

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2014.04.001

劣质水安全利用研究综述

彭世彰¹, 程 胜^{1,2}, 徐俊增^{1,2}, 熊玉江^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:分析了劣质水资源化利用在缓解用水压力、优化水资源配置、产生特有灌溉效益等方面的重要意义, 简要概括了劣质水灌溉的研究与实践进展, 重点阐述了对土壤、作物、地下水的影响。今后应着重开展农田污染物迁移与劣质水处理、劣质水灌溉技术与标准以及劣质水灌溉的环境影响与生态风险等研究。

关键词:劣质水; 再生水; 微咸水; 灌溉回归水; 安全利用; 灌溉效益

中图分类号: S273.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2014)04-0001-06

Advances in safe utilization of poor-quality water

PENG Shizhang¹, CHENG Sheng^{1,2}, XU Junzeng^{1,2}, XIONG Yujiang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The significance of the utilization of poor-quality water to alleviate water shortages, the optimization of water resources allocation, and the production of specific irrigation benefits are analyzed in this paper. Advances in the study and practice of poor-quality water irrigation are summarized in brief. The impacts of poor-quality water irrigation on soil, crops, and groundwater are analyzed in detail. It is suggested that future research should be focused on contaminant migration and poor-quality water treatment in croplands, poor-quality water irrigation technologies and standards, and environmental impacts and ecological risks of poor-quality water irrigation.

Key words: poor-quality water; reclaimed water; brackish water; irrigation return flow; safe utilization; irrigation efficiency

劣质水是指一切可利用的非常规水资源, 主要包括再生水、灌溉回归水、微咸水等。再生水指城市污水经过适当再生工艺处理后具有一定功能的水, 其主要污染物包括盐分、养分、重金属、有机污染物等; 灌溉回归水是指在农田灌溉中, 流经渠系和田间的地表水流和地下渗流汇集到下游排水河道中的灌溉余水, 其主要污染物包括盐分、养分以及农药残留物等; 用于灌溉的微咸水是指矿化度为 2~5 g/L 的水, 其主要特点是含有大量盐分。可见, 通常意义上的劣质水中含有一定量的有害成分, 利用不当会影

响作物生长, 破坏生态环境。

中国许多地区曾有过漫长的污水灌溉历史。1957 年, 国家建工部曾联合农业部、卫生部把污水灌溉列入国家科研计划, 全国范围内开始兴建污水灌溉工程。1972 年召开的全国污水灌溉会议将“积极慎重”作为发展方针。20 世纪 70 年代末至 90 年代中期, 全国污水灌溉面积激增十余倍。至 1998 年, 全国污水灌溉面积达到 361.8 万 hm², 占全国灌溉总面积的 7.3%^[1]。但我国污水灌溉早期理论研究严重滞后, 将废污水直接用于农业灌溉, 对生态环

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2012BAD08B04); 江苏高校优秀科技创新团队项目(2013)
作者简介: 彭世彰(1959—2013), 男, 教授, 主要从事节水灌溉理论及其农田生态效应研究。E-mail: szpeng@hhu.edu.cn
通信作者: 徐俊增, 教授。E-mail: xjz481@hhu.edu.cn

境造成了极大破坏。20 世纪 90 年代以后,我国制定了 GB5084—1992《农田灌溉水质标准》和 SL 368—2006《再生水水质标准》,但由于水质标准和灌溉技术的适应性问题、再生水对作物的品质影响以及人们对再生水的心理障碍,再生水灌溉目前还未能广泛推广。在宁夏、甘肃、内蒙古、陕西、河南、河北、山东、新疆、辽宁等地区都开展了微咸水利用试验和生产实践^[2],但尚处于探索阶段,研究成果还未普遍推广应用。

近年来,众多学者对再生水、微咸水、灌溉回归水的安全利用进行了大量研究与实践。在劣质水灌溉造成的土壤污染、作物生长受到影响、地下水质量下降等方面,已经形成了初步的理论,但许多研究分散零碎,重复性较多,且多限于定性研究,安全性评价、灌溉模式等诸多研究都有所欠缺,劣质水利用存在的“安全”问题仍难以得到有效解决。劣质水资源化利用,对于解决我国农业用水短缺的问题具有重要意义,且只要利用合理,可将劣质水造成的危害控制在可承受的安全范围内。因此,需要加强劣质水安全利用的理论研究,坚持“低风险、高产量、高效率”的劣质水安全利用理念,确保劣质水能安全高效的应用于农业灌溉,促进劣质水资源化利用的大面积推广。

