

引用格式:孙宏勇,张雪佳,胡燕哲,等. 缺水盐碱区农田多水源协同利用的思考[J]. 世界科技研究与发展, 2025, 47(1): 37 - 45.

缺水盐碱区农田多水源协同利用的思考^{*}

孙宏勇^{*,1,2} 张雪佳¹ 胡燕哲¹ 李腾¹ 王金涛¹ 董心亮¹ 郭凯^{1,2} 刘小京^{1,2}

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 石家庄 050022;

2. 中国科学院大学现代农业科学学院, 北京 100049)

摘要: 水安全是粮食安全的基础, 缺水盐碱区农田多水源协同利用对保障国家粮食安全具有重要的战略意义。本文分析了缺水盐碱区农田多水源利用的现状及其面临的挑战, 蒸发降水比大是盐碱地形成的主要原因, 淡水资源匮乏仍是制约盐碱地利用和生态环境保护的核心问题; 在我国不同类型盐碱区的降水资源存在明显差异, 年降水量小于 500 mm, 其他水源也有一定差异; 结合农田生态系统五水转化理论的研究进展, 重点从植物高效用水、降水集蓄高效利用、地表坑塘沟渠集蓄灌溉、土壤保墒蓄水高效利用、地下水生态调蓄利用和基于作物生命需水信息和上述农田多水源资源特点的协同高效利用六个方面进行了综述, 并提出了未来气候变化下农田多水源协同利用发展的关键技术、产业等重点方向, 以期缺水盐碱区农田多水源协同利用提供理论参考和技术支撑。

关键词: 农田多水源; 协同利用; 高效用水; 水资源短缺; 盐碱区

DOI: 10.16507/j.issn.1006-6055.2025.02.002

CSTR: 32308.14.1006-6055.2025.02.002

Discussion on the Agricultural Efficient Utilization of Multiple Water Resources in the Deficient Water and Saline Alkali Areas^{*}

SUN Hongyong^{*,1,2} ZHANG Xuejia¹ HU Yanzhe¹ LI Teng¹ WANG Jintao¹
DONG Xinliang¹ GUO Kai^{1,2} LIU Xiaojing^{1,2}

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 2. College of Advanced Agricultural Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Water security is the foundation of food security, and the coordinated utilization of multiple water sources in farmland with scarce fresh water and salt-affected soils is of great strategic significance for ensuring national food security. This study analyses the current situation and challenges faced by the utilization of multiple water sources in deficient water resources and saline alkali areas. The high ratio of evaporation to precipitation is the main reason for the formation of saline alkali land, and the scarcity of freshwater resources remains the core issue restricting the utilization of saline alkali land and

^{*} 国家科技部十四五重点研发计划“冀津环渤海不同盐渍化程度耕地质量与产能提升技术集成及综合技术模式构建”(2021YFD1900904), 河北省现代农业产业技术体系“旱碱麦创新团队”项目(HBCT2024030204), 河北省农业农村厅项目“滨海区轻中度盐碱耕地综合利用技术示范与应用”(冀农科 24001)

^{**} E-mail: hysun@sjiam.ac.cn

maintaining the ecological environment. There are significant differences in rainfall resources among different types of saline alkali areas in China, with annual precipitation less than 500mm, and other water sources also have certain differences. Based on the research progress of the theory of five water transformation in agricultural ecosystems, this paper focuses on six aspects: efficient use of plants, efficient utilization of rainfall harvesting, efficient irrigation of surface ponds and ditches, efficient utilization of soil moisture retention and water storage, ecological regulation and utilization of groundwater, and collaborative efficient utilization based on crop life water demand information and the characteristics of multiple water sources in farmland. Key technologies and industries for the development of collaborative utilization of multiple water sources in farmland under future climate change are proposed. This study will provide theoretical reference and technical support for the coordinated utilization of multiple water sources in the deficient water and saline-alkali areas.

