

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.016

# 再生水高效安全灌溉关键理论与技术研究进展\*

栗岩峰 李久生 赵伟霞 王珍

(中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

**摘要:** 再生水灌溉已成为世界范围内缓解水资源供需矛盾的有效手段。再生水中含有一定量的有害物质可能带来农田生态环境的污染风险,不合理再生水灌溉引起的系统安全和环境污染风险成为限制其应用的主要因素。以实现系统稳定、环境持续和调控有效为目标,深入开展相关理论和技术问题研究是保证再生水高效安全灌溉的关键。在系统总结国内外研究成果的基础上,分析了再生水灌溉对灌水器、灌溉系统、农田环境以及农产品等不同尺度介质的影响,阐释了再生水中的养分、盐分、微生物和典型污染物等的行为特征及相互作用机制。提出需要进一步研究再生水灌溉对系统性能影响的微观机制与宏观特征、对环境影响的动力学过程、对养分吸收利用及转化过程的影响以及高效安全调控机制等关键理论和技术,为实现再生水的高效安全灌溉提供参考。

**关键词:** 再生水灌溉 灌溉系统安全 环境安全 养分吸收 安全调控

**中图分类号:** S273.5; S275.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)06-0102-09

## Review on Irrigation Technology Applying Sewage Effluent—Advances and Prospects

Li Yanfeng Li Jiusheng Zhao Weixia Wang Zhen

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,  
China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** The use of sewage effluent subjected to proper treatment for agricultural irrigation has been increasingly considered as a supplemental source of freshwater in many countries where a shortage of potable water is current reality. However, concern exists over the pollution risk due to the toxic accumulation from sewage effluent, which is the main restraint on the application of sewage effluent irrigation. Extensive researches on system stability, environmental sustainability, and efficient control are highly necessary to ensure the efficient and safe use of sewage effluent for agricultural irrigation. The effects of sewage effluent application on drip emitters, irrigation system, environments and agricultural products were reviewed. The behaviors and interaction between nutrients, salts, microorganisms and typical pollutants were summarized. Several theoretical and technical issues that need to be further studied, including the micro mechanism and macro behaviors of the influences of sewage application on irrigation system performance, the dynamics process of environmental changes imposed by sewage irrigation, the effects of sewage application on nutrient uptake and utilization, and efficiently safe control mechanisms of sewage irrigation, were prospected. Expected researches on these issues can add new knowledge to the regulation theory of water, nutrients and salts for irrigation and it will be a contribution to enhancing the efficiency and safety of use of sewage effluent for agricultural irrigation.

**Key words:** Sewage irrigation Safety of irrigation system Environmental safety Nutrient uptake Safety regulation

收稿日期: 2015-02-10 修回日期: 2015-03-12

\* 国家自然科学基金重点资助项目(51339007)

作者简介: 栗岩峰,高级工程师,博士,主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: liyf@iwhr.com

通讯作者: 李久生,研究员,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: jiushengli@126.com

## 引言

水资源短缺是制约我国社会经济可持续发展的主要瓶颈之一。作为用水大户的农业用水量持续增加,从2003到2013年的10年间增加了490.1亿 $\text{m}^3$ ,相当于2013年全国用水总量的8%<sup>[1]</sup>,对农业节水和高效用水的要求尤为迫切。将污水处理回用,作为替代性水源,可以有效缓解农业用水紧缺的矛盾。我国的再生水水源稳定、供给可靠,截至2013年,全国水务系统污水处理厂已达2159座,年污水处理总量254.1亿 $\text{m}^3$ ,占农业用水总量的6.5%<sup>[2]</sup>。如何有效利用再生水资源已成为当前面临的重要课题。再生水灌溉作为再生水利用的主要途径,已经在世界许多国家得到广泛应用<sup>[3]</sup>。2012年FAO出版的38号水报告《Coping with water scarcity: an action framework for agriculture and food security》指出,在水资源日益紧缺的形势下,再生水在农业灌溉中发挥着重要作用,据估计全世界污水灌溉面积约达到2000万 $\text{hm}^2$ ,并将再生水灌溉列为解决水危机的重要举措。我国的再生水灌溉也在近几年取得了较快的发展,目前在北京、天津等大中城市的郊区应用较为集中。以北京市为例<sup>[4]</sup>,2014年全市再生水利用量达到8.6亿 $\text{m}^3$ ,再生水灌溉面积达4万 $\text{hm}^2$ ,发展潜力巨大,对保障农业生产、缓解用水矛盾、实现灌溉农业的可持续发展具有重要的意义。

与常规灌溉水源相比,再生水中含有较为丰富的营养物质可供作物吸收利用,同时也有一定量的有害物质带来农田生态环境的污染风险,实现水肥高效利用与降低污染风险是再生水灌溉最为关注的问题。本文从再生水灌溉的系统(管网及灌水器)安全、环境行为特征、水肥高效利用和安全调控等方面系统总结国内外的研究进展,从再生水灌溉的系统稳定、环境持续和调控有效3个方面探讨了解决再生水安全高效的关键理论和技术,为实现再生水的高效安全灌溉提供参考。

## 1 再生水灌溉的系统安全

在灌溉系统安全方面,被认为最适宜再生水灌溉的滴灌技术是关注的重点。引起滴灌系统安全的主要问题是灌水器堵塞。据调查<sup>[5]</sup>,国内已报废的滴灌工程中,1/3是由于堵塞问题处理不当。再生水中的悬浮物、溶解盐、化学沉淀、溶解性有机物及微生物等污染物都极易形成灌水器的生物和化学堵塞,对系统性能的影响相对常规水滴灌会更加严重,机制更加复杂。Li等<sup>[6]</sup>通过不同水质滴灌的连续运行试验得出,再生水滴灌的灌水器流量与初始值

