

# 黄河流域农业水资源高效利用与优化配置研究

赵英<sup>1\*</sup>, 王海霞<sup>1</sup>, 王毅<sup>1</sup>, 牛忠恩<sup>1</sup>, 胡秋丽<sup>1</sup>, 赵芬<sup>1</sup>, 索立柱<sup>1</sup>, 徐征和<sup>2</sup>, 陈小兵<sup>3</sup>

(1. 鲁东大学资源与环境工程学院, 山东烟台 264025; 2. 济南大学水利与环境学院, 济南 250022;  
3. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台 264003)

**摘要:** 水资源是基本的自然资源、战略性的经济资源, 对于黄河流域而言更是攸关上、中、下游农业高质量发展与生态保护的核心要素; 在实施“黄河流域生态保护和高质量发展”国家战略的背景下, 提高水资源利用效率并优化分配具有重要意义。本文围绕黄河流域农田水分高效利用和可持续发展, 遵循流域系统水文学研究方法和大食物观理念, 立足农业高质量发展过程中水资源优化配置的理论和技术, 探讨了农田水文过程的机理及用水效率提升、农业与生态的水资源优化配置、水-粮食-生态协同优化、农业信息化体系建设等方面的发展挑战与应对策略。从水循环的视角全面审视了黄河全流域农业节水和水资源配置能力, 可为黄河流域农业水土资源优化配置、农业高质量发展与生态保护协同等提供基础支撑。

**关键词:** 黄河流域; 农业水土资源; 生态水文过程; 水分利用效率; 水资源配置

中图分类号: S-01 文献标识码: A

## Efficient Utilization and Optimal Allocation of Agricultural Water Resources in the Yellow River Basin

Zhao Ying<sup>1\*</sup>, Wang Haixia<sup>1</sup>, Wang Yi<sup>1</sup>, Niu Zhongen<sup>1</sup>, Hu Qiuli<sup>1</sup>, Zhao Fen<sup>1</sup>,  
Suo Lizhu<sup>1</sup>, Xu Zhenghe<sup>2</sup>, Chen Xiaobing<sup>3</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, Shandong, China;  
2. School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China; 3. Yantai  
Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, China)

**Abstract:** Water resources are basic natural and economic resources of strategic significance and are vital for the high-quality agricultural development and ecological protection of the Yellow River Basin. To implement the national strategy of ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin, it is significant to improve the use efficiency and allocation of water resources in the basin. This study focuses on the high-efficiency utilization and sustainable development of agricultural water resources, adopts the research methods of systematic hydrology, and adheres to an all-encompassing approach to food. Based on the theories and technologies for the optimal allocation of water resources in the process of high-quality agricultural development, it explores the mechanism for the hydrologic process of farmlands and investigates the challenges faced in terms of water use efficiency improvement, optimal allocation of agricultural and ecological water resources, collaborative optimization of water, food, and ecosystem, and construction of farmland information systems. Countermeasures are further proposed. This study reviews the

收稿日期: 2023-06-02; 修回日期: 2023-07-15

通讯作者: \*赵英, 鲁东大学资源与环境工程学院教授, 研究方向为土壤水文过程及其机理; E-mail: yzhaosoils@gmail.com

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

agricultural water-saving and water resource allocation capabilities of the whole Yellow River Basin from a water cycle perspective and is expected to provide basic support for the optimal allocation of land and water resources, high-quality agricultural development, and ecological protection collaboration in the Yellow River Basin.

**Keywords:** Yellow River Basin; agricultural water and soil resources; eco-hydrological process; water use efficiency; water resource allocation

## 一、前言

水资源既是基本的自然资源，也是战略性的经济资源，缺乏水资源或其不合理分配将导致潜在的生态、社会、经济等问题。随着全球气候变化、人类活动影响的加剧，农业水资源利用与生态环境保护之间的矛盾更为尖锐，使得流域水资源管理中水资源优化配置的作用进一步凸显。开展全流域水资源系统各要素的综合研究、水资源高效利用与生态环境保护的深入剖析，有助于实现水资源的合理配置，解决流域不同区域、不同生态保护水平条件下的农业用水需求和用水效率问题。

黄河流域既是我国关键的生态屏障，又是粮食生产核心区、保障粮食安全重点区域，相应生态保护和农业开发都具有战略意义。黄河流域年平均降水量仅为447 mm，明显低于全国平均水平(628 mm)。黄河流域农业用水占全流域用水超过70%，在很大程度上挤占了生态用水空间，生产与生态之间的用水冲突尖锐；在有限水资源的条件下，实现黄河流域全域国土空间下的粮食安全、生态环境保护双重目标，具有挑战性。从20世纪末开始，我国食物消费需求从“吃得饱”向“吃得好”阶段快速转变，食物结构发生了显著变化。近年来，树立大食物观、构建多元化食物供给体系成为国家要求。因此，研究关注点需要从过去黄河流域农区耕地的常规农业，转向基于整个黄河流域空间来发展“农林牧副渔”的大农业，进一步厘清黄河流域上、中、下游之间以水为纽带关系的系统性问题；审视农业、自然资源、生态保护各部门政策的一致性，在大食物观视角下建立多元化的食物生产体系，以期充分发挥政策的协同效应，提升黄河流域以水资源为纽带关系的协同管理水平，在全球综合应对气候、粮食安全、自然生态系统保护等多个议题层面提供中国方案。

黄河流域生态保护、高质量发展战略都强调“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”原则。着力推进生态环境保护治理，加快建设国土空

间保护利用新格局，凸显了黄河流域水资源优化管理的重要性和紧迫性。目前，针对黄河流域水资源优化配置<sup>[1,2]</sup>、生态环境保护<sup>[3]</sup>等，在区域尺度上进行了深入研究，但从全流域尺度探讨“水资源-农业生产-生态环境”耦合系统的协调、优化与综合管理的研究甚少，导致黄河流域协调农业生产和生态保护的方案构建面临支撑不足的情况。针对于此，本文采用系统、产业和生态思维，面向黄河流域农田水分高效利用和可持续发展，以水为中心并从全流域视角出发，探讨黄河全流域农业水资源高效利用与优化配置涉及的关键问题和技术方法，以期为黄河流域生态保护和高质量发展研究提供参考。

