

黄河三角洲滨海盐碱地可持续利用的水土资源 约束与均衡配置策略

左强¹, 吴训¹, 石建初¹, 王全九², 刘兆辉³, 朱安宁⁴, 尹冬勤¹,
冯权泷¹, 纪文君¹, 康绍忠^{5*}

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193; 2. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048; 3. 山东省农业科学院, 济南 250100; 4. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 5. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 基于现有耕地优势并开发利用好各类后备耕地资源, 对确保国家粮食与生态安全意义重大。黄河三角洲(黄三角)盐碱地后备耕地资源丰富, 农业开发利用潜力巨大, 但因水资源短缺、水土资源配置不平衡而制约了高效可持续利用。本文梳理了黄三角滨海盐碱地治理利用与种植业发展现状, 详细分析了地区水土资源条件, 从水资源供应、地下水位调控、治理利用体系、科技创新及运行管理等方面明晰了发展挑战。提出的水土资源高效可持续利用与均衡配置策略为: 适度增加引黄配额并实施滨海入海河道水系联通工程以优化调配区域水资源, 启动高标准灌排体系完善与配套建设工程以促进耕地提质增效, 加快盐碱地治理利用关键技术集成示范推广以发挥科技支撑作用。相关成果可为我国滨海盐碱地综合治理与高效利用、农业可持续发展等研究提供启发和参考。

关键词: 黄河三角洲; 滨海盐碱地; 治理与利用; 水土资源配置; 农业可持续发展

中图分类号: S-01 **文献标识码:** A

Constraints and Coordinated Allocation Strategies of Water and Land Resources for Sustainable Use of Coastal Saline-Alkali Land in the Yellow River Delta

Zuo Qiang¹, Wu Xun¹, Shi Jianchu¹, Wang Quanjiu², Liu Zhaohui³, Zhu Anning⁴,
Yin Dongqin¹, Feng Quanlong¹, Ji Wenjun¹, Kang Shaozhong^{5*}

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. School of Water Resources and Hydropower, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China; 4. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 5. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: To ensure national food and ecological security in China, it is essential to develop various reserve resources for cultivated land based on existing farmland advantages. Owing to abundant saline-alkali land reserves, the Yellow River Delta has enormous potentials for agriculture development. However, water scarcity and imbalance between water and land resources allocation have

收稿日期: 2023-04-19; 修回日期: 2023-05-18

通讯作者: *康绍忠, 中国农业大学水利与土木工程学院教授, 中国工程院院士, 研究方向为农业节水与水资源; E-mail: kangsz@cau.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“黄河三角洲滨海盐碱地综合治理与生产效能绿色提升战略研究”(202201SDS01)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

significantly limited the efficient utilization of saline-alkali land in this region. According to the development status regarding saline-alkali soil amelioration and crop production, this study analyzes water and land resource conditions, clarifies major challenges for the sustainable development of local agriculture from the perspectives of water resource supply, groundwater table regulation, management and utilization system of saline-alkali land, technological innovation, and follow-up engineering maintenance, and proposes strategies for efficient use and coordinated allocation of water and land resources in the region. The strategies include: (1) increasing water supply from the Yellow River and connecting the coastal hydrographic net to make optimal allocation of regional water resources; (2) improving irrigation and drainage systems and auxiliary projects to enhance the quality of arable lands; and (3) accelerating demonstration and promotion of key technologies for saline-alkali soil amelioration to fully leverage the supporting function of sciences and technologies. The research results can provide a reference for comprehensive governance and utilization of saline-alkali land and agricultural sustainable development.

Keywords: Yellow River Delta; coastal saline-alkali cultivated land; management and utilization; water and land resources allocation; sustainable development of agriculture

一、前言

居民对物质生活水平和美好生活的期望逐步提高，而绿色生态环境相关的目标要求加严，国际形势面临不可预期的显著变化。在此背景下，我国粮食需求压力有所增加，粮食安全问题更加突出。充分发挥现有耕地优势，开发利用好各类后备耕地资源，成为农业高质量、可持续发展的必然选择。

黄河三角洲（黄三角）北邻京津冀地区，西接中西部地区腹地，向南通达长江三角洲北翼，向东出海并与东北亚各国邻近，区位优势明显。黄三角高效生态经济区总面积为 $2.65 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[1]，核心区即通常所指的近代黄三角，面积为 5478 km^2 （其中东营市占有 5200 km^2 ）。黄三角是全球最年轻的河口三角洲和新生陆地之一，河-海-陆交互带来了独特的地理环境，具有土地资源丰富、引黄灌溉便利、气候条件适宜、盐生植物资源丰富等适宜农业开发利用的条件^[2,3]；在环渤海的1000多万亩（1亩 $\approx 666.7 \text{ m}^2$ ）滨海盐碱地中具有代表性，开发利用的示范经验可拓展至我国其他地区的盐碱地类型。鉴于黄三角在保障粮食和生态安全方面的重要地位，国家专门设立了黄河三角洲农业高新技术产业示范区（农高区）、国家盐碱地综合利用技术创新中心，在盐碱地综合治理、土地经营管理机制创新、现代生态农业发展方面积极布局以取得更好发展成效。

值得指出的是，黄三角土地和水资源配置长期处于不平衡状态，成为制约盐碱地综合治理与绿色产能提升、农业可持续发展的主要障碍。当地缺水严重，人均水资源量仅为 300 m^3 ，不到全国的 $1/6$ ^[4]；农业灌溉用水经常性受到生态、工业、生活等行业的挤占，呈逐年下降趋势，如2020年东营市灌溉用水仅占总用水量的32%^[5]。与之相对，盐碱地治理

和利用通常需以消耗大量淡水资源为代价，当前的环境变化又使当地土壤盐碱化程度逐年加重、面积不断扩大，如近3年表层土壤含盐量从 5.4 g/kg 增长为 6.6 g/kg ，中度和重度盐碱耕地面积占比接近50%。盐碱程度加重、分布范围扩大势必加剧水资源紧缺形势，对粮食与生态安全、可持续发展构成威胁。因此，立足区域水土资源利用现状，探索黄三角滨海盐碱地水土资源均衡配置策略具有现实意义。