1 劣质水安全利用有利于保障水资源安全和粮食安全

1.1 合理利用劣质水可缓解农业用水危机

中国水资源稀缺,人均淡水资源仅为世界平均的 1/4。目前中国有 2/3 城市供水不足,1/6 城市严重缺水,在 46 个重点城市中,45.6% 水质较差,14 个沿海开放城市中有 9 个严重缺水。且农村还有近 3 亿人口饮水不安全。此外,我国水资源整体缺乏,地区分布差异性极大。水资源总量的 81% 集中分布于长江及以南地区。总的来说,我国北方属于资源型缺水地区,而南方地区因水体污染造成的水质型缺水问题相当严重。水资源短缺导致了我国紧张的农业用水供需矛盾,据 2011 年《中国水资源公报》统计,全国总用水量 6 107.2 亿 m³,其中农业用水 3 743.5 亿 m³,占总用水量的 61.3%。但农业用水中淡水资源的用量是零增长,供需矛盾日益突出,严重影响粮食生产,2010 年我国由于缺水造成粮食减产 1.684 8 亿 kg^[3]。农业用水短缺已成为制约中国农业发展的主要因素之一,将劣质水安全合理地用于农业灌溉是缓解我国水资源危机,保障粮食产量的有效途径。

1.2 劣质水可利用量巨大,安全利用可保障水资源安全

我国人口众多,每年产生的污水数量极大。据《中国水资源公报》统计分析,2011 年全国废污水排放总量 807 亿 t,其中废污水排放总量大于 30 亿 t 的有江苏、浙江、安徽、福建、河南、湖北、湖南、广东、广西和四川 10 个省(自治区)。污水直接排放造成了严重危害,对全国 103 个主要湖泊的 2.7 万 km² 水面进行水质评价的结果表明,全年水质为劣 V 类的水面占评价水面面积的 24.7%。另一方面,中国地下微咸水资源约 200 亿 m³/a,其中可开采量为 130 亿 m³/a,绝大部分地下微咸水存在于地下 10 ~ 100 m 处^[4],宜于开采利用。我国劣质水可利用量巨大,弃之不用会造成不同程度的生态环境负效应。将劣质水安全利用于农业灌溉不仅可以减少这种危害,还能极大地减少农业方面的常规水用量,降低农业用水占全国总用水的比例,保障水资源安全,促进水资源的优化配置。

1.3 劣质水用于农业灌溉特有的灌溉效益

劣质水安全利用可以产生可观的灌溉效益。再生水与灌溉回归水中含有丰富的氮、磷、钾等营养元素,用于农业灌溉可以减少化肥的使用,并在一定程度上提高土壤肥力,改善土壤结构。Pereira 等^[5]研究再生水灌溉对柑橘生长所需养分的影响,发现再生水能弥补柑橘所需大量元素的不足。众多研究表明,劣质水灌溉对作物产量有积极作用。据统计,污水灌溉后旱田一般情况下可增产 50 % ~ 150 %,水稻田可增产 30 % ~ 50 %,水生蔬菜可增产 50 % ~ 300 %^[6]。郭太龙等^[7]在冬小麦的微咸水灌溉试验中发现,微咸水灌溉相对于旱作增产效果显著;王洪彬^[8]在沧州地区利用微咸水进行灌溉试验也得出了相同的结论。陈秀玲等^[9]在河北省南皮实验区用微咸水($\rho=2 \sim 4$ g/L)和半咸水($\rho=4 \sim 6$ g/L)灌溉的小麦玉米连作,产量分别为 6 960,8 355 kg/hm²,比不灌的雨养农业增产 1.2 ~ 1.6 倍。此外,微咸水用于灌溉可以腾出地下水库库容,可有效滞蓄汛期降雨和地面淡水径流补给,有利于地下咸水淡化,改善农业生态环境。

2 劣质水处理及灌溉技术

长期使用劣质水进行农业灌溉存在着诸多不可避免的问题,归根结底是由于劣质水中含有大量的盐离子、养分或有毒物质(重金属、有机污染物等),对土壤特性、作物生长以及地下水等造成不同程度的负面影响,如何有效除去劣质水中有害物质的问题一直备受关注。污水的处理方式主要包括物

