

地学视角下的流域系统整体性及其可持续运行面临的挑战

郝林钢^{1,2}, 江恩慧^{1,2}, 屈 博^{1,2}, 于宗绪³, 刘 畅^{1,2}, 刘 盈⁴, 李佳琪⁵

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院; 2. 水利部黄河重点实验室;
3. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室; 4. 天津大学管理与经济学部;
5. 郑州大学水利与交通学院)

摘要: 为加强对流域系统整体性、复杂性及其面临的挑战等方面的认识, 基于流域河源、上游、中游、下游和河口五大单元在水文泥沙、地形地貌、营养物质和生态要素等方面的联系, 从五大单元自然地理特征与人文地理特征级联关系的视角出发, 阐释了流域系统的整体性。基于流域系统内部要素和子系统之间相互作用机制的特点, 剖析了流域系统复杂难治的内在矛盾; 从地学视角出发, 基于地球圈层相互作用框架, 分析了大气圈、水圈、岩石圈、人类圈和生物圈对流域系统治理造成的外在影响; 总结了“人类世”背景下, 流域系统可持续运行面临的气候变化、科技水平、政策法规、国际形势等约束。考虑整体性和内外部挑战, 提出了保障流域系统可持续运行的重点研究方向, 即建立基于五大单元级联关系的流域系统可持续运行理论体系, 识别流域系统要素和子系统关系状态转变的临界阈值, 并构建整体论与还原论相统一的流域系统模拟器。

关键词: 地学视角; 流域系统整体性; 流域系统治理; 流域可持续发展

中图分类号: P933 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2026)05-0186-09

Integrity of watershed systems from geoscience perspective and challenges for sustainable operation//Hao Lingang^{1,2}, Jiang Enhui^{1,2}, Qu Bo^{1,2}, Yu Zongxu³, Liu Chang^{1,2}, Liu Ying⁴, Li Jiaqi⁵ (1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC; 2. Key Laboratory of Yellow River, MWR; 3. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences; 4. College of Management and Economics, Tianjin University; 5. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University)

Abstract: To enhance the understanding of the integrity and complexity of watershed systems and the challenges they face, based on the connections among the five major units, i. e., the headwaters, upper reaches, middle reaches, lower reaches, and estuary, in terms of hydrology and sediment transport, topography and geomorphology, nutrients, and ecological elements, the integrity of watershed systems was elucidated from the perspective of the cascading relationships between physical and human geographical characteristics of the five units. Based on the characteristics of the interaction mechanisms among internal elements and subsystems, the inherent contradictions underlying the complexity and difficulty of watershed system governance were analyzed. From the geoscience perspective, the external influences on watershed system governance by the atmosphere, hydrosphere, lithosphere, anthroposphere, and biosphere were examined based on interactions among the Earth's sphere interactions. Finally, the constraints to the sustainable operation of watershed systems in the context of "Anthropocene" were summarized, including climate change, technological development, policies and regulations, and the international situation. Considering the integrity of the watershed system and the challenges arising from both internal and external factors, key research directions were proposed to ensure the sustainable operation of watershed systems. These directions include establishing a theoretical framework for sustainable watershed system operation based on the cascading relationships among five units, identifying the critical thresholds governing regime shifts in the relationships among watershed system elements and subsystems, and developing a watershed system simulator that integrates holistic and reductionist approaches.

Key words: geoscience perspective; integrity of watershed system; watershed system governance; sustainable development of watershed

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U2243601, 52409027)
作者简介: 郝林钢 (1991—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事水文水资源与流域可持续发展研究。E-mail: haolg.20b@igsnnr.ac.cn
通信作者: 江恩慧 (1963—), 女, 正高级工程师, 博士, 主要从事流域系统治理研究。E-mail: 1067741039@qq.com

在“人类世”背景下,地球系统可认为是由大气圈、水圈、岩石圈、人类圈和生物圈相互联系组成的有机整体^[1-2]。其中,水圈是联系地球各圈层的纽带,水循环在地球系统中具有气候调节、生态调节、水资源储存与输送等功能^[3-4],而流域水循环又是陆地水循环的基本单元^[5],流域系统在地球系统中具有重要的作用。可持续发展是解决当前人类命运共同体面临资源、环境、经济、社会等问题的最佳途径,流域尺度的可持续发展是实现地球系统与人类社会共同可持续发展的关键所在^[6]。