在黄三角滨海盐碱地治理利用与农业可持续发展方面已经开展了不少研究，如盐碱地综合开发利用、生态修复、环境保护，水肥盐迁移过程与调控机理，不同改良措施的作用机理与调控模式，水盐时空演变规律及驱动机制，土壤碳氮循环与微生物多样性，河-海-陆相互作用及环境效应，管理体制机制优化等^[2,3,6-9]。基于多维调控手段、着眼生态环境保护的水土资源优化配置是相关领域的研究热点，事关未来发展整体质量，也属新阶段环境变化条件下黄三角滨海盐碱地可持续利用需要正面回应的关键科学问题。鉴于此，本文梳理发展现状、厘清主要问题、辨明严峻挑战，提出水土资源高效可持续利用与均衡配置策略，以期为深化黄三角滨海盐碱地综合治理利用与农业绿色可持续发展研究提供基础参考。

二、黄三角滨海盐碱地治理利用与种植业发展现状

（一）黄三角滨海盐碱地的成因与特点

黄三角属黄河冲积平原，特殊的地理环境和气候条件使得盐碱土在区域内分布广泛，主要成因有以下四方面^[10,11]。①盐分离子来源丰富且广泛。黄

河近代频繁决口泛滥的沉积物、黄河入海后回流的淤积物等造成盐渍淤泥,大面积浅层高矿化度潜水以及周期性海水入侵均不断向三角洲输送盐分。②地下水埋深浅、矿化度高。黄河水侧渗、海水顶托、夏季暴雨频发,使黄三角地下水长期处于高位运行,多数区域地下水埋深不足1.5 m。浅层高矿化度地下水中的盐分极易向上运移,聚集于根区和地表而产生次生盐碱化危害。③大气蒸发力强,土壤毛细作用明显。黄三角地处东部沿海季风盛行区,年蒸发量与降水量的比值多在2.5以上;土壤主要为黄河泥沙沉积物及黄河入海回流淤积物堆积形成的壤质潮土,毛细作用强烈(毛管水上升高、输水速率快),为深层土壤和地下水中可溶性盐分的上行提供了充足能量并创造了环境条件。④受到地形平坦、海潮频繁活动的影响。黄三角地势低平、坡降平缓,地表与地下水的自然水力坡降难以满足自流排水要求,易造成地下径流迟缓、排水(盐)不畅;加之沿海地区易受海潮侵袭影响,使得盐碱化程度极易反复和加重。

在独特的自然环境条件下,河-海-陆交互以及各类因素的综合作用使黄三角盐碱地分布呈现以下特征:①盐碱化土地面积不断扩增,黄河入海口陆地新生面积增幅约为 1.5×10^4 亩/年,是我国国土面积自然扩展最快的地区;②土地质量较差,土壤含盐量(尤其是 Na^+ 含量)普遍较高,致使土壤结构不良、通气性差、pH值高、微生物活性低、养分释放慢,相应农产品产能低下;③生态系统脆弱,改良过的盐碱地需要精心的后期农业种植管理,否则次生盐碱化现象无法避免甚至退化为盐碱荒地,从而表现为逆向演替。

(二) 黄三角滨海盐碱地治理利用的技术和方法

经过长期研究与实践探索,黄三角滨海盐碱地改良与利用取得良好进展,目前广泛采用物理(工程)、化学、生物3类技术以及集成方法(见表1)。①物理方法主要分为洗盐-压盐-排盐(明沟或暗管)、上农下渔、引黄淤灌、隔层阻盐、平地围埝等水利工程措施。由于滨海盐碱地土壤结构差、极易板结、有机质含量低、养分有效性差,实施各类水利工程通常还需结合应用掺沙改盐、深耕深翻、秸秆还田、增施有机肥、地膜覆盖等农业技术措施,以改善土壤结构、增加土壤有机质、提高盐

分淋洗能力、抑制土面蒸发、控制表层土壤返盐。②化学方法即在土壤中施用化学改良剂,基于酸碱中和、离子平衡等原理,添加不同类型的试剂材料以加速盐分离子淋洗、增加盐基代换容量、凝聚土壤颗粒、改善土壤结构,从而达到“治盐改碱”目的。③生物方法以适盐种植模式为主,分为种植盐生植物、耐盐作物,施用绿肥等,旨在扩大地表植被覆盖、增加蒸腾耗水,通过生物排水降低地下水位,从而减轻地表盐分积累、改善土壤理化性质及结构。

(三) 黄三角滨海盐碱地种植业发展现状

经过多年的改造建设,黄三角大量盐碱耕地基本上成方连片、地势平整,便于农业种植的规模化、机械化发展。以东营市为例,2021年农业规模化经营水平为70%,农业机械化水平为94%^[12],初步形成以“大生态、大牧场、大产业、大基地”为主要特征的现代农业产业体系;粮食生产保持稳定,播种面积保持在 3.8×10^6 亩左右。东营市主要粮食作物的种植面积(产能)分别为:小麦 1.59×10^6 亩(6.55×10^5 t)、玉米 1.66×10^6 亩(5.28×10^5 t)、水稻 3.66×10^5 亩(1.41×10^5 t)、大豆 1.73×10^5 亩(2×10^4 t)、高粱 9×10^3 亩(1.5×10^3 t)、薯类 4.2×10^3 亩(2.3×10^3 t)^[12];食用菌产能为 3.5×10^5 t,成为全国重要的设施食用菌生产基地^[13]。

在种业创新、核心技术攻关方面,黄三角地区深入实施农业良种工程、重大科技创新工程,围绕耐盐碱植物种质资源创新、作物新品种培育,建立了7个基地进行小麦、玉米、棉花、水稻、大豆品种选育试验,收集耐盐碱植物种质资源约 1.8×10^4 份,选育耐盐碱马铃薯、水稻、大豆等新品种(系)超过200个。育成的耐盐大豆品种TZX-1736、TZX-805,在盐碱地(土壤含盐量为0.5%)中的产量为264.8 kg/亩、263.3 kg/亩^[14];蛋白脂肪“双高”大豆品种“齐黄34”,在盐碱耕地(土壤含盐量为0.3%)中的产量为302.6 kg/亩^[15]。这些耐盐碱大豆品种为优化黄三角盐碱地种植结构提供了直接支持。