理、化学处理工艺以及建立生物氧化塘、人工湿地等。物理处理工艺是指用格栅、筛网等降低悬浮物含量,或采用合适孔径的超滤或微滤膜处理污水中的细菌、病毒及一定盐分^[10];化学处理工艺是使用一定的化学试剂对污水进行中和、沉淀、除臭、脱色;建立一定规模的生物氧化塘,利用微生物和藻类对污水进行长时间进化处理;人工模拟天然湿地,利用土壤自然净化能力及各类湿地植物、微生物的吸收和降解作用改善污水水质。目前再生水处理技术的应用日趋成熟,开始广泛推广于各再生水灌区。常用的微咸水处理技术主要由蒸馏法、电解析法、反渗透法、冷冻法、超滤法等^[4]。微咸水处理所耗损的能源较多,能源供给问题是目前微咸水利用难以推广的主要原因之一,利用太阳能等清洁能源作为水处理能源是目前微咸水处理技术研究的主要方向之一。灌溉回归水的处理最为常用的方式是湿地净化处理,彭世彰等^[11]提出的农田沟塘湿地系统(PEDWS)能有效除去农田排水中的TN、TP,可将之推广应用于各类劣质水处理。

在灌溉技术上,地下滴灌最适宜于劣质水灌溉,但滴灌因滴头堵塞问题而对水质处理要求较高。劣质水地面灌溉和漫灌对土壤和地下水的污染风险较大。对于再生水,喷灌会增加病菌传播的危险;对于微咸水,喷灌会造成盐分在叶片表面积累而毒害作物。此外,采用常规水与劣质水的混灌、轮灌也可有效减小劣质水中有害物质的影响。

3 劣质水安全利用的研究与实践进展

重金属和盐分在“作物-土壤-地下水”系统中的迁移、分布状况已成为众多学者研究的重点^[12-13],但有机污染物的迁移转化规律研究较少。有关劣质水安全评价的研究也涉及较少,李江云等^[14]针对准噶尔盆地南缘农八师莫索湾灌区微咸水灌溉实践进行了安全评价研究,确立了一套用于微咸水灌溉安全性评价的指标体系,但该评价指标体系存在许多不足,仍有大量工作需要完善。对于微咸水的适应性研究,众多学者以不同作物为研究对象^[15-17],在盐分对土壤和作物生长的影响以及灌溉技术等方面,展开了大量的研究与实践,得出了适宜当地特点的微咸水灌溉盐度。

另一方面,经过众多学者的不断研究与实践,我国在劣质水灌溉对土壤、作物生长、地下水的影响方面,已形成初步理论体系。

3.1 对土壤中盐分和重金属影响

劣质水利用对土壤的影响主要是由盐分和重金属造成的。劣质水携带的丰富盐分在土壤中迁移转

化,会影响土壤物理和化学特性,破坏土壤结构;重金属在土壤中富集会造严重污染。

利用劣质水灌溉时,会携带大量盐分离子进入土壤,而大部分水分由土壤蒸发作用和作物蒸腾作用消耗,盐分则在土壤中不断积累,达到一定程度会发生土壤盐渍化。随着土壤含盐量增加,土壤溶液的渗透势逐渐增加,导致作物生理性干旱。在干旱少雨区,盐分积累是劣质水灌溉的主要问题之一^[18]。但在降雨充分的地区或排水性能良好的土壤,土壤盐分积累产生的影响较小。马文军等^[19]关于微咸水灌溉对冬小麦和夏玉米产量影响的研究结果表明,在正常降雨年份,使用微咸水灌溉不会导致土壤的次生盐渍化。徐小元等^[20]对华北地区的再生水灌溉研究发现,土壤中 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Cl^- 离子浓度总体呈增加趋势,但在0~40 cm层位增加不明显,40~80 cm层位存在明显增加。再生水引起耕层土壤盐分积累的风险较低。Hulugalle等^[21]研究发现,土壤排水良好时,再生水灌区的土壤盐度没有增加。如果灌溉水源呈碱性,还会造成土壤次生碱化,导致土壤结构破坏,土壤黏粒分散,物理性质变差^[21]。劣质水中的 Na^+ 在土壤中积累,会置换土壤中的钙、镁等离子^[23],导致土壤孔隙的减少,引起土壤颗粒收缩、胶体颗粒的分散和膨胀^[24]。再生水中含有丰富的营养元素和盐分会使土壤pH值轻微上升^[18],微咸水中交换性钠量达到一定水平后,会使土壤pH值升高^[24]。研究表明,灌溉水源的pH值对土壤有影响,一般呈正相关^[25],但劣质水灌溉一般不会导致土壤pH值发生明显变化。