## 二、黄河流域农业水资源研究的需求和意义

### (一) 水资源短缺背景下的粮食安全方略

粮食安全作为国家三大基础安全之一，一直是经济增长和社会稳定的基础领域，叠加积极应对全球挑战的需要，其重要性日益凸显。当前，我国农业仍然存在人均占有低、总产增长率低、种粮效益低、粮食质量低的问题，导致粮食安全形势不容乐观。在黄河流域，推进高质量发展意味着在壮大经济规模的同时，必须更加注重提高质量和效益。尽管黄河流域拥有良好的光热条件，但大部分地区属于干旱/半干旱区，水资源条件有限，农业生产受到水资源的严格约束。为了保障粮食安全、提升沿黄流域的农村治理能力，亟待优化全流域水资源配置，提高水土资源的有效利用率（见图1）。

### (二) 生态文明建设下的水资源空间优化

自20世纪下半叶以来，水资源短缺导致的生产、生活、生态问题趋于严重，世界上部分地区甚至由此导致了严重冲突，引起各国政府的高度关注。在我国，黄河流域穿越9个省份，尽管不存在跨境水资源利用争端，但各地经济社会发展水平有差异，对水资源开发和利用的诉求不一致。部分地区水资源的大规模开发加重了地表植被、水资源数

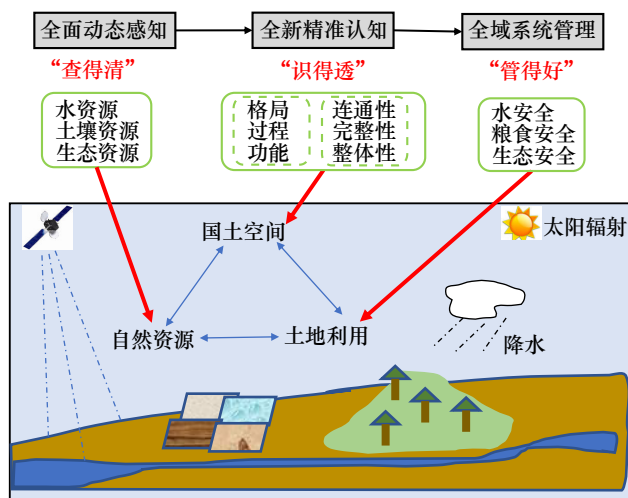


图1 国土空间格局与水资源配置示意图

量与质量（如水污染）、生态环境等方面的问题，已超过流域的生态承载力，制约了生态文明建设的进程。黄河水量少、含沙量高，水沙关系失衡，导致水旱灾害频发、水污染等严重的生态问题，使得黄河治理面临长期、复杂和艰巨挑战<sup>[4]</sup>。当前，国家提出了“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水方针，因而强化黄河流域的“生态保护大局、统筹管理”的战略思维至关重要（见图1）。

### （三）气候变化影响下的水资源预测和优化管理

农业生产和生态环境受气候变化的作用日益显著，需要在流域水资源管理中充分考虑气候变化带来的影响。气候变化导致农业生产不稳定性增加，而对于不同气候变化情景下的农业生产和流域水资源趋势的预测能力仍显薄弱。当前，黄河流域径流量、泥沙量均大幅减少，但此变化在多大程度上受气候变化的影响尚不明确。此外，大规模流域的农业水资源预测、决策管理工具等也显缺乏，迫切需要研究黄河流域气候智能型的水资源管理方案，支持提升流域农业生产应对全球气候变化的能力。

### （四）大食物观理念下的适水农业发展新思路

黄河水资源总量受限，因而合理分配水资源、发展适水农业尤为关键。黄河上、中游地区的耕地占比较高，但农业水资源非常有限且用水效率不高，耕地与水资源的时空匹配矛盾日益凸显。黄河流域水资源短缺以及地区灌溉用水增长带来的生态环境问题突出，特别是包括河套灌区等大型灌区在

内的耕地次生盐碱化的防治与盐碱荒地的耕地化改造难度较大，迫切需要农业适水发展并突破高效利用农业水资源的核心技术。基于大食物观理念，开展流域尺度上水资源、粮食、生态的协同优化，研究节水、减污、提质兼顾的农业管理方法，提出适水产业规模和布局方案，“宜农则农、宜牧则牧”，是黄河流域适水农业发展的新思路<sup>[1]</sup>。

## 三、黄河流域上、中、下游生态保护和农业水资源利用的现状和不足

### （一）上游：生态系统功能和水源涵养能力降低，亟需发展节水灌溉农业

黄河源头地区是黄河流域的“水塔”、最关键的水源和产流区，对整个流域的水资源、粮食产量、生态环境具有决定性作用。自1951年起，黄河源区经历了显著的气候变暖和湿润化过程，导致冰川和积雪加速融化、冻土层逐渐消退。然而，这种湿润化能否转化为有效的水资源，尤其是在长时间尺度上的成效仍需进一步研究。一般来说，尽管冰川和积雪融化在一定时期内增加径流，但会增加损耗：随着气温上升，冻土层下降、不饱和土层变厚，导致产流量减少。目前，黄河源区的天然河川径流量已呈下降趋势，而草地退化进一步削弱了该区域的水分涵养能力。因而迫切需要探究草地植被与寒区冷生土壤水文之间的相互作用，确定草地的需水量，明确保障黄河水源涵养需求的草地恢复阈值。

黄河上游虽是河流源区，但降水量有限，而居民和农田多集中于河流周围并以河水为主要水源；黄河水大部分用于灌溉，由此发展出了特色“绿洲农业”<sup>[5]</sup>。近40年来，伴随着大面积农田的开发，灌溉用水需求不断增加<sup>[6]</sup>。当前，农田灌溉计划主要根据耕作经验和水资源可及性进行安排，水分利用效率低，深层渗漏比例大，次生盐碱化加剧，农田排水对尾间湿地的影响变大<sup>[7]</sup>。整体上，该地区灌溉农业应调整为节水农业，推行节水灌溉技术、实施计划用水、实行按方收费制度是缓解该地区水资源短缺并实现农业可持续发展的必需<sup>[6-9]</sup>。