三、黄三角水土资源条件分析

(一) 黄三角盐碱土分布与土地利用现状

基于土壤成因,结合遥感影像资料(哨兵2号

表1 黄三角滨海盐碱地治理利用的技术措施

技术类别	常用措施	原理/特点	优势	劣势
物理 (工程)	明沟、暗管	洗盐、压盐、排盐	可除涝、防渍、降低地下水位，淋洗盐分并显著缩短脱盐周期；暗管可提高土地利用效率，不影响机械作业，后期运行成本较低	明沟边坡稳定性较差、极易坍塌；暗管一次性施工量大、投资成本高、排盐速度慢、地下管道易堵塞；排水系统自然坡降难以满足自流排水需求，地下水位多处于高位运行，导致大面积涝渍灾害时有发生
	上农下渔	挖土成池、筑土为台、台田种植、浅池养殖	上面的台田可用于种植粮棉、林果、瓜菜、饲草等，下方的蓄水池则可用于养殖鱼、虾、蟹，经济效益较高	受淡水资源供给不足无法及时换水的影响，绝大多数蓄水池内的盐度均快速上升至不适宜养殖的程度 ^[16] ；占地率较高，土地种植面积通常缩减一半以上
	引黄淤灌	压盐、增加地下水埋深、降低返盐风险	既能沉积一定厚度的泥沙形成新的土层并淋洗盐分，又能通过抬高地面增加地下水埋深以防止土壤次生盐碱化	土层淤灌厚度通常在30 cm以上才能达到改土效果，需要消耗大量泥沙资源且费时费力 ^[16] ；受上游来水来沙量减少影响，引黄淤灌的应用范围和规模已较为有限
	其他措施	掺沙改盐、深耕深翻、秸秆还田、地膜覆盖等	改善土壤结构、增加有机质、提高盐分淋洗能力，辅助增强工程措施的改良效果	单独使用难以有效防治土壤盐碱化
化学	钙质（如石膏、煤矸石）、酸性（如硫磺、硫酸铝等）和有机（生物炭、泥炭、糠醛渣）改良剂	酸碱中和、离子平衡	见效较快，尤其在土壤结构差、养分贫瘠的中-重度盐碱土中效果更佳	效果单一、持续时间短且易发生二次污染 ^[17]
生物	选育、种植盐生植物或耐盐作物	适盐种植	适应一定的盐分环境，通过蒸腾耗水降低地下水位，改善土壤理化性质和结构；盐生植物具有一定的经济价值，在收割后还可带走部分盐分，起到一定的排盐作用	见效较慢，玉米、小麦、水稻、甘薯、大豆、花生等主要粮经作物的耐盐碱适生新品种还很少

卫星影像反演获得的植被指数、盐分指数因子)和土壤盐分实测数据,构建了土壤含盐量反演模型;据此评估得到了黄三角核心区表层0~20 cm土壤含盐量分布(2020年5月)。区域内土壤多属盐碱土,盐碱化程度从西到东、自南向北逐渐加重,以东部、北部沿海地区的含盐量最高。在现有耕地中,轻度(1~2 g/kg)盐碱地面积为1.9×10⁴亩,中度(2~4 g/kg)盐碱地面积为9.5×10⁵亩,重度(4~6 g/kg)盐碱地面积为3.86×10⁵亩,盐土(>6 g/kg)面积为6.6×10⁴亩。区域内土壤含盐量受季节气象条件影响较大,通常春秋两季降水量少、蒸发强烈,

表层及根系层土壤以返盐为主,土壤含盐量较高;夏季雨水较多,盐分以下行为主,也会因环境条件变化而呈现下行/上行交替过程。

土地利用/覆盖与土壤盐碱化程度密切相关。基于中高尺度Landsat-8卫星遥感影像,结合野外田间测量的多个样本,应用机器学习中的随机森林算法^[18]获得了核心区的土地利用情况(2020年6月、7月)。主要涉及小麦、水稻、其他旱地作物(如棉花、大豆、高粱、温室大棚、大蒜、苜蓿、甘薯)、一般树林、柽柳灌丛、芦苇、翅碱蓬、建设用地、农村居民点、库塘、养殖水面、盐田、滩涂、未利用地

14个类别,相应面积(占比)分别为 3.85×10^5 亩(4.7%)、 1.85×10^5 亩(2.3%)、 6.98×10^5 亩(8.5%)、 1.52×10^5 亩(1.9%)、 8.48×10^5 亩(10.3%)、 1.96×10^6 亩(23.8%)、 2.34×10^5 亩(2.8%)、 6.59×10^5 亩(8.0%)、 1.85×10^5 亩(2.2%)、 3.22×10^5 亩(3.9%)、 1.52×10^6 亩(18.5%)、 3.85×10^5 亩(4.7%)、 6.68×10^5 亩(8.1%)、 1.6×10^4 亩(0.3%)。小麦、水稻、其他旱地作物等农作物主要分布于黄河沿岸一定宽度的缓冲区内,盐碱程度基本在中度及以下。

(二) 黄三角水资源供应与需求

1. 供水量与用水构成(东营市)

以东营市数据为主表述黄三角供水量与用水构成。2020年,除大气降水外,东营市现状供水总量为 $1.47 \times 10^9 \text{ m}^3$,其中地表水为 $1.39 \times 10^9 \text{ m}^3$ (占比94.4%)、地下水为 $7.4 \times 10^7 \text{ m}^3$ (占比5%)、其他水源为 $8 \times 10^6 \text{ m}^3$ (0.6%)^[5];地表水中82%为黄河水,其他地表水仅占18%。近年来,黄三角地区的生态环境安全广受关注,生态补水量得以显著增加(见图1),2020年黄河水中的特批生态环境用水量为 $4.67 \times 10^8 \text{ m}^3$,主要用于缓解三角洲湿地退化和盐碱化、提高植被覆盖率等。

2012—2020年,在不计特批生态环境用水的前提下,东营市用水总量相对稳定,用水构成始终以农田灌溉为主(见图1);由于受到其他行业用水的挤占,农田灌溉用水占比从57%下降至47%,而工业、居民生活和城镇公共、林牧渔畜用水占比分别从17%、11%、12%增加至24%、13%、15%。2018年开始实施特批生态环境用水政策后,生态环境用水占比迅速攀升,2020年为33%,而同期农田灌溉用水占比仅为32%^[5]。盐碱地农业开发利用需以大量淡水资源消耗为代价,随着灌溉水资源紧缺程度的加剧,黄三角农业可持续发展面临更大挑战。

2. 作物需水量

从农田水分循环角度看,灌溉用水量的消耗途径主要分为作物耗水(蒸散)、盐分淋洗两方面。以黄三角核心区为例,依据气象条件和土地利用现状,分析作物需水量、根区盐分淋洗需水量情况。根据农高区内山东省农业科学院黄河三角洲现代农业试验示范基地内实测的逐日气温、相对湿度、太阳辐射、风速等气象数据(2019—2020年),采用联合国粮食及农业组织(FAO)推荐的彭曼公式、标准作物系数^[19,20],估算了主要作物的全生育期需水量(见表2)。

