低重金属的积累和危害。对个别重金属敏感度较高、存在重金属污染风险的草本作物,可以规避该种作物的再生水灌溉。对于木本作物,可以尝试间作易吸收重金属且经济价值低的草本作物,减少木本作物对重金属的吸收,或同样可以施加适当的肥料,从根本上减少重金属在土壤中富集。

#### 3.3 盐碱化

短期再生水灌溉不会产生土壤盐碱化。也就是说,再生水灌溉对生长周期短的草本作物不会造成显著的盐碱损害。在草本作物开花坐果期使用清水灌溉能够有效控制盐分积累<sup>[84]</sup>,因此可以尝试在木本作物的开花坐果期替换为清水灌溉。还有研究发现,为橄榄幼苗接种丛枝菌根真菌能够降低Na<sup>+</sup>和Cl<sup>-</sup>离子量<sup>[85]</sup>,因此,木本作物接种丛枝菌根真菌是减轻盐碱危害的

有效手段。此外,也可以选择耐盐的品种以适应盐碱环境,或者施加土壤改良剂等降低盐分,从根源上减少土壤盐碱化出现的可能。

## 4 展望

1) 再生水灌溉还可能造成有机物污染,目前国内外对再生水灌溉的土壤有机物污染研究很少,有机物在土壤中的运移方式和途径尚不清晰。Hydrus-3D 软件<sup>[86-94]</sup>能够模拟土壤中水分的运移模式,国内外已有许多研究采用 Hydrus-3D 软件对不同灌溉方式导致的土壤水分运移和动态变化进行了模型模拟,效果显著。此外, Cary 等<sup>[95]</sup>利用铅同位素工具追踪了短期灌溉土壤中的元素迁移和动态。应用 Hg 同位素可以有效示踪 Hg 的来源<sup>[96-102]</sup>。因此,可以尝试利用同位素工具追踪土壤中的有机物,结合 Hydrus-3D 软件推测模拟有机物在不同种类作物土壤中的运移模式,以期降低有机物污染风险。

2) 再生水能够增加微生物群落多样性和酶活性,但是对于病原微生物的影响仍不清楚。土壤中的病原体并非对作物乃至人的健康毫无影响,病原体能够随气流混入空气,再随着呼吸进入人的体内,或者污染农作物,随着食物侵害人类健康<sup>[103]</sup>。目前,降低病原微生物风险的有效措施是采用滴灌灌溉<sup>[104]</sup>,增加滴灌带埋深<sup>[105]</sup>和增加灌水频率<sup>[106]</sup>能够进一步减少病原微生物数量<sup>[107]</sup>。Arora 等<sup>[108]</sup>发现,蚯蚓能够控制微生物生物量和提高微生物活性,适当引入蚯蚓或能降低病原微生物的危害。此外,再生水灌溉对生物虫害的影响的研究也很少,有研究<sup>[12]</sup>发现,用再生水灌溉的植物在不同程度上增加了蚜虫的数量,但植物的生长与受感染的对照植物相同或更好,表明再生水灌溉减轻了蚜虫对植物的高侵袭水平的不利后果。因此,有必要进一步探究再生水灌溉与病原微生物和虫害生物的联系,减少作物由生物造成的损失。

3) 目前广泛认为滴灌是最适宜进行再生水灌溉的灌溉技术,但滴灌有着易堵塞滴灌系统的缺点,据统计,国内 1/3 的报废滴灌工程是由堵塞问题导致的<sup>[109]</sup>。滴灌系统易滋生细菌,再生水中的细菌在滴灌系统中大量繁殖,与水中的微粒形成附生生物膜,堵塞滴灌系统。周博等<sup>[110]</sup>发现,滴灌系统的堵塞程度与附生生物膜组分呈显著的“S 形曲线”关系,进一步印证了这一观点。因此,可以在下层水层中大量有机物积聚之前,从近底部开始抽水灌溉,可以避免颗粒物积聚和浮游动物生长,从而堵塞灌溉过滤器<sup>[111]</sup>。或者研究一种不会对作物和土壤产生有害影响的杀菌剂,杀灭再生水中的微生物。或探究堵塞物质的成分,寻找一种既不会损害滴灌设备,又能够溶解堵塞物的溶