Keywords: Multiple Water Resources; Collaborative Utilization; Efficient Water Utilization; Water Resources Deficient; Saline Alkali Areas

水安全与食物安全是人类社会可持续发展的最基本支撑点^[1]。水安全是食物安全的基础,水资源量的多少是影响食物安全的最重要因素^[2]。近年来,中国水资源短缺愈发严重,可耕地面积持续减少,水土资源空间分布不匹配的问题尤为突出,进一步限制了粮食生产,制约粮食安全。盐碱地作为重要的后备耕地资源,其改良利用可以有效扩展耕地面积,提升粮食生产水平,对保障国家粮食安全具有重要意义。

习近平总书记指出,开展盐碱地综合利用是一个战略问题,必须摆上重要位置。要立足我国盐碱地多、开发潜力大的实际,发挥科技创新的关键作用,加大盐碱地改造提升力度,加强适宜盐碱地作物品种开发推广,有效拓展适宜作物播种面积,积极发展深加工,做好盐碱地特色农业这篇大文章^[3]。受自然环境的影响,我国盐碱地集中分布于干旱和半干旱地区,由于该区域水土资源约束强、生态系统脆弱,农业生产潜力低。研究表明,土壤水盐运移及其调控是盐碱地综合利用的核心问题,而水资源则是盐碱地的合理开发利用的关键要素^[4]。为此,我国科学家提出了一系列以水为核心的盐碱地改良技术,包括水盐平衡管理、水盐动态调控以及淡化肥沃层构建等^[5]。这些技术通过优化灌溉与排水措施、精准调控土壤盐分运移、提升土壤肥力等手段,有效改善了盐碱

地的土壤结构和生态环境,提升盐碱耕地质量。然而,在盐碱地改造利用过程中,还需要充分考虑水资源的承载能力和利用效率,综合评估成本效益^[6],以便决策者及农民在不同技术间进行合理权衡。《2016—2045 年新兴科技趋势报告》预测,到 2045 年,全球将有超过 40% 的人口面临水资源短缺的严峻挑战。非常规水高效利用和降水收集等多水源联合利用技术将会减缓人类对淡水的需求,也将成为解决盐碱地治理瓶颈的必然选择。这些技术不仅能缓解盐碱地治理对淡水资源的依赖,还能降低治理成本、提高水资源利用效率。在此背景下通过统筹区域降水、地表水、地下水以及区域内的水资源,结合盐碱地的水盐运移规律,确定水量平衡和水盐平衡的农业利用模式,能够实现盐碱地的可持续开发利用。

本文简要分析了我国缺水盐碱区的农田多水源利用现状及其面临的问题,并提出降水、植物水、土壤水、地表水和地下水等多水源在农业生产中高效协同利用情况和需要关注的重点问题,旨在为盐碱地可持续综合利用保障国家粮食安全提供借鉴。

1 缺水盐碱区农田多水源概况

我国盐碱地集中分布在西北、东北、华北和沿海地区,受成土母质、气候特征、地形地貌、水文地

质和农业活动等因素的影响,其盐碱类型和程度各不相同。盐碱地的分布遍及湿润至干旱地区,但主要分布在干旱和半干旱地区,蒸发降水比大是该地区盐碱地形成的主要原因,淡水资源短缺是限制盐碱区农业可持续发展的主要瓶颈^[3]。在东北地区,受地势低洼和地表排水不畅等地形地貌因素、蒸降比大和冻融等气候因素、构造运动等自然因素和农牧业过度开发等人为因素的共同影响,土壤结构不良、透水性差、pH 值和电导率高;年降水量 370 ~ 500 mm,其他水源以地表水为主^[7]。在西北地区,由于地表蒸发强烈而降水稀少,溶解在水中的盐分在土壤表层严重表聚;年降水量小于 150 mm,其他水源以高山融冰的河流来水为主^[8]。在扬黄灌区,受气候因素和灌溉水质影响,灌溉后水分在地质和生态限制下无法外排,土壤盐渍化问题严重;年降水量在 200 ~ 300 mm 之间,其他水源以黄河水源为主^[9]。在滨海地区,受季风气候和浅层地下咸水顶托共同影响,旱渍交替现象频发,整个土体盐分含量较高,盐碱问题周年反复性较为严重^[10,11];年降水量在 500 mm 以上,其他水源以地表水和浅层地下水为主。