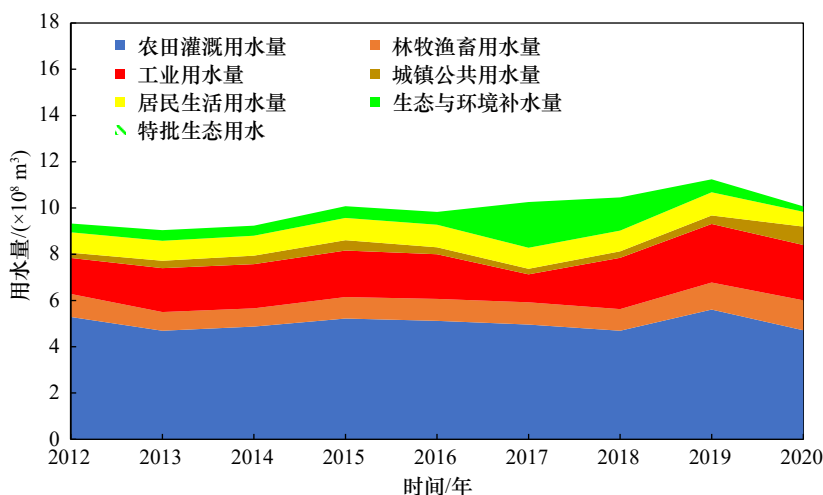


图1 东营市用水结构变化(2012—2020年)

表2 黄三角核心区主要作物种植面积和需水量

项目	冬小麦	夏玉米	水稻	棉花	大豆	高粱	合计
面积/($\times 10^4$ 亩)	38.5	38.5	18.6	24.9	12.3	0.8	133.6
单位面积需水量/mm	543	427	706	555	443	500	3174
总需水量/($\times 10^8 \text{ m}^3$)	1.39	1.10	0.88	0.92	0.36	0.03	4.68

3. 根区盐分淋洗需水量

在盐分淋洗需水量计算方面，主要考虑种植作物的0~50 cm根区，需根据土壤盐碱化程度（含盐量）进行确定。受气象条件、土壤环境、作物耗水、地下水埋深及矿化度等因素的影响，根区土壤含盐量处于动态变化状态。滨海盐碱耕地中的土壤盐分主要来源于浅层高矿化度地下水，理论上在盐分淋洗后只要能将地下水位控制在临界埋深以下即无需额外规划淋洗需水量；但实际上受海水顶托作用的影响，自然水力坡降几乎无法满足自流排水的要求，滨海地区的地下水位难以进行调控。因此，黄三角地区的地下水埋深多小于1.5 m，离海越近地下水埋深越小，致使根区土壤含盐量越高（盐碱程度越严重）。为了合理简化淋洗需水量评估的计算过程，假定区域内地下水位、流向、坡降基本稳定，即产生的不同程度盐碱土分布基本一致；在此情形下，根区土壤含盐量的动态分布或累积效应将在年内呈现周期性变化：在非生长季以返盐积盐为主，播种前通过灌溉淋洗压盐，在生长季随着灌溉、降雨、蒸散呈动态变化，之后又恢复至非生长季的返盐积盐状态。这样每年只需将返上来的盐分淋洗出根区，即可保证作物的正常生长。

黄三角盐碱耕地区域内的浅层地下水，埋深基本为50~300 cm^[21]，矿化度为5~30 g/L^[22]；土壤主要由冲积和洪积形成，以壤土分布最为广泛；冬小麦-夏玉米轮作在作物播种面积中的占比约为60%（见表2）。为此，基于前述试验示范基地内开展的

冬小麦-夏玉米轮作田间试验（包括不同的水分处理）数据（2019—2020年），构建土壤水盐运移模型，分析作物轮作期间根区土壤盐分的演变动态及累积效应。在相关田间试验中，采用经典土壤物理学分析方法^[23]获得土壤质地、容重、水力学参数（如饱和导水率和土壤水分特征曲线），监测作物不同生育期内的叶面积指数、扎根深度、土壤水盐分布等数据^[24]，通过自动气象站获取逐日太阳辐射、温度、湿度、风速等气象数据；基于实测资料，对构建的土壤水盐运移模拟模型（基于Richards方程、对流-弥散方程的耦合模型）进行校验^[25]；应用校验后的模型，针对冬小麦-夏玉米轮作期（2019年10月7日—2020年10月1日）并假定冬小麦播种前剖面土壤盐分已经淋洗至1 g/kg，模拟不同地下水埋深条件下的土壤水盐动态、根区盐分累积效应，获得根区平均土壤含盐量的变化过程（见图2）。

就一定地下水浅埋深条件（如50~130 cm）而言，根区平均含盐量随时间的动态变化规律基本与当地气候特点同步。当年10月至次年5月属冬小麦生长季，降水稀少，主要源于灌溉的根区水分多消耗于蒸散，除了期间零星降雨导致含盐量略有降低外，根区整体以蒸发积盐为主，含盐量迅速攀升。随后的5—9月进入玉米生长季和当地雨季，频繁的降雨使根区多数时间处于盐分淋洗状态，导致根区平均含盐量整体逐渐下降。9月后期随着雨季的结束，根区平均含盐量略有回升。此外，模拟结果再

