

非常规水资源农业利用现状及研究进展

崔丙健^{1,2},高峰^{1,2*},胡超^{1,2},李中阳^{1,2},樊向阳^{1,2},崔二革^{1,2}

(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 农业水资源高效安全利用重点开放实验室,河南 新乡 453002)

摘要:由于缺乏合理的水资源管理措施和适当的水处理技术导致淡水资源枯竭和水质恶化问题日益严重,促使再生水、微咸水和雨水等非常规水作为一种新的水资源开发利用方式得到发展,为农业灌溉提供了可靠且稳定的补充水源。然而,非常规水独特的水质特性决定了其农业利用过程中必然会对环境与健康产生众多负面影响,这也成为人们关注的焦点。本文概述了国内外非常规水资源在农业中的利用与研究现状,总结了非常规水资源农业回用的生态风险和相关标准规范,并对非常规水资源农业利用的安全性和可持续性提出相关建议。

关键词:非常规水资源;开发利用;农业灌溉;安全;资源化

中图分类号:X53

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20180686

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.

0 引言

农业是水资源最大的消费产业,灌溉农业的快速发展在提高耕地产量方面发挥了巨大作用,但世界各国都面临着水资源枯竭和淡水需求量急剧增加的压力,尤其是地处干旱半干旱地区的发展中国家,由于农业配置优质水资源的数量正在逐年减少,导致现有淡水资源难以满足农业用水的需求,灌溉水源的减少也增加了农业用水成本。中东、北非和地中海地区的许多国家,特别是人口增长率高、城市化和工业化程度高的干旱气候地区,地表水资源的开发已经达到最大限度。2017年我国农业用水量占全年总用水量的62%以上,从资源的角度看,我国水资源时空分布不均与耕地资源匹配性不好以及工程设施体系的不完善使很多地区水资源供需矛盾突出^[1-2]。在水资源短缺不断加剧和农业用水利用率低的情况下,迫切需要寻找替代水源并提出可行的解决方案,非常规水资源的开发和农业综合利用成为必然选择和重要途径。

非常规水资源,又称非传统水资源、劣质(边缘)水资源,顾名思义是相对常规水资源而言的,其区别于一般意义上的地表水和地下水,通常包括再生水、微咸水、雨水和海水等^[3]。非常规水资源作为一类可靠且可再生的二次水源,其开发利用已成为众多国家和地区补充农业用水量和缓解农业用水危机的应对策略,也是现代节水农业的重要研究内容。围绕非常规水资源在农业生产中科学合理的开发利用尚有一系列问题有待研究解决,如节水灌溉与非常规水资源安全高效利用技术,重金属、盐分、药品和个人护理用品(Pharmaceutical and Personal Care Products, PPCPs)、病原菌等典型污染物在农田环境中的迁移和转化规律,非常规水资源长期灌溉的生态与环境效应定位监测等。本文结合国内外研究进展,针对再生水、微咸水和雨水等重要非常规水资源农业灌溉的利用现状、生态风险和标准规范进行了探讨分析,并对非常规水资源农业灌溉安全高效利用提出相关建议。

1 非常规水资源开发利用的意义

全球水资源需求预计将以年均2%的速度增长,到2030年将接近7万亿m³,人口增加、生活水平提高、消

收稿日期:2018-12-18

基金项目:“十三五”国家重点研发计划子课题(2017YFC0403503-2);中央级科研院所基本科研业务费专项(FIRI2018-02);国家自然科学基金面上项目(51479201)

作者简介:崔丙健(1985-),男,助理研究员,主要从事再生水安全利用研究。E-mail: ayangcbj@126.com

通信作者:高峰(1963-),男,研究员,主要从事非常规水资源安全利用研究。E-mail: gfyx@sina.com

费方式改变和灌溉农业扩大是全球对水资源需求上升的主要推动力^[4]。世界经济论坛的年度风险报告中将水资源危机列为潜在影响最大的全球风险。根据联合国《世界水资源发展报告》，到2030年预计农业灌溉用水量将占世界淡水资源的70%以上，世界40%人口将面临水资源短缺问题。此外，气候变化增加了干旱发生的频率和强度，导致作物需水量和农业灌溉用水量的持续增长^[5]。由于水资源开发利用不当和水体污染严重导致全球淡水资源枯竭和水质恶化，传统淡水资源已不能满足日益增长的用水需求。非常规水资源作为一类可持续的替代水源被提出，包括污水再生利用、雨水收集、海水淡化等。在日益加剧的水资源短缺形势推动下，由依赖单一水源向多水源联合优化配置发展成为一种可持续的、成本效益高的解决方案。我国淡水资源极度匮乏，人均淡水资源仅为世界平均水平的1/4。作为一个农业生产大国，农业在我国经济发展当中占有十分重要的比重，而农业生产发展又依赖灌溉。2017年统计数据显示我国北方六区水资源总量仅占全国的17.5%，而农业用水量占用水总量的75.3%^[1]，尤其是我国华北和西北一些资源型缺水城市和地区，河流、降水和地下水资源等已不能满足农业生产发展的需求。因此，可利用水资源量在农业可持续发展过程中起着举足轻重的作用。一方面，限制流域用水、提高用水效率以及更好地共享有限的淡水资源，将是降低水资源短缺对农业生产和人类社会可持续发展威胁的关键。另一方面，开发利用非常规水资源是解决水资源短缺的重要途径，其中再生水、微咸水、雨水及养殖废水等的开发利用尤为重要，这些水源可以有效提高可再生水资源的利用量以及缓解农业用水对传统水源的占用。

