

中国农业非常规水资源灌溉现状与发展策略

胡雅琪, 吴文勇

(中国水利水电科学研究院水利研究所, 北京 100048)

摘要: 随着水资源的日益紧缺, 非常规水资源的开发利用越来越受到各国的重视。利用非常规水资源进行灌溉是应对水资源紧缺的重要举措之一。非常规水资源农业利用以再生水和微咸水为主。中国农业非常规水资源具有较高的潜力, 预计到 2030 年, 农业可利用非常规水资源量为 $3.438 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 其中再生水和微咸水农田灌溉量分别为 $1.645 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 和 $2.48 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。在淡水资源紧缺、非常规水资源相对丰富的地区, 充分利用非常规水资源是缓解淡水资源危机的重要途径。本文在介绍了中国非常规水资源农业利用现状的基础上, 总结了非常规水资源的灌溉模式, 从灌溉区划技术、适宜作物分类、污染识别技术、高效灌水技术、监测评价技术和集成应用模式六方面提出了非常规水资源安全灌溉保障措施, 提出了加强农业非常规水资源灌溉技术研究推广、完善农业非常规水资源回用的标准规范体系、将非常规水资源纳入水资源配置与开发利用规划以及制定农业非常规水资源开发利用激励政策的发展策略, 以建立适合我国气候特点和国情的农业非常规水资源利用技术体系。

关键词: 非常规水资源; 再生水; 微咸水; 灌溉

中图分类号: S275 **文献标识码:** A

Review and Development Strategy of Irrigation with Unconventional Water Resources in China

Hu Yaqi, Wu Wenyong

(Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: With the increasing shortage of water resources, the development and utilization of unconventional water resources have received more and more attention from various countries. Using unconventional water resources to irrigate is one of the important measures to deal with the shortage of water resources. Unconventional water resources mainly include the reclaimed water and brackish water. In China, the agricultural unconventional water resources have relatively high potentials. It has been predicted that the amount of unconventional water available for agriculture will reach $3.438 \times 10^{10} \text{ m}^3$ in 2030 and the irrigation amount of reclaimed water and brackish water will be $1.645 \times 10^{10} \text{ m}^3$ and $2.48 \times 10^9 \text{ m}^3$, respectively. In areas where the fresh water resources are lacking and the unconventional water resources are relatively abundant, especially in the arid area in the north, developing and using unconventional water resources can be regarded as a good solution for the shortage of fresh water. In this paper, based on the situation of China, the irrigation mode of unconventional water resources was summarized. From the aspects of zoning technology, suitable crop classification, pollution identification technology, high-efficient irrigation technique, monitoring and evaluation technology, and integrated application mode, this paper proposes the safe irrigation measures of unconventional water resources in China. Finally, in order to establish a technical system of agricultural unconventional water resources utilization suitable for China, this paper puts forward the development

收稿日期: 2018-08-20; 修回日期: 2018-08-30

通讯作者: 吴文勇, 中国水利水电科学研究院, 教授级高级工程师, 主要从事农业节水基础理论与技术研究; E-mail: wenyongwu@126.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“中国农业资源环境若干战略问题研究”(2016-ZD-10); 国家重点研发计划课题“灌溉多水源优化调度配置技术与方法”(2016YFC0400102)

本刊网址: www.engsci.cn

and utilization strategy, which is to further strengthen the technical research and popularization of the agricultural unconventional water resource utilization technology, to improve the recycling standards and regulation system, to bring the unconventional water resources into the planning of water resources development and utilization, and to formulate incentive policies.

Keywords: unconventional water resources; reclaimed water; brackish water; irrigation