的比率平均比地下水滴灌低26%,均匀系数比地下水滴灌降低23%。因此,堵塞问题已成为关系再生水滴灌系统成败的关键因素,堵塞的防止和安全处理技术也成为国内外研究的热点。Nakayama等<sup>[7]</sup>系统全面地总结了灌水器堵塞方面的研究成果,给出了防止物理、生物和化学堵塞的水质标准。由于再生水中含有比常规水多得多的藻类、微生物(细菌)和各种盐离子及氮、磷等化学物质,堵塞物的形成机制更加复杂,灌水器内部不规则形状底层上沉积物的不断聚集<sup>[8]</sup>、有机物和细菌组成的微生物絮团表面的固体颗粒吸附<sup>[9]</sup>都可能导致灌水器堵塞。鉴于堵塞物形成过程的微观特征,揭示再生水滴灌灌水器的堵塞机制还需要对再生水中引起堵塞的污染物和颗粒物的运移累积过程进行动力学描述。多位学者利用CFD<sup>[10-11]</sup>和分形几何理论<sup>[12]</sup>等手段模拟灌水器流道内的颗粒物随水流的运动,分析流道结构参数与灌水器堵塞状况、水力性能之间的关系,为明确灌水器内部的堵塞物富集形成机制以及灌水器流道结构优化提供了新思路。现代观测技术和分析手段的应用使得从微观上揭示灌水器的堵塞机制成为可能。多位学者借助现代观测和分析技术研究了生物膜在灌水器堵塞形成和发展过程中的作用<sup>[13-14]</sup>。生物膜是微生物、固体颗粒、絮状物质经过不断沉积而黏附于介质表面的一层物质,再生水中丰富的微生物群落及其生长所需的养分、悬浮颗粒物等都为生物膜的形成提供了条件,而且在微生物的作用下,再生水中化学离子的参与也会对生物膜的稳定状态产生较大影响<sup>[15]</sup>。因此,再生水灌溉条件下堵塞物的形成和演变过程主要受灌溉系统内部水环境中物理、化学和生物等多过程的控制。

灌水器堵塞对系统性能的影响直接表现为系统的灌水均匀性下降。现行滴灌系统均匀性设计与评价标准多是从水力学设计出发,很少考虑土壤中水肥分布的均匀性以及作物的响应特征。如我国的《微灌工程技术规范》<sup>[16]</sup>和美国的《微灌系统田间评价方法》<sup>[17]</sup>,均未能建立在对田间尺度土壤水肥动态和作物生长影响定量评估的基础上而显得依据不足。再生水滴灌系统性能的田间评价除了需要考虑管网水力特性、农田水肥动态与淋失、作物产量与品质等因素,还需考虑再生水中污染物和盐分在土壤中的分布累积特性及作物的响应特征,其核心问题是田间尺度上非均匀供水条件下的水分、养分、盐分 and 各类污染物的运移转化规律研究,这也是相关学科近年来关注的具有挑战性的热点问题。现有滴灌系统性能评价的试验结果多在常规水试验<sup>[18]</sup>或室内无作物条件下获得<sup>[19]</sup>,所得结论还需在大田再

生水滴灌试验和整个灌溉季节内进一步研究和验证。在堵塞对滴灌系统水力性能影响的模拟研究方面,多数成果都是针对清水滴灌建立的<sup>[20-21]</sup>,而再生水滴灌与常规水滴灌发生堵塞的机制有很大不同。因此,现有模型如何应用于再生水滴灌系统,还需要进一步确认。

灌水器堵塞的防止和处理是再生水滴灌系统安全运行的关键问题,处理的方法包括化学处理和生物处理两大类。其中,化学处理方法的研究和应用较为广泛,主要包括曝气池、加氯/酸处理、紫外线消毒、管网冲洗等,研究和应用最多且经济实用的是加氯/酸处理。加氯处理的效果与再生水的水质有很大关系。以往的研究中所用的水质差别很大,有人工配制的咸水、经二级处理的城市污水<sup>[22-23]</sup>、土地渗滤系统处理后的畜禽养殖场废水及藻类和细菌含量较高的水库水<sup>[24]</sup>等,再加上试验的气候条件、灌水器类型等不尽相同,得出的加氯模式千差万别。堵塞的生物处理方法是通过在灌溉系统中加入有机物质,防止微生物的生长和堵塞的形成。通常是借助拮抗微生物原理,从植物体表面和土壤等各种生态环境中筛选具有拮抗作用的细菌,或者从滴灌系统堵塞物水相中分离拮抗微生物<sup>[25]</sup>加入再生水滴灌系统,包括放射性土壤农杆菌、荧光假单胞杆菌和芽孢杆菌等,清除堵塞的效果显著<sup>[25]</sup>。目前关于堵塞生物处理方法的研究尚处在起步阶段。总体而言,目前对于灌水器堵塞的化学和生物处理方法的研究还很不全面,各种处理方法对堵塞的减缓和清除机制还不明确,对土壤-作物系统,尤其是土壤环境的影响也不清楚,急需开展相关研究。

## 2 再生水灌溉的环境安全

### 2.1 病原体污染风险

病原体污染风险是灌溉农户和农产品用户最为关心的安全性指标之一,也是各国灌溉水质标准中的重要指标。以我国《城市污水再生利用 农田灌溉用水水质》<sup>[26]</sup>中限定的粪大肠菌群为例,经二级处理后含量明显降低,基本在 $10^3 \sim 10^5$ 个/(100 mL)的水平<sup>[27]</sup>,总体上高于我国现行灌溉水质标准的规定值(4 000 个/(100 mL))。病原体在土壤、作物中存活的时间是病原体感染致病的重要因素之一。病原体在土壤基质中的衰减速率比在再生水中小很多<sup>[28]</sup>,而且还可能继续生长,存活时间受光照、温度等气象条件的影响,也与土壤中的有机物种类和数量、盐离子含量、pH 值、湿度以及病原体自身的特性有关<sup>[29]</sup>。此外,灌水技术参数也会影响病原体在土壤中的存活,如增加滴灌带埋深<sup>[30]</sup>和增加灌水频