解剂,规划定期清洗,预防堵塞问题的发生。加氯配合毛管冲洗能够起到一定的控制堵塞效果<sup>[112]</sup>,但要彻底解决滴灌堵塞问题仍有待进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 胡雅琪,吴文勇. 中国农业非常规水资源灌溉现状与发展策略[J]. 中国工程科学, 2018, 20(5): 69-76.
- [3] 崔丙健,高峰,胡超,等. 非常规水资源农业利用现状及研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(7): 60-68.
- [4] 王璐璐,田军仓,徐桂红,等. 再生水滴灌对黄瓜叶绿素、光合、产量及品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(5): 18-25.
- [5] CAKMAKCI T, SAHIN U. Improving silage maize productivity using recycled wastewater under different irrigation methods[J]. Agricultural Water Management, 2021, 255: 107 051.
- [6] 王丽学,王晓帆,张钟莉莉,等. 不同灌溉水源加磁对生菜生长品质及水分利用效率的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2020, 51(2): 146-152.
- [7] 徐桂红,田军仓,王璐璐,等. 再生水滴灌对番茄光合、产量及品质的影响[J]. 节水灌溉, 2019(10): 83-88.
- [8] 吴卫熊,何令祖,邵金华,等. 清水、再生水灌溉对甘蔗产量及品质影响的分析[J]. 节水灌溉, 2016(9): 74-78.
- [9] 刘惠青,于辉,牛红云,等. 再生水、自来水混合灌溉及抗蒸腾剂对苜蓿产草量及品质的影响[J]. 中国草地学报, 2016, 38(6): 102-105.
- [10] CHAGANTI V N, GANJEGUNTE G, NIU G H, et al. Effects of treated urban wastewater irrigation on bioenergy sorghum and soil quality[J]. Agricultural Water Management, 2020, 228: 105 894.
- [11] 廖林仙,举健,邵孝侯,等. 不同灌水下限再生水灌溉对土壤-小白菜的影响研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(14): 242-246.
- [12] SHANNAG H K, AL-MEFLEH N K, FREIHAT N M. Reuse of wastewaters in irrigation of broad bean and their effect on plant-aphid interaction[J]. Agricultural Water Management, 2021, 257: 107 156.
- [13] 刘春成,崔丙健,胡超,等. 微咸水与再生水混灌对作物生理特性的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 327-333, 348.
- [14] 于辉,刘惠青,王静. 再生水、自来水混合灌溉及保水剂施用对饲用甜高粱产草量及品质的影响[J]. 草业科学, 2018, 35(5): 1 154-1 160.
- [15] 刘增进,柴红敏,李宝萍. 不同再生水灌溉制度对冬小麦生长发育的影响[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(5): 71-74.
- [16] SDIRI W, DABBOU S, CHEHAB H, et al. Quality characteristics and chemical evaluation of Chemlali olive oil produced under dairy wastewater irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2020, 236: 106 124.
- [17] AMENI B H, MOHAMED Z, LINA T, et al. Physiological improvements of young olive tree (*Olea europaea* L. cv. *Chetoui*) under