一、前言

随着社会经济的高速发展和人口的急剧增加,水资源供需矛盾日益突出。中国是一个水资源短缺的国家,人均水资源量仅为 $2\ 100\ \text{m}^3$,不足世界人均占有量的 $1/3$,居世界第 127 位 [1]。由于各地区处于不同的水文带及受季风气候影响,中国淡水资源时空分布不均、与耕地资源分布不匹配、水资源水分利用效率低及水污染严重等问题更加剧了淡水资源危机。中国是一个农业大国,农业是中国第一用水大户,约占用水总量的 65%,其中农业用水量的 90% 用于农业灌溉,在水资源形式日益紧张的情况下,农业的发展首先受到制约。多渠道开发利用非常规水资源是世界各国高度重视和积极探索的水资源可持续利用模式之一,对缓解农业水资源问题具有重要意义。非常规水资源主要包括再生水、微咸水、雨水、海水等,农业用非常规水资源以再生水和微咸水为主。具体来讲,再生水指污水经适当工艺处理后,达到一定的水质标准,满足某种使用功能要求,可以进行有益使用的水 [2];微咸水一般指矿化度为 $2\sim 5\ \text{g/L}$ 的含盐水 [3]。若在农业灌溉中合理开发利用非常规水资源,既增辟了灌溉水源,又提高了灌溉保障率,是缓解水资源短缺矛盾的重要举措之一 [4,5]。本文就中国非常规水资源分布特征与农业利用现状、安全灌溉模式和保障措施,及未来发展趋势进行简要介绍,以期对农业领域的非常规水资源利用提供参考。

二、中国农业非常规水资源开发利用现状评价

(一) 中国农业可利用非常规水资源分布特征

中国非常规水资源具有水量大、水量集中的特点。以 2015 年为例,我国农田灌溉水量为 $3.377\times 10^{11}\ \text{m}^3$ [6]。根据调研与数据分析,2015 年全国再生水资源量为 $3.665\times 10^{10}\ \text{m}^3$,再生水农田灌溉量为 $1.101\times 10^{10}\ \text{m}^3$,其中再生水农田灌溉量最

大区域为华北区 $5.21\times 10^9\ \text{m}^3$ 和长江区 $2.57\times 10^9\ \text{m}^3$ 。在微咸水方面,矿化度为 $2\sim 5\ \text{g/L}$ 的微咸水天然补给量为 $2.459\times 10^{10}\ \text{m}^3$,可开采量为 $8.78\times 10^9\ \text{m}^3$,主要分布在华北平原区、松辽平原区、黄河中游黄土区、西北干旱区和长江三角洲滨海区;微咸水农田灌溉量为 $1.48\times 10^9\ \text{m}^3$,其中微咸水农田灌溉量最大区域为华北区 $9.3\times 10^8\ \text{m}^3$ 和晋陕甘 $4.2\times 10^8\ \text{m}^3$ 。2015 年各区划非常规水资源量分布,如表 1 所示。

(二) 中国农业非常规水资源利用现状与潜力

我国非常规水资源开发利用潜力巨大,非常规水资源开发利用对于提升水资源、水生态、水环境承载能力、促进空间均衡等具有重要意义。我国自 20 世纪 50 年代大规模采用污水灌溉开始,国内先后形成了北京污灌区、天津武宝宁污灌区、辽宁沈抚污灌区、山西惠明污灌区及新疆石河子污灌区共计五大污灌区 [7],到 1991 年,全国污灌面积已达 $3.067\times 10^6\ \text{hm}^2$ [8]。2000 年以后,农业缺水形势日趋严峻,再生水灌溉利用受到广泛关注。北京市先后建设了新河灌区、南红门灌区等再生水灌区,是国内最大的灌区,灌溉面积超过 6×10^5 亩 (1 亩 $\approx 666.667\ \text{m}^2$),2010 年再生水灌溉量达到 $3\times 10^8\ \text{m}^3$ [9]。到 2015 年全国再生水灌溉量已达 $1.101\times 10^{10}\ \text{m}^3$ 。在北京、天津、内蒙古、陕西、山西等省市自治区,再生水已在农田灌溉、绿地灌溉、景观补水等方面得到规模化推广利用。为推动再生水灌溉利用,颁布了《城市污水再生利用农田灌溉用水水质》[10],北京、内蒙古等地颁布了再生水灌溉工程的地方标准,以上工作推动了再生水的广泛利用。

我国微咸水面积分布广、数量大,广泛分布在华北、西北以及沿海地带,特别是盐渍土地区,且绝大部分在地下 $10\sim 100\ \text{m}$ 处,易于开发利用 [11]。我国利用微咸水进行农田灌溉的实践已经有很长的历史,但从 20 世纪六七十年代才开始微咸水灌溉方面的研究。宁夏是较早利用微咸水进行农田灌溉的地区,用咸水灌溉的大麦和小麦达到了比旱地增