2 农田多水源特征及面临的问题

从我国盐碱地治理的历史来看,淡水资源仍然是盐碱地改良利用过程中的必要条件和行之有效的改良措施^[12,13]。在此背景下,缺水盐碱区农田多水源利用仍然存在以下问题。

2.1 淡水资源短缺仍是最重要卡点问题

淡水资源是盐碱地利用的前提,水盐调控则是核心问题。盐碱地治理的基本原理在于水盐的同步运动,即盐随水来、盐随水去,通过合理的调控水分实现盐分的有效淋洗与排出。然而目前淡水资源短缺已成为全球性问题,我国已成为世界

上人均水资源最贫困的国家之一^[4],人均水资源量仅为世界平均的 1/4;同时,随着人口增长与社会的快速发展,各产业用水需求不断增加,生活、工业和农业用水之间的竞争日益激烈,农业用水需求的持续增长与有限的淡水资源供给之间存在显著矛盾,尤其是在盐碱地区,用于农业灌溉的淡水资源愈发紧张。此外,地下水的过度开采问题依然突出,部分地区因长期超采导致地下水位下降,造成地下漏斗和一系列生态环境问题^[14],进一步加剧淡水危机。因此,淡水资源短缺仍是当前盐碱地治理最重要的卡点问题。

2.2 生态环境仍有恶化的潜在问题

在淡水资源日渐匮乏情况下,采用微咸水、咸水等非常规水源进行农业灌溉是解决水资源短缺的途径之一,但其存在导致土壤盐渍化的潜在风险。利用微咸水、咸水等非常规水灌溉农田,虽然能为作物提供生长水源,但同时也给土壤引入了盐分;高盐环境下,土壤中的钠离子会破坏土壤团聚体结构,使土壤颗粒崩解、膨胀和分散,导致土壤孔隙度降低、透气性和渗水性变差;另一方面,高盐环境下的土壤,其水分更容易通过蒸发和毛细作用向地表迁移,导致盐分在表层积聚,进一步加剧土壤盐碱化^[15]。同时,部分缺水盐碱区受季节性水源变化特征与作物需水信息不匹配的影响,雨季集中降水易造成农田涝渍,形成周年旱渍交替现象,进而造成作物减产。此外,滨海地区受气候变化等因素的影响,浅层地下咸水顶托下存在海水入侵导致土壤盐渍化,造成盐渍化土壤面积增加的风险^[11]。

2.3 配套工程措施投入产出比低的问题

盐碱地改造利用的核心是灌排结合,其主要通过水利工程措施得以实现,主要技术包括暗管排盐、明排盐、暗排盐、干排盐、湿排盐等。灌排体

系主要是通过灌溉淋洗土壤中的盐分,强排把地下水位控制在土壤返盐的临界水位以下,抑制地下水的上升,有效调节土壤的水盐平衡,减少土壤次生盐碱化的发生。然而,灌排体系的建立不仅需要大量的资金投入,后期运行维护成本也较高。并且这些措施在主粮作物的生产过程中,造成投入产出比低,进而影响配套工程措施的使用^[16]。

因此,缺水盐碱区农业可持续发展主要面临水资源承载力低、生态效益持续性差和经济效益低等问题的挑战,亟需探索依据“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”(四水四定)为基础的缺水盐碱区农业可持续发展的模式。