再生水中含有的重金属离子在田间迁移过程中因土壤的吸附等作用而滞留于土壤中,发生较强的富集作用,对土壤造成严重污染。沈阳市张士灌区利用沈阳西部工业区排放的污水灌溉农田已有近40年的历史,灌溉面积2800 hm²,经监测,灌区内细河河床铅沉积约143.2 t,镉沉积约22.7 t^[25]。另据我国农业部进行的全国污灌区调查,在约140万hm²的污水灌区中,遭受重金属污染的土地面积占污水灌区面积的64.8%,其中轻度污染的占46.7%,中度污染的占9.7%,严重污染的占8.4%。我国每年因重金属污染而减产粮食1000多万t,被重金属污染的粮食每年多达1200万t,合计经济损失至少200亿元^[27]。可见污水直接用于灌溉将产生极大危害。再生水是经过再生工艺处理的城市污水,许多学者对劣质水的短期研究表明,再生水不会造成重金属污染^[28-29]。但长期使用再生水灌溉的重金属污染问题却有待考证。重金属含量超过土壤吸附能力后,会逐渐向下层迁移,重金属的迁移能力从大到

小排序为 Cd、Cu、Pb、Cr,随着土层不断加深,重金属含量逐渐变小^[30]。镉金属离子的活性最高,故长期再生水灌溉条件下土壤的镉污染问题不容忽视。

合理利用劣质水要求注重土壤淋洗管理和排水管理,严格控制土壤中盐分和重金属含量。淋洗频率和定额依灌溉及淋洗所用水水质、土壤和气候条件、作物的耐盐性而定,并通过明沟排水、暗管排水、竖井排水或井渠结合等方式保证良好的排水条件。

3.2 对作物生长及产量品质的影响

劣质水对作物的影响主要包括污染物的直接积累和通过土壤间接影响作物生长,具体影响表现在产量和品质两方面。

如果劣质水利用不合理,会导致作物产量降低,其原因是多方面的。盐分在土壤中积累,使土壤含盐量超过作物耐盐度临界值时,会影响作物正常生长,导致作物产量降低。研究表明,土壤中重金属污染也会影响作物的生长和产量,周振民^[31]研究了重金属铅对玉米成长发育及产量的影响,发现随着土壤铅污染浓度的升高,单株叶面积、株高、总干物重等形态指标呈降低趋势,平均单株穗长、穗粗、穗重、总粒数、百粒重下降,玉米产量呈下降趋势。劣质水中的盐分还会通过影响作物对养分的吸收,从而影响作物产量。钠离子会降低作物对钾离子和钙离子的吸收,导致作物营养失调。而氯离子与硝酸盐存在拮抗关系,劣质水中大量的氯离子影响作物对硝酸盐的吸收。此外,大量有机物分解时需要消耗大量的氧并释放初热量,从而导致作物根部因缺氧或沤根而死亡,造成作物减产^[26]。

再生水中的有机污染物和重金属也会在作物体内积累和转化,造成作物品质降低。作物株体不同部位对污染物累积程度不一^[32],呈现根、茎、叶、籽粒、果实递减的规律。一般农作物污染负荷由大到小依次为菠菜、小麦、圆白菜、西红柿、黄瓜、萝卜、葫芦、水稻、大白菜、玉米。微咸水灌溉对作物果实品质的影响很明显,主要表现在作物果实大小,颜色外形的变化,以及果实成分的改变。再生水中复杂的污染物,对不同的植物产生不同程度的伤害,植株叶绿素含量明显减少^[1]。

合理利用劣质水需要选择适宜劣质水灌溉的作物,确定与之对应的水质标准。不同作物对盐分敏感程度不同,选择种植在盐渍条件下能正常生长的作物,另外作物苗期对盐分比较敏感,尽量不用劣质水灌溉。同时,应选择适宜的灌水方式和灌溉制度,提高作物对水分的利用效率^[33]。