表 1 2015 年各区划非常规水资源量

 $\times 10^8 \text{ m}^3$

区域划分	再生水		微咸水		
	再生水资源量	农田灌溉量	天然补给量	可开采量	农田灌溉量
东北区	30.2	13.1	0.0	0.0	0.0
华北区	77.8	52.1	43.0	28.0	9.3
长江区	123.3	25.7	53.6	38.3	0.5
华南区	78.1	6.8	4.7	3.1	0.0
蒙宁区	6.8	3.0	9.5	5.7	0.8
晋陕甘	14.4	5.6	28.0	11.0	4.2
川渝区	18.9	0.9	0.0	0.0	0.0
云贵区	11.1	0.5	5.2	0.0	0.0
青藏区	1.2	0.0	102.2	1.7	0.0
西北区	4.7	2.3	0.0	0.0	0.0
全国	366.5	110.1	245.9	87.8	14.8

产的效果；天津提出了符合干旱耕地质量安全的矿化度 3~5 g/L 微咸水灌溉模式 [12]；衡水利用微咸水灌溉，节约深层地下淡水 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，节约灌溉费用 4000 多万元 [13]；此外，在内蒙古、甘肃、河南、山东、辽宁、新疆等地都有不同程度的利用微咸水进行灌溉并获得高产的实践经验。目前，我国微咸水利用重点区域是海河流域、吉林西部、内蒙古中部、新疆等地区，矿化度为 2~5 g/L 的地下微咸水天然补给量为 $2.459 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ，微咸水灌溉量约为 $1.48 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

我国农业非常规水资源具有较高潜力，到 2030 年，农业可利用非常规水资源量为 $3.438 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。预计农业可利用再生水资源量为 $2.951 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ，其中农田灌溉量为 $1.645 \times 10^{10} \text{ m}^3$ （较 2015 年新增 $5.44 \times 10^9 \text{ m}^3$ ）；预计农业可利用微咸水资源量为 $4.87 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，其中农田灌溉量为 $2.48 \times 10^9 \text{ m}^3$ （较 2015 年新增 $1 \times 10^9 \text{ m}^3$ ）。在淡水资源缺乏而非常规水资源相对丰富的地区，特别是北方干旱地区，开发利用非常规水资源不失为解决当地淡水资源短缺的良策。

三、农业非常规水资源灌溉技术模式

（一）再生水灌溉技术模式

国内外已开展大量不同处理再生水灌溉模式实践。澳大利亚墨尔本 Werribee 农场通过土地渗滤、地表渗流、氧化塘等方法对污水进行渗滤处理；北

京市大兴区南红门再生水灌区利用杨各庄湿地、坑塘处理与调蓄再生水，实现季节性调蓄，促进了再生水的高效利用；对于经过土地处理系统或湿地处理系统深度处理后的再生水，在采用合适的灌溉方式与灌溉时机条件下，一般可以灌溉所有作物或园林植物 [14]。概括来说，根据再生水灌溉系统中预处理工程的组成可以将再生水灌溉模式分为 4 种，即“4R”模式（见表 2），包括二级出水经土地处理系统（SAT）净化后用于灌溉的土地净化再生水灌溉（SR）模式、二级出水经湿地处理系统（WTS）净化后用于灌溉的湿地净化再生水灌溉（WR）模式、二级出水经自然水系循环联调改善后用于灌溉的自然水循环净化再生水灌溉（CR）模式及深度处理出水直接用于农林绿地灌溉的深度处理再生水灌溉（DR）模式。此外，再生水安全灌溉技术还包括植物类型识别、风险评估与污染控制、再生水喷滴灌溉技术等关键技术。

（二）微咸水灌溉技术模式

世界各国在生产实践中，因地制宜地采用不同的微咸水灌溉技术模式。Wang 等 [15] 研究表明直接利用矿化度小于 3 g/L 的微咸水连续 3 年灌溉春玉米未出现明显的减产现象；陈琳等 [16] 发现采用咸淡水混灌最有利于黄瓜产量的积累和品质的提高。总体来说，微咸水灌溉技术模式分为 3 类，包括微咸水直接灌溉（DI）模式、咸淡水混灌（MI）模式和咸淡水轮灌（AI）模式，即“3I”