2 国内外非常规水资源农业利用现状

2.1 国内非常规水资源农业利用现状

随着淡水资源消耗速度逐渐超过可持续发展的速度，地表水受污染、旱季缺水 and 环境恶化等问题日益突出，越来越多的人开始关心从哪里汲取可利用的二次水源。截至2017年年底，我国非常规水资源利用工程供水量165亿m³，占全国水利工程供水的1.93%，其中再生水占的比重最大^[6]。《“十三五”全国城镇污水处理及再生利用设施建设规划》指出，城镇污水处理及再生利用设施是城镇发展不可或缺的基础设施，是经济、居民安全健康生活的重要保障。截至2015年，我国城镇污水处理能力已达2.17亿m³/d，城市污水处理率达到92%，县城污水处理率达到85%，大量稳定的城镇再生水将是我国农业用水的重要补充水源。北京是我国城市污水处理率及再生水利用率最高的城市之一，遵循“资源节约、安全可靠、环境友好”和“优水优用、一水多用、重复利用”的原则，对多个灌区进行水网改造，再生水灌溉面积达3.33万hm²，再生水农业年利用量超过3亿m³^[7]。再生水利用的可行性和经济性主要体现在其既能给农业生产提供稳定的水源，又能为作物生长提供氮磷等必需的营养元素，还可以降低污水厂脱氮除磷的处理成本。

我国微咸水资源分布广泛，华北平原地区矿化度为2~5 g/L的浅层微咸水资源约75亿m³，西北地区地下微咸水资源为88.6亿m³^[8]。我国咸水灌溉已有近50年的历史，通过开展粮食作物、经济作物和蔬菜微咸水灌溉的试验研究和实践建立了因地制宜的微咸水灌溉评价和技术体系。

雨养农业是一种依靠天然降水作为补偿灌溉的生产方式，以蓄水保墒、提高降水利用率为主，在涵养水源、改善和保护生态环境的基础上，促进旱区农业可持续发展^[9]。利用雨水资源发展集雨节水灌溉技术，能够缓解季节性缺水地区水资源不足的矛盾。北京农村地区已经建成了大约600个雨水收集系统用于农业灌溉，农业用水量占总用水量的比重下降了50%左右^[10]。自20世纪90年代起，雨水收集和补充灌溉技术在西北地区得到了大力推广，一批集雨示范区陆续建立起来，如甘肃“121”工程、宁夏“窑窖工程”、内蒙古“112”工程和陕西“甘露工程”等将雨水集蓄和节水灌溉技术结合取得了一定的实践效果^[11]。

2.2 国外非常规水资源农业利用现状

国外非常规水资源用于农业灌溉的实践已有较长历史，尤其是一些地处干旱半干旱地区及经济发展水平较高的国家，如以色列、美国、澳大利亚和日本等国家非常规水资源灌溉技术及利用的相关标准规范都比较成熟。国外污水再生回用总量排名最高的是美国，其次为沙特阿拉伯、卡塔尔、以色列、科威特和澳大利亚等国家，这些国家的学者较早开展了利用污水和雨水进行都市农业灌溉的研究和实践。佛罗里达和加利福尼亚是美国再生水利用率最高的2个州，加利福尼亚州用水规划目标提出预计到2020年再生水年利用量要达到25亿m³，占规划新增水源的40%左右，农业和城市绿地灌溉约占再生水利用总量的70%^[12]。澳大利亚污水处理率达到92%以上，全国580座污水处理厂每年处理污水20亿m³，其中14%的再生水被用于灌

溉^[13]。埃及有3~5亿m³的咸水被用于约40.5万hm²的土地灌溉,其中75%排水的盐分低于3g/L。印度哈里亚纳邦9个地区广泛采用浅层地下咸水进行灌溉(10.6万hm²),其中4个地区直接用咸水灌溉,其余5个地区将咸水与河流淡水混合或者交替灌溉^[14]。美国与澳大利亚雨水集蓄用于城市农业灌溉占18%~21%^[15]。非洲撒哈拉沙漠以南地区60%的农业生产依赖雨水,雨养农业占肯尼亚农业生产的80%以上,埃塞俄比亚雨养农业灌溉面积接近350万hm²,多数农场利用10~100m³的贮存池收集雨水径流用于补充灌溉或者生活用水,已成为缓解旱季粮食生产和生活用水的重要方式之一^[16]。

目前,多数国家面临的不仅仅是水资源量和质量问题的双重挑战,在开发利用替代水源应对水资源危机方面也缺少资金来源和技术措施。一些低收入国家需要通过改善供水需求状况来提高粮食生产和改善生活环境,但高能耗和高成本的污水再生利用、雨水收集和海水淡化技术可能会成为主要障碍。

3 非常规水资源在农业中的应用研究

3.1 再生水在农业中的应用

再生水是指对污水处理厂出水、工业排水、生活污水等非传统水源进行回收,经适当处理后达到一定水质标准,在一定范围内重复利用的水资源^[17]。再生水总量大、水质稳定、受季节和气候影响小,是一种可再生的“二次水源”,利用再生水灌溉农田在国内外已经得到广泛推广实践。再生水富含氮磷等养分,重金属污染物等毒理指标量低,利用其灌溉农田既能实现污水资源化,又能利用土壤自身特性净化水质减少农业环境的污染。郑顺安等^[18]研究表明长期利用再生水灌溉可以减少人工施肥量,有效改善砂质紫色土土壤不同粒级团聚体中的有机碳库、氮库和磷库。Chen等^[19]对美国南加州5个长期再生水灌区土壤中参与C、N、P和S循环相关的17种酶活性进行研究,结果表明土壤酶活性平均提高了2.2~3.1倍。潘能等^[20]研究了北京城郊农田长期灌溉再生水土壤的生物活性,结果表明再生水灌溉农田0~20cm土层土壤平均微生物量碳上升了14.2%,土壤酶活性平均增幅7.4%,并且随土层深度增加而降低。上述研究表明,再生水中所含的可生物降解有机质和营养物质具有一定的有益作用,长期灌溉可以改善土壤生物健康和养分状况。