- short term irrigation with treated wastewater[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 207: 53-58.
- [18] PEDRERO F, GRATTAN S R, BEN-GAL A, et al. Opportunities for expanding the use of wastewaters for irrigation of olives[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 241: 106-333.
- [19] 董思琼, 田军仓, 沈晖, 等. 不同再生水水质和追肥量对滴灌辣椒光合和产量的影响[J]. *节水灌溉*, 2022(2): 34-39.
- [20] 董思琼, 田军仓, 沈晖, 等. 再生水滴灌对辣椒产量和品质的影响[J]. *宁夏工程技术*, 2021, 20(2): 134-138.
- [21] 朱永福, 田军仓, 董思琼, 等. 基于主成分分析的生活再生水滴灌对苹果影响的综合评价[J]. *节水灌溉*, 2022(2): 21-27.
- [22] PERULLI G D, BRESILLA K, MANFRINI L, et al. Beneficial effect of secondary treated wastewater irrigation on nectarine tree physiology[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 221: 120-130.
- [23] PEDRERO F, ALLENDE A, GIL M I, et al. Soil chemical properties, leaf mineral status and crop production in a lemon tree orchard irrigated with two types of wastewater[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 109: 54-60.
- [24] NEMERA D B, BAR-TAL A, LEVY G J, et al. Mitigating negative effects of long-term treated wastewater irrigation: Leaf gas exchange and water use efficiency response of avocado trees (*Persea Americana* Mill.)[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 256: 107-126.
- [25] NEMERA D B, BAR-TAL A, LEVY G J, et al. Mitigating negative effects of long-term treated wastewater application via soil and irrigation manipulations: Sap flow and water relations of avocado trees (*Persea Americana* Mill.)[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 237: 106-178.
- [26] 戚至辉, 马波, 田军仓, 等. 再生水滴灌水量对枸杞生长、产量与品质的影响[J]. *宁夏工程技术*, 2020, 19(3): 283-288.
- [27] 陈治江, 陈晓. 乌鲁木齐市再生水灌溉对棉花品质的影响[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(5): 2 006-2 008.
- [28] PAUDEL I, BAR-TAL A, LEVY G J, et al. Treated wastewater irrigation: Soil variables and grapefruit tree performance[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 204: 126-137.
- [29] 吴文勇, 刘洪禄, 郝仲勇, 等. 再生水灌溉技术研究现状与展望[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(5): 302-306.
- [30] 赵全勇, 李冬杰, 孙红星, 等. 再生水灌溉对土壤质量影响研究综述[J]. *节水灌溉*, 2017(1): 53-58.
- [31] 王玮, 王辉, 陈潇岳, 等. 再生水灌溉对亚热带典型土壤干缩裂缝演变特征的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(13): 55-65.
- [32] 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.
- [33] 胡廷飞, 王辉, 谭帅. 再生水灌溉模式对潮土结构性质及导水性能的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(2): 146-152.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] GARCÍA-ORENES F, CARAVACA F, MORUGÁN-CORONADO A, et al. Prolonged irrigation with municipal wastewater promotes a persistent and active soil microbial community in a semiarid agroecosystem[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 149: 115-122.
- [37] 盛丰, 李忠润, 方娴静, 等. 再生水中阴离子表面活性剂对土壤结构与水流运动的影响[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(10): 4 531-4 539.
- [38] 杨鑫, 赵全勇, 翟大明, 等. 再生水灌溉对土壤质量影响的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(27): 133-136, 151.
- [39] 姣哈尔 红卫, 李宁, 苏玉红, 等. 长期再生水灌溉对干旱区山地土壤基本性质及重金属含量的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(12): 181-186.
- [40] 郑顺安, 郑向群, 刘书田, 等. 再生水灌溉下紫色水稻土颗粒态有机质中重金属的富集特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 246-250.
- [41] BELAID N, FEKI S, CHEKNANE B, et al. Impacts of irrigation systems on vertical and lateral metals distribution in soils irrigated with treated wastewater: Case study of Elhajeb-Sfax[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 225: 105-739.
- [42] 陈志凡, 赵焯, 郭廷忠, 等. 污灌条件下重金属在耕作土壤中的积累与形态分布特征: 以北京市通州区凤港减河污灌区农用地为例[J]. *地理科学*, 2013, 33(8): 1 014-1 021.
- [43] 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.
- [44] 万金颖, 纪玉琨, 巨振海, 等. 污水灌溉区土壤重金属的空间分布特征[J]. *环境工程*, 2006, 24(2): 87-88.
- [45] 万蕾, 张曼玉, 陆晟, 等. 污染水灌溉对土壤影响的研究进展及问题分析[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(5): 906-910.
- [46] 雷艳娇, 葛强, 李靖, 等. 区域再生水灌溉研究现状及发展趋势[J]. *人民黄河*, 2015, 37(1): 140-145.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 孔林华, 李培元. 水资源短缺地区实施再生水农田灌溉可行性分析[J]. *中国水利*, 2018(2): 68-69.
- [50] 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: 106-986.
- [51] 李河, 史海滨, 李仙岳, 等. 建筑回填土中再生水灌溉对草坪草生长及土壤理化性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 171-176.
- [52] 王志超, 史海滨, 李仙岳, 等. 回填土下再生水灌溉对玉米生长及土壤理化性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 196-202, 277.
- [53] 叶文, 王会肖, 高军, 等. 再生水灌溉土壤主要盐离子迁移模拟[J].