模式（见表3）。DI主要用于土地渗透性好且淡水资源十分紧缺的地区，同时选择耐盐类植物进行种植[17,18]；MI是将淡水与咸水混合，通过冲淡盐水的办法进行灌溉[19]；对于苗期对盐分比较敏感的作物，可采用AI[20]。微咸水灌溉以耐盐、抗旱作物为主，在充分考虑作物品质、水质状况、土壤类型、气象条件、地下水埋深等状况基础上，结合地面灌、喷滴灌等灌溉方式，及相应的农艺措施，合理控制灌水量和灌水次数，选取适宜的灌溉模式。

四、非常规水资源安全灌溉保障措施

我国农业利用再生水、微咸水等非常规水资源具有较高的潜力，为促进非常规水资源安全高效利用，需要在农业非常规水灌溉区划技术、适宜作物

分类、污染识别技术、高效灌水技术、监测评价技术、集成应用模式六方面不断完善技术成果，实现必要的技术保障。

（一）灌溉区划技术

灌溉区划技术对于非常规水资源利用十分重要，再生水灌溉要重点防止伴生污染，微咸水灌溉要重点防控土壤次生盐渍化，通过灌溉区划对回用区域进行分区，提高非常规水资源安全高效利用水平。

再生水灌溉利用区划是再生水安全利用的重要措施之一，应根据再生水灌区土壤理化性状、土壤质量、地下水埋深以及地面坡度等进行再生水灌区灌溉适宜性分区，宜按表4的规定进行再生水灌溉适宜性分区。

微咸水灌溉区域一般排水条件良好，结合适宜

表2 再生水灌溉“4R”模式

分项	SR 模式	WR 模式	CR 模式	DR 模式
模式描述	以 SAT 为预处理设施对再生水水质进行深度净化，出水进入灌溉输配水管网系统	以 WTS 为预处理设施对再生水水质进行深度净化，出水进入灌溉输配水系统	污水处理厂二级处理出水达标排放进入上游河湖系统景观水体，通过向下游自流净化作用使得水质改善后用于灌溉	深度处理出水经过调蓄系统与灌溉管网系统相连接，用于田间灌溉
水质要求		二级处理出水及以上		三级处理出水
作物类型	任何作物	任何作物（除了生食类蔬菜、草本水果等）	任何作物（除了生食类蔬菜、草本水果等）	任何作物
灌溉方式	喷滴灌	地面灌、喷滴灌	地面灌、喷滴灌	喷滴灌

表3 微咸水灌溉“3I”模式

分项	DI 模式	MI 模式	AI 模式
模式描述	将开采的微咸水直接灌溉农田	根据咸水的水质情况，混合相应比例的淡水，使得混合后的淡水符合灌溉水质标准，可灌溉所有作物	根据作物生育期对盐分的敏感性的不同，选择在作物盐分敏感期采用淡水灌溉，在非敏感期采用咸水灌溉
作物类型	耐盐类植物	适用作物较为广泛	盐分敏感作物
土壤要求	土壤渗透性好	需结合农艺措施，土壤渗透性好	需结合农艺措施
灌溉方式	地面灌、喷滴灌	地面灌、喷滴灌	地面灌、喷滴灌

表4 再生水灌溉适宜性分区标准

类型	控制指标		
	地下水埋深 D/m	包气带渗透系数 $K/(m \cdot d^{-1})$	地面坡度 $I/\%$
适宜灌溉区	$D \geq 8.0$	$K < 0.5$	$I < 2.0$
控制灌溉区	$3.0 \leq D < 8.0$	$0.5 \leq K < 0.8$	$2.0 \leq I < 6.0$
不宜灌溉区	$D < 3.0$	$K \geq 0.8$	$I \geq 6.0$