率<sup>[31]</sup>都会显著减小土壤中的病原体含量。土壤对微生物的吸附、解吸是一个复杂的动态过程,利用传统的静态试验方法研究病原体传输时,由于未充分考虑病原体的繁殖特性,很难掌握病原体的实际行为特征,因此利用动态试验研究病原体的传输规律已成为主要的发展方向。病原体在土壤中富集后,不仅可以通过气溶胶或粉尘进入大气,污染大气环境及危害人类健康,还可能进入作物体内,对农产品造成污染,危害人体健康<sup>[32]</sup>。滴灌(尤其是地下滴灌)能够有效避免再生水中的病原体和人体直接接触,污染风险相对较小,病原体在滴灌系统中的存活率也明显低于地面灌溉<sup>[33]</sup>。在玉米<sup>[34]</sup>和番茄<sup>[35]</sup>等作物的再生水地下滴灌试验中,均未在果实中检测到病原体残留。虽然目前还没有再生水灌溉引起疾病传播的报道,但如何科学认识与合理评价病原体的污染风险始终是人们关注的焦点。因此,急需深入研究病原体在土壤中的迁移、繁殖和衰减机制以及在作物中的存活规律,探讨通过调控灌溉技术参数减轻病原体污染的可能性,从而有效降低土壤和作物中的病原体数量,减小疾病传播的危险。

### 2.2 持久性有机污染物的影响

再生水中的持久性有机污染物虽然含量较低,但往往具有环境持久性和生物累积性等污染特征,且种类繁多、数量庞大,对环境和人体健康造成危害的风险较大。最受关注的有:《斯德哥尔摩公约》中首批控制的12种化学物质之一,多氯联苯 PCBs;被美国环保局和一些国际组织列入优先控制有机污染物的多环芳烃 PAHs 和邻苯二甲酸酯 PAEs,以及有机杀虫剂等<sup>[36]</sup>。这几类物质都具有难以生物降解、危害持续时间长等典型特征。以多环芳烃 PAHs 为例,研究者在北京东南郊运行20余年的再生水灌区检出表层土壤中有14种多环芳烃 PAHs,平均含量虽然不及附近污灌区的1/3,但也达到了污染土壤的临界值<sup>[37]</sup>。多数持久性有机污染物由于具有低溶解性和憎水性,在污水处理过程中去除效果较差,进入土壤后会吸附于颗粒物质上,长期累积在土壤中。目前国内外对于持久性、微量有机污染物在农田生态系统中的迁移转化规律研究才刚刚起步,取得的结果还不能很好地解释其机理。同时由于有机污染物的种类、化学结构及其代谢产物或降解产物的不同,其迁移过程与机制更为复杂。土壤中有有机污染物的增加会对作物的生长和品质产生一定影响。研究表明<sup>[38]</sup>,作物对有机污染物的吸收与有机污染物的理化特性密切相关,包括有机物的正辛醇-水分配系数和蒸汽压等指标。此外,作物品种和土壤类型对有机污染物的吸收与富集也有很大影响<sup>[39]</sup>。因

此,有必要系统研究典型土壤-作物系统中有机污染物富集规律及其调控机制,探寻有机污染物从土壤进入作物根系的途径,分析作物对有机污染物污染胁迫的适应机制及其根际效应。

### 2.3 重金属累积

再生水灌溉引起的重金属污染风险也是研究和应用中广受关注的热点问题。我国 GB20922—2007《城市污水再生利用 农田灌溉用水水质》在基本控制项目里对汞、镉、砷、铬和铅等5项重金属指标做出了限定。在来源于工业污水的再生水中重金属含量通常较高,以生活污水为主要来源的再生水中含量较低。刘洪禄等<sup>[40]</sup>对北京18座污水处理厂再生水水质的监测结果表明,各污水厂出水的重金属浓度均远低于农田灌溉水质标准,超标率为零。对北京市东南部具有40年历史的污灌区土壤调查发现,长期再生水灌溉不会引起土壤的重金属污染<sup>[41]</sup>。但也有多项研究指出污水灌溉会引起土壤中重金属严重超标<sup>[42]</sup>,长期再生水灌溉条件下的重金属累积问题不容忽视。可见,土壤中的重金属污染程度与再生水来源、土壤类型以及灌溉负荷<sup>[43]</sup>和灌溉方式等因素有关。科学评估再生水灌溉引起的土壤重金属污染风险需要对不同灌溉条件下重金属在各种类型土壤中的运移分布规律开展系统研究。此外,采用合理的灌溉方式也可以减少重金属在土壤中的累积,如采用滴灌和分根交替灌溉等技术较沟灌和常规灌溉方式会显著降低土壤中的重金属含量<sup>[44]</sup>。土壤重金属污染会引起重金属在作物中的累积,直接影响作物生长和农产品的质量。重金属在作物各部位的累积程度存在差异,针对粮食作物的研究表明<sup>[45]</sup>,重金属在根部的累积量最大,籽粒中最小,作物的根系生长和种子发芽率因此受到明显的抑制作用<sup>[46]</sup>,幼苗死亡率也明显增加<sup>[47]</sup>。可以认为作物的根茎叶系统起到了减少重金属向果实迁移的屏障作用。尽管如此,作物的产量和果实品质指标也可能受到不利的影响。而在再生水灌溉的叶菜类作物中,重金属的累积则比较明显<sup>[48]</sup>。土壤中的重金属累积还会通过改变酶活性影响土壤中的各类生化过程。而重金属对土壤酶活性的作用也要受到土壤中粘粒和有机质<sup>[49]</sup>吸附作用的影响。因此,再生水灌溉条件下的重金属污染是包含土壤中物理、化学和生物各类反应,同时还有作物参与的复杂行为过程。