作物的产量和品质直接受灌溉水质影响,研究再生水不同灌溉方式对作物生长品质的影响,对指导再生水农业安全利用具有重要意义。再生水滴灌条件下采取适量减少追施氮肥、缩短灌溉周期及增加滴灌带埋深等措施,能够显著增加蔬菜产量和促进作物对土壤氮素的吸收利用,并提高营养品质^[21-23]。Intriago等^[24]基于过滤和太阳能技术处理再生水用于农业灌溉的研究表明,处理后的再生水完全符合相关标准和指南,而未经处理的再生水及灌溉生菜中大肠杆菌数量略高于规定的阈值,滴灌方式生菜产量高于喷灌。Hassanli等^[25]利用清水和再生水进行地下滴灌、地表滴灌和沟灌试验,研究干旱地区再生水不同灌溉方式和灌溉制度对节水、水分利用效率和玉米产量的影响,结果表明,与沟灌相比,地下滴灌节水效果最好,地表滴灌和地下滴灌玉米产量更高。已有研究表明,利用再生水和常规淡水灌溉在作物产量方面没有显著的统计学差异^[26]。最近在以色列进行的一项长期再生水滴灌研究发现,在黏性土壤种植的鳄梨和柑橘产量下降了约20%~30%,反映了再生水灌溉会影响土壤和植物物理、化学和生物之间复杂的相互作用^[27]。再生水中养分的过量输入也会对植物生长产生不利影响,供应过量氮素会造成养分比例失衡,作物表现出生长过度、作物果实减少、成熟延迟或营养品质下降等。Chiou^[28]对台湾地区农业灌溉再生水中氮负荷量与作物氮肥需求量进行估算,评价更有效地利用再生水的方式,认为需要适当控制再生水与常规淡水的稀释比来适应作物的生长条件。

3.2 微咸水在农业中的应用

微咸水一般指矿化度为2~5g/L的含盐水,凡利用矿化度为2~5g/L的浅层地下水和地表水进行灌溉的统称为微咸水灌溉^[29]。微咸水灌溉方式包括微咸水直接灌溉、咸淡水混灌和咸淡水轮灌。河北省衡水市针对淡水资源极度缺乏的现实,坚持把浅层地下微咸水的开发利用作为农业灌溉开源的重要手段,深入研究并大力推广咸淡水混灌与管道输水一体化技术,取得了较好的社会效益和环境效益^[30]。苏莹等^[31]的研究表明微咸水轮灌方式有利于土壤盐分淋洗,减少盐分对作物根系的危害,低钠吸附比的微咸水对次生碱化土有一定的改良作用。土壤改良剂可有效减少微咸水灌溉引起的盐分积累,改善土壤理化特性和盐分离子分布。增施有机肥可以提高土壤肥力和缓冲能力,降低盐分对植物根系的胁迫作用。研究表明农家肥是一种有效的咸水灌溉砂质土壤改良剂,但还需要在田间条件下进行更多的研究以评估作物对灌溉水质和粪肥种类响应^[32]。谭军利等^[33]利用室内土柱模拟试验,比较研究了不同微咸水灌水量条件下覆沙处理对土

壤水盐分布和运移的影响,结果表明覆沙减少了土壤水分累计蒸发量,减少幅度随灌水量增加而降低,保蓄了上层土壤含水率,明显抑制了表层土壤盐分累积,促进盐分向下层土壤淋洗和运移。

国内外学者围绕矿化度水平、土壤类型、作物与田间管理等,将微咸水应用于小麦、玉米、棉花和蔬菜等作物的灌溉研究均取得了良好的实践效果。闵勇等^[34]利用不同矿化度微咸水和淡水对夏玉米不同生育期进行交替灌溉,结果表明交替灌溉制度应采用在玉米拔节抽雄期灌溉淡水,灌浆成熟期灌溉微咸水。研究发现4 g/L的微咸水灌溉处理显著降低了棉花幼苗的株高、鲜质量和根长以及叶绿素量,而矿化度为2 g/L的微咸水灌溉对棉花幼苗生长和生理指标没有显著的抑制作用^[35]。龚雨田等^[36]通过田间试验研究不同矿化度微咸水灌溉对冬小麦农艺性状及产量的影响,结果显示冬小麦株高和叶面积随微咸水矿化度增高而减小,1~2 g/L低矿化度微咸水灌溉促进作物根系对土壤水分的吸收,在低盐胁迫下使干物质向小麦籽粒中转移,从而提高了小麦产量。膜下滴灌是将地表滴灌和覆膜栽培相结合的一种节水灌溉技术,既可以发挥滴灌浅层浸润的优势,又能起到增温保墒效果,达到节水增产目的。短期膜下滴灌条件下,微咸水使土壤根系层(0~30 cm)处于脱盐状态,土壤积盐现象不明显^[37]。Pang等^[38]通过田间试验研究了微咸水灌溉和秸秆覆盖对种植冬小麦和夏玉米土壤盐分和作物产量的影响,结果表明采用秸秆覆盖方式进行微咸水灌溉有助于提高作物产量和降低土壤盐渍化的风险。汪洋等^[39]研究了不同微咸水利用方式对非耕地条件下番茄生长品质的影响以及土壤养分吸收、水分和盐分变化规律,结果表明与微咸水直接灌溉相比,咸淡水混灌根系土壤盐分累积不明显,果实各项品质指标均高于淡水灌溉,因此认为咸淡水混灌是微咸水利用的最佳模式。田间试验表明采用膜下滴灌方式和适当的灌水下限,可实现微咸水灌溉玉米、棉花和油菜等作物在盐碱地中的种植和土地的可持续利用^[40-42]。另外,研究表明冬季咸水结冰灌溉能够有效降低盐碱地耕层土壤盐分和提高土壤含水率,实现盐碱区水土资源的高效利用和作物增产^[43]。有试验表明微咸水在水培蔬菜生产中应用是可行的^[44]。

3.3 雨水在农业中的应用

雨水集蓄农业利用是指经过一定的人为措施,对自然界中的雨水径流进行干预,通过一定的工程措施增加拦蓄入渗或减少蒸发来利用雨水或通过一定的汇流面将雨水汇集蓄存,在作物需水期进行补灌的主动利用,一般由集雨系统、蓄水设施、输配系统和节水灌溉系统等部分组成^[45]。通过集蓄工程对雨水资源进行蓄存和调控,把有限的供水与传统旱作农业节水措施结合起来,提高旱区雨水资源利用率,是当前解决旱区农业用水短缺的一种重要方式。