3 缺水盐碱区农田多水源协同利用探讨

盐碱区多分布在干旱半干旱地区,淡水资源短缺是限制盐碱区农业生产发展的关键限制因素。开源节流并重是解决盐碱区淡水资源短缺的主要途径,主要表现为优先利用非常规水资源,高效利用地表水资源,合理控制地下水资源,最大化利用降水资源。刘昌明^[17]提出在农田生态系统中存在五水转化过程,其是指大气、植物、地表、土壤和地下水层中的水存在相互转化过程。各种状态的水分通过一系列的转化关系构成一个相互联系的网络,通过在土壤-大气界面、根系-土壤界面和植物-大气界面进行调控,可以有效提升水分利用效率。因此,合理的配置水资源和高效的利用水资源是缺水盐碱区农业健康发展的保障。

3.1 植物高效用水

利用植物自身的生理遗传特性,在相同水分条件下可以获得更多产量。在单株水平上可以通过发掘作物抗旱基因和培育抗旱节水型新品种,构建高水效理想株型,进而实现增加作物光合速

率,减少叶片蒸腾,提高水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE)。多项研究发现,在相同水分条件下不同作物种类所生产的干物质不同,同一种类作物不同品种所生产的干物质也存在明显差异。张喜英等^[18]研究表明冬小麦夏玉米品种间 WUE 达 20% 左右。董宝娣等^[19]在 19 个不同的冬小麦抗旱品种研究中发现,品种间产量相差 44.86%, WUE 相差 42.18%。王斌等^[20]报道了我国 17 个省小麦 WUE 变化范围为 0.27 ~ 3.44 kg/m³, 15 个省玉米 WUE 变化范围 0.08 ~ 4.90 kg/m³, 9 个省大豆 WUE 变化范围为 0.28 ~ 1.69 kg/m³。作物种类和品种之间对水分的利用效率存在差异,因此迫切需要加强基因组学代谢组学共同创制高水效的作物品种,实现植物对水的高效利用。

3.2 降水资源高效利用

我国北方多数地区受季风气候影响,年内降水分配不均。以环渤海地区沧州市为例,分析雨季降水在不同降水量上出现的频率,由图 1 可知,7 月是降水量较高的月份,在 50 ~ 100 mm、100 ~ 150 mm、150 ~ 200 mm 和 200 mm 以上均有较高的频率,分别为 89.47%、73.68%、57.89% 和 26.32%。同时,由于雨季降水强度高,无法全部储存在土壤中,易形成径流损失。因此,需要从降水的不同层级考虑降水资源的高效利用。纳雨蓄墒耕作技术可以尽可能的增加土壤对降水资源的集蓄,其主要包括深耕、深松保墒、耙耱和镇压、保护性耕作和使用高性能的土壤保水剂等^[18]。同时,创制降水集蓄新材料可以通过储水介质的改变实现对降水的集蓄、存储,进而在适宜适期进行调配灌溉利用^[21]。

降水是水循环过程中基本环节,其可以转化为地表水、土壤水、地下水等不同形态的水,但其

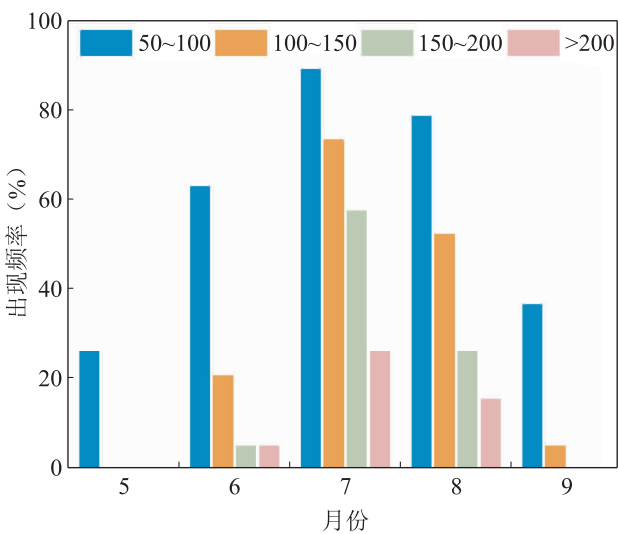


图1 沧州市不同月份降水量出现频率(1961—2014)