### （二）中游：植被恢复导致土壤储水下降，亟需发展高效旱作农业

黄河中游是黄河流域水沙环境变化调控的“枢



纽”、进行水资源优化配置的关键区域。黄河90%的泥沙来自黄土高原土壤侵蚀,历史上的坡耕地行为加剧了水土流失,造成根层厚度减少、土壤蓄水能力下降。20世纪90年代末实施了包括“退耕还林(草)工程”在内的一系列大型造林活动<sup>[10]</sup>,显著提高了区域的植被覆盖率,有效遏制了水土流失,但也造成土壤干燥化<sup>[11]</sup>,特别是深层土壤储水下降<sup>[12]</sup>、地下水补给减弱<sup>[13]</sup>,可能对区域水循环和气候产生强烈的反馈作用。该地区的植树造林已接近水分承载力上限,进一步扩大造林面积将加剧土壤水分耗散、水资源短缺等问题<sup>[14]</sup>。为此,确定植被生产的区域承载力是该地区生态系统恢复措施可持续的前提<sup>[15]</sup>,亟需明确退耕还林(草)后生态-水文-土壤过程耦合作用及其产水、产沙机制,界定不同地貌类型区的生态水文阈值,提出生态建设格局优化方案。

黄河中游也是我国的重要旱作农耕区。长期以来,该地区发展了许多节水抗旱保墒的覆盖栽培措施<sup>[16]</sup>,如集水农业工程、结合滴灌、地膜覆盖集水增温保墒等技术;也有众多研究分析了黄土旱塬区不同覆盖模式下的水分高效利用潜力,评价了适合该地区的水土资源调配及合理利用途径。面向未来,确定气候和土地利用在土壤水平衡中的主导地位,对于制定本地区农业水资源管理策略至关重要。研究表明,实际蒸散量的变化主要受降水、温度的影响,但地下水补给量的变化主要受农田向林地转化的控制<sup>[8]</sup>。为此,制定平衡的农林业生态系统、维持水资源可持续性,是未来本地区合理土地利用的重要考虑因素<sup>[17]</sup>。

### (三) 下游:河道生态系统持续保护,亟需进行多水源联动的盐碱农业高效发展

黄河最下游的三角洲地区,既拥有我国暖温带最为完整的湿地生态系统,又有超过 $5 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 的盐碱地后备耕地资源,是探索区域农业结构转型升级、生态健康发展共赢的良好区域<sup>[18]</sup>。建设黄河下游绿色生态走廊,加大湿地生态系统保护,促进河道生态功能提升和入海口生态环境改善,是该地区的发展重点。目前,编制黄河三角洲湿地保护修复规划并建设黄河口国家公园是重要举措。精准确定湿地生态需水量是湿地水文恢复与水资源调配的前提及基础,但缺少对湿地水文和湿地生态过程之间

关系的深入理解、对湿地未来演变动态的准确预测;亟需构建具有物理过程机制的湿地生态水文模型,确定湿地保护与恢复所需的适宜生态水资源及其阈值。

与我国其他区域的盐碱地相比,黄河三角洲盐碱地受海水顶托浸润作用明显,地下水埋深浅且矿化度高,土壤盐碱化严重且分布广。因此,地下水管控是黄河三角洲盐碱农业发展的关键因素。厘清农业生态系统和地下水文过程的互馈机制,研发基于控制性灌排工程的地下水优化调控关键技术,可为黄河三角洲盐渍土改良、农业高质量发展提供理论和工程依托。可以新定义“地下水效益区间”——将地下水位调控在临界地下水位以下、地下水产量补贴边界(即最佳地下水位附近)两者重叠的区间,以此作为地下水调控的理论标准<sup>[19]</sup>。随着区域内农业种植面积的扩大,淡水资源供给更显不足,农业用水开始转向利用浅层地下咸水、咸淡水结合灌溉。高效合理地“开源节流”,对于缓解淡水资源短缺十分必要,需要探讨多水源联动的高效利用机制,发展适合该区域的节水灌溉技术并优化相应种植结构。

### (四) 黄河流域上、中、下游联动

黄河流域跨越我国东部、中部、西部的三大气候带,具有复杂的自然环境和独特的河流特征,在治理和保护策略上需要全面规划、统筹协调、综合实施<sup>[20]</sup>。在通常情况下,流域上、下游的水文循环主要取决于中游的可持续发展及其与上、下游生态系统健康之间的平衡。在黄河上中游地区,农业与生态用水之间的矛盾尤为突出,导致土壤干燥化、地下水位下降、土壤次生盐碱化、非点源污染等严重问题,对下游地区的生态和农业发展也产生了不利影响。然而,在黄河流域生态保护和高质量发展方面,针对全流域的系统研究还较少,加之黄河水沙问题仍然突出,迫切需要协调上、中、下游的差异性,充分认识到流域功能的整体性、系统性、综合性。

全流域系统水文学是水文学的一个分支,主要研究全流域范围内的水文过程和水资源管理,综合考虑水的循环、水量与水质变化、人类活动对水资源的影响等因素。通过全流域水文过程研究,能够更好地管理和利用水资源,促进水环境保护并减少

水灾害风险。近年来，随着水科学研究的不断深入，关注重点转向以地球关键带为单元的生态-水文过程，为流域环境综合管理确立基础。地球关键带拓展了生态系统与水文过程的研究范畴，强化了土壤水文过程在陆地表层系统剖面、坡面、流域等多尺度物质运移及循环中的重要作用<sup>[21]</sup>。例如，在分析自然-社会二元水循环与流域生态保护关系的基础上，针对黄河流域生态本底及特征，分别从空间格局、时间过程上提出了维护黄河流域生态系统完整性的主要原则<sup>[22]</sup>。未来应以黄河上、中、下游的典型农业区（如河套灌区、黄土高原旱作区、华北平原农作区、黄河下游及三角洲地区）为关键区域，围绕限制不同区域农田的水分高效利用问题，开展系统整合分析；明确不同区域农田的主导水文过程与调控方案，为黄河流域不同地区农业节水、作物优质高产、生态保育、水资源优化配置提供科学依据及技术保障；探索黄河流域节余水权的市场配置机制，在保证不突破黄河流域水资源刚性约束红线的前提下，通过市场调节方式促进水资源向高效益农业利用的地区转移，从而以水资源利用效益及效率的提高来实现流域尺度上的水资源节约与集约利用。