国内外雨水的研究主要是围绕城市雨水的收集利用和干旱地区的雨养农业2个方面。城市雨水利用是将降落到城市中的雨水通过蓄水系统和人工设施等汇聚收集起来并经净化处理后加以利用的过程。罗马市区屋顶雨水收集可以满足22%~40%城市农业的灌溉需水量,从而减少传统水源的使用^[46]。穆大伟等^[47]研究发现雨水重金属量远低于农业灌溉用水重金属量限值,利用雨水灌溉的生菜营养品质略高。雨养农业是指完全依靠自然降雨,人工汇集雨水,实行补偿灌溉的农业生产类型。雨养农业应以蓄水保墒、提高降水利用效率为主。在严重缺乏或季节性缺乏地表水和地下水资源背景下,巴基斯坦雨养农业面积达25%,传统的种植制度会导致土壤有机质损失和持水率降低,雨水易形成径流流失。Akhtar等^[48]通过田间试验评价雨养区农业适宜的可持续种植方式,研究表明豆类-小麦间作是该地区旱作农业补充灌溉的最佳种植方式,利用雨水在作物敏感生长阶段进行补充灌溉可以提高作物产量和养分利用率。配有滴灌系统的50 m³田间蓄水塘能够满足300~600 m²蔬菜作物补充灌溉用水需求,渗漏和蒸发造成的水量损失是影响雨水利用和扩大农田蓄水系统的主要因素之一^[16]。Tian等^[49]评价甘肃省半干旱地区雨水收集和补充灌溉农业的经济可行性,结果表明利用雨水收集和补充灌溉技术必须选择与当地降雨量相适应的作物,与春小麦、玉米以及小麦-玉米间作相比,生产马铃薯的种植方式是最佳选择。Wu等^[50]研究了中国半湿润地区垄沟雨水收集系统结合灌溉对玉米水分利用率的影响,发现与传统沟灌和畦灌相比,垄沟覆膜的集雨作用使灌溉水量减少了一半,在半湿润或半干旱地区灌区具有非常重要的应用价值。雨水用于农业灌溉还未形成规范化和标准化,围绕雨水收集技术、蓄水设施容积、灌溉设施和灌溉作物的选择等还存在一系列问题有待解决。

3.4 非常规水资源农业利用风险研究

非常规水资源水质是决定其利用风险大小的最主要因素之一,其会影响这类水源针对某一特定用途的适用性。为保障非常规水资源农业灌溉的可持续利用,必须综合考虑以下几方面:①土壤盐渍化和植物危害;②土壤中重金属的积累和植物富集;③地下水中盐分和新兴污染物的污染;④病原体引起的公众健

康问题。

宝哲等^[51]利用再生水和清水灌溉处理对粮经作物、蔬菜及绿化植物等根冠发育、品质、产量及污染物富集状况等的影响进行了综合评价,提出再生水直接灌溉的作物分类,为再生水安全、科学灌溉利用提供有力的技术支撑。众所周知,目前的污水处理技术并不能有效地去除有机微污染物,典型污染物风险识别和健康风险优先控制污染物评价体系尚未建立,并且多数污染物短期内在土壤和作物中并不体现出表观污染特征,需要加强研究和长期定位监测。Martínez-Piernas等^[52]首次对长期使用再生水灌溉的农业土壤进行有机微污染物目标性和可疑性筛查,结果显示土壤和无土栽培基质样品中分别检测出11种和26种有机微污染物,并且发现之前从未报道过的11种新的有机微污染物。迄今为止的研究已经提供的确凿证据表明,再生水农业利用会使PPCPs从土壤转移至植物体内,三氯卡班、三氯生和二甲双胍等PPCPs会导致块茎类蔬菜中有较高的生物富集水平,而卡马西平、双氯芬酸和三氯生等在叶菜类蔬菜的茎叶中也有累积趋势^[53]。崔二苹等^[54]对当前再生水利用对环境中抗生素抗性基因影响的研究进行了较为系统的总结与分析,指出再生水灌溉技术、灌溉制度对土壤和作物体内抗生素抗性基因的影响是今后的研究重点。Orlofsky等^[55]利用培养和非培养方法比较研究了再生水灌溉下土壤和作物中的病原微生物污染状况,发现再生水和清水灌溉的番茄表面粪指示菌数量无统计学差异,表明再生水地表滴灌不会导致病原微生物向土壤或作物中迁移。研究发现土壤养分越高,越有利于粪大肠菌群生长繁殖,控制再生水灌水水平可有效降低病原菌污染风险^[56]。再生水灌溉引发疾病传播的潜在风险始终存在,以卫生指示菌为指标的评价体系已不能有效表征再生水灌溉的健康风险。李平等^[57]研究发现再生水灌溉潜水埋深越深地下水硝态氮量增幅越小,而埋深越浅因土壤淋溶和硝化作用产生的硝态氮造成浅层地下水污染的风险越大。另外,有研究表明再生水灌溉会增加土壤发生次生盐渍化的风险^[58-59]。

微咸水灌溉不当可能带来的风险主要是土壤盐碱化,以及土壤盐分经灌溉淋洗引入浅层地下水的污染问题,还应关注微咸水灌溉对作物产量和品质的影响。据估计全球约有20%~50%的灌溉土地受到不同程度的盐渍影响,每天约有2 000 hm²农田因盐渍而退化,其中干旱和半干旱地区尤为严重^[60]。在不造成作物产量损失的前提下,允许采取适当的策略开发利用咸水灌溉,包括混合不同质量的水、选择耐盐作物和规避过度敏感的土壤;另一种存在争议的策略是主张通过增加高于植物蒸腾需求的灌溉量来补偿高矿化度咸水^[28]。降雨淋洗和咸淡水轮灌对微咸水灌溉土壤积盐现象具有缓解作用。Ma等^[61]发现微咸水灌溉导致表层土(0~100 cm)EC值增加,在降雨充足的条件下,土壤盐分能得到有效淋洗。利用不同矿化度的地下水长期灌溉冬小麦和雨季高粱进行田间试验,小麦产量有不同程度的减产,而高粱产量只有在高盐水灌溉下才显著下降^[62]。改善微咸水灌溉土壤盐分累积状况的措施包括提高单次灌水量、淡水灌溉淋洗、秸秆覆盖及改良剂的施用等。在淡水资源短缺和地下微咸水资源丰富的地区,可以考虑将高矿化度的微咸水与淡水合理配置,降低微咸水的矿化度,并采取相应的水盐调控措施及长期监测盐分动态变化,减轻盐分对土壤及作物的胁迫危害。