Fig. 1 Frequency of occurrence of precipitation in different months in Cangzhou City (1961-2014)

转化效率在不同降水年型下存在一定差异。据张利等报道^[22],在不同降水年型下均为降水对土壤水的转化最高,对地表水的转化最低,多年平均下河北黑龙港地区全年降水的 75.0% 转化为土壤水、2.5% 转化为地表水、22.5% 补给地下水。

表 1 不同降水频率下降水转化为地表水、地下水和土壤水的比例^[22]

Tab. 1 Proportions of rainfall converted to surface water, groundwater and soil water at different precipitation frequencies^[20]

降水频率	降水量 /mm	地表水 /%	地下水 /%	土壤水 /%
25%	650.0	4.0	23.5	72.5
50%	500.0	2.0	21.0	77.0
75%	380.0	1.5	11.0	87.0
多年平均	537.8	2.5	22.5	75.0

3.3 地表水资源高效利用

地表水指陆地表面上动态水和静态水的总和,是河流、冰川、湖泊、沼泽的总称。以沧州市为例,研究表明沧州坑塘沟渠等地表水的储水量变化受当地降水和水面蒸发有关;地表水水质跟距

离渤海的距离相关性较强^[23]。根据沧州市典型年份不同含盐量的地表水分布情况,结合前人的研究成果^[24,25],小于 5 g/L 的微咸水可以用于冬小麦拔节期灌溉,按照 750 m³/hm² 灌水定额计算,约可保障 46.45 万 hm² 的冬小麦灌溉面积,大于 5g/L 的咸水可以用于冬季咸水结冰灌溉改良重度盐碱地,按照 1500 m³/hm² 灌水定额计算,约可保障 15.17 万 hm² 的重度盐碱地改良(表 2)。

表2 沧州市典型年型地表水蓄水量和可灌溉面积

Tab. 2 The surface water storage and possible irrigable area in typical years in Cangzhou City

水质 (g/L)	蓄水量 (万 m ³)	灌水定额 (m ³ /hm ²)	可灌溉面积 (万 hm ²)
<1	1053.00	750	1.40
1~2	7164.91	750	9.55
2~3	9762.00	750	13.02
3~5	16823.27	750	22.43
>5	22761.81	1500	15.17
合计	57564.99	/	61.58

3.4 土壤水资源高效利用

土壤水是位于包气带上部土壤层中具有利用价值的结合水和毛细水。土壤水资源概念是前苏联学者李沃维奇^[26]于 20 世纪 70 年代首次提出,随后 Budagovskii 和 Busarova 发表了土壤水资源的论述^[27,28]。土壤水作为水资源的重要组成部分,其研究的重要性和应用价值逐渐受到重视,但关于土壤水资源评价的研究仍有不足。多数土壤水资源来源于天然降水,部分来自于浅层地下水。如何高效利用土壤水资源对提高水分利用效率具有极其重要的作用。

一些农艺措施可以增加土壤水资源量^[29]。例如,秸秆、薄膜等覆盖措施可以显著减少土壤蒸发,将多余的水分储存在土壤中。通过调整作物时空布局,使之与土壤水资源时空分布相匹配,进

而提高土壤水资源的高效利用。同时,提高土壤有机质是提升土壤水分有效性的重要措施之一,通过施用有机肥可以提高土壤有机质含量,显著改善土壤的物理结构,进而增加土壤有效水分含量^[30]。