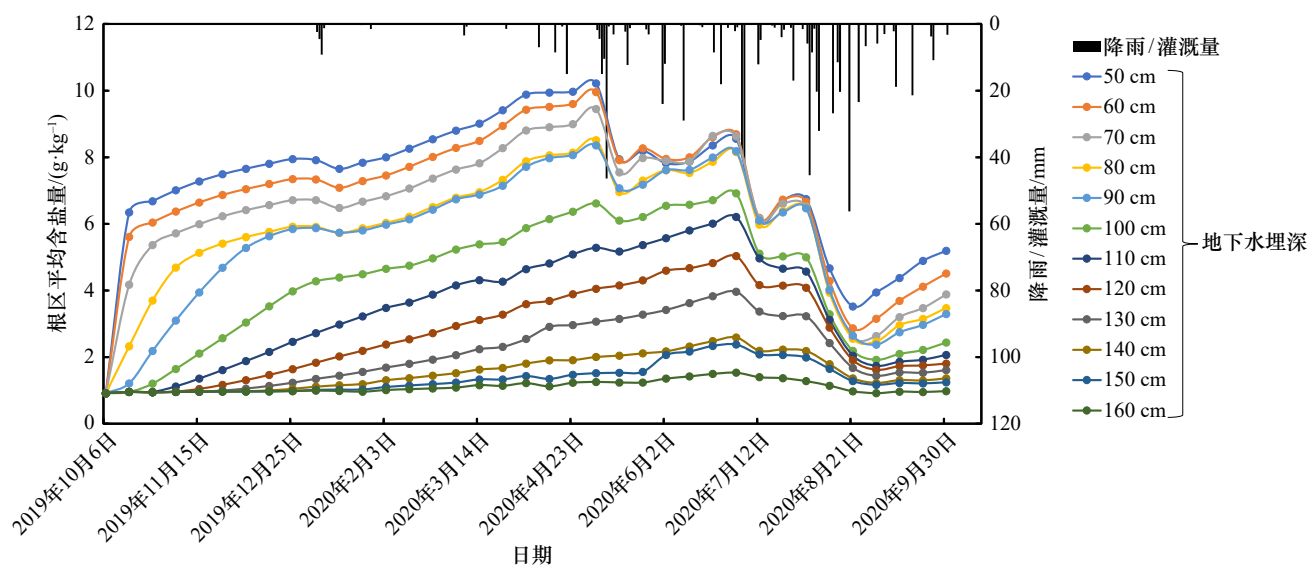


图2 冬小麦-夏玉米轮作周期内降雨/灌溉量与不同地下水埋深条件下根区平均土壤含盐量变化

现了根区盐分累积效应随地下水埋深增加而衰减的规律。地下水埋深为50~70 cm时,土壤返盐严重,周年后根区含盐量达到重度盐碱水平,相应面积为 2.52×10^5 亩;地下水埋深为80~110 cm时,为中度盐碱土,相应面积最大,达到 6.52×10^5 亩;地下水埋深为120~150 cm对应轻度盐碱土,相应面积为 1.4×10^4 亩;地下水埋深在160 cm以上时,根区盐分累积几乎不受影响。

根区盐分淋洗需水量估算仍依据前述假设和动力学模型进行,目标是将(与不同地下水埋深相对应的)不同程度盐碱地根区的平均含盐量淋洗至1 g/kg以下。结果表明,轻度、中度、重度盐碱地的淋洗需水量(对应的排水量)分别为0~29.1 mm(0~20.5 mm)、29.1~41.5 mm(20.5~32.2 mm)、41.5~53.9 mm(32.2~43.8 mm);结合不同程度盐碱地的分布面积可得轻度、中度、重度盐碱地的盐分淋洗年需水总量(排水总量)分别为 $0 \sim 3 \times 10^6 \text{ m}^3$ ($0 \sim 2 \times 10^6 \text{ m}^3$)、 $1.26 \times 10^8 \sim 1.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ($8.9 \times 10^7 \sim 1.4 \times 10^8 \text{ m}^3$)、 $7 \times 10^7 \sim 9.1 \times 10^7 \text{ m}^3$ ($5.4 \times 10^7 \sim 7.4 \times 10^7 \text{ m}^3$)。因此,黄三角核心区盐分淋洗需水量、排水量合计分别为 $1.96 \times 10^8 \sim 2.74 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1.43 \times 10^8 \sim 2.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

需要指出的是,“地下水-土壤-植物-大气”系统中的地下水(埋深及矿化度)与土壤盐分(含盐量及分布)的关系受众多因素影响^[7,9],为了探明地下水埋深与根区盐分累积效应的关系以支撑盐分淋洗需水量估算,采取区域农业水土资源评价的通行做法^[26,27]并采用了一些简化假设(如基础数据主要取自前述试验示范基地且仅针对1个冬小麦-夏玉米轮作周期,地下水埋深、矿化度保持恒定,未考虑不同水文年型和生长季内气候条件差异、地下水季节性波动、土壤空间变异性、种植结构变化等因素),可能会给根区盐分累积效应模拟、盐分淋洗需水量评估带来一定的不确定性。然而,估算过程具有适当的理论基础,估算结果具有良好的代表性,作为下文问题剖析、策略建议的立足点具有相当的合理性。

四、黄三角农业可持续发展面临的挑战

(一) 水资源供应不足致使农业水土资源配置失衡

淡水资源严重不足构成了黄三角地区农业高质量发展的主要制约因素。黄三角地区内年均降水量

约为600 mm,70%以上集中在7—8月,对根区盐分有一定的淋洗作用,但与保证作物正常生长的目标相比仍有相当大的差距;大量的作物生长需水、盐分淋洗需水只能依靠源自黄河水的人工灌溉。当前,核心区引黄灌溉的毛引水量为 $2.43 \times 10^8 \text{ m}^3$,考虑渠道输水损失(当地灌溉水利用率为0.64)后的农田净灌溉量仅为 $1.56 \times 10^8 \text{ m}^3$,叠加 $3.82 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的有效降水而得区域净供水量为 $5.38 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。根据前述作物生长、根区盐分淋洗需水量的测算结果($4.68 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1.96 \times 10^8 \sim 2.74 \times 10^8 \text{ m}^3$),总的灌溉需水量为 $6.64 \times 10^8 \sim 7.42 \times 10^8 \text{ m}^3$ (不包括温室大棚、大蒜、苜蓿、甘薯等作物的用水需求)。因此,农田净灌溉量缺口至少为 $1.26 \times 10^8 \sim 2.04 \times 10^8 \text{ m}^3$,毛引水量缺口至少为 $1.97 \times 10^8 \sim 3.19 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。可见,当前黄河引水量已无法满足当地农业种植、盐碱地改良的发展需求,遑论支撑更大规模的盐碱荒地开发利用。

除资源性缺水外,黄三角地区存在较为严重的水质性和利用性缺水问题^[28]。土地盐碱化、河道污染等问题导致汇入河道的地表径流水质较差、利用率较低,每年能够利用的河道拦蓄水量仅占地表径流量的10%左右。黄三角南部内陆部分区域的地下水储量相对丰富,但当前开采量已近饱和,咸水入侵风险较大;其他区域的浅层地下水以咸水、微咸水为主,矿化度多在5 g/L以上(最高为70.5 g/L),无法直接用于农业灌溉^[4]。现有的引黄灌区多修建于20世纪60—70年代,输水、灌排设施陈旧且配套水平较低,再加上渠道衬砌少、河道下游缺少拦蓄建筑物,使雨水资源无法充分利用;渠系水用管制度不健全,灌溉技术相对落后,灌溉水利用率不高,导致水资源浪费现象较为普遍。

(二) 地下水长期高位运行不利于盐碱地治理及利用

黄河水侧渗、海水顶托、夏季暴雨频发以及现有排水系统运转效率不高,使区域内地下水长期处于高位,埋深多不足1.5 m。春秋季节蒸发强烈,浅层高矿化度地下水中的盐分极易向上运移并聚集于根区和地表,导致各种盐碱地改良利用措施难以发挥功效,成为农作物产量长期偏低的主要原因。