针对作物灌溉、厕所冲洗、河流回灌等雨水回用应考虑潜在的健康风险,该风险程度高低因污染物类型、污染负荷、毒性和流动性等而异。过去的研究已经明确道路是雨水径流的主要污染源,Liu等^[63]建议从交通拥挤和路面粗糙道路收集的雨水应进一步处理后采取“符合目的”的回用策略。Ng等^[64]研究生物过滤系统雨水灌溉下蔬菜对重金属的富集水平,结果发现蔬菜食用部分富集重金属Cd和Pb量超过了澳大利亚、新西兰和世界卫生组织的指导值,认为食用不安全。由于缺乏相应的水质标准导致其利用的不确定性,特别是与公众健康潜在风险有关的微生物污染。以腺病毒和诺如病毒为目标病原,Lim等^[65]研究了与病毒健康风险有关的冲厕、洗浴和作物灌溉3种雨水利用途径,定量微生物风险评估结果显示雨水灌溉作物的年病毒感染风险最高,其次是淋浴和冲厕,仅冲厕符合美国EPA的风险基准。即使降雨水质处于可接受水平,氮磷等营养物质的存在也可能导致储存过程中水质发生变化,藻类生长和细菌增殖是雨水和再生水共同存在和需要关注的问题。

4 非常规水资源相关标准及管理规范

目前国际上还没有统一的再生水水质标准和农业回用指南,各国都是基于现有的水资源管理政策,结合实际的水资源供需状况和利用途径制订相关的标准、规范和技术规程,这些标准规范主要是为了保障水

质、产地和农产品安全。基于“零风险”的概念,世界卫生组织提出了相对严格的污水回用指南,要求考虑污水处理过程、灌溉制度、暴露人群以及作物类型等,特别指出灌溉生食作物的再生水水质必须接近常规供水水质。美国环境保护署(U.S. Environmental Protection Agency, EPA)再生水回用指南内容包括再生水规划和管理、回用途径、各州的规范和指南、再生水回用的区域差异、基于公众和环境健康的处理技术、公共宣传和公众参与和国内外经验等作了具体说明,各州可在推荐指南的基础上根据本州水资源实际需求自行设计再生水回用项目方案。指南中推荐用于灌溉的水质标准包括21种重金属和2种病原菌(总大肠菌群和粪大肠菌群)控制指标,但没有规定有机微污染物的量^[66]。近年来我国陆续颁布了一系列再生水水质及污水再生利用的推荐性、强制性和行业标准,污水处理厂的出水必须满足环保部门制订的《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)和《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)相关水质要求才能排放。出水要经过适当处理后,满足水利部《再生水水质标准》(SL 368—2006)、农业部《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)、建设部《城市污水再生利用农田灌溉用水水质》(GB 20922—2007)才可以用于农业灌溉。现行《城镇污水处理厂污染物排放标准》中基本控制项目为19项,选择控制项目22项。《再生水水质标准》基本控制项目为6项,回用于农业用水选择性标准12项。排放标准与再生水水质指标不匹配、不对应问题对于再生水工程规划、设计、回用途径、监管都会造成较大影响。《城市污水再生利用农田灌溉用水水质》规定的基本控制项目19项,选择控制项目9项,该标准适用于以城市污水厂出水为水源的农田灌溉用水。《农田灌溉水质标准》则适用于全国以地表水、地下水和处理后的养殖废水及以农产品为原料加工的工业废水作为水源的农田灌溉用水,其针对水作、旱作和蔬菜作物规定了16项基本控制项目和11项选择性控制项目。各标准中规定的基本控制指标项目必须检测,选择控制项目一般是对环境有较长期影响或毒性较大的污染物,根据农业用水质量和水环境质量要求选择控制。北京市地方标准《再生水农业灌溉技术导则》(DB11/T 740—2010)规定了农业利用再生水灌溉规划、设计的基本原则、要求和方法以及再生水灌区监测与管理,适用于北京地区农业利用再生水灌溉新建、改扩建工程的规划、设计与管理。要求有条件的地区宜优先选用再生水作为灌溉水源,但为防止再生水灌溉过程中污染物对地表水、地下水以及公众健康的影响要求设置的具有隔离(缓冲)效果的区域,并依据相关标准建立再生水水质、灌区排水水质、地下水水质、土壤质量和农产品质量监测与评价制度。

《微咸水灌溉冬小麦种植技术规程》(DB13/T 1280—2010)标准中规定了微咸水灌溉下冬小麦种植生产过程的品种选择、整地、施肥、播种、灌溉等配套措施的相关技术要求,适用于河北低平原区利用矿化度 ≥ 2 g/L且 ≤ 5 g/L的咸水灌溉地区。《微咸水灌溉棉花种植技术规程》(DB13/T 1281—2010)规定了河北低平原区利用微咸水进行棉花单作并保持土体(0~100 cm)盐分周年基本平衡的环境要求、栽培管理、灌溉技术和风险控制等。《微咸水灌溉棉花-饲用黑麦一体化种植技术规程》(DB13/T 1489—2011)规定了河北低平原区利用微咸水灌溉棉花-饲用黑麦一体化种植的灌溉条件、棉花栽培管理技术和饲用黑麦栽培管理技术。《棉花微咸水滴灌和自然降水利用技术规程》(DB37/T 2923—2017)适用于山东省有地下微咸水分布且淡水缺乏的棉花种植区,规定了棉花生产过程技术应用的灌排工程、灌溉管理、盐分淋洗和田间管理等技术要求。上述技术规程要求水质符合《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005),并遵循《咸淡水混合灌溉工程技术规范》(DB13/T 928—2008)规定的咸淡水混合灌溉的工程规划、设计、施工、管理和水土环境监测。此外,微咸水灌溉不同类型作物的适宜矿化度阈值还有待研究确定。