系统论是研究解决地球系统和流域系统具体问题的指导性理论,依据该理论,物质世界是相互联系的整体,整体性原则是系统最基本的原则之一^[7-8]。地球系统科学是研究地球系统的基础理论,着眼于地球各圈层相互作用,以全球性、统一性的整体观、系统观研究地球整体^[9]。作为地球系统的重要组成部分,流域上、中、下游的自然和人文要素相互作用,构成了流域系统^[10-11]。要实现流域可持续发展必须具备整体观,将流域视为一个由各部分组成的有机整体^[12-13],推动建立上下游贯通一体的治理体系^[14-15]。为此,借鉴地球系统科学理论,江恩慧等^[16]提出了流域系统科学理论体系,强调以流域各系统相互作用为切入点,研究流域整体性。

流域的自然要素和人文要素具有显著的空间异质性,流域系统内部要素和子系统之间相互作用机制极其复杂,加之地球圈层,特别是人类圈对流域系统的影响日益显著,增加了流域治理的难度,流域系统可持续运行面临着复杂多变的挑战。然而,目前对流域系统整体性、组成要素之间的内部矛盾、地球圈层的外部矛盾等的认识不全面、不系统,共同制约着流域系统的可持续运行。

鉴于此,本文从地学视角出发,考虑地球圈层相互作用下流域地理单元的分异性,阐明流域系统,特别是大江大河流域系统从河源到河口五大单元自然地理特征和人文地理特征的一般性规律;基于流域系统内部要素和子系统之间相互作用机制的复杂性,剖析流域系统复杂难治的内在根源,揭示地球圈层对流域系统的影响路径,阐明“人类世”背景下流域系统可持续运行面临的挑战,并提出保障流域系统可持续运行的重点研究方向。

1 地学视角下的流域系统整体性

根据流域的地理阶梯变化,无论是内流河流域,还是外流河流域,都包括河源、上游、中游、下游和河口五大地理单元。在干流、支流、湖泊、湿地等水体的连接作用下,流域五大单元之间形成了径流、泥

沙、地貌、物质、生态等方面的关联性^[17-19]。流域的产汇流过程和河川径流取用既发生在流域的每一个单元内,也联系着不同单元,构成流域系统整体。流域泥沙的产沙、搬运和堆积过程发生在流域的不同单元,贯穿了整个流域。流域不同单元的地形地貌变化相互关联,特别是河床的宽度、深度、坡降等形态变化从河源到河口具有明显的连续性。在水循环的作用下,河流系统输送养分、有机质和泥沙等,维持流域内的物质循环。上下游生态系统相互依存,河流为流域内的动植物提供连续的栖息地,特别是为水生生物在流域内不同部分之间的运动提供迁移通道。

在径流、泥沙、地貌、物质、生态等自然要素的级联效应作用下,流域河源、上游、中游、下游和河口五大地理单元相辅相成,构成了一个有机整体^[20-21];在自然环境的塑造下,流域五大单元的人文地理特征各有特色,互相联系,构成了流域人文地理特征的基本架构^[22-25]。流域系统五大单元的主要自然地理特征和人文地理特征^[26-29]如表1所示。

2 流域系统治理面临的内外部矛盾

2.1 流域系统内部相互作用机制的复杂性

流域是由多种要素组成的复杂巨系统,其内部要素和子系统之间相互作用的复杂性是流域系统复杂难治的内在矛盾。流域系统内部相互作用关系的特点不仅体现在传统的非线性、随机性、不确定性、尺度效应等方面,更突出表现在随时间变化的累积效应、阈值效应和滞后效应等方面^[30-34]。累积效应可能触发阈值效应,累积效应和阈值效应往往伴随着滞后效应,三者之间的复杂交互,进一步增加了流域系统治理的难度。