### 2.4 盐分累积

再生水灌溉引起的土壤盐碱化也是最为关注的问题之一。据估计,二级处理再生水中的全盐含量约为地下水的1.5~2.0倍<sup>[40]</sup>,在干旱少雨地区土

壤盐分累积问题尤为突出。Qian等<sup>[50]</sup>对美国干旱半干旱区5处运行4~33年的再生水灌区土壤化学特性进行了监测,结果表明土壤电导率(EC)和钠吸附比(SAR)分别比常规水灌溉增加187%和481%。我国也有许多再生水灌溉引起盐分累积的研究报道<sup>[51]</sup>。但也有一些室内土柱模拟试验和短期田间试验<sup>[52]</sup>研究得出再生水灌溉后土壤盐分累积不明显的结论。可见,再生水灌溉条件下的土壤盐分累积具有时间尺度效应,土壤盐分的分布累积在不同年际间如何变化,对降雨等气象环境因素的变化如何响应以及对地下水的影响等都是值得进一步深入研究的问题。滴灌属于局部灌溉,盐分的分布和累积比地面灌溉更趋复杂,积盐区域是值得关注的问题。有研究表明<sup>[53]</sup>滴灌带埋深较浅时土壤表层的含盐量要高于地面灌溉,尤其在两条滴灌带中间的地表处累积盐分的浓度最高,而滴灌带下方的盐分累积最少。盐分在土壤中的分布和累积状况很大程度上受土壤性质和灌溉技术参数影响<sup>[54]</sup>,也与再生水中的离子特性密切相关。不同盐离子在土壤中的迁移速度与分布特征并不相同,如 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 与 $\text{SO}_4^{2-}$ 主要分布在湿润体外围,而 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Na}^+$ 主要分布在湿润体内部<sup>[55]</sup>。因此,全面认识再生水滴灌条件下盐分在土壤中的累积特性需要系统研究不同时间尺度内不同再生水灌溉方式引起的土壤盐分变化动态,分析不同尺度区域的土壤盐分在灌溉季节和年间的变化。

### 2.5 对土壤酶活性的影响

土壤酶是由土壤微生物、动植物活体分泌及动植物残体、遗骸分解释放于土壤中的一类具有催化功能的生物化学物质,参与土壤中各种生物化学过程和物质循环,是各种生化反应的催化剂。土壤酶活性反映了土壤养分转化的快慢以及各种生物化学过程的动向和强度。与土壤的理化指标相比,酶活性对各种自然和人为因素的变化更加敏感,土壤理化性质的改变、不同的水肥管理措施、耕作措施、种植条件和轮作情况等都可能引起土壤酶活性的变化<sup>[56]</sup>,因此土壤酶活性也常被作为评价土壤肥力的指标。再生水中的养分、盐分、有机污染物和重金属等指标都会引起土壤酶活性的变化。养分指标中最重要的氮、磷、碳等都与土壤酶活性有较好的相关性,如与全氮显著正相关的酶包括脲酶、脱氢酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶和蔗糖酶活性等,与全磷和有机碳显著正相关有磷酸酶活性<sup>[57]</sup>。土壤中可溶性盐分的累积对酶活性有潜在的负效应,如 $\beta$ -葡萄糖苷酶、酸性磷酸酶和芳基硫酸酯酶活性会随含盐量和含钠量增加分别呈指数和线性降低<sup>[58]</sup>。有机污染物会

引起土壤生态群的毒性反应,降低酶活性。然而,这类物质在再生水中的浓度通常是很低的,即使土壤酶活性暂时受到抑制,也会很快恢复。与有机污染物相反,再生水中的重金属会长期累积在土壤中破坏土壤的微生物群落,影响土壤酶的活性,且随含量的增加其抑制作用明显增强。影响较大的重金属指标主要包括砷、汞、镉、硒、锌等,尤其以水溶性可交换状态存在时毒性最大<sup>[59]</sup>。以往的研究大多仅考虑单项水质指标对土壤酶活性影响,而没能考虑各指标间的交互作用。研究表明,不同的重金属元素间、不同的重金属元素和多环芳烃组合<sup>[60]</sup>都会对酶活性产生交互作用。因此,再生水灌溉对土壤酶活性的影响是各种水质指标相互影响、多种环境因子综合作用的结果,而且由于土壤酶的种类很多,不同酶的活性对各项水质指标与环境参数的反应也有很大差异,以致相关的研究成果较为零散,系统性较差,未能较好地揭示土壤酶活性对再生水灌溉的响应机制。此外,由于缺乏再生水灌溉条件下土壤酶活性对养分转化过程的系统研究,利用土壤酶活性对再生水灌溉条件下土壤肥力特征进行评价的指标体系还很不完善。

### 3 再生水灌溉的高效利用与安全调控

#### 3.1 再生水灌溉水肥利用机制

再生水中含有一定量的营养物质(如氮、磷、钾、碳等),通常认为能够增加土壤中和植物体内的养分含量,促进植株的发育、增加产量。国内外有关再生水和污水灌溉条件下的养分平衡和利用效率的研究结果表明<sup>[61-62]</sup>,从增加土壤肥力和产量的角度来看,再生水中的养分可以起到部分替代施肥的作用,但与施入肥料的吸收利用模式仍存在差异<sup>[63]</sup>。再生水中养分的形态多样性可能是造成与施入肥料的吸收模式存在差异的原因之一。以氮素为例,再生水中除了与施入肥料类似的矿物质氮,还有藻类代谢等形成的有机氮。据估计<sup>[64]</sup>,再生水有机氮的比例约占10%~30%,虽然有机氮可能会被土壤颗粒吸附,但是其在土壤中的运移程度比铵态氮要大很多,有机氮的运移转化对整个氮素的循环过程有较大贡献。然而,目前对再生水中氮素的研究以矿物质氮为主,关于有机氮的运移转化的研究还很少,对再生水中养分有效性的定量研究也十分缺乏。上述分析可以看出,由于缺乏对再生水灌溉条件下不同来源养分吸收利用和转化机制的系统研究,对再生水中各类营养元素被植物吸收利用的程度难以定量评估,进而无法对再生水中的养分能在多大程度上代替施肥、对施入肥料吸收过程的影响等问题