再生水的相关标准规范同样适用于雨水水质评价体系,雨水回用也可分为限制性和非限制性利用,主要取决于公众暴露和取用途径。目前,美国50个州中有17个州制定了农作物收获法来规范集蓄雨水在农业灌溉中的利用^[67]。马来西亚自1999年起制定了包括《安装雨水收集与利用系统指南》在内的8项与雨水收集利用有关的政策和指南,目的是减少对再生水的依赖,为供水不足时提供缓冲的空间,但这些政策适用性不强,仅限于工厂、学校等大型建筑物。我国颁布的雨水集蓄和利用技术标准规范多数是针对城市雨水收集。由于初期雨水含有较多污染物,接入市政管网必须符合《污水排入城镇下水道水质标准》(CJ343—2010)要求。雨水提供的水量只能有限度的满足特定的用水需求,供水标准应根据地区降雨量、雨水集蓄工程规模决定。国家标准和水利行业标准《雨水集蓄利用工程技术规范》(GB/T 50596—2010;SL 267—2001)适用于地表水和地下水缺乏或开发利用困难,且多年平均降水量 >250 mm的半干旱地区和经常发生季节性缺水的湿润、半湿润山丘地区,以及海岛和沿海地区。由于集蓄雨水的数量有限,为了使雨水资源得到最有

效的利用,规范建议应当采用非充分灌溉和限额灌溉的原则和方法,在作物需水的生长关键期采用较小的灌溉定额进行补充灌溉。

5 结论与建议

通过比较分析国内外非常规水资源的利用现状以及相关的农业应用研究,发现影响非常规水资源安全利用的关键是与水质有关的环境和健康问题,再生水和微咸水灌溉会导致土壤出现次生盐渍化并有迁移至地下水的风险;再生水和雨水灌溉可能导致重金属和病原菌在土壤和作物中累积,进而通过食物链对人体健康造成潜在危害。人为管理措施的关键在于加强水资源管理,实行有效的源头控制和合理的田间操作规范,尤其是非常规水资源灌溉过程中新兴有机污染物和病原微生物的潜在风险以及适宜灌溉制度的研究还有待进一步加强。

淡水资源的短缺和工业用水的竞争,使农业生产对非常规水资源(再生水、微咸水和雨水等)利用的依赖性日益增加。应继续开展再生水、微咸水、雨水等的安全性及减少环境影响方面的研究,并建立非常规水资源长期灌溉对农田生态和地下水及区域水环境的综合评价指标体系,为非常规水资源安全、高效利用提供理论和技术支撑。为了进一步促进非常规水资源农业利用的可持续性,降低农田灌溉的生态环境及健康风险,提出以下建议:

1)研究方面,再生水与微咸水中可溶性盐分和重金属在水体、土壤及作物中的迁移转化规律及影响因素的研究已取得一定成果,而新兴污染物和病原微生物的研究还不够全面。为实现潜在风险因子的源头控制,应重点加强非常规水资源深度处理技术的研究。针对长期灌溉条件下典型污染物在水-土壤-作物系统的迁移转化规律,需要联合农业水土工程、环境科学、土壤学和微生物学等多个交叉学科,综合考虑水土环境的承载能力,将非常规水资源、土壤、农作物和地下水作为整体展开系统研究。

2)水资源管理方面,灌溉农业可持续发展的核心是水资源优化配置和可供选择水资源多样化。首先,非常规水资源是一类补充性质的水源,即使在干旱缺水地区也要考虑常规水资源和非常规水资源农业灌溉的协同配置问题,调整用水及农业种植结构,提高灌溉水利用效率。其次,在不增加环境压力和利用成本的前提下,改善水质和水资源供应,构建资源节约型和环境友好型农业生产体系。最后,非常规水资源农业灌溉工程规划应与现有灌溉系统相结合,以开源、节流和减污为核心,综合灌溉技术和节水措施全面提高用水效率和节水效果。

3)标准规范方面,非常规水资源及其农业回用的相关标准、技术规程和指南适用范围存在较大差异,水质标准与灌溉利用的监测和控制指标不匹配,且关联不紧密。微咸水和雨水的独立性标准缺失,微咸水由地方参照《农田灌溉水质标准》制定技术规程指导农业生产,但缺乏普适性的矿化度阈值,而雨水水质则是参照污水排放标准。基于作物类型、食用方式和加工方式的非常规水资源农业灌溉回用缺乏细分,微生物学指标有待完善,应增补能够反映水质安全的关键性指标,如毒理指标和生物指标等,并充分考虑非常规水资源利用对环境和人类健康产生的潜在风险。

4)风险管理方面,非常规水资源开发利用将水环境风险直接转化为人类健康和食品安全风险,增加了风险管理的复杂性,其农业回用的主要风险和制约因素体现在病原体的存在、重金属累积以及盐分和有毒化合物对土壤、作物和地下水的污染。非常规水资源的风险管控,尤其是风险因子的源头识别和控制即源水的深度处理技术至关重要。生态风险评估还应考虑非常规水资源农业利用途径,如大田作物灌溉生态风险评估中代表毒性的相关系数可能与设施农业栽培等不同。多数研究仅限于非常规水资源灌溉短期效应评价,难以将水质管控、灌溉管理和生态风险有机关联起来,因而长期灌溉定位监测风险评估体系亟待建立。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 2017年中国水资源公报[R]. 2017.
- [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): 77-84.
- [3] 高传昌,刘兴. 城市非常规水资源的应用研究进展[J]. 灌溉排水学报,2007,26(S1): 68-70.
- [4] HARDY D, CUBILLO F, HAN M, et al. Alternative water resources: A review of concepts, solutions and experiences[R]. The international water association IWA, Alternative water resources cluster Google Scholar, 2015.
- [5] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. Four billion people facing severe water scarcity[J]. Science Advances, 2016, 2(2): 1500323.
- [6] 中华人民共和国水利部. 2017年全国水利发展统计公报[R]. 2017.
- [7] 俞亚平,郑秋丽. 北京,33.6亿方污水变资源[J]. 中外企业文化,2011,(5): 31-33.