3.5 地下水资源高效利用

地下水可分为浅层地下水和深层地下水。浅层地下水通常是指能够直接接受大气降水和地表水补给的潜水,主要由大气降水和地表径流水形成,水质和水量均受降水和径流的影响,埋深一般不超过 100 m。深层地下水一般指承压水,即充满两个隔水层之间的地下水。环渤海区地下水资源量为 437.5 亿 m³,地下水位埋深小于 6 m 的区域占环渤海低平原面积的 65%^[31]。浅层地下水埋深直接影响土壤含水量的变化^[32],地下水埋深越浅,地下水对作物根系的水分补给量越多,但同时可能会造成土壤中氧气含量降低,植物根毛减少^[33]。地下水埋深不仅对植物地下部影响显著,同时对地上部的影响也较为显著,显著影响植株叶面积指数,地下水埋深浅,则植株高大、叶片生长密集、叶面积指数大^[34,35]。在地下水与作物产量之间存在一个最佳的地下水埋深,是作物、气候和土壤的函数^[36,37];环渤海区的研究结果表明,地下水埋深在 1.5 m 时冬小麦产量最优^[38]。因此,根据作物的生理特性合理地控制浅层地下水埋深对作物生长和生态环境等均具有非常重要的作用。

3.6 基于作物需水信息的多水源协同利用

不同缺水盐碱区域的光热资源差异形成了不同的种植制度。东北盐碱区、扬黄灌区盐碱区和部分西北盐碱区多为一年一熟制度,滨海盐碱区较为充沛的光热资源可以支撑冬小麦-夏玉米一年两熟的种植制度。不同种植制度下作物的类型

及品种对水分的需求存在差异,且作物在不同生育阶段对水分和盐分的敏感度也有所不同。例如环渤海缺水盐碱区冬小麦-夏玉米一年两熟种植制度下作物总需水量约为 800 ~ 850 mm,其中冬小麦约需 400 ~ 450 mm,夏玉米约需 350 ~ 400 mm^[39]。同时,作物种类、同一作物品种及同一品种在不同生育阶段对水量和水质的敏感性不同。因此,需深入研究作物生命健康需水过程及其量化表达方法,明确不同水土气热资源条件下作物生命健康需水阈值,并建立相应的农业节水标准体系;同时,探讨作物生命健康需水过程对环境变化的响应关系^[40],进而实现农田多水源的协同利用。

4 结语与展望

在新形势下,面向国家粮食安全战略需求,依据缺水盐碱区种植制度特点和农田多水源特点,坚持“适水、适地、适生”的理念,创新缺水盐碱区农田多水源高效安全协同利用的理论、技术、产品和装备,构建缺水盐碱区农田多水源协同利用的农业高质量绿色发展新模式,推动综合考虑农田多水源问题的中国式现代化发展。未来,在农田多水源协同利用领域,应重点加强以下 3 方面的工作。

4.1 气候变化下农田多水源协同利用

气候变化通过以温度和降水两个要素为代表的变化加剧了农业生产的不稳定性。全球气候变暖加剧了冰川消融,导致地表径流改变、旱涝灾害频发、海平面上升和暴雨干旱等极端气候频繁出现^[41]。由于气候变化引发的蒸发强度增加、淡水资源短缺、海平面上升和海水倒灌等均会增加土地的盐碱化。通过科技创新多水源协同利用技术可以增加可利用水源,应对气候变化下的水资源供需矛盾和提升盐碱地综合利用程度。因此,未

来缺水盐碱区要以水资源承载力为核心,增加农业气象预报和作物需水信息采集能力,发展国家农业水网、咸水低成本淡化、适度增加跨流域调水和非常规水安全利用技术等多种农业用水保障能力,积极优化缺水盐碱区适水农业种植制度等^[42]。

4.2 创新农田多水源协同利用技术

缺水盐碱区丰富的咸水资源使咸水淡化技术成为解决区域淡水资源短缺的主要途径之一^[40]。咸水淡化的主流技术由于水成本较高(3.6 ~ 7.0 RMB/m³),在农业生产尤其是主粮作物种植业中利用率较低,如何创新低成本的海水淡化技术进而充分利用丰富的咸水资源是多水源利用的主要方向。降水是雨养农田主要的水源,创新降水集蓄系统、储水介质,研制高效低价集雨表面材料、创新农田土壤降水高效保墒技术是其高效利用的途径。从区域上,以地下水采补平衡和盐分补排平衡为核心,以降水为基本通过地表地下水联合调控获得满足作物生命健康需水信息的农田多水源比例、配水时间及分布,提高多水源综合利用效率^[41]。