予以准确回答。

再生水中的养分含量相对于作物的生长需求来说通常较小,还需要与施肥结合来满足作物的生长需要。目前关于再生水灌溉施肥的研究十分缺乏,对再生水灌溉条件下的水肥吸收利用机制和影响因素还不清楚。再生水灌溉会引起土壤离子环境和微生物环境的变化从而导致土壤中养分含量的变化,并改变作物对水肥的吸收利用过程,影响途径包括:①通过改变土壤水总溶解盐的浓度改变渗透压,物理性地阻碍作物对水肥的吸收<sup>[65]</sup>。②通过改变土壤理化性质,引起土壤渗透性的变化,间接影响作物代谢和水肥吸收过程。再生水灌溉条件下土壤中微生物活动的变化可能会导致土壤大孔隙体积减小而使饱和导水率降低<sup>[66]</sup>,土壤孔隙表面的悬浮固体和有机物沉积、高钠和低盐度引起土壤粘粒分散<sup>[67]</sup>等也会引起土壤渗透性和通气性降低。然而,也有研究认为再生水灌溉引起的有机质含量增加会提高土壤团聚体的稳定性<sup>[68]</sup>。这取决于再生水中各类指标的相对含量。③通过改变土壤的离子环境,影响作物的水肥吸收利用过程。再生水中过量的盐分会引起植株体内养分的失衡,例如会增加土壤中钠和氯的含量,导致更多的钠离子和氯离子被吸入植株体内,抑制叶片的气体交换作用<sup>[69]</sup>,降低叶片的叶绿素含量,影响作物的同化作用。不同盐分离子在作物吸收过程中也存在竞争和置换作用。例如钠离子在根区的生化反应中与钾离子和钙离子竞争,干扰根系对钾离子和钙离子的吸收,并通过置换作用导致作物体内的钙离子缺失。目前关于各种离子影响的研究大多只是机理性的描述,定量分析较少。④改变土壤的微生物环境,影响养分的转化过程。研究发现再生水灌溉能够加速土壤中养分的矿化作用和硝化反应等过程<sup>[70]</sup>,引起土壤中总碳和总氮等含量的变化。土壤中盐分含量的增加也会降低土壤中水解酶的活性<sup>[71]</sup>,引起氮素形态和含量的变化。可见,再生水灌溉条件下水肥吸收利用机制的复杂性在于,一方面再生水中盐分离子的多样性及其交互作用导致水肥盐耦合过程的不确定性;另一方面,再生水灌溉引起的土壤微生物种群数量变化也会在水肥盐耦合过程产生影响。目前,相关的研究工作还十分缺乏,再生水灌溉条件下的水肥吸收利用机制尚不明晰。

#### 3.2 再生水灌溉安全调控

再生水灌溉条件下的水肥管理调控原理与常规灌溉类似,主要是借助灌溉施肥技术参数,如地面灌溉中的单宽流量、关口时间和施肥时机等参数以及滴灌技术中的滴头流量、灌水频率、灌水量、滴灌带

理深及分根交替灌溉等措施,改变水肥在土壤中的时空分布特性,进而影响作物的吸收利用过程。还有研究<sup>[72]</sup>通过给灌溉水中掺气的方式改善地下滴灌时作物根区的缺氧状况,增加根系的活力,改善水肥的吸收。然而,再生水灌溉条件下的系统运行管理调控除了要提高水肥的利用效率以外,还需实现防止污染物和病原体的淋失扩散及盐分累积、降低污染风险、保证再生水灌溉安全运行的目标。因此,再生水灌溉条件下的调控应综合考虑养分、盐分和污染物等的运移转化过程及作物生长和产量的响应。以往研究中,考虑最多的调控手段是灌水量。通过改变灌水量调控不同土层深度的盐分含量,减少根区土壤的盐分累积和淋失风险,同时也可影响土壤中微生物的活性<sup>[73]</sup>,改善土壤肥力状况。此外,合理调控根区附近的水分状况还能够补偿盐分对作物耗水的抑制效应<sup>[74]</sup>。滴灌技术通常采用较小的灌水量,因此盐分和污染物在土壤中的累积状况更值得关注。例如,通过改变距离滴头较近范围内的土壤电导率可以有效调节作物的蒸腾<sup>[75]</sup>;通过改变滴灌带埋深可以调节根区土壤的盐分累积,进而影响作物水肥吸收利用和生长;在淡水资源丰富或地下水位较低的地区还可以通过持续的清水滴灌把累积在根区的盐分进一步淋溶到更深层的土壤以减少盐分对作物的危害<sup>[35]</sup>。可以看出,目前有关再生水灌溉调控的研究大都仅考虑了盐分累积的影响,对养分和污染物指标及其相互作用的影响均未涉及,存在调控目标单一、描述技术参数影响的定量化程度不够、对水肥盐和污染物指标转化过程及作物响应特征等因素考虑不足等问题,影响了调控的效果,限制了再生水灌溉综合效益的发挥。

#### 4 再生水灌溉关键理论与技术研究展望

前述分析表明,目前对再生水灌溉系统内部的污染物行为特征和堵塞机制的研究还不够深入,有关灌水器堵塞安全处理模式、污染物环境影响机理以及水肥盐耦合机制与安全调控措施等方面的研究仍十分缺乏,难以满足再生水高效安全灌溉的要求。为此,继续深入探索再生水灌溉的关键理论,系统揭示再生水灌溉的系统影响特征、环境行为过程和安全调控机制,将为科学评估再生水灌溉的污染风险、提出再生水灌溉安全高效运行管理技术奠定基础。

(1)再生水灌溉影响系统运行的微观机制与宏观特征

再生水中各类污染物在灌溉管道和灌水器内部的运移和富集是引起灌水器堵塞、影响滴灌系统运行安全的主要因素。目前对于再生水中污染物在灌

溉系统内部的运移和反应的机制还不完全清楚,对堵塞形成和减缓机理的认识还很不全面,对于堵塞在灌溉系统中的宏观分布特征和演化规律及其对系统性能的影响也缺乏系统的研究。为此,应从不同的空间和时间尺度研究灌溉系统内部的污染物行为特征对堵塞形成的诱发机制、堵塞灌水器在灌溉系统中的分布特征、堵塞的减缓机制及年际间的演化规律,同时还需考虑水质指标、灌水器结构参数、环境因子以及人为干预措施等各种因素的共同作用,从而对再生水滴灌灌水器的堵塞机理及减缓机制获得更为全面的认识。