的灌水制度及管理模式,能有效控制根层土壤盐分累积。土壤中的可溶性钠百分率(SSP) < 65%且钠吸附比(SAR) ≤ 10的区域适宜利用微咸水灌溉[21]。应依据灌区气候类型、微咸水水质、地下水埋深条件和土壤质地类型等指标进行微咸水灌溉适宜性分区(见表5)。

(二) 适宜作物分类

再生水灌溉作物分类[10]: ①优先推荐工业原料类植物、园林绿地、林木等; ②推荐大田粮食作物、烹调及去皮蔬菜、瓜类、果树、牧草、饲料类等; ③不推荐生食类蔬菜、草本水果等。

微咸水灌溉作物分类: ①耐盐植物,可以利用中度或重度微咸水进行灌溉; ②中等耐盐植物,可利用轻度或中度微咸水进行灌溉,在淋洗分数(LF) ≥ 36%的排水控盐条件较好灌区可利用重度微咸水进行灌溉; ③中等盐分敏感植物,可利用轻度微咸水灌溉,在LF ≥ 50%的排水控盐条件较好灌区可利用中度微咸水进行灌溉,不得利用重度微咸水

进行灌溉; ④盐分敏感植物,在LF ≥ 80%的排水控盐条件较好灌区可利用轻度微咸水进行灌溉,不得利用中度或重度微咸水进行灌溉。

植物耐盐能力分类情况[22],如表6所示。

(三) 风险评估技术

完善风险评估技术是推进农业非常规水资源灌溉安全利用的重要技术环节,通过风险评估可以定量表征非常规水资源开发利用的现状风险,并预测目标灌溉年限后环境演变趋势,重点关注以下几个方面: ①评估对象:针对土壤、作物、地下水等环境质量以及公众健康等评估对象; ②评估方法:风险评估主要采取试验研究和数值模拟相结合的方法,评估复合污染条件下再生水利用风险是今后需要研究的难点之一; ③评估阈值:针对不同的回用目标确定相应的阈值指标体系,作为风险评判的依据。目前,我国在非常规水资源评估方法的研究方面有一定进展,但是在再生水持久性新兴污染物影响的风险评估方面国内外均处于起步阶段,还

表5 微咸水灌溉适宜性分区标准

水盐性	土壤类型	非碱性水									弱碱性水	强碱性水
		降雨 $R < 200 \text{ mm}$			200 mm ≤ 降雨 $R \leq 800 \text{ mm}$			降雨 $R > 800 \text{ mm}$				
		地下水埋深 D/m			地下水埋深 D/m			地下水埋深 D/m				
		$D < 3.0$	$3.0 \leq D \leq 6.0$	$D > 6.0$	$D < 1.5$	$1.5 \leq D \leq 3.0$	$D > 3.0$	$D < 1.5$	$D \geq 1.5$			
轻度微咸水 1~2 g/L	砂土	×	△	√	△	√	√	△	√	√	×	
	壤土	×	△	√	×	△	√	△	√	△	×	
	黏土	×	×	△	×	×	△	×	△	△	×	
中度微咸水 2~3 g/L	砂土	×	△	√	△	√	√	△	√	√	×	
	壤土	×	△	√	×	△	√	△	√	△	×	
	黏土	×	×	△	×	×	△	×	△	×	×	
重度微咸水 3~5 g/L	砂土	×	×	△	×	△	√	△	√	√	×	
	壤土	×	×	△	×	×	√	△	√	△	×	
	黏土	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	

注: √为适宜灌溉区; △为控制灌溉区; ×为不宜灌溉区。

表6 植物耐盐能力分类

耐盐等级	植物种类	耐盐阈值 $EC_e/(\text{dS}\cdot\text{m}^{-1})$
耐盐	大麦, 甜菜, 棉花, 芦笋等	$6.0 \leq EC_e < 10.0$
中等耐盐	小麦, 燕麦, 黑麦, 高粱, 大豆, 豇豆, 红花, 苜蓿, 油菜, 油葵, 南瓜, 石榴, 无花果, 橄榄, 菠萝, 向日葵等	$3.0 \leq EC_e < 6.0$
中等盐分敏感	玉米, 亚麻, 粟, 花生, 水稻, 甘蔗, 甘蓝, 芹菜, 黄瓜, 茄子, 莴苣, 香瓜, 胡椒, 马铃薯, 番茄, 萝卜, 菠菜, 西瓜, 葡萄等	$1.3 \leq EC_e < 3.0$
盐分敏感	菜豆, 芝麻, 胡萝卜, 洋葱, 梨, 苹果, 柑橘, 梅子, 李子, 杏, 桃, 草莓等	$EC_e < 1.3$