3.3 对地下水污染防控的影响

近年劣质水灌溉对地下水影响的研究偏少,现

有研究主要包括对地下水盐分、养分、重金属等的影响。合理利用劣质水应防止地下水污染,需要注重劣质水的风险评价,严格控制污染物向地下水的迁移。

劣质水中高浓度的钠离子在迁移过程中,能将含水层中的钙、镁离子置换出来,造成地下水硬度升高^[34];氯离子还会迁移到地下水,导致地下水中氯离子浓度增大。此外,劣质水灌溉对地下水中硝酸盐浓度影响较大,尤其是长期进行劣质水灌溉的土壤,易造成地下水中硝酸盐的污染。土壤中的重金属向浅层地下水迁移,造成地下水的重金属污染^[35]。研究表明,再生水中含有的有机污染物也会对地下水造成污染。杜斌等^[36]对太原市灌区进行野外调查,在灌区附近浅层地下水中检测到多环芳香烃类化合物,距离灌区较远或水位较深的地下水也有轻度污染。

4 劣质水安全利用今后的研究方向

a. 进一步研究劣质水安全利用标准。加强劣质水灌溉对作物产量和品质的影响研究,揭示重金属、盐分、有机污染物等在作物-土壤-地下水系统中的变化规律,建立适合区域特点的适宜劣质水灌溉的作物分类目录,使劣质水安全利用标准严格化、标准化。

b. 建立劣质水安全灌水技术模式。开展不同水源、不同土壤类型、不同作物种类的灌溉制度和灌溉方式研究,完成对喷灌、滴管等灌水技术的适应性研究,并基于此建立最适宜作物的劣质水灌水模式,提高对水分的利用率。

c. 深入研究环境影响的风险评价指标与方法。增加劣质水灌溉对作物生长、土壤、地下水影响方面的研究深度,选择一套全面的劣质水灌溉安全性评价指标体系,建立合理的综合评价理论,定量分析劣质水灌溉的环境效应,为劣质水灌区的合理管理提供理论依据。

d. 开发高效节能的劣质水处理技术。研究适合中国缺水地区的微咸水淡化利用技术,开发太阳能、风能等自然能源驱动条件下的微咸水淡化技术,深入开展农田沟塘湿地系统等利用自然净化的水质处理技术,降低处理成本,促进劣质水灌溉的推广。

e. 研究灌溉回归水再利用的尺度效应。分析回归水再利用条件下,农田、灌区、流域等不同空间尺度间的相互影响和内在联系,建立相应的水质水量转化关系,对不同空间尺度和时间尺度条件下灌溉回归水再利用的环境效应进行综合评价。

参考文献:

- [1] 王永强,李诗殷,蔡信德. 中国农田污水灌溉研究进展[J]. 天津农业科学, 2010(4): 77-80. (WANG Yongqiang, LI Shiyin, CAI Xinde. Advance of research on sewage irrigation in farmland in China [J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2010(4): 77-80. (in Chinese))
- [2] 刘静,高占义. 中国利用微咸水灌溉研究与实践进展[J]. 水利水电技术, 2012(1): 101-104. (LIU Jing, GAO Zhanyi. Advances in study and practice of brackish water irrigation in China [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012(1): 101-104. (in Chinese))
- [3] 彭世彰,艾丽坤. 提高灌溉水利用系数,保障国家粮食安全与水安全[J]. 水资源保护, 2012(3): 79-82. (PENG Shizhang, AI Likun. Improving irrigation water use coefficient and ensuring national food and water safety [J]. Water Resources Protection, 2012(3): 79-82. (in Chinese))
- [4] 吴敏,黄苗,李青云,等. 微咸水淡化技术研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2012(2): 59-63, 66. (WU Min, HUANG Zhuo, LI Qingyun, et al. Research progress for brackish water desalination [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012(2): 59-63, 66. (in Chinese))
- [5] PEREIRA B F F, HE Z L, STOFFELLA P J, et al. Reclaimed wastewater: effects on citrus nutrition [J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(12): 1828-1833.
- [6] 刘增进,张建伟. 污水灌溉在我国发展的必要性分析[J]. 安徽农业科学, 2008(20): 8738-8739. (LIU Zengjin, ZHANG Jianwei. Necessity analysis of the development of sewage irrigation in China [J]. Journal of Anhui Agri Sci, 2008(20): 8738-8739. (in Chinese))
- [7] 郭太龙. 微咸水灌溉冬小麦试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2005.
- [8] 王洪彬. 沧州地区利用地下微咸水灌溉分析[J]. 河北水利水电技术, 1998(4): 4-5. (WANG Hongbin. Analysis of using underground brackish water in Cangzhou [J]. Hebei Water Resources and Hydropower Engineering, 1998(4): 4-5. (in Chinese))
- [9] 陈秀玲,刘璐,郭永晨,等. 咸水、碱性淡水与混合水灌溉及地下咸水淡化的研究[C]//方生,陈秀玲. 农业节水灌溉与咸水淡化利用. 北京: 中国农业技术出版社, 2008: 160-222.
- [10] 单婵,邵孝侯. 劣质水农业高效安全利用技术的研究现状及其展望[J]. 水资源保护, 2006, 22(1): 19-22. (SHAN Jie, SHAO Xiaohou. Status and prospects of high-efficient and safe utilization of poor quality water for agriculture [J]. Water Resources and Protection, 2006, 22(1): 19-22. (in Chinese))
- [11] 彭世彰,熊玉江,罗玉峰,等. 稻田与沟塘湿地协同原位削减排水中氮磷的效果[J]. 水利学报, 2013, 44(6): 657-663. (PENG Shizhang, XIONG Yujang, LUO Yufeng, et al. The effect of paddy eco-ditch and wetland system on nitrogen and phosphorus pollutants reduction in drainage [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(6): 657-663. (in Chinese))
- [12] ELIFANTZ H, KAUTSKY L, MOR-YOSEF M, et al. Microbial activity and organic matter dynamics during 4 years of irrigation with treated wastewater [J]. Microbial Ecology, 2011, 62(4): 973-981.
- [13] 郑顺安,李仪,普锦成,等. 污水灌溉条件下 Cu 在农田土壤中的运移及其模拟研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2011, 37(3): 343-354. (ZHENG Shunan, LI Yi, PU Jincheng, et al. Evaluating transport of Cu in agricultural soils under sewage irrigation [J]. Journal of Zhejiang University: Agric & Life Sci, 2011, 37(3): 343-354. (in Chinese))
- [14] 李江云,贺娟,王健. 微咸水灌溉安全性综合评价指标体系[J]. 中国农村水利水电, 2010(8): 8-12. (LI Jiangyun, HE Juan, WANG Jian. Safety evaluation index system of brackish water irrigation [J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(8): 8-12. (in Chinese))
- [15] 焦艳平,张艳红,潘增辉,等. 不同矿化度微咸水灌溉对大白菜生长和土壤盐分累积的影响[J]. 节水灌溉, 2012(12): 4-8. (JIAO Yanping, ZHANG Yanhong, PAN Zenghui, et al. Effect of saline water irrigation on Chinese Cabbage growth and soil salt accumulation [J]. Journal of Water-Saving Irrigation, 2012(12): 4-8. (in Chinese))
- [16] 王诗景,黄冠华,杨建国,等. 微咸水灌溉对土壤水盐动态与春小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010(5): 27-33. (WANG Shijing, HUANG Guanhua, YANG Jianguo, et al. Effect of irrigation with saline water on water-salt dynamic and spring wheat yield [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(5): 27-33. (in Chinese))
- [17] 张亚哲,高业新,王建中,等. 微咸水灌溉条件下的土壤水盐动态变化研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(1): 49-54. (ZHANG Yazhe, GAO Yexin, WANG Jianzhong, et al. Research on dynamic change of soil water-salt under Brackish water irrigation [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(1): 49-54. (in Chinese))
- [18] QIAN Y, 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.
- [19] 马文军,程琴娟,李良涛,等. 微咸水灌溉下土壤水盐动态及对作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010(1): 73-80. (MA Wenjun, CHENG Qinjuan, LI Liangtao, et al. Effect of slight saline water irrigation on soil salinity and