(2)再生水灌溉对环境影响的动力学过程

全面认识和掌握各类污染物在灌溉过程中的迁移、转化、累积和扩散规律,是科学评价再生水灌溉环境污染效应的基础,也可为现行的再生水水质及灌溉水质等相关标准的修订和完善提供科学依据。然而,由于再生水中污染物行为的多样性和土壤环境的复杂性,再生水灌溉对农田生态环境的作用和影响机理还不完全清楚,仍存在大量的科学问题需要深入研究。尤其是在变化环境因素的影响下,污染物在地表、土壤和作物等环境介质中的迁移、转化、累积和扩散规律,以及在不同时间尺度上的演变过程等,都是保障再生水灌溉安全应用的核心问题。综合考虑水质要素和环境参数变化条件下再生水中典型有机污染物和病原体在环境介质中的行为特征以及土壤肥力指标的响应机制,克服以往再生水灌溉环境影响评价中单纯依靠经验和统计方法的不足,有利于揭示再生水灌溉对环境影响的动力学过程。

(3)再生水灌溉对养分吸收利用及转化过程的影响机制

再生水灌溉条件下养分的来源和形态多样。再生水灌溉引起的土壤离子环境和微生物特性的变化都会影响养分的运移、转化和吸收利用过程。以往研究对再生水中所含养分考虑不足,对水肥盐耦合作用及微生物环境变化的影响机制也尚不明晰。因此,应系统研究不同来源和形态营养元素的吸收特征,全面揭示再生水灌溉条件下土壤离子特性及微生物特性对养分吸收模式和转化机制的影响,从而为制定再生水灌溉高效安全调控措施与优化技术参数组合提供依据。

(4)再生水灌溉的高效安全调控机制

再生水灌溉条件下的系统运行调控应综合考虑养分、盐分和污染物等的运移转化过程及作物生长和产量的响应。以往再生水灌溉调控中对养分转化过程及安全性指标考虑不足。为此,应将灌水施肥技术参数的调控范围从单纯反映水肥盐分布运移的物理

过程,扩展到包含多种生化反应的水肥盐耦合过程、环境行为特征以及作物生长过程,进而得出更为科学合理的再生水灌溉高效安全调控技术参数组合。

## 5 结束语

我国的再生水灌溉发展迅速、潜力巨大。国家农业节水纲要(2012—2020年)明确提出要大力提倡合理利用雨洪资源、微咸水和再生水。当前,在我国大力建设资源节约型、环境友好型现代农业的形

势下,再生水灌溉的发展必须在节约淡水资源的同时,满足增产增效、生态环保等综合效益的要求。为此,系统开展再生水灌溉的关键理论研究,从再生水灌溉的安全和高效利用出发,揭示再生水灌溉对养分吸收以及系统安全和环境的影响机理,提出利用灌溉技术参数对养分、盐分和典型污染物行为特征和影响过程进行调控的方法,制定科学合理的再生水灌溉安全高效运行管理模式,对于实现再生水灌溉的健康、可持续发展具有重要的理论和现实意义。

## 参 考 文 献

- 1 中华人民共和国水利部. 2013年中国水资源公报[R]. 北京:中华人民共和国水利部,2014.
- 2 中华人民共和国水利部. 2013年全国水利发展统计公报[R]. 北京:中国水利水电出版社,2014.
- 3 Toze S. Reuse of effluent water benefits and risks[J]. *Agricultural Water Management*, 2006,80(1-3):147-159.
- 4 朱松梅. 城区2015年再生水用量将超5亿立方米[N]. 北京日报,2014-12-17.
- 5 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):21-25.
- 6 Li J, Chen L, Li Y. Comparison of clogging in drip emitters during application of sewage effluent and groundwater[J]. *Transactions of the ASABE*, 2009, 52(4):1203-1211.
- 7 Nakayama E S, Bucks D A. Water quality in drip/trickle irrigation: a review[J]. *Irrigation Science*, 1991,12(4): 187-192.
- 8 Adin A, Sacks M. Dripper clogging factor in wastewater irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1991, 117(6):813-826.
- 9 Taylor H D, Bastos R K X, Pearson H W, et al. Drip irrigation with waste stabilization pond effects: solve the problem of emitter fouling[J]. *Water Science and Technology*, 1995, 31(12):417-424.
- 10 Li Y, Yang P, Xu T, et al. CFD and digital particle tracking to assess flow characteristics in the labyrinth flow path of a drip irrigation emitter[J]. *Irrigation Science*, 2008, 26(5): 427-438.
- 11 牛文全,吴普特,喻黎明. 基于含砂量等值线的迷宫流道结构抗堵塞设计与模拟[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(5): 14-20. Niu Wenquan, Wu Pute, Yu Liming. Anti-clogging experimental investigation and optimized design of micro-channels of emitter based on isoline of sand content[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(5): 14-20. (in Chinese)
- 12 李云开,杨培岭,任树梅,等. 分形流道设计及几何参数对滴头水力性能的影响[J]. *机械工程学报*, 2007,43(7): 109-113. Li Yunkai, Yang Peiling, Ren Shumei, et al. Effects of fractal flow path designing and its parameters on emitter hydraulic performance[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007,43(7): 109-113. (in Chinese)
- 13 李贵兵,任树梅,杨培岭,等. 再生水条件下灌水器内生物膜生长对流量的影响[J]. *农业机械学报*, 2012,43(3):33-38. Li Guibing, Ren Shumei, Yang Peiling, et al. Effects of growth of biofilm to emitters flow in emitter of reclaimed wastewater irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012,43(3):33-38. (in Chinese)
- 14 李云开,宋鹏,周博. 再生水滴灌系统灌水器堵塞的微生物学机理及控制方法研究[J]. *农业工程学报*, 2013,29(15): 98-107. Li Yunkai, Song Peng, Zhou Bo. Microbiology mechanism and controlling methods for emitter clogging in the reclaimed water drip irrigation system[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(15): 98-107. (in Chinese)
- 15 Gouidera M, Bouzida J, Sayadi S, et al. Impact of orthophosphate addition on biofilm development in drinking water distribution systems[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 167(1): 1198-1202.
- 16 GB/T 50485—2009 微灌工程技术规范[S]. 2009. GB/T 50485—2009 Technical standard of micro-irrigation project[S]. 2009. (in Chinese)
- 17 ASAE EP 458—2000 Field evaluation of microirrigation systems[S]. 2000.
- 18 Li J, Meng Y, Li B. Field evaluation of fertigation uniformity as affected by injector type and manufacturing variability of emitters[J]. *Irrigation Science*, 2007, 25(2): 117-125.
- 19 Hills D J, Brenes M J. Microirrigation of waste water effluent using drip tape[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2001, 17(3): 303-308.
- 20 康跃虎. 微灌系统水力学解析和设计[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1999.
- 21 Chieng S, Ghaemi A. Uniformity in a microirrigation with partially clogged emitters[C]//2003 ASAE Annual Meeting, ASAE Paper 032097, 2003.
- 22 Coelho R D, Resende R S. Biological clogging of Netafim drippers and recovering process through chlorination impact treatment [C]//2001 ASAE Annual Meeting ASAE Paper 012231, 2001.
- 23 Li J, Chen L, Li Y, et al. Effects of chlorination schemes on clogging in drip emitters during application of sewage effluent[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2010, 26(4): 565-578.
- 24 Dehghanisanij H, Yamamoto T, Ahmad B O, et al. The effect of chlorine on emitter clogging induced by algae and protozoa and