- 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 1 007-1 015.
- [54] 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 等. 再生水农业灌溉利用现状及影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(6): 130-136.
- [55] 康轩, 黄景, 吕巨智, 等. 保护性耕作对土壤养分及有机碳库的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2 339-2 343.
- [56] 潘秋艳, 刘玉春, 徐倩, 等. 微咸水和再生水对盆栽棉花土壤理化性质和根系的影响[J]. 节水灌溉, 2016(8): 122-126.
- [57] MALAFAIA G, DE ARAÚJ F G, DA COSTA ESTRELA D, et al. Corn production in soil containing in natura tannery sludge and irrigated with domestic wastewater[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 163: 212-218.
- [58] 李中阳, 樊向阳, 齐学斌, 等. 再生水灌溉对不同类型土壤磷形态变化的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 232-235, 258.
- [59] 李竞, 马红霞, 郑恩峰. 再生水灌溉对园林植物叶片生理及根际土壤特性的影响[J]. 水土保持研究, 2017, 24(4): 70-76.
- [60] 周媛, 李平, 郭魏, 等. 施氮和再生水灌溉对设施土壤酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 268-273.
- [61] 苗祥峰, 邵勇, 张德永. 再生水利用灌溉现状及存在的问题[J]. 科技传播, 2012, 4(11): 81-83.
- [62] 陈红军, 孟虎, 陈钧鸿. 两种生物农药对土壤蔗糖酶活性的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 584-588.
- [63] 李平. 再生水灌溉对设施土壤氮素转化及生境影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [64] 焦志华, 黄占斌, 李勇, 等. 再生水灌溉对土壤性能和土壤微生物的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2): 319-323.
- [65] 莫宇. 再生水灌溉对氮素利用效率及土壤酶活性的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- [66] 梁伊, 施宏, 张文莉, 等. 再生水中的 Cd 对蔬菜根际土壤酶及微生物的影响[J]. 天津农业科学, 2017, 23(9): 16-21.
- [67] MKHININI M, BOUGHATTAS I, ALPHONSE V, et al. Heavy metal accumulation and changes in soil enzymes activities and bacterial functional diversity under long-term treated wastewater irrigation in East Central region of Tunisia (Monastir governorate)[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 235: 106 150.
- [68] 周媛, 齐学斌, 李平, 等. 再生水灌溉年限对设施土壤酶活性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(1): 22-26.
- [69] 潘能, 侯振安, 陈卫平, 等. 绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究[J]. 环境科学, 2012, 33(12): 4 081-4 087.
- [70] 郭魏, 齐学斌, 李平, 等. 不同施氮水平下再生水灌溉对土壤细菌群落结构影响研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(1): 280-287.
- [71] 陈黛慈, 王继华, 关健飞, 等. 再生水灌溉对土壤理化性质和可培养微生物群落的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(5): 1 304-1 311.
- [72] 崔丙健, 崔二苹, 胡超, 等. 生物炭施用对再生水灌溉空心菜根际微生物群落结构及多样性的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(12): 5 636-5 647.
- [73] 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.
- [74] 郭魏, 齐学斌, 李中阳, 等. 不同施氮水平下再生水灌溉对土壤环境的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 311-315, 319.
- [75] GATTA G, LIBUTTI A, GAGLIARDI A, et al. Treated agro-industrial wastewater irrigation of tomato crop: Effects on qualitative/quantitative characteristics of production and microbiological properties of the soil[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 149: 33-43.
- [76] 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.
- [77] 彭致功, 杨培岭, 王勇, 等. 再生水灌溉对草坪土壤速效养分及盐碱化的效应[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 84-88.
- [78] ALMUKTAR S A A N, SCHOLZ M. Mineral and biological contamination of soil and *Capsicum annum* irrigated with recycled domestic wastewater[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 167: 95-109.
- [79] PERULLI G D, GAGGIA F, SORRENTI G, et al. Treated wastewater as irrigation source: A microbiological and chemical evaluation in apple and nectarine trees[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 244: 106 403.
- [80] 景若瑶, 崔二苹, 樊向阳, 等. 不同钾肥对再生水灌溉条件下土壤-作物系统 Cd 的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 328-333, 339.
- [81] SIMARRO R, GONZÁLEZ N, BAUTISTA L F, et al. Assessment of the efficiency of in situ bioremediation techniques in a creosote polluted soil: Change in bacterial community[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 262: 158-167.
- [82] 秦樊鑫, 魏朝富, 李红梅. 重金属污染土壤修复技术综述与展望[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(S2): 199-208.
- [83] 刘源, 崔二苹, 李中阳, 等. 生物炭和果胶对再生水灌溉下玉米生长及养分、重金属迁移的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 242-248, 271.
- [84] 薛彦东, 杨培岭, 任树梅, 等. 再生水灌溉对土壤主要盐分离子的分布特征及盐碱化的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 234-240.
- [85] BEN HASSENA A, ZOUARI M, TRABELSI L, et al. Potential effects of arbuscular mycorrhizal fungi in mitigating the salinity of treated wastewater in young olive plants (*Olea europaea* L. cv. *Chetoui*)[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 245: 106 635.
- [86] CREVOISIER D, POPOVA Z, MAILHOL J C, et al. Assessment and simulation of water and nitrogen transfer under furrow irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(4): 354-366.
- [87] COTE C M, BRISTOW K L, CHARLESWORTH P B, et al. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation[J]. *Irrigation Science*, 2003, 22(3/4): 143-156.
- [88] 徐存东, 赵志宏, 程慧, 等. 基于 HYDRUS-3D 的干旱区土壤沟灌模式水盐运移模拟[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(12): 134-141.
- [89] BHATNAGAR P R, CHAUHAN H S. Soil water movement under a single surface trickle source[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(7): 799-808.