需要开展深入研究，建立再生水灌溉条件下新兴污染物健康风险评价是目前再生水安全利用的技术瓶颈。

（四）高效灌水技术

农业非常规水资源高效利用技术涉及灌水技术和灌溉制度：①农业再生水高效利用技术，从区域和田块尺度寻求技术突破，在区域层面重点解决大中型再生水灌区水资源优化调度问题，在田块尺度，重点解决再生水过程中悬浮物对喷灌和滴灌系统的影响机制和性能提升技术，提高灌水均匀度和设备使用寿命；②农业微咸水高效利用技术，重点突破微咸水安全高效灌溉制度，提出微咸水灌溉土壤水肥盐耦合模拟模型，建立微咸水微灌水盐优化调控灌溉制度和调控模式。

（五）监测评价技术

农业非常规水资源开发利用应当建立监测评价制度，定量评估环境质量演变过程：①监测指标：根据非常规水资源灌溉对土壤、作物和地下水等环境要素的影响机制，筛选相应物理、化学及生物指标，作为年度监测指标；②监测密度和频率：根据主要监测污染物指标的时空变异性和地统计学特征，建立监测密度和频率的计算方法；③评价方法：研究建立单因子评价法和综合评价法，明确不同评价方法的适用条件。

（六）集成应用模式

开展再生水灌溉和微咸水灌溉关键技术集成应用研究，是深入推进农业非常规水资源推广应用的重要方面。①提出典型灌溉模式工程结构和规模，建立农业非常规水资源灌溉的规划设计方法，明确典型灌区不同灌溉工程的技术参数；②针对不同水质特点建立灌溉运行管理调控阈值体系，提高灌溉运行管理效益；③开展相应的标准规范和管理体制机制研究，构建工程措施、农艺措施、管理措施相结合的非常规水资源集成应用模式。

五、中国农业非常规水资源开发利用策略

与美国、以色列等发达国家相比，我国在农业非常规水资源利用的基础研究、政策法规方面尚不

健全，为促进非常规水资源开发利用，重点考虑以下四个方面。

（一）加强农业非常规水资源灌溉技术与推广

我国农业非常规水资源利用研究起步较晚，与发达国家相比还有较大差距。我国再生水利用研究起步于2000年前后。2000年以来，国家“863计划”、科技支撑计划以及“十三五”时期实施的“水资源重点研发专项”均涉及到非常规水资源开发利用研究课题，今后研究重点关注农业非常规水资源利用的污染识别技术、风险评估技术、高效灌溉技术等领域，建立适合我国气候特点和国情的农业非常规水资源利用技术体系。面向公众和农户，开展农业非常规水资源开发利用宣传推广工作，建设不同类型的示范区。

（二）完善农业非常规水资源回用的标准规范体系

《中国节水政策大纲（2005）》明确提出“在研究试验的基础上，安全使用部分再生水、微咸水和淡化后的海水等非常规水以及通过人工增雨技术等非常规手段增加农业水资源”，从国家政策衔接来看，尚需制定农业非常规水资源利用技术指南。技术标准体系不完善也是制约因素之一，目前国内已经制定了《城市污水再生利用农田灌溉用水水质》（GB 20922—2007），尚未制定微咸水灌溉水质标准以及再生水、微咸水灌溉的技术规范。北京、内蒙古等地制定了再生水灌溉的地方标准，河北、内蒙古等地制定微咸水灌溉的地方标准，其他地区尚未制定农业非常规水资源开发利用的地方标准，标准体系不完善客观上制约了非常规水资源的开发利用。