- the performance of drip irrigation[J]. Transaction of ASAE, 2005, 48(2): 519 - 527.
- 25 Ustun A, Figen D M. Biological treatment of clogged emitters in a drip irrigation system [J]. Journal of Environmental Management, 2005, 76(4): 338 - 341.
- 26 GB 20922—2007 城市污水再生利用 农田灌溉用水水质[S]. 2007.  
GB 20922—2007 The reuse of urban recycling water—quality of farmland irrigation water[S]. 2007. (in Chinese)
- 27 仇付国,王晓昌. 污水再生工艺去除病原体效果的评价[J]. 中国给水排水, 2005, 21(7):52 - 54.  
Qiu Fuguo, Wang Xiaochang. Assessment on wastewater reclamation and reuse process for pathogen removal[J]. China Water & Wastewater, 2005, 21(7):52 - 54. (in Chinese)
- 28 Gerba C P, Mcleod J. Effect of sediments on the survival of *Escherichia coli* in marine waters[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1976, 32(1):114 - 120.
- 29 Meschke J S, Sobsey M D. Comparative adsorption of Norwalk virus, poliovirus 1 and F + RNA coliphage MS2 to soils suspended in treated wastewater[J]. Water Science and Technology, 1998, 38(12):187 - 189.
- 30 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): 387 - 392.
- 31 Hassan G, Reneau R B, Hagedorn J C. 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.
- 32 Cirelli G L, Consoli S, Licciardello F, et al. Treated municipal wastewater reuse in vegetable production[J]. Agricultural Water Management, 2012, 104:163 - 170.
- 33 Kouznetsov Y A, Pachepsky L, Gillerman C J, et al. Microbial transport in soil caused by surface and subsurface drip irrigation with treated wastewater[J]. International Agrophysics, 2004, 18(3):239 - 247.
- 34 Oron G, DeMalach J, Hoffman Z, et al. Subsurface microirrigation with effluent [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1991, 117(1):25 - 36.
- 35 Oron G. Soil as a complementary treatment component for simultaneous wastewater disposal and reuse[J]. Water Science and Technology, 1996, 34(11):243 - 252.
- 36 Zhang C, Liao X, Li J, et al. Influence of long-term sewage irrigation on the distribution of organochlorine pesticides in soil - groundwater systems[J]. Chemosphere, 2013, 92(4):337 - 343.
- 37 何江涛,金爱芳,陈素暖,等. 北京东南郊再生水灌区土壤 PAHs 污染特征[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(4):666 - 673.  
He Jiangtao, Jin Aifang, Chen Sunuan, et al. Distribution characteristic of soil PAHs in reclaimed water irrigation area in the southeastern suburb of Beijing[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(4):666 - 673. (in Chinese)
- 38 Smith C J, Hopmans P, Cook F J, et al. Accumulation of Cr, Pb, Cu, Ni, Zn and Cd in soil following irrigation with treated urban effluent in Australia[J]. Environmental Pollution, 1996, 94(3):317 - 323.
- 39 刘文莉,张珍,朱连秋,等. 电子垃圾拆解地区土壤和植物中邻苯二甲酸酯分布特征[J]. 应用生态学报, 2010, 21(2): 489 - 494.  
Liu Wenli, Zhang Zhen, Zhu Lianqiu, et al. Distribution characteristic of phthalic acid esters in soil and plants at e-waste recycling sites in Taizhou of Zhejiang China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(2):489 - 494. (in Chinese)
- 40 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 - 13.  
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 - 13. (in Chinese)
- 41 Bao Z, Wu W, Liu H, et al. Impact of long-term irrigation with sewage on heavy metals in soils, crops, and groundwater—a case study in Beijing[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2014, 23(2):309 - 318.
- 42 Carlos A, Lucho C, Francisco P G, et al. Chemical fractionation of boron and heavy metals in soils irrigated with wastewater in central Mexico[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2005, 108(1):57 - 71.
- 43 Chen W, Lu S, Peng C, et al. Accumulation of Cd in agricultural soil under long-term reclaimed water irrigation [J]. Environmental Pollution, 2013, 178(7):294 - 299.
- 44 李平,齐学斌,亢连强,等. 不同潜水平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): 1384 - 1388.  
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): 1384 - 1388. (in Chinese)
- 45 冯绍元,邵洪波,黄冠华. 重金属在小麦作物体中残留特征的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4):113 - 115.  
Feng Shaoyuan, Shao Hongbo, Huang Guanhua. Field experimental study on the residue of heavy metal in wheat crop [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(4):113 - 115. (in Chinese)
- 46 王军涛,刘洪禄,吴文勇,等. 水培条件下重金属 Cr(VI)对作物种子萌发影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6):222 - 225.
- 47 Bhati M, Singh G. Growth and mineral accumulation in *Eucalyptus camaldulensis* seedlings irrigated with mixed industrial effluents [J]. Bioresource Technology, 2003, 88(3):221 - 228.
- 48 庞妍,同延安,梁连友,等. 污灌农田土壤-作物体系重金属污染评价[J]. 农业机械学报, 2015, 46(1):148 - 154.  
Pang Yan, Tong Yan'an, Liang Lianyou, et al. Assessment of heavy metal pollution in soil - crop system on sewage irrigated farmland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1):148 - 154. (in Chinese)