### 四、黄河流域农业水资源配置的关键问题

#### （一）如何进一步提升黄河流域农田用水效率

水资源不足是制约黄河流域农业可持续发展的瓶颈因素，实现地区农业水资源高效利用是首要任务。在我国，无论是旱作农业区还是灌溉农业区，水资源利用率、水分生产效率都明显低于农业发达国家，主要粮食作物平均水分生产力实际值与理论值也有很大距离，说明开发潜力很大。黄河流域的农田经过了上千年的改造，特别是较为成熟的农艺和工程措施的应用，已经极大提高了水分生产力；但上游、中游、下游主要作物耗水过程的系统比较分析缺失，限制了区域之间水资源调配、节水技术的推广潜力，不利于用水效率提升。黄河流域上、中、下游地区典型农业的作物种植与管理，如黄土高原地膜覆盖、起垄耕作、梯田工程措施对提高作物水分利用率产生显著影响，但对根区水分传输机理的研究不够深入。在气候暖干化、径流急剧减少、人类用水不断增加的背景下，亟需厘清黄河流

域农田用水效率提升的作用机理<sup>[23]</sup>，精准实施全流域、全过程、全行业节水。

#### （二）如何改进黄河流域水-粮食-生态协同优化技术

水土资源的合理组合对作物生产起到决定性作用，然而过去的研究更多关注总量关系，较少关注结合土地资源特性进行的时空优化配置（见图1）。黄河流域特色农业发展亟需相应的土地利用理论和技术。水-粮食-生态关系错综复杂，探究其互动机制和协同优化是关键内容。当前研究集中在粮食生产的水资源安全保障、以水资源承载能力为限制的配置方案等方面，而整体协同优化仍处于概念阶段。需要研究不同土地利用类型对绿水和蓝水入渗、渗漏及蒸发的影响，提高绿水和蓝水的综合利用率；通过实时调配蓝水并有效储存绿水，满足作物需水量。进一步，开发水-粮食-生态关系分析模拟模型，根据不同区域的水碳足迹分析结果，评估黄河流域各区域水-粮食-生态的适应性与风险水平。在变化的环境下，研发水资源配置方案和技术，制定水-粮食-生态协同安全保障策略、空间布局和调控措施<sup>[24]</sup>，将黄河流域产业发展、循环经济、可持续发展等目标有机结合。此外，可评估不同配置方案的水足迹，从虚拟水流动角度开展流域水-粮食-生态的协同优化，提出适应黄河流域气候的智慧型农业水资源可持续管理策略（见图2）。

#### （三）如何构建黄河流域水资源立体监测体系

黄河流域具有广泛的生态脆弱区域、丰富的脆弱生态类型。当前，需要深入研究黄河水沙关系长期演变趋势及其对生态环境的影响，提高黄河流域水利工程联合调度平台的能力，推动上、中、下游地区防洪抗旱协同应对。例如，自2002年流域尺度水沙调节计划实施以来，约有28%的河流径流、57%的泥沙通过小浪底水库的控释而快速排放，导致黄河三角洲的形态与景观格局发生了明显变化；然而由于缺乏长期监测数据和系统性实验，黄河三角洲湿地生态对水沙排放模式的动态响应没有得到充分研究<sup>[25]</sup>，黄河流域水资源配置与水沙调控措施对水沙时空变化、区域生态环境的影响并不清楚。又如，尽管黄土高原植树造林工程使区域环境得到改善、泥沙径流明显减小，但也导致黄河下游泥沙

补给不足，在局部已呈现为净侵蚀，黄河三角洲面积有所缩小（见图3）。为量化这种人类活动导致的水沙环境变化，需要提高黄河流域水资源监控能力，建立基于“天-空-地”多时空尺度、“水-土-气-生”综合观测协同的黄河流域网络监测体系，实现数据融合共享；为水资源在流域尺度上的