4.3 培育多水源高效利用特色产业

依据缺水盐碱区自然资源禀赋和社会经济发展情况,重点培育不同水源和盐碱类型和程度支撑下的粮经饲特色产业,形成以水定产的产业高效发展新模式,促进缺水盐碱区农业高质量绿色发展。同时,应充分利用生物技术、信息技术和智能技术,创新缺水盐碱区农田多水源量质特点、作物需水用水实时遥测感知、同步传输、数据融合、实时预报等现代技术^[40],培育相关新业态,提升缺水盐碱区农田多水源高效利用产业发展。

参考文献

[1]康绍忠. 中国农业节水十年:成就、挑战及对策

[J]. 中国水利,2024(10): 1-9.

[2]康绍忠. 农业水土工程学科路在何方[J]. 灌溉排水学报,2020,39(1):1-8.

[3]新华社. 在田间地头,总书记关心农业科技创新[EB/OL]. (2023-05-13) [2025-01-16]. http://www.xinhuanet.com/2023-05/13/c_1129610954.htm.

[4]刘小京,郭凯,封晓辉,等. 农业高效利用盐碱地资源探讨[J]. 中国生态农业学报(中英文),2023,31(3): 345-353.

[5]杨劲松,姚荣江,王相平,等. 中国盐渍土研究:历程、现状与展望[J]. 土壤学报,2022,59(1): 10-27.

[6]习近平. 切实加强耕地保护抓好盐碱地综合改造利用[J]. 求是,2023,23: 4-8.

[7]赵兰坡,尚庆昌,李春林. 松辽平原苏打盐碱土改良利用研究现状及问题[J]. 吉林农业大学学报,2000,22(S1): 79-83,85.

[8]牛子路,王磊,齐拓野,等. 宁夏红寺堡扬黄灌区土壤盐渍化特征[J]. 干旱区研究,2023,40(11): 1785-1796.

[9]吕宁,石磊,戴昱余,等. 新疆盐碱地治理利用研究回顾与启示[J]. 灌溉排水学报,2024,43(12): 1-10.

[10]王遵亲. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社,1993.

[11]HOPMANS J W, QURESHI A S, KISEKKA I, et al. Critical knowledge gaps and research priorities in global soil salinity[J]. Advances in agronomy, 2021,169: 1-191.

[12]黄冠华. 再生水农业灌溉安全的有关问题研究[J]. 中国农业科技导报,2007,9(1): 26-35.

[13]王全九,邓铭江,宁松瑞,等. 农田水盐调控现实与面临问题[J]. 水科学进展,2021,32(1):