- 49 Bansal O P, Gajraj S, Pragati K. Effect of untreated sewage effluent irrigation on heavy metal content, microbial population and enzymatic activities of soils in Aligarh[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2014, 35(4): 641 - 647.
- 50 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.
- 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 - 107.  
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 - 107. (in Chinese)
- 52 Reyes S I E, Garcia C N E, Servin R D E. Wastewater-irrigation effect in physical and chemical soil properties of Mezquital Valley[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(18): 396 - 402.
- 53 Suarez-Rey E, Choi C Y, Waller P M, et al. Comparison of subsurface drip irrigation and sprinkler irrigation for Bermuda grass turf in Arizona[J]. *Transactions of ASAE*, 2000, 43(3): 631 - 640.
- 54 Chen W, Lu S, Peng C, et al. Accumulation of Cd in agricultural soil under long-term reclaimed water irrigation[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 178(7): 294 - 299.
- 55 王丹, 康跃虎, 万书勤. 微咸水滴灌条件下不同盐分离子在土壤中的分布特征[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(2): 83 - 87.
- 56 Bruce A C. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: a review[J]. *Pedobiologia*, 2005, 49(6): 637 - 644.
- 57 Green V S, Stott D E, Cruz J C. Tillage impacts on soil biological activity and aggregation in a Brazilian Cerrado Oxisol[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 92(1 - 2): 114 - 121.
- 58 Rietz D N, Haynes R J. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(6): 845 - 854.
- 59 Bhattacharyya P, Subhasish T, Kangjoo K, et al. Arsenic fractions and enzyme activities in arsenic-contaminated soils by groundwater irrigation in West Bengal[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, 71(1): 149 - 156.
- 60 Shen G, Lu Y, Zhou Q, et al. Interaction of polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals on soil enzyme[J]. *Chemosphere*, 2005, 61(8): 1175 - 1182.
- 61 Feigin A, Vaisman I, Bielora H. Drip irrigation of cotton with treated municipal effluents: II. nutrient availability in soil[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1984, 13(2): 234 - 238.
- 62 黄冠华, 查贵锋, 冯绍元, 等. 冬小麦再生水灌溉时水分与氮素利用效率研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 65 - 68.  
Huang Guanhua, Zha Guifeng, Feng Shaoyuan, et al. Water and nitrogen use efficiency for winter wheat under the condition of irrigation with treated sewage effluent[J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(1): 65 - 68. (in Chinese)
- 63 da Fonseca A F, Melfi A J, Montes C R. Maize growth and changes in soil fertility after irrigation with treated sewage effluent. I. Plant dry matter yield and soil nitrogen and phosphorus availability[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2005, 36(13 - 14): 1965 - 1981.
- 64 Feigin A, Ravina I, Shalhevet J. Irrigation with treated sewage effluent, management for environmental protection[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1991.
- 65 Yurtseven E, Kesmez G D, Unlukara A. The effects of water salinity and potassium levels on yield, fruit quality and water consumption of a native central anatolian tomato species (*Lycopersicon esculentum*) [J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 78(1 - 2): 128 - 135.
- 66 Jnad I, Lesikar B, Kenimer A, et al. Subsurface drip dispersal of residential effluent: II. soil hydraulic characteristics[J]. *Transactions of the ASAE*, 2001, 44(5): 1159 - 1165.
- 67 Patterson R A. Domestic wastewater and sodium factor[M] // Bedinger M S, Fleming J S, Johnson A I. Site characterization and design of on-site septic systems. West Conshohocken, PA: ASTM STP 1324, 1997: 23 - 25.
- 68 Chenu C, Le Bissonnais Y, Arrouays D. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(4): 1479 - 1486.
- 69 Murray U, Jim K, Daryl S. Managing risks to plant health from salinity, sodium, chloride and boron in reclaimed waters[M] // Stevens D I. Growing crops with reclaimed wastewater. Collingwood: CSIRO Publishing, 2006: 147 - 158.
- 70 da Fonseca A F, Melfi A J, Monteiro F A, et al. Treated sewage effluent as a source of water and nitrogen for Tifton 85 bermudagrass[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 87(3): 328 - 336.
- 71 Garcia C, Hernandez I. Influence of salinity on the biological and biochemical activity of a calciorthird soil[J]. *Plant and Soil*, 1996, 178(2): 255 - 263.
- 72 Bhattarai S P, Midmore D J, Pendergast L. Yield, water-use efficiencies and root distribution of soybean, chickpea and pumpkin under different subsurface drip irrigation depths and oxygenation treatments in vertisols[J]. *Irrigation Science*, 2008, 26(5): 439 - 450.
- 73 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 effects 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. (in Chinese)
- 74 Michelakis N, Vougioucalou E, Clapaki G. Water use, wetted soil volume, root distribution and yield of avocado under drip irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 1993, 24(2): 119 - 131.
- 75 Dehghanisani H, Agassi M, Anyoji H, et al. Improvement of saline water use under drip irrigation system[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 85(3): 233 - 242.