调整及优化提供基础数据支持，指导精准农业生产、态势感知、预警预测、辅助决策，推动黄河流域智慧农业建设。

**（四）如何完善变化环境下的黄河流域水量分配方案**  
 跨界河流分水问题事关河流健康，“人、地、

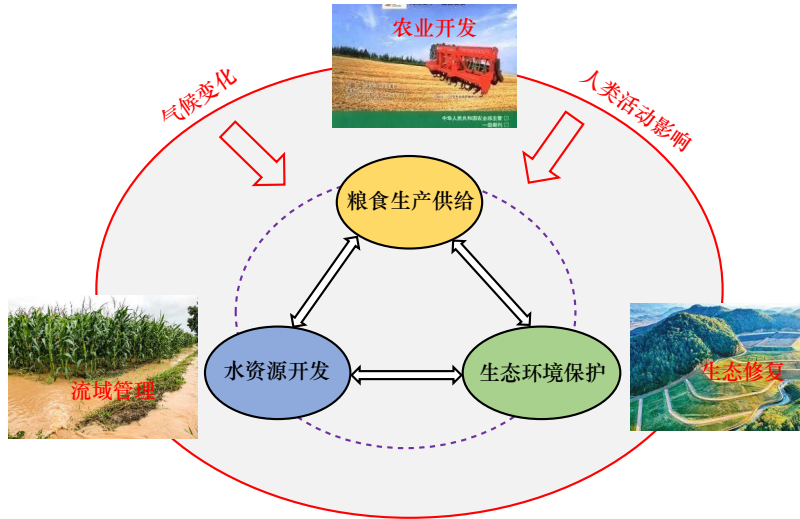


图2 水-粮食-生态纽带关系示意图

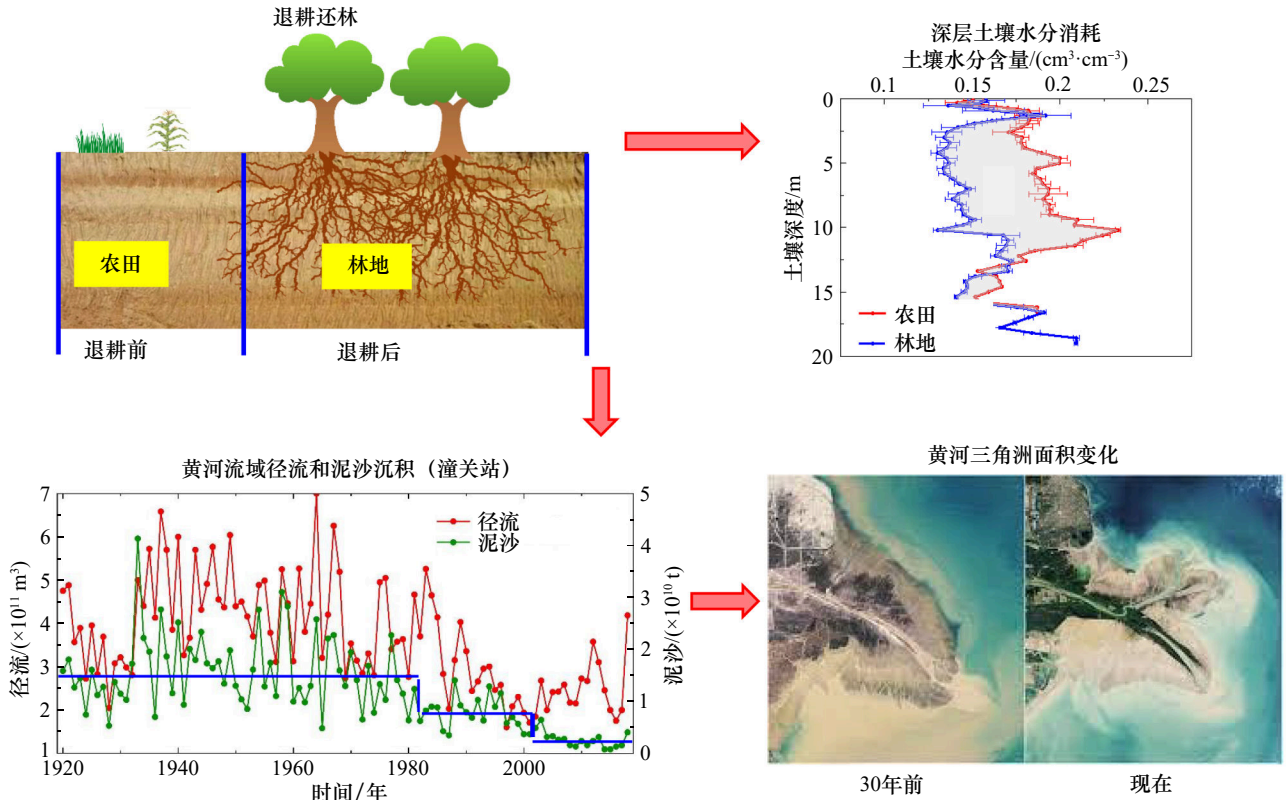


图3 黄河流域水沙关系变化示意图



水”关系，区域协调发展甚至社会稳定。1987年颁布的分水方案仍是当前黄河沿岸各省份耗水量指标的依据<sup>[26]</sup>，在历史上为黄河流域有序用水发挥了重要作用。然而，近年来黄河水沙条件，水资源禀赋，流域供用水背景，上、中、下游社会经济发展格局变化很大，如南水北调东中线一期工程已经投入运行、沿海地区海水利用规模扩大等。当前，气候变化明显、水资源短缺、极端气候频繁，需要构建黄河流域分布式生态-水文-泥沙耦合模型，预估未来气候和土地利用情境下的黄河流域水文与泥沙变化过程以及时空变化趋势，从而辅助决策水量分配优化方案与管理模式，确保“大稳定、小调整”。例如，可利用区域气候模式、降尺度方法，研究黄河上、中、下游地区近百年的气候变化趋势，结合野外人工气候场，模拟不同降雨和气温情景下的农业水文过程，建立气候变化对区域作物用水与产量影响的预测方法及模型，预测未来气候变化情景下作物需水量和作物产量的变化规律；有助于遴选基于全流域农业可持续发展和生态保育多目标的水资源区域联调方案，全面揭示变化背景下黄河流域“人地水”耦合控制机理。

## 五、黄河流域农业水资源持续利用的重点举措

### （一）作物高效用水与土壤水盐过程调控技术

从产业发展、新旧动能转换的角度看，推动节水产业和技术发展以确保水资源安全，具有明显的时代价值。当前，不同区域农业节水技术手段既有一致性又有差异性，不同领域、学科之间也是共识与分歧并存。以地下水资源保护为例：①黄河上、中游采用的节水技术导致了地下水位下降，但黄河下游农业开发面临的问题恰恰出在地下水位过高；②华北平原地区地下水超采造成了地面沉降、湿地退化等问题，对生活 and 生态用水不利，但地下水位下降却在一定程度上缓解了该地区土壤盐碱化的问题，对农业（短期）生产反而有利；③黄土高原植树造林改善了环境，但导致深层土壤干燥化乃至地下水枯竭，保护地表生态与地下水资源补给之间存在矛盾；④国外已在地下水回补技术方面进行了大量研究和应用，而我国的相关工作还很欠缺，有必要进行跨区域、跨部门的协同甚至跨学科的交叉融

合。然而，已有研究集中于黄河流域典型生态系统或者小流域，局限在植物-土壤格局变化对生态水文过程的影响层面；亟需从全流域尺度上开展整体性、系统性研究，揭示植被变化影响蒸散及其组分分配等关键环节的生态水文效应，刻画人为调控措施对黄河源区、黄土高原、黄河三角洲等典型地区的生态水文效应，发展全流域尺度的农业水文模型。

人类活动通过改变流域下垫面条件来影响水循环过程。根据黄河流域上、中、下游的水文地质条件，因地制宜构建基于农业水资源可持续管理的农作体系（包括作物、耕作、灌溉、施肥、土地管理），具有挑战性。相关工作涉及区域适宜性评价，需要创建农业节水新理论，突破农业绿色高效用水关键技术。从地球关键带研究的角度看，关注并揭示黄河流域上、中、下游联动和各地水分利用效率的差异性，才能精准提高流域系统尺度上的水资源综合利用效率。例如，黄河流域的不同区域虽然降雨量、地下水埋深差别较大，但都存在一定的土壤盐渍化风险；需要针对作物生境系统的主控要素及其之间的耦合作用开展深入研究，阐明农业管理措施对土壤水盐运移、作物水分利用效率的影响机制。由此，建立综合考虑农田土壤水文过程、作物生长及盐分特征的机理模型，剖析灌溉和旱作农田水文过程，揭示灌溉水（降水）-土壤水-地下水-作物水转化过程及伴生的土壤次生盐碱化和面源污染成因；提出水土资源协同调控途径，破解耕地总量不足和质量偏差难题，为其他区域水资源优化配置提供应用参照。