- 139-147.
- [14] 王树强. 地下水资源可持续利用的制度架构——以华北平原为例[J]. 地下水, 2012, 34(3): 6-8.
- [15] 董心亮, 王金涛, 田柳, 等. 盐渍化土壤团聚体和微生物与有机质关系研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 12: 1-9.
- [16] 耿其明, 闫慧慧, 杨金泽, 等. 明沟与暗管排水工程对盐碱地开发的土壤改良效果评价[J]. 土壤通报, 2019, 50(3): 617-624.
- [17] 刘昌明. 中国农业水问题: 若干研究重点与讨论[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 875-879.
- [18] 张喜英, 刘小京, 陈素英, 等. 环渤海低平原农田多水源高效利用机理和技术研究[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(8): 995-1004.
- [19] 董宝娣, 张正斌, 刘孟雨, 等. 小麦不同品种的水分利用特性及对灌溉制度的响应[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 27-33.
- [20] 王斌, 孟祥龙, 徐波, 等. 基于文献数据估算中国主要粮食作物水分利用效率[J]. 水利发展研究, 2017(4): 24-29.
- [21] 孙宏勇, 刘小京, 闵雷雷, 等. 农村坑塘蓄水利用的研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(1): 17-19, 21.
- [22] 张利, 朱福星, 王金珍. 河北省黑龙港地区四维治水研究[J]. 农业工程学报, 1990, 6(4): 40-45.
- [23] 赵长龙, 邢英梅, 董心亮, 等. 河北低平原区坑塘水水量水质变化特征及影响因素[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(5): 900-909.
- [24] 陈素英, 邵立威, 孙宏勇, 等. 微咸水灌溉对土壤盐分平衡与作物产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(8): 1049-1058.
- [25] 郭凯, 巨兆强, 封晓辉, 等. 咸水结冰灌溉改良盐碱地的研究进展及展望[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(8): 1016-1024.
- [26] 朱福星, 王金珍. 四维治水—黄淮海平原农业水资源综合治理配套技术. 北京: 科学出版社, 1993, 57-61.
- [27] BUDAGOVSKII A I. Soil water resources and available water supply of vegetation cover[J]. Water resources, 1985, 12(4): 317-325.
- [28] BUDAGOVSKII A I, BUSAROVA O E. Basis of methods to evaluate changes in soil water resources and river runoff for different climate change scenarios[J]. Water resources, 1991, 18(2): 111-120.
- [29] CHEN S Y, ZHANG X Y, PEI D, et al. Effects of straw mulching on soil temperature, evaporation and yield of winter wheat: Field experiments on the North China Plain[J]. Annals of applied biology, 2007, 150(3): 261-268.
- [30] 单秀枝, 魏由庆, 严慧峻, 等. 土壤有机质含量对土壤水动力学参数的影响[J]. 土壤学报, 1998, 35(1): 1-9.
- [31] 田言亮, 严明疆, 张光辉, 等. 环渤海低平原土壤盐分分布格局及其影响机制研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(1): 118-123.
- [32] 李小倩, 夏江宝, 赵西梅, 等. 不同潜水埋深下浅层土壤的水盐分布特征[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(2): 43-50.
- [33] 隋文华. 地下水埋深对膜下滴灌玉米干物质积累和需水的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [34] 乌兰其其格, 乌仁格日乐, 李美芝. 不同埋深下土壤水盐运移及对作物生长影响的试验研究

- [J]. 内蒙古水利, 2011(4): 3-4.
- [35] 刘战东, 刘祖贵, 俞建河, 等. 地下水埋深对玉米生长发育及水分利用的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(7): 617-624.
- [36] BENYAMINI Y, MIRLAS V, MARISH S, et al. A survey of soil salinity and groundwater level control systems in irrigated fields in the Jezre' el Valley, Israel [J]. Agricultural water management, 2005, 76(3): 181-194.
- [37] MIAO Q F, ROSA R D, SHI H B, et al. Modeling water use, transpiration and soil evaporation of spring wheat-maize and spring wheat-sunflower relay inter cropping using the dual crop coefficient approach [J]. Agricultural water management, 2016, 165: 211-229.
- [38] 张雪佳, 王金涛, 董心亮, 等. 地下微咸水埋深对土壤水盐分布与冬小麦耗水特性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(3): 417-427.
- [39] 栗晓玲. 农业水资源优化配置研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(7): 1-7, 34.
- [40] 康绍忠. 藏粮于水 藏水于技—发展高水效农业保障国家粮食安全[J]. 中国水利, 2022(13): 1-5.
- [41] ZHANG X Y, CHEN S Y, SUN H Y, et al. Changes in evapotranspiration over irrigated winter wheat and maize in North China Plain over three decades [J]. Agricultural water management, 2011, 98: 1097-1104.
- [42] 孙宏勇, 刘小京, 张喜英. 盐碱地水盐调控研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1528-1536.

作者贡献说明

孙宏勇: 文章总体思路和框架设计;
张雪佳: 撰写文章初稿;
胡燕哲: 收集、整理资料;
李 腾: 辅助收集、整理资料;
王金涛: 初稿的校稿、修改;
董心亮: 修改稿的校稿、修改;
郭 凯: 材料整理、文章排版;
刘小京: 辅助设计文章框架和审核。