流域系统中水文泥沙过程对生态环境与社会经济影响的累积和滞后效应突出体现在:①泥沙淤积会增加洪水风险并重塑土地分布,泥沙逐年沉积导致行洪能力降低,会威胁农业生产和居民生活,改变人类活动的空间边界和土地利用方式;②泥沙携带的污染物积累,会影响河流水质,降低生物多样性,影响湿地、滩涂等生态系统的稳定性。

流域系统阈值效应主要表现为:①当洪水频率或强度超过生态系统的适应能力时,可能导致植被破坏、栖息地丧失;②水库建设可能拦蓄泥沙,减少下游及入海泥沙输送,导致河口三角洲萎缩,超过阈值后会引发海岸侵蚀;③人类过度取水可能导致河流断流、湿地萎缩;④工业、农业和生活污染引起的水体富营养化可能引发藻类暴发,破坏水生生态系统;⑤当土地利用变化超过流域水资源和生态

表 1 流域系统五大单元的自然地理特征和人文地理特征

Table 1 Physical and human geographical characteristics of five major units of watershed systems

五大单元	自然地理特征	人文地理特征
河源	河源地区海拔最高,多为高山,地势起伏大;水流湍急,是最初具有地表水流的地方,通常与冰川、湖泊和泉联系;生态空间异质性较小,是重要的水源涵养区和生态功能区,为其他单元提供生态保障 ^[26-27]	人口总数少,分布稀疏;经济发展滞后,以农业经济为主,多为畜牧业或小规模农业;多居住着具有独特民族文化和传统习俗的族群
上游	上游地区地势起伏大,分水岭明显,坡度较大,河段多急滩和瀑布 ^[26] ;河谷窄、比降和流速大、水量小、侵蚀强烈,河床多基岩裸露;径流补给以冰雪融水、降水和地下水补给为主,流量和含沙量的季节性波动较大;气候和植被垂直分异明显,生态系统较为脆弱	人口密度较低,分布稀疏,多沿河谷分布;经济以农业为主,主要是传统种植业;城市规模相对较小;以少数民族为主,往往是不同民族的交界地带,是多民族聚居区
中游	中游地区位于山地与平原的过渡带,地势逐渐平缓,河谷展宽,由“V”形谷向“U”形谷演变,河漫滩和河曲发育;河水流速减缓,支流汇入增多,径流量增加,泥沙淤积加剧,泥沙含量显著增加,湖泊与湿地发育;河床比降逐步变缓,水流的下切侵蚀作用开始减小,河床位置比较稳定,侵蚀和堆积作用大致保持均衡,纵断面往往呈平滑下凹曲线 ^[26] ;气候类型多样,降水季节分布不均,气温高于上游,蒸发作用增强;相较于上游,中游植被覆盖度降低,人工植被增多	人口密度适中,介于上游和下游之间;城市化发展水平较高,通常是流域内经济最为发达的区域之一,是连接上游和下游的枢纽地带,农业、工业、服务业一般均较为发达;通常是古文明的发祥地,历史悠久,拥有丰富的历史遗迹和文化遗产,是不同民族、文化交流融合的场所,具有多元文化特色 ^[23]
下游	下游地区地势平坦开阔,以冲积平原为主,河谷宽广,河道弯曲,到处可见浅滩和沙洲 ^[26] ;河水流速小,通常径流量大且较为稳定,河道泥沙不断增加,河床泥沙淤积更加明显;气候条件较为稳定,温差相对上中游地区较小,降水季节分配不均;以人工植被为主	人口最密集、城市规模最大、发展水平最高的地区之一;具有多元化经济体系,农业发达且类型多样;工业基础雄厚,产业集聚度高;随着经济发展,服务业较为发达;通常历史悠久,文化繁荣
河口	河口地区一般地势平缓,分汊现象显著,经常有泥沙堆积,在入海、入湖处形成三角洲 ^[26] ;对于外流河,河口受径流与潮汐过程交互作用,水水泥沙动力过程复杂;土壤肥沃,但易发生盐渍化;一般是重要的湿地,具有较高的生态价值	人口稠密,是流域经济发展水平最高的地区之一 ^[28-29] ;种植业和水产养殖业发达;外流河流域河口地区具有航运和物流价值,多形成港口城市;由于贸易枢纽的作用,不同地区、不同民族的人口在此汇集,成为文化交汇区