- yield of crop [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26 (1): 73-80. (in Chinese))
- [20] 徐小元,孙维红,吴文勇,等. 再生水灌溉对典型土壤盐分和离子浓度的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26 (5): 34-39. (XU Xiaoyuan, SUN Weihong, WU Wenyong, et al. Effect of irrigation with reclaimed water on soil salt and ion content in Beijing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(5): 34-39. (in Chinese))
- [21] HULUGALLE N, WEAVER T, HICKS A, et al. Irrigating cotton with treated sewage [J]. Cotton Grower, 2003, 24 (3): 41-42.
- [22] 薛峰,杨劲松. 劣质水的灌溉利用[J]. 土壤, 1997, 29 (5): 240-245. (XUE Feng, YANG Jingsong. Irrigation usage of poor quality water[J]. Soils, 1997, 29(5): 240-245. (in Chinese))
- [23] 陈卫平,张炜铃,潘能,等. 再生水灌溉利用的生态风险研究进展[J]. 环境科学, 2012, 33 (12): 4070-4080. (CHEN Weiping, ZHANG Weiling, PAN Neng, et al. Ecological risks of reclaimed water irrigation: a review[J]. Environmental Science, 2012, 33 (12): 4070-4080. (in Chinese))
- [24] 吴忠东,王全九,苏莹. 微咸水进行农田灌溉的研究[J]. 人民黄河, 2005, 27 (5): 52-54. (WU Zhongdong, WANG Quanjie, SU Ying. Study of irrigation using brackish water[J]. Yellow River, 2005, 27 (5): 52-54. (in Chinese))
- [25] 郭凤震. 废污水灌溉对土壤和地下水水质的影响及控制措施[C]//中国水利技术信息中心. 首届全国地下水开发利用与污染防治技术交流研讨会, 南京: 2009.
- [26] 蔡秀萍,周宁. 我国农田污水灌溉现状综述[J]. 水利天地, 2009 (11): 11-12. (CAI Xiuping, ZHOU Ning. Advance in sewage irrigation [J]. Shuili Tiandi, 2009 (11): 11-12. (in Chinese))
- [27] EPA. Guidelines for Water Reuse [G]. Washington, DC: US Agency for International Development. 2004: 241-284.
- [28] 李中阳,樊向阳,齐学斌,等. 再生水灌溉下重金属在植物-土壤-地下水系统迁移的研究进展[J]. 中国农村水利水电, 2012 (7): 5-8. (LI Zhongyang, FAN Xiangyang, QI Xuebin, et al. The impact of renewable wastewater on the distribution of heavy metals in plants soil land underground water [J]. China Rural Water and Hydropower, 2012 (7): 5-8. (in Chinese))
- [29] 魏益华,徐应明,周其文,等. 再生水灌溉对土壤盐分和重金属累积分布影响的研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27 (3): 5-8. (WEI Yihua, XU Yingming, ZHOU Qiwen, et al. Effects of irrigation with reclaimed water on soil salinization-alkalization and heavy metal distribution [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27 (3): 5-8. (in Chinese))
- [30] 周振民. 污水灌溉重金属在农田土壤中的运移分布规律研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29 (6): 76-78. (ZHOU Zhenmin. Distribution of heavy metal pollution in farm and soil under waste water irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29 (6): 76-78. (in Chinese))
- [31] 周振民. 污水灌溉区土壤重金属污染对玉米生长影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2010 (4): 62-66. (ZHOU Zhenmin. Influence of soil heavy metal pollution on corn caused by wastewater irrigation [J]. China Rural Water and Hydropower, 2010 (4): 62-66. (in Chinese))
- [32] 孟惠萍,谢萍娟. 污水灌溉对农田土壤环境的影响分析[J]. 环境科学, 2012 (25): 199-200. (MENG Huiping, XIE Pingjun. Analysis of the effect of sewage irrigation on soil environment [J]. Environmental Science, 2012 (25): 199-200. (in Chinese))
- [33] 彭世彰,刘笑吟,杨士红,等. 灌区水综合管理的研究动态与发展方向[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33 (6): 1-9. (PENG Shizhang, LIU Xiaoyin, YANG Shihong, et al. Advances in research and development on integrated water management of irrigation district [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33 (6): 1-9. (in Chinese))
- [34] 张淑丽. 浅析污水灌溉环境污染的研究进展[J]. 科技情报开发与经济, 2009, 19 (27): 128-129. (ZHANG Shuli. Research on the application of body language in the classroom teaching of university [J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2009, 19 (27): 128-129. (in Chinese))
- [35] XU J, WU L, CHANG A C, et al. Impact of long-term reclaimed wastewater irrigation on agricultural soils: a preliminary assessment [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 183 (1): 780-786. (in Chinese))
- [36] 杜斌,龚娟,李佳乐. 太原市污水灌溉对水土环境的有机污染研究[J]. 人民长江, 2010, 41 (17): 58-61. (DU Bin, GONG Juan, LI Jiale. Study on organic pollution of soil and water environment by sewage irrigation in Taiyuan City [J]. Yangtze River, 2010, 41 (17): 58-61. (in Chinese))

(收稿日期: 2013-11-01 编辑: 高渭文)