（三）将非常规水资源纳入水资源配置与开发利用规划

将非常规水资源纳入行政区水资源统一配置是推动非常规水资源灌溉利用的基础性工作，目前，国家尚未编制农业非常规水资源开发利用规划，尚未将非常规水资源纳入水资源配置。国家和地方政府制定的水利发展五年规划中应当专门设立专题规划，规划非常规水资源开发利用目标、工程任务和资金投入等，从源头上加强农业非常规水资源的开发利用，对于开发利用非常规水资源的工程给予资金、减免水费等政策支持。

(四) 制定农业非常规水资源开发利用激励政策

科学制定非常规水源的价格,让价格杠杆在水资源市场中充分发挥主导作用,建立和完善非常规水源的收费制度,以补充非常规水源开发利用设施的投资、建设和运营的支出。通过价格、补贴、税收优惠等措施使得非常规水源与常规水源相比具有明显的价格优势和盈利空间,调动企业的积极性。综合运用多种金融、财税政策与制度,设立专项扶持基金,对非常规水资源开发利用相关企业、公司、科研院所从税收、项目资助等方面进行扶持,以促进非常规水资源开发利用技术的升级换代和向实用阶段转化,将农田灌溉列入公益性非常规水资源开发利用,纳入政府补贴配置范畴,降低非常规水资源开发利用成本,使非常规水资源开发利用具有相对竞争优势。

六、结语

农业非常规水资源利用将有效缓解区域水资源短缺形势。中国非常规水资源开发利用潜力巨大,预计到 2030 年,再生水和微咸水农田灌溉量分别为 $1.645 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 和 $2.48 \times 10^9 \text{ m}^3$,较 2015 年新增 $5.44 \times 10^9 \text{ m}^3$ 和 $1 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。在淡水资源缺乏而非常规水资源相对丰富的地区,特别是北方干旱地区,开发利用非常规水资源不失为解决当地淡水资源短缺的良策。再生水灌溉技术模式有四种,包括二级出水经土地处理系统净化后用于灌溉的 SR 模式、二级出水经湿地系统净化后用于灌溉的 WR 模式、二级出水经自然水系循环联调改善后用于灌溉的 CR 模式及深度处理出水直接用于农林绿地灌溉的 DR 模式;微咸水灌溉技术模式有三种,包括 DI 模式、MI 模式和 AI 模式。合理选择非常规水灌溉模式,不仅可以增加水资源供给量和作物产量,还可以避免带来环境不利因素。为促进非常规水资源安全高效利用,需要在农业非常规水灌溉区划技术、适宜作物分类、污染识别技术、高效灌水技术、监测评价技术、集成应用模式六方面不断完善技术成果,实现必要的技术保障。同时,同发达国家相比,我国在农业非常规水资源利用方面的基础研究、政策法规尚不健全。针对中国国情,在国内外现有研究基础上,要进一步加强农业非常规水资源灌溉技术的研究与推广,完善农业非常规水资源回用的标

准规范体系,将非常规水资源纳入水资源配置与开发利用规划,制定农业非常规水资源开发利用激励政策,以建立适合我国气候特点和国情的农业非常规水资源利用技术体系。

参考文献

- [1] 王浩, 王建华. 中国水资源与可持续发展 [J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 352-358.
Wang H, Wang J H. Sustainable utilization of China's water resources [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(3): 352-358.
- [2] GB/T 19923—2005. 城市污水再生利用工业用水水质 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
GB/T 19923—2005. The reuse of urban recycling water—Water quality standard for industrial uses [S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.
- [3] 徐秉信, 李如意, 武东波, 等. 咸水的利用现状和研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2013, 41(36): 13914-13916.
Xu B X, Li R Y, Wu D B, et al. Utilization status and research progress of brackish water [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(36): 13914-13916.
- [4] Romero-Trigueros C, Parra M, Bayona J M, et al. Effect of deficit irrigation and reclaimed water on yield and quality of grapefruits at harvest and postharvest [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 85: 405-411.
- [5] 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.
Wu W Y, Liu H L, Hao Z Y, et al. Review and perspectives of research status on reclaimed wastewater irrigation technologies [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5): 302-306.
- [6] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报 2015 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
Ministry of Water Resources of the PRC. Chinese water resources bulletin 2015 [M]. Beijing: China Water Power Press, 2016.
- [7] 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.
Dai Z Y, Gao B Z. Research advances in reclaimed water irrigation [J]. Waterresources Protection, 2014, 30(1): 8-13.
- [8] 黄春国, 王鑫. 我国农田污灌发展现状及其对作物的影响研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2009, 37(22): 10692-10693.
Huang C G, Wang X. China's farmland sewage irrigation development and its impact on crop research [J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2009, 37(22): 10692-10693.
- [9] 潘兴瑶, 吴文勇, 杨胜利, 等. 北京市再生水灌区规划研究 [J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(4): 115-119.
Pan X Y, Wu W Y, Yang S L, et al. Study of reclaimed water irrigation district in Beijing [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(4): 115-119.
- [10] GB 20922—2007. 城市污水再生利用农田灌溉用水水质 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
GB 20922—2007. The reuse of urban recycling water-quality of farmland irrigation water [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [11] 王全九, 单鱼洋. 微咸水灌溉与土壤盐调控研究进展 [J]. 农