- [90] 朱君, 李婷, 谢添, 等. 负水头环境土壤水分湿润锋运移三维模拟[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(4): 42-51, 58.
- [91] PATEL N, RAJPUT T B S. Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(12): 1 335-1 349.
- [92] SKAGGS T H, TROUT T J, ROTHFUSS Y. Drip irrigation water distribution patterns: Effects of emitter rate, pulsing, and antecedent water[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(6): 1 886-1 896.
- [93] 李耀刚, 王文娥, 胡笑涛. 基于 HYDRUS-3D 的涌泉根灌土壤入渗数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(6): 546-552.
- [94] 樊向阳, 费良军, 代智光, 等. 基于 Hydrus-3D 模型的再生水涌泉根灌模拟及布置参数预测[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 133-139.
- [95] CARY L, SURDYK N, PSARRAS G, et al. Short-term assessment of the dynamics of elements in wastewater irrigated Mediterranean soil and tomato fruits through sequential dissolution and lead isotopic signatures[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 155: 87-99.
- [96] ESTRADE N, CARIGNAN J, SONKE J E, et al. Measuring Hg isotopes in bio-geo-environmental reference materials[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2010, 34(1): 79-93.
- [97] FOUCHER D, OGRINC N, HINTELMANN H. Tracing mercury contamination from the Idrija mining region (Slovenia) to the Gulf of Trieste using Hg isotope ratio measurements[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(1): 33-39.
- [98] LAFFONT L, SONKE J E, MAURICE L, et al. Anomalous mercury isotopic compositions of fish and human hair in the Bolivian Amazon[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(23): 8 985-8 990.
- [99] SENN D B, CHESNEY E J, BLUM J D, et al. Stable isotope (N, C, Hg) study of methylmercury sources and trophic transfer in the northern gulf of Mexico[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(5): 1 630-1 637.
- [100] 冯新斌, 尹润生, 俞奔, 等. 汞同位素地球化学概述[J]. 地学前缘, 2015, 22(5): 124-135.
- [101] 谭清友, 付学吾, 何天容. 我国自然源汞排放研究进展[J]. 生态学杂志, 2017, 36(3): 833-845.
- [102] 钱建平, 李伟, 张力, 等. 地下水中重金属污染源及研究方法综述[J]. 地球与环境, 2018, 46(6): 613-620.
- [103] CIRELLI G L, CONSOLI S, LICCIARDELLO F, et al. Treated municipal wastewater reuse in vegetable production[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 104: 163-170.
- [104] KOUZNETSOV M, PACHEPSKY Y, GILLERMAN L, et al. Microbial transport in soil caused by surface and subsurface drip irrigation with treated wastewater. *International Agrophysics*[J]. 2004, 18(3): 239-247.
- [105] CAMPOS C, ORON G, SALGOT M, et al. Attenuation of microorganisms in the soil during drip irrigation with waste stabilization pond effluent[J]. *Water Science and Technology*, 2000, 42(10/11): 387-392.
- [106] HASSAN G, RENEAU R B, HAGEDORN C, et al. Modeling water flow behavior where highly treated effluent is applied to soil at varying rates and dosing frequencies[J]. *Soil Science*, 2005, 170(9): 692-706.
- [107] 栗岩峰, 李久生, 赵伟霞, 等. 再生水高效安全灌溉关键理论与技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 102-110.
- [108] ARORA S, SARASWAT S, MISHRA R, et al. Design, performance evaluation and investigation of the dynamic mechanisms of earthworm-microorganisms interactions for wastewater treatment through vermifiltration technology[J]. *Bioresource Technology Reports*, 2020, 12: 100 603.
- [109] 马学良, 吴晓光, 苏音, 等. 我国滴灌技术应用发展若干问题分析[J]. 节水灌溉, 2004(5): 21-24.
- [110] 周博, 李云开, 裴旖婷, 等. 再生水滴灌灌水器附生物膜生长对堵塞的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 146-151.
- [111] MILSTEIN A, FELDLITE M. Relationships between thermal stratification in a secondarily treated wastewater reservoir that stores water for irrigation and filter clogging in the irrigation system[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 153: 63-70.
- [112] 宋鹏, 李云开, 李久生, 等. 加氯及毛管冲洗控制再生水滴灌系统灌水器堵塞[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 80-86.

(下转第 43 页)