### （二）流域系统分水策略与调度平台

跨界河流水量分配应以实际发展规模、用水需求为基础，综合考虑各种影响因素来实现发展与需求相匹配的目标。现有的跨界河流分水理论<sup>[27]</sup>以全面协调并平衡各地区之间的用水需求为主，而具有全面系统流域特征的黄河流域用水准确量化方法依然缺乏。需要发展统筹各类要素的综合系统分水计算方法，研发嵌入水资源要素的高时空精度经济系统模拟技术，形成契合发展实际的新时期黄河分水策略。也要注意，现有的流域水量调度模型（如数字流域系统、数字黄河模拟系统）缺乏针对全流域水资源和水沙综合调度功能。应优先研究统筹水

源区河流水资源禀赋条件、水生态环境属性、水工程调配能力、功能区划定位的生态环境需水评估方法,提出各河段必须确保的生态流量(见图4)。

革新管理体系是推动黄河流域生态保护和高质量发展的重要方面。需深化顶层策略构思,加强全流域监管,构建面向黄河流域水资源的复杂系统多维协同调度平台。在区域农业开发方面,以水定产、适水发展是核心目标,不能以牺牲周边生态环境为代价;应立足精细化水资源管理需求,研发水资源安全评估与配置决策管理平台,把握区域农业和生态产业发展关系,明确资源环境的成本约束关系,科学开展全流域水资源分配。例如,按照政府管控、市场调节相结合的资源配置思路,采取调整配水方案和水价的方式,提高水资源利用效率;对农业用水方案、节水潜力等进行情景分析与测算<sup>[28]</sup>,通过水权交易盘活存量。实证研究表明,在不改变单方水收益的前提下,适度减少作物种植面积即可实现节水目标。采取生态优先原则,适当减少作物种植面积,同步建立农业节水补偿机制,为生态用水提供更多空间,是黄河流域生态脆弱区的可行发展策略。

### (三) 变化环境下农业用水与生态保护协同适应

水资源空间均衡是新时期的治水方针,相关概念及框架已有较多讨论,但面向空间均衡的水资源适应性配置方法研究较薄弱。鉴于流域水循环的特

点,未来水资源配置需要进一步考虑空间、时间维度上的均衡,实现流域上、中、下游之间,人与自然之间的协调发展。在水资源有限的黄河流域,生态保护、农业生产各有需求,经济社会价值也不一样,不同区域的利用效率分化,使得水资源配置显得极为复杂。例如,从粮食安全的角度看,不同区域的农业用水、生态用水如何分配?从水安全和生态的角度看,如何定产或者发展水资源高效的农业?应该看到,农业用水和生态用水既存在分水矛盾,也存在“共赢”机遇;农业系统本身也是自然-人工复合生态系统的一部分,兼具生态功能,在生态脆弱区更可发挥农业对生态环境的改善作用。这与当前提倡的盐碱地治理新观念(由治理盐碱地适应作物向选育耐盐碱植物适应盐碱地转变)是一致的。

在大食物观理念的指导下,上游地区农业的发展宜优先考虑多重土地利用方式。例如,发展与草牧业相结合的项目,考虑协调粮畜争地矛盾,合理设置各种作物的种植规模红线,减少对水土资源的压力;将生态要素纳入考虑范畴,有效削减发展乳业带来的温室气体排放,促进传统的种植业、畜牧业、生态产业的协调发展。在中游地区,重点在坚持水土保持的同时,强调森林和树木对粮食安全与营养的重要性,加强对森林作用的认可与支持。在下游地区,基于“湿地与农业:共同成长的伙伴”理念的引导,寻求粮食安全、生态安全之间的平衡