- 业机械学报, 2015, 46(12): 117-126.
- Wang Q J, Shan Y Y. Review of research development on water and soil regulation with brackish water irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 117-126.
- [12] 邵玉翠, 张余良, 李悦, 等. 微咸水农田灌溉技术研究 [J]. 天津农业科学, 2003, 9(4): 25-27.
- Shao Y C, Zhang Y L, Li Y, et al. Technique of brackish water for farmland irrigation [J]. Tianjin Agricultural Science, 2003, 9(4): 25-27.
- [13] 周晓妮, 刘少玉, 王哲, 等. 华北平原典型区浅层地下水化学特征及可利用性分析——以衡水为例 [J]. 水科学与工程, 2008 (2): 56-59.
- Zhou X N, Liu S Y, Wang Z, et al. The chemical characteristics and available analysis of shallow groundwater in the typical area of plain of North China—Take Hengshui as an example [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2008 (2): 56-59.
- [14] 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.
- Bao Z, Liu H L, Wu W Y, et al. The impact of irrigation with reclaimed water on plant [J]. Beijing Water, 2013 (3): 28-31.
- [15] Wang Q M, Huo Z L, Zhang L D, et al. Impact of saline water irrigation on water use efficiency and soil salt accumulation for spring maize in arid regions of China [J]. Agricultural Water Management, 2016, 163: 125-138.
- [16] 陈琳, 田军仓, 闫新房. 微咸水不同灌溉方式对温室膜下滴灌黄瓜的影响 [J]. 宁夏工程技术, 2016, 15(2): 97-101.
- Chen L, Tian J C, Yan X F. Impact of different irrigation methods with brackish water to cucumber drip irrigation under film in greenhouse [J]. Ningxia Engineering Technology, 2016, 15(2): 97-101.
- [17] Leogrande R, Vitti C, Lopodota O, et al. Effects of irrigation volume and saline water on maize yield and soil in Southern Italy [J]. Irrigation and Drainage, 2016, 65: 243-253.
- [18] 万书勤, 康跃虎, 王丹, 等. 华北半湿润地区微咸水滴灌对番茄生长和产量的影响 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 30-35.
- Wan S Q, Kang Y H, Wang D. Effect of saline water on tomato growth and yield by drip irrigation in semi-humid regions of North China [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 30-35.
- [19] 郝远远, 郑建华, 黄权中. 微咸水灌溉对土壤水盐及春玉米产量的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(10): 36-41.
- Hao Y Y, Zheng J H, Huang Q Z. Effects of saline water irrigation on soil water salinity and spring maize yield [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(10): 36-41.
- [20] Liu X W, Feike T, Chen S Y, et al. Effects of saline irrigation on soil salt accumulation and grain yield in the winter wheat-summer maize double cropping system in the low plain of North China [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(12): 2886-2898.
- [21] DB13/T 1280—2010. 微咸水灌溉冬小麦种植技术规程 [S]. 河北省质量技术监督局, 2010.
- DB13/T 1280—2010. Technical manual for growing winter wheat with slightly saline water irrigation [S]. Hebei Provincial Administration of Quality and Technology Supervision, 2010.
- [22] Wallender W W, Tanji K K. Agricultural salinity assessment and management [R]. USA: American Society of Civil Engineers, 2011.