- [8] 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,2012,43(1): 101.
- [9] 卢增兰,钮溥. 加强雨养农业建设,促进旱区农业发展——“全拦降水,就地入渗,高效利用”技术体系的探讨[J]. 干旱地区农业研究,1996,14(4): 79-82.
- [10] LIANG X, VAN DIJK M P. Economic and financial analysis on rainwater harvesting for agricultural irrigation in the rural areas of Beijing[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2011, 55(11): 1 100-1 108.
- [11] HE X F, CAO H, LI F M. Econometric analysis of the determinants of adoption of rainwater harvesting and supplementary irrigation technology (RH-SIT) in the semiarid Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2007, 89(3): 243-250.
- [12] 陈卫平. 美国加州再生水利用经验剖析及对我国的启示[J]. 环境工程学报,2011,5(5): 961-966.
- [13] United Nations Environment Programme. Good practices for regulating wastewater treatment: legislation, policies and standards[R]. 2015.
- [14] HAMDY A. Sustainable use and management of non-conventional water resources in the arid regions[J]. Acta Horticulturae, 2002, 573: 159-174.
- [15] LUNDY L, REVITT M, ELLIS B. An impact assessment for urban stormwater use[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(20): 19 259-19 270.
- [16] NGIGI S N, SAVENIJE H H G, THOME J N, et al. Agro-hydrological evaluation of on-farm rainwater storage systems for supplemental irrigation in Laikipia district, Kenya[J]. Agricultural Water Management, 2005, 73(1): 21-41.
- [17] 中华人民共和国水利部. 再生水水质标准, SL368—2006[S]. 2006.
- [18] 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): 2 053-20 59.
- [19] CHEN W, WU L, FRANKENBERGER W T, et al. Soil enzyme activities of long-term reclaimed wastewater-irrigated soils[J]. Journal of Environment Quality, 2008, 37(5): 36-42.
- [20] 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.
- [21] LU Shibao, ZHANG Xiaoling, LIANG Pei. Influence of drip irrigation by reclaimed water on the dynamic change of the nitrogen element in soil and tomato yield and quality[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 139: 561-566.
- [22] 胡超,李平,樊向阳,等. 减量追氮对再生水灌溉设施番茄产量及品质的影响[J]. 灌溉排水学报,2013,32(5): 104-106.
- [23] 朱伟,李中阳,高峰. 再生水灌溉对不同类型土壤的小白菜水分利用效率及品质的影响[J]. 河南农业大学学报,2015,49(2): 199-202.
- [24] INTRIAGO J C, LOPEZ-GALVEZ F, ALLENDE A, et al. Agricultural reuse of municipal wastewater through an integral water reclamation management[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 213: 135-141.
- [25] HASSANLI A M, EBRAHIMZADEH M A, BEECHAM S. The effects of irrigation methods with effluent and irrigation scheduling on water use efficiency and corn yields in an arid region[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(1): 93-99.
- [26] 周新伟,沈明星,陆长婴,等. 再生水灌溉对白菜产量、品质及土壤化学性状的影响[J]. 江苏农业科学,2014,42(1): 130-133.
- [27] ASSOULINE S, RUSSO D, SILBER A, et al. Balancing water scarcity and quality for sustainable irrigated agriculture[J]. Water Resources Research, 2015, 51(5): 3419-3436.
- [28] CHIOU R J. Risk assessment and loading capacity of reclaimed wastewater to be reused for agricultural irrigation[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, 142(1-3): 255-262.
- [29] 马中昇,谭军利,魏童. 中国微咸水利用的地区和作物适应性研究进展[J]. 灌溉排水学报,2019,38(3): 70-75.
- [30] 齐胜利. 衡水市利用微咸水灌溉的实践[J]. 节水灌溉,2005(1): 42-43.
- [31] 苏莹,王全九,叶海燕,等. 咸淡水灌土壤水盐运移特征研究[J]. 灌溉排水学报,2005,24(1): 50-53.
- [32] AHMED B O, INOUE M, MORITAN S. Effect of saline water irrigation and manure application on the available water content, soil salinity, and growth of wheat[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(1): 165-170.
- [33] 谭军利,王西娜,田军仓,等. 不同微咸水灌水量条件下覆砂措施对土壤水盐运移的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(17): 100-108.
- [34] 闵勇,朱成立,舒慕晨,等. 微咸水-淡水交替灌溉对夏玉米光合日变化的影响[J]. 灌溉排水学报,2018,37(3): 9-17.
- [35] 董元杰,陈为峰,王文超,等. 不同NaCl浓度微咸水灌溉对棉花幼苗生理特性的影响[J]. 土壤,2017,49(6): 1 140-1 145.
- [36] 龚雨田,孙书洪,闫宏伟. 微咸水灌溉对冬小麦产量及农艺性状的影响[J]. 节水灌溉,2017(9): 33-37.
- [37] 张蚌蚌,王数,王建初,等. 新疆盐碱地膜下滴灌棉田可持续利用系统分析[J]. 中国农业大学学报,2017,22(11): 36-48.
- [38] PANG H C, LI Y Y, YANG J S, et al. Effect of brackish water irrigation and straw mulching on soil salinity and crop yields under monsoonal climatic conditions[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(12): 1 971-1 977.
- [39] 汪洋,田军仓,高艳明,等. 非耕地温室番茄微咸水灌溉试验研究[J]. 灌溉排水学报,2014,33(1): 12-16.
- [40] 李金刚,屈忠义,黄永平,等. 微咸水膜下滴灌不同灌水下限对盐碱地土壤水盐运移及玉米产量的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(1): 217-223.
- [41] 刘娟,孙兆军,范秀华. 不同矿化度咸水滴灌对盐碱地水盐特性及油葵生长的影响[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(5): 175-180.
- [42] 马君,师维军,郭仁松,等. 微咸水对滴灌棉花冠层光合特征及产量品质的影响[J]. 中国农学通报,2017,33(24): 52-56.
- [43] 张秀梅,郭凯,谢志霞,等. 冬季咸水结冰灌溉下滨海重盐碱地土壤水盐动态及对棉花出苗和产量的影响[J]. 中国生态农业学报,2012,20(10): 1 310-1 314.
- [44] COVA A M, DE FREITAS F T, VIANA P C, et al. Content of inorganic solutes in lettuce grown with brackish water in different hydroponic systems [J]. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2017, 21(3): 150-155.
- [45] 姚素梅,吴大付. 非常规水资源农业利用的若干问题研究[J]. 水资源与水工程学报,2008,19(4): 24-27.
- [46] LUPIA F, BAIOCCHI V, LELO K, et al. Exploring Rooftop Rainwater Harvesting Potential for Food Production in Urban Areas[J]. Agriculture, 2017, 7 (6): 46.
- [47] 穆大伟,张睿,李长伟,等. 城市雨水对生菜产量品质与重金属含量的影响[J]. 农业工程学报,2017,33(S1): 348-354.