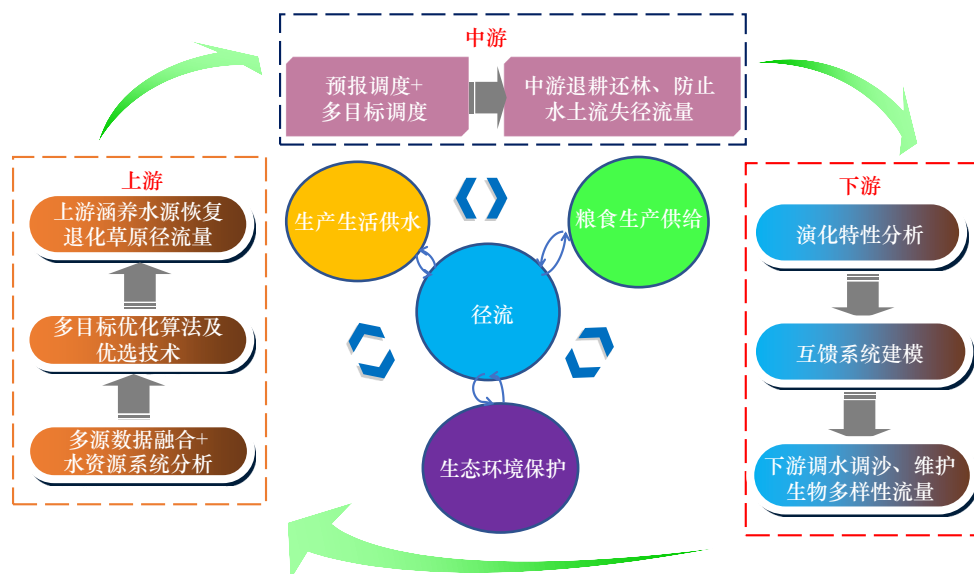


图4 黄河流域不同区域的水资源调度目标



点，遵循农业生态共生共存、物质循环原理，完善苇-鱼（蟹、虾）-稻复合生态工程模式。

受近年来气候变化明显、极端气候频繁、降雨带移动的影响，及时开展水资源格局再分配、再平衡背景下的水资源管理系统研究尤为重要。量化农业发展和气候变化对流域上、中、下游水文变化的差异化影响以及沿程传递效应，通过农业用水的区域差异化协同调控来强化全流域农业生产、生态保育应对全球气候变化的能力，是机遇也是挑战。例如，针对黄河三角洲盐碱地，研究全球气候变化背景下的土壤盐渍化演变驱动机制及生态效应，开展土壤盐渍化与植被生态对节水场景的响应与过程模拟，解析盐渍土区的土壤-植被-水文耦合响应与协同适应机制<sup>[29]</sup>，进而明确农业用水和湿地生态用水的配额配置。系统分析流域尺度用水的多过程调控理论，改进灌区用水实时调配技术，构建现代灌区高效用水调控技术集成模式，既实现水资源的高效利用，又维护并调控水肥盐环境，减轻对灌区外围环境的影响。从流域功能整体性出发，分析流域生态平衡分量的格局变化规律，量化表征气候变化、人类活动、生态系统变化之间的关联度，解析黄河流域生态系统的时空格局变化与生态水文过程，阐明生态系统中过程-结构-功能-服务-管理的级联效应，促进农业用水与生态保护协同适应。

#### （四）全流域系统水资源配置与信息化体系

全流域系统水资源配置与信息化体系是一套完善的信息化管理方法，支持在整个流域内开展水资源调度与管理，达到水资源合理配置与优化利用的目标；包括水资源监测网络、数据库管理系统、水资源调度系统、水资源配置决策系统，支持提高水资源管理效率。当前，黄河流域上、中、下游已有不少农业水资源高效利用技术（如节水灌溉、秸秆地膜覆盖、控制性排水）的应用，但在大范围实施时未能充分考虑区域水资源条件，制约了推广效果。从全流域角度看，内容具体且操作性强的顶层设计与规划缺乏，可能导致区域发展不平衡问题。因此，有待构建黄河流域水资源立体监测体系、农业水资源信息化技术平台，据此提出黄河流域水资源安全保障综合方案。此外，在经济发展水平较高的城市，可积极利用地理优势开发咸水（海水）资

源；尽管当前发展规模有限，但随着综合成本降低将具有广阔的发展空间。

当前，黄河流域农业节水控盐试验与监测网络发展滞后，有关变化环境下适水农业发展的基础研究缺乏，能够阐明土地利用和气候变化对水资源影响的耦合关系研究较少，可在区域层面指导生产的成果更是稀缺。重点解析流域-子流域-田块等多尺度上的水资源优化配给机制，分析与作物物候相匹配的节水灌溉理论与制度，提出农业高效用水应对气候变化的策略，优化不同区域水资源调配应对措施。基于近期在土壤盐渍化演变过程监测与多源数据融合、土壤水盐运移过程模拟与尺度拓展、盐渍农田灌排优化管理与边际水安全利用等方面的进展，后续可面向农业、资源、生态、环境等领域和行业，提升农业用水信息化水平、大数据分析能力，更好支持黄河流域水资源监控能力建设；发展多目标统筹、多约束限制的决策方案生成模型，快速生成管理方案集，形成大数据驱动下的方案优选能力。进一步，综合已有的试验观测数据，结合室内、田间试验观测和物理模型，利用深度学习来发展空间和时间上表征土壤特性的算法；优化数字土地制图技术，将大数据信息化、参数化，构建“天-空-地”一体化的高水效农业智能管控系统；创建作物控水提质与产能提升综合技术模式并进行示范应用，着力提升黄河流域水土资源高效利用能力。

## 六、结语

本文聚焦黄河流域农田水分高效利用和可持续发展，遵循大食物观理念和水文学研究方法，突出黄河流域农田用水效率提升的作用机理、水资源配置方案及技术、全流域农业可持续发展与生态保育多目标的水资源区域联调方案等重点研究内容，提出了作物高效用水与土壤水盐过程调控、流域系统分水策略与调度平台、变化环境下农业用水与生态协同适应、全流域系统水资源配置与信息化体系构建等有待攻克的关键技术。相关内容，有望化解农业生产用水与生态用水之间的冲突，为黄河流域生态保护和高质量发展提供新的思路。

黄河流域具有良好的农业开发条件，但高质量发展面临多方面挑战，如农业水资源高效利用技术

实施没有充分结合区域水资源禀赋条件, 全流域水资源配置的精细规划缺失, 农业土地利用和气候变化的耦合关系有待阐明, 跨行业/部门/学科提升农业节水认知需要深化。为此, 不仅需要保障生态环境并促进可持续发展, 更要提高农业生产体系的产品质量和效率, 精心测算并用好水土资源, 从严从细管好水资源; 在“水-热-土-气-生”相互作用过程取得新认识的基础上, 发展高分辨率的流域气候-水文-生态-社会经济耦合模式并提供系统管理工具, 支撑水资源高效利用及优化配置策略的实践应用, 增强流域国土空间规划能力、水-粮食-生态纽带关系系统管理水平。

#### 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:** June 2, 2023; **Revised date:** July 15, 2023

**Corresponding author:** Zhao Ying is a professor from the School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University. His major research field is soil hydrological process and its mechanism. E-mail: yzhaosoils@gmail.com