地下水位控制在滨海盐碱地开发利用、农业可持续发展过程中理应占有重要位置,而受自然条

件、人为因素的影响，黄三角地下水位调控依然缺乏有效措施。① 位于黄河口两侧的莱州湾、渤海湾是最主要的地表水与地下水天然容泄区，但自然水力坡降太小^[29]，无法满足自流排水的要求，明显制约了排水系统的排水（盐）、地下水位调控等功能。② 区域内的河槽淤积严重，河道内杂草丛生，沿线涵闸等水工建筑物年久失修，加之不同河道系统之间缺少连通，输水和排水能力极为有限，无法实现区域水资源的合理配置与调度；河道行洪受到严重影响，夏洪来袭时地下水位急剧上涨且居高不下，造成大面积农田积水并形成洪涝灾害。③ 区域内的农田主要采用明沟、暗管进行排水（盐），布局规划缺乏且建设规模有限，维护力度不足甚至报废现象严重，普遍存在排水坡降难以达到设计要求、排水（盐）不畅、调控能力差、运行管理效率低下等问题，致使农田排水系统无法有效调控地下水位。

（三）粗放式的盐碱地治理利用体系不适应农业发展需求

经过多年努力，黄三角盐碱地改良利用及农业规模化、机械化取得一定成效，但对照新阶段的可持续发展要求看，在滨海盐碱地综合治理与高效利用、耐盐作物新品种培育、盐碱农业产业化发展等方面仍需大力开展精准性、集成性、规模化、智能化、高值化应用。

近年来，黄河径流量以及沿岸地区的经济社会和生态环境发生了显著变化，黄三角地区资源性缺水、生产/生活/生态需水要求之间的矛盾更为突出；统一调配黄河水，实现水资源在部门之间的合理配置，更好发挥水资源的经济和生态效益，有待开展进一步的规划和管理。盐碱地改良与利用仍以灌溉与排水、上农下渔、化学生物调理等传统单项技术措施或模式为主，而新材料、新技术、新模式应用有待开拓，重治轻防、重灌轻排等现象突出，整体性的长效治理与利用理念有待建立和应用。玉米、小麦、水稻等传统耐盐作物品种的选育进展缓慢、推广范围有限，而适宜盐碱地现代高效农业发展的耐盐作物新品种少、结构不佳。盐碱地“农林牧渔”结合、“种养加”一体、三次产业融合发展水平不高，科技成果转化动力不足；高值优质的盐碱地农产品缺乏且其功能性并未进行挖掘，相应深

加工仍处于起步阶段。因滨海盐碱地自身特点造成播种、中耕除草、地下块根/块茎收获难度大，传统农机装备不适应盐碱地高效农业生产需要，信息技术手段深化应用有待展开。

（四）科技创新体系与运行管理机制亟待优化

盐碱地治理利用的综合成效不显著，还体现在科技创新体系不完善、运行管理机制不健全等方面。盐碱地治理是系统性工程，需要资源合理调配与协同攻关，而以问题和目标为导向的顶层设计、跨部门组织协调、科研机构协同攻关等方面的机制不够完善，多为各自为战的“碎片化”研究，不利于科研资源的集约高效和成果产出。产业发展是盐碱地治理利用的重要原动力、实现盐碱地长效利用的根本途径，而盐碱地相关产业布局与发展滞后，对盐碱地治理技术创新的牵引和驱动作用不明显。在盐碱地治理利用的综合组织、技术研发、成果应用、后期维护方面，一体化运行管理机制缺失，不利于重大科技成果组织凝练、知识产权明晰管理、技术体系应用落地。

五、黄三角滨海盐碱地水土资源高效可持续利用策略

（一）适度增加引黄配额以保障根系层盐分淋洗需水，实施入海河道水系联通工程并优化水资源调配

2014—2021年，黄河利津站年均径流量为 $2.33 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ，其中当年11月至次年6月的径流量为 $3.23 \times 10^9 \sim 1.54 \times 10^{10} \text{ m}^3$ （平均值为 $9.95 \times 10^9 \text{ m}^3$ ），可以满足每年 $5 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的黄河生态基流要求^[30]。仅就黄三角核心区而言，盐碱耕地作物需水与盐分淋洗需水年度缺口为 $1.97 \times 10^8 \sim 3.19 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其中 $1.43 \times 10^8 \sim 2.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ 用水经盐分淋洗循环后仍可回归入海，建议适度增加黄三角地区的引黄配额，根本性保障灌溉淋洗供水，推动滨海盐碱耕地的可持续利用。

有必要在东营市、滨州市实施黄三角滨海水系（河、湖、库、湿地）联通工程，对水资源进行集中调配以取得三方面成效。① 利于防洪除涝和雨水资源利用。夏季上游洪水来势猛，下游海潮顶托泄水慢，黄河现行入海流路单一且无法调控洪水，易造成洪涝灾害并浪费水资源。通过沿海地区入海河

道的水系联通建设,增强河道防洪除涝、雨水资源综合利用的集中调度能力。② 利于区域水资源灵活调配和地下水位调控。沿海地区“河湖库”水系联通,直接支持调水、储水、配水、输水、排水等多过程综合调控,提高地区水资源时空分布优化配置能力;便于控制区域地下水位,缓解排水(盐)效率低、土壤次生盐碱化等问题。③ 利于滨海陆地、沿岸海域的生态恢复。黄河多流路串联入海,将缓解沿海滩涂的蚀退压力,增加生物多样性和生物量,提高植被覆盖率,改善入海河道、近岸海域及其辐射范围内的水生态环境,加快河-海-陆交互地带的生态环境恢复进程。

(二) 实施高标准灌排体系与配套建设工程,提高滨海盐碱农田建设标准及耕地质量

建议国家层面给予直接资源保障,加快实施黄三角滨海盐碱地高标准灌排体系与配套建设工程。在海岸线以内5~10 km区域,修建从套尔河口到支脉沟口、长约130 km的截渗墙及若干座扬水站,利用当地丰富的可再生能源,采取强排方式加速区域排水,降低截渗墙内侧的地下水位,实质性解决排水自然坡降不足的问题。

根据综合治理与生产效能提升、农业可持续发展的形势和要求,建议将黄三角地区盐碱农田建设投资标准提高到3500~5000元/亩,重点支持以下方面:① 参照不同区域的地下水埋深控制标准,完善排水沟道体系配套条件,改善田间排水设施(如明沟、暗管、竖井)布局,提高农田压碱排盐、除涝抗渍能力;② 建设节水灌溉工程,优化灌溉制度,优选抗旱耐盐节水品种,提高灌溉水利用率和生产效率;③ 通过治碱改土、培肥地力等措施,改善土壤结构和理化性质,将耕地地力提升至中等以上水平,同时构建良好的水盐协同生态环境;④ 建设农业信息监测工程,发展智慧农业,提高灌水、施肥、控盐的智能化水平;⑤ 完善农业机械作业配套体系,支撑现代农业发展。