- [48] AKHTAR M, HASSAN F U, AHMED M, et al. Is rainwater harvesting an option for designing sustainable cropping patterns for rainfed agriculture [J]. *Land Degradation & Development*, 2016, 27(3): 630-640.
- [49] TIAN Y, LI F M, LIU P H. Economic analysis of rainwater harvesting and irrigation methods, with an example from China[J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 60(3): 217-226.
- [50] WU Y, JIA Z, REN X, et al. Effects of ridge and furrow rainwater harvesting system combined with irrigation on improving water use efficiency of maize (*Zea mays* L.) in semi-humid area of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 158: 1-9.
- [51] 宝哲, 刘洪禄, 吴文勇, 等. 再生水灌溉对植物影响风险研究[J]. *北京水务*, 2013, (3): 28-31.
- [52] MARTINEZ-PIERNAS A B, PLAZA-BOLANOS P, GARCIA-GOMEZ E, et al. Determination of organic microcontaminants in agricultural soils irrigated with reclaimed wastewater: Target and suspect approaches[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2018, 1030:115-124.
- [53] WU X, DODGEN L K, CONKLE J L, et al. Plant uptake of pharmaceutical and personal care products from recycled water and biosolids: a review [J]. *Science of The Total Environment*, 2015, 536: 655-666.
- [54] 崔二苹, 高峰, 陈红, 等. 再生水利用对环境中抗生素抗性基因影响的研究进展[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(2): 32-38.
- [55] ORLOFSKY E, BERNSTEIN N, SACKS M, et al. Comparable levels of microbial contamination in soil and on tomato crops after drip irrigation with treated wastewater or potable water[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 215: 140-150.
- [56] 韩洋, 齐学斌, 李平, 等. 再生水和清水不同灌水水平对土壤理化性质及病原菌分布的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(8):32-38.
- [57] 李平, 齐学斌, 亢连强, 等. 不同潜水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.
- [58] 刘源, 崔二苹, 李中阳, 等. 再生水和养殖废水灌溉下生物炭和果胶对土壤盐碱化的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(6):16-23.
- [59] 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.
- [60] QADIR M, QUILLEROU E, NANGIA V, et al. Economics of salt-induced land degradation and restoration[J]. *Natural Resources Forum*, 2014, 38(4): 282-295.
- [61] MA W, MAO Z, YU Z, et al. Effects of saline water irrigation on soil salinity and yield of winter wheat - maize in North China Plain[J]. *Irrigation and Drainage Systems*, 2008, 22(1): 3-18.
- [62] SHARMA D P, RAO K V G K. Strategy for long term use of saline drainage water for irrigation in semi-arid regions[J]. *Soil and Tillage Research*, 1998, 48(4): 287-295.
- [63] LIU A, LIU L, LI D, et al. Characterizing heavy metal build-up on urban road surfaces: Implication for stormwater reuse[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 515-516: 20-29.
- [64] NG K T, HERRERO P, HATT B, et al. Biofilters for urban agriculture: Metal uptake of vegetables irrigated with stormwater[J]. *Ecological Engineering*, 2018, 122: 177-186.
- [65] LIM K Y, HAMILTON A J, JIANG S C. Assessment of public health risk associated with viral contamination in harvested urban stormwater for domestic applications[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 523: 95-108.
- [66] U.S. Environmental Protection Agency. Guidelines for Water Reuse[R]. 2012.
- [67] National Conference of State Legislature (NCSL) U.S. State Rainwater Harvesting Laws and Programs[R]. 2017.

The Use of Brackish and Reclaimed Waste Water in Agriculture: A Review

CUI Bingjian^{1,2}, GAO Feng^{1,2*}, HU Chao^{1,2}, LI Zhongyang^{1,2}, FAN Xiangyang^{1,2}, CUI Erping^{1,2}

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

2. Key laboratory of High-efficient and Safe Utilization of Agriculture Water Resources of CAAS, Xinxiang 453002, China)

Abstract: Due to poor water resources management and appropriate water treatment technologies, freshwater resources depletion and water quality deterioration has made reclaimed waste water, brackish water and rainwater, called unconventional water, an important complementary resource for irrigation. However, due to its unique chemical quality, irrigating with unconventional water might lead to some detrimental impact on environment and impose health risks, which has attracted increased attention in both scientific and public community. This paper reviews the current situation of the usage of unconventional water resources for irrigation in both China and beyond, and summarized the potentially ecological risks of unconventional water, as well the national standards for regulating unconventional water irrigation. We also put forwards suggestions to improve safe and sustainable use of unconventional water resources for irrigation.

Key words: unconventional water resources; agricultural irrigation; safe and sustainable

责任编辑:赵宇龙