#### 参考文献

- [1] 贾绍凤, 梁媛. 新形势下黄河流域水资源配置战略调整研究[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 29-36.  
Jia S F, Liang Y. Suggestions for strategic allocation of the Yellow River water resources under the new situation [J]. Resources Science, 2020, 42(1): 29-36.
- [2] 王煜, 彭少明, 郑小康. 黄河流域水量分配方案优化及综合调度的关键科学问题[J]. 水科学进展, 2018, 29(5): 614-624.  
Wang Y, Peng S M, Zheng X K. Key scientific issues of water allocation plan optimization and comprehensive operation for Yellow River Basin [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(5): 614-624.
- [3] 左其亭. 黄河流域生态保护和高质量发展研究框架[J]. 人民黄河, 2019, 41(11): 1-6, 16.  
Zuo Q T. Research framework for ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin [J]. Yellow River, 2019, 41(11): 1-6, 16.
- [4] 刘昌明, 田巍, 刘小莽, 等. 黄河近百年径流量变化分析与认识[J]. 人民黄河, 2019, 41(10): 11-15.  
Liu C M, Tian W, Liu X M, et al. Analysis and understanding on runoff variation of the Yellow River in recent 100 years [J]. Yellow River, 2019, 41(10): 11-15.
- [5] Yi J, Li H J, Zhao Y, et al. Assessing soil water balance to optimize irrigation schedules of flood-irrigated maize fields with different cultivation histories in the arid region [J]. Agricultural Water Management, 2022, 265: 107543.
- [6] Zhang Y L, Lu Y Y, Zhou Q, et al. Optimal water allocation scheme based on trade-offs between economic and ecological water demands in the Heihe River Basin of Northwest China [J]. Science of The Total Environment, 2019, 703: 134958.
- [7] Li D F. Quantifying water use and groundwater recharge under flood irrigation in an arid oasis of Northwestern China [J]. Agricultural Water Management, 2020, 240: 106326.
- [8] Li D F, Wang X M. Assessing irrigated water utilization to optimize irrigation schedule in the oasis-desert ecotone of Hexi Corridor of China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 322: 107647.
- [9] Zhou H, Zhao W Z. Modeling soil water balance and irrigation strategies in a flood-irrigated wheat-maize rotation system. A case in dry climate, China [J]. Agricultural Water Management, 2019, 221: 286-302.
- [10] Cao S X, Chen L, Shankman D, et al. Excessive reliance on afforestation in China's arid and semi-arid regions: Lessons in ecological restoration [J]. Earth-Science Reviews, 2011, 104(4): 240-245.
- [11] Shao M A, Wang Y Q, Xia Y Q, et al. Soil drought and water carrying capacity for vegetation in the critical zone of the loess plateau: A review [J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 1-8.
- [12] Li H J, Si B, Wu P, et al. Water mining from the deep critical zone by apple trees growing on loess [J]. Hydrological Processes, 2019, 33(2): 320-327.
- [13] Zhang Z Q, Li M, Si B C, et al. Deep rooted apple trees decrease groundwater recharge in the highland region of the Loess Plateau, China [J]. Science of The Total Environment, 2018, 622: 584-593.
- [14] Feng X M, Fu B J, Piao S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [15] Zhang Y, Huang M B, Lian J J. Spatial distributions of optimal plant coverage for the dominant tree and shrub species along a precipitation gradient on the central Loess Plateau [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 206: 69-84.
- [16] 山仑, 黄占斌, 张岁歧. 节水农业 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.  
Shan L, Huang Z B, Zhang S Q. Water-saving agriculture [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [17] Li B B, Biswas A, Wang Y Q, et al. Identifying the dominant effects of climate and land use change on soil water balance in deep loessial vadose zone [J]. Agricultural Water Management, 2021, 245: 106637.
- [18] 张凌云. 黄河三角洲地区滨海盐渍土农业生态的利用模式 [J]. 中国土壤肥料, 2006 (1): 38-43.  
Zhang L Y. Study the using agricultural ecology model of the coastal saline soil on the Yellow River Delta [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2006 (1): 38-43.
- [19] Aide M, Braden I. Soil science—Emerging technologies, global perspectives and applications [M]. London: IntechOpen, 2021.
- [20] 张金良. 黄河流域生态保护和高质量发展水战略思考 [J]. 人民黄河, 2020, 42(4): 1-6.  
Zhang J L. Water strategy for ecological protection and high quality development in the Yellow River Basin [J]. Yellow River, 2020, 42(4): 1-6.
- [21] Banwart S, Bernasconi S, Bloem J, et al. Soil processes and functions in critical zone observatories: Hypotheses and experimental design [J]. Vadose Zone Journal, 2011, 10(3): 974-987.

- [22] 王浩, 胡鹏. 水循环视角下的黄河流域生态保护关键问题 [J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1009–1014.  
Wang H, Hu P. Key issues of ecological conservation in the Yellow River Basin from a water cycle perspective [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(9): 1009–1014.
- [23] 马柱国, 符淙斌, 周天军, 等. 黄河流域气候与水文变化的现状及思考 [J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(1): 52–60.  
Ma Z G, Fu C B, Zhou T J, et al. Status and ponder of climate and hydrology changes in the Yellow River Basin [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(1): 52–60.
- [24] Hatfield J L, Sauer T J, Cruse R M. Soil: The forgotten piece of the water, food, energy nexus [J]. Advance in Agronomy, 2017, 143: 1–46.
- [25] Zhang H, Chen X B, Luo Y M. An overview of ecohydrology of the Yellow River delta wetland [J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2016, 16(1): 39–44.
- [26] 王忠静, 刘俊鹏. 关于黄河“八七”分水方案调整的几点思考 [J]. 人民黄河, 2022, 44(8): 1–5, 27.  
Wang Z J, Liu J P. Some thoughts on the adjustment of water resources allocation of “87 Scheme” of Yellow River [J]. Yellow River, 2022, 44(8): 1–5, 27.
- [27] 左其亭, 吴滨滨, 张伟, 等. 跨界河流分水理论方法及黄河分水新方案计算 [J]. 资源科学, 2020, 42(1): 37–45.  
Zuo Q T, Wu B B, Zhang W, et al. A method of water distribution in transboundary rivers and the new calculation scheme of the Yellow River water distribution [J]. Resources Science, 2020, 42(1): 37–45.
- [28] 刘静, 梅旭荣, 连煜阳, 等. 黄河流域农业高质量发展中水土资源优化配置研究 [J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(6): 1–14.  
Liu J, Mei X R, Lian Y Y, et al. Study on the optimal allocation of water and land resources under high-quality agricultural development in Yellow River Basin [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 43(6): 1–14.
- [29] 张治梅, 樊彦国, 矫志军, 等. 土壤盐渍化对滨海湿地生态环境质量的影响——以黄河三角洲为例 [J/OL]. 自然资源遥感, [2023-04-03]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1759.P.20230331.1810.006.html>.  
Zhang Z M, Fan Y G, Jiao Z J, et al. Impact of soil salinization on the ecological environment quality of coastal wetlands: A case study of Yellow River Delta [J/OL]. Remote Sensing for Natural Resources, [2023-04-03]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1759.P.20230331.1810.006.html>.