(三) 因地制宜开展盐碱地治理利用关键技术与综合集成模式的示范推广

依托已启动或即将开展的黄三角滨海盐碱地治理与产能提升技术研究各类专项计划或科研项目,开展黄三角滨海盐碱地综合利用关键技术与集成模

式示范推广。

建设农业产业综合示范园区,按照内陆高效农业种植区、中部农牧渔业综合利用区、近海牧渔业-湿地生态协同发展区等类型划分,形成统筹规划,因地制宜、分区治理、“农牧渔”互补、“粮经饲”协同、“蓄水、调水、配水、用水、排水”与“用地、改土、养地、管地”相结合的黄三角滨海盐碱地综合治理模式。构建控盐-抑害-改土-增养-促生一体化、盐渍并治的盐碱化土地绿色利用技术体系,驱动具有集约化经营、规模化生产、机械化作业、智能化管控特征的现代生态农业发展,显著提高黄三角滨海盐碱地高效可持续利用水平。

推动从治理盐碱地以适应作物生长向选育耐盐碱植物以适应盐碱地的重大转变,研发耐盐作物/盐生植物优良品种的筛选、培育、栽培以及资源化利用技术,建立耐盐作物/盐生植物种质资源库,创建盐碱地耐盐作物优质高效种植技术体系,大力发展适盐种植,支撑黄三角滨海地区生态农业发展。

构建多元化的农业产业经营体系,发展盐碱地特色种业、食品加工业、生物技术与制造业,形成“农牧渔盐”功能互补的产业链,带动滨海地区盐碱地现代农业发展。

六、结语

黄三角区位优势明显,盐碱后备耕地资源丰富,推动滨海盐碱地综合治理与高效利用,既是区域农业绿色高质量与可持续发展的需求,也事关国家粮食与生态安全战略。着眼新的环境变化形势,黄三角地区的水土资源配置失衡问题更突出,成为制约区域盐碱地综合治理成效、农业可持续发展的瓶颈环节。本文在梳理黄三角滨海盐碱地治理利用成效、地区水土资源配置现状的基础上,深入辨识农业可持续发展面临的挑战,提出了促进水土资源高效可持续利用的应对策略:① 在满足黄河生态基流要求的同时,适度增加引黄配额,实质性缓解黄三角地区农业灌溉水资源趋紧的不利局面,同步实施沿海入海河道水系联通工程,在区域层面上实现水资源均衡调度;② 实施黄三角地区高标准灌排体系与配套建设工程,合理提高盐碱农田建设投资标准,在农田尺度层面上促进耕地的提质增效;③ 强

化盐碱地治理利用关键技术与综合集成模式的示范推广,充分发挥科技创新对黄三角盐碱地治理及可持续农业发展的关键支撑作用。

盐碱地治理、水土资源优化布局涉及一系列复杂的理论、技术和应用问题。着眼未来发展,准确刻画气候、作物、土壤、地下水等因素对根区盐分累积效应的综合影响,为盐分淋洗需水量的精准测算、区域水土资源的评价管理确立科学基础,是值得进一步探究的科学问题;有关新的变化环境下水土资源的动态演变规律、滨海入海河道水系联通工程与高标准农田协同建设方案的规划设计等,仍需深入开展论证和推演。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: April 19, 2023; **Revised date:** May 18, 2023

Corresponding author: Kang Shaozhong is a professor from the College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research field is water conservation and water resources in agriculture. E-mail: kangsz@cau.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on the Integrated Governance and Greening Production Efficiency of Coastal Saline-Alkali Land in the Yellow River Delta” (202201SDS01)

参考文献

[1] 李念春,张伟峰,罗振江. 基于高效生态农业布局导向性的资源环境承载力评价——以黄河三角洲高效生态经济区为例[J]. 山东国土资源, 2016, 32(8): 37–46.
Li N C, Zhang W F, Luo Z J. Resource and environment carrying capacity assessment of efficient ecological agriculture oriented layout: Setting case efficient ecological economic zone in Yellow River Delta as an example [J]. Shandong Land and Resources, 2016, 32(8): 37–46.

[2] 白春礼. 科技创新引领黄河三角洲农业高质量发展[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(2): 138–144.
Bai C L. Scientific and technological innovation leads high-quality development of agriculture in the Yellow River Delta [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(2): 138–144.

[3] 欧阳竹,王竑晟,来剑斌,等. 黄河三角洲农业高质量发展新模式[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(2): 145–153.
Ouyang Z, Wang H S, Lai J B, et al. New approach of high-quality agricultural development in the Yellow River Delta [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(2): 145–153.

[4] 高明秀,吴姝璇. 资源环境约束下黄河三角洲盐碱地农业绿色发展对策[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(S1): 60–63.
Gao M X, Wu S X. Countermeasures of agricultural green development of saline-alkali land in the Yellow River Delta under the

constraints of resource and environment [J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(S1): 60–63.

[5] 东营市水务局. 东营市2020年水资源统计公报[R]. 东营: 东营市水务局, 2021.
Dongying Water Authority. Dongying water resources bulletin in 2020 [R]. Dongying: Dongying Water Authority, 2021.

[6] 张文馨,衣世杰,范小莉,等. 黄河三角洲生态系统多功能性与不同维度植物多样性的关系研究[J]. 湿地科学, 2023, 21(1): 1–8.
Zhang W X, Yi S J, Fan X L, et al. Relationship between ecosystem multifunctionality and plant diversity in different dimensions in the Yellow River Delta [J]. Wetland Science, 2023, 21(1): 1–8.

[7] 李俊翰,高明秀. 黄河三角洲滨海土壤盐渍化时空演化特征[J]. 土壤通报, 2018, 49(6): 1458–1465.
Li J H, Gao M X. Temporal and spatial characteristics of salinization of coastal soils in the Yellow River Delta [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(6): 1458–1465.

[8] 赵英,于金艺,胡秋丽,等. 黄河三角洲盐碱地根土水交互过程及其调控[J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 2023, 39(2): 97–106.
Zhao Y, Yu J Y, Hu Q L, et al. Interactive processes and modifications of root-soil-water in saline agricultural development of the Yellow River Delta [J]. Ludong University Journal (Natural Science Edition), 2023, 39(2): 97–106.

[9] 高鹏. 黄三角滨海区土壤盐渍化的空间多尺度变异规律、驱动机制与预测预警[D]. 泰安: 山东农业大学(博士学位论文), 2022.
Gao P. Spatial multi-scale variation, driving mechanism, prediction and early warning of soil salinization in the coastal area of the Yellow River Delta [D]. Taian: Shandong Agricultural University (Doctoral dissertation), 2022.

[10] 宋静茹,杨江,王艳明,等. 黄河三角洲盐碱地形成的原因及改良措施探讨[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(27): 95–97.
Song J R, Yang J, Wang Y M, et al. Exploration of the reason and improvement measures of saline-alkali soil in the Yellow River Delta [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(27): 95–97.

[11] 尹建道,姜志林,李兴明,等. 黄河三角洲盐碱地综合开发构想[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2000, 24(5): 61–63.
Yin J D, Jiang Z L, Li X M, et al. Strategic concept on comprehensive development of Yellow River Delta saline and alkaline land [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2000, 24(5): 61–63.

[12] 东营市统计局. 2021年东营市国民经济和社会发展统计公报[R]. 东营: 东营市统计局, 2022.
Dongying Municipal Bureau of Statistics. Statistical bulletin on Dongying national economic and social development [R]. Dongying: Dongying Municipal Bureau of Statistics, 2022.

[13] 东营市农业农村局. 东营市推进农业农村现代化规划(2021—2025)[R]. 东营: 东营市农业农村局, 2021.
Dongying Municipal Bureau of Agriculture and Rural Affairs. Dongying City’s plan for promoting agricultural and rural modernization (2021—2025) [R]. Dongying: Dongying Municipal Bureau of Agriculture and Rural Affairs, 2021.

[14] 张丽. 山东省东营市农作物种业发展现状与对策建议[J]. 中国种业, 2022(2): 49–51.

- Zhang L. Development status and countermeasures of crop seed industry in Dongying City, Shandong Province [J]. *China Seed Industry*, 2022 (2): 49–51.
- [15] 宋介宏. 齐黄 34 在盐都区种植表现及高产栽培措施 [J]. *农业科技通讯*, 2021 (3): 288–290.
- Song J H. Planting performance and high yield cultivation techniques of Qihuang 34 in Yandu District [J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2021 (3): 288–290.
- [16] 王万战, 雷坤, 江恩惠, 等. 黄河三角洲及附近海域综合治理战略研究 [J]. *中国工程科学*, 2016, 18(2): 91–97.
- Wang W Z, Lei K, Jiang E H, et al. Study on creating an integrated management strategy for the Yellow River Delta and its ambient sea area [J]. *Strategic Study of CAE*, 2016, 18(2): 91–97.
- [17] 赵英, 王丽, 赵惠丽, 等. 滨海盐碱地改良研究现状及展望 [J]. *中国农学通报*, 2022, 38(3): 67–74.
- Zhao Y, Wang L, Zhao H L, et al. Research status and prospects of saline-alkali land amelioration in the coastal region of China [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(3): 67–74.
- [18] Breiman L. Random forests [J]. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5–32.
- [19] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements [EB/OL]. [2023-03-15]. <https://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.htm>.
- [20] 曹丹, 易秀, 陈小兵. 基于农业灌溉需水量计算的黄河三角洲作物结构优化 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(2): 154–159.
- Cao D, Yi X, Chen X B. Crop structure optimization based on agricultural irrigation water demand calculation in the Yellow River Delta [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(2): 154–159.
- [21] 徐征和, 傅新. 黄河三角洲农业水土资源高效利用调查与分析 [J]. *山东水利*, 2021 (2): 4–6.
- Xu Z H, Fu X. Investigation and analysis on efficient utilization of agricultural water and soil resources in Yellow River Delta [J]. *Shandong Water Resources*, 2021 (2): 4–6.
- [22] 王兴军, 侯蕾, 厉广辉, 等. 黄河三角洲盐碱地高效生态利用新模式 [J]. *山东农业科学*, 2020, 52(8): 128–135.
- Wang X J, Hou L, Li G H, et al. New models of high-efficient utilization of the Yellow River Delta saline-alkali land [J]. *Journal of Shandong Agricultural Sciences*, 2020, 52(8): 128–135.
- [23] 吴训, 许艳奇, 石建初, 等. 基于根系加权土壤水分有效性的冬小麦水分生产函数 [J]. *农业工程学报*, 2022, 38(8): 124–134.
- Wu X, Xu Y Q, Shi J C, et al. Water production function of winter wheat based on root-weighted soil water availability [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38 (8): 124–134.
- [24] Wu X, Xu Y Q, Shi J C, et al. Estimating stomatal conductance and evapotranspiration of winter wheat using a soil-plant water relations-based stress index [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 303: 108393.
- [25] Liu L N, Wang T S, Wang L C, et al. Plant water deficit index-based irrigation under conditions of salinity [J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 269: 107669.
- [26] 李明思, 刘洪光, 郑旭荣. 长期膜下滴灌农田土壤盐分时空变化 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(22): 82–87.
- Li M S, Liu H G, Zheng X R. Spatiotemporal variation for soil salinity of field land under long-term mulched drip irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(22): 82–87.
- [27] 宁松瑞. 长期膜下滴灌棉田根系层盐分累积效应模拟 [D]. 北京: 中国农业大学 (博士学位论文), 2015.
- Ning S R. Numerical simulation on soil salt accumulation in root zone of cotton under long-term film mulched drip irrigation [D]. Beijing: China Agricultural University (Doctoral dissertation), 2015.
- [28] 高振斌, 万鹏, 高洁, 等. 黄河三角洲水资源利用问题及对策研究 [J]. *水利规划与设计*, 2017 (11): 100–101.
- Gao Z B, Wan P, Gao J, et al. Research on countermeasures of water resources utilization in Yellow River Delta [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2017 (11): 100–101.
- [29] 范晓梅, 刘高焕, 唐志鹏, 等. 黄河三角洲土壤盐渍化影响因素分析 [J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 139–144.
- Fan X M, Liu G H, Tang Z P, et al. Analysis on main contributors influencing soil salinization of Yellow River Delta [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1): 139–144.
- [30] 东营市水务局. 2019—2020 黄河三角洲应急生态补水实施方案 [R]. 东营: 东营市水务局, 2019.
- Dongying Water Authority. Implementation plan for emergency ecological water replenishment in the Yellow River Delta in 2019—2020 [R]. Dongying: Dongying Water Authority, 2019.