承载力时,可能加剧水土流失,增大洪水风险。

2.2 地球各圈层对流域系统的外部影响

流域系统处于地球各圈层的包围之中,既是各圈层的一部分,又是连接各圈层的纽带,同时受到各圈层的作用,大气圈、水圈、岩石圈、人类圈和生物圈等圈层要素及其变化对流域系统具有显著影响^[35-37]。如图 1 所示,大气圈通过极端气温、极端降水、骤旱、早涝急转等极端天气事件威胁流域系统^[38-40];水圈通过水循环和水文过程影响流域水资源时空分布;岩石圈的地质运动、地貌演变、地质灾害等是流域形成与演变的基础,决定了流域系统的基本自然特征;人类圈的国际国内形势、治理管理体制、科学技术水平等人类活动因素^[41-45],可以显著改造甚至重塑流域系统的结构与功能;生物圈对流域系统的影响,突出体现在物种入侵、动物迁徙、植被变化等方面^[46]。

根据以上影响路径,阐明地球各圈层对流域系统影响的具体表现形式,如表 2 所示。大气圈变化对流域的水沙资源供需关系、水系结构、生态系统稳定、社会经济发展等具有显著影响。水圈变化可能加剧流域水资源时空分布不均,改变河湖水系连通状态。岩石圈的长期和短期变化对流域系统及其治理的影响,既体现在流域的地形地貌重塑上,也涉及水文过程、泥沙过程、生态系统和自然灾害等,滑坡、泥石流等地质灾害会在短时间内改变流域行洪输沙

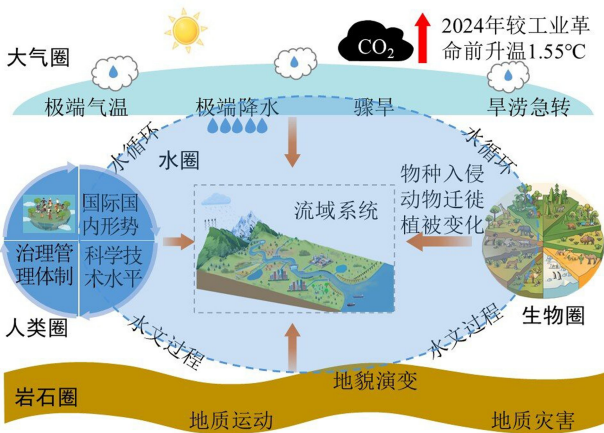


图 1 地球圈层引起的流域系统治理的复杂性

Fig. 1 Complexity of watershed system governance induced by Earth's spheres

功能,危害生态环境和人民生命财产安全^[36,47-48]。人类活动对流域系统的影响涉及政治、宗教、发展程度、科技水平等方面。生物圈及其变化对流域系统的影响涉及水文、气候、生态和社会经济等领域。

3 “人类世”背景下流域系统可持续运行面临的挑战

流域系统可持续运行是实现流域多维功能协同和可持续发展的重要保障,然而流域系统的内部矛盾及外部圈层的影响决定了流域系统可持续运行面临着复杂多变的约束作用^[53-54]。在“人类世”背景

表 2 地球各圈层对流域系统的影响
Table 2 Impacts of Earth's spheres on watershed systems

圈层类型	影响路径	具体表现
大气圈	极端气温	极端高温导致流域蒸发量增加,土壤水分减少,加剧农业干旱;当气温超过作物生长发育所能承受的上限温度时,会发生热害;加剧水资源紧缺,影响城乡居民的生活用水;增加电力需求;可能永久性损害区域经济增长 ^[38]
	极端降水	极端低温导致农作物冻害,牲畜冻伤或死亡,损坏温室、灌溉设备等设施;导致供水管道冻结甚至破裂,影响居民和工业用水;增加能源需求,损坏能源设施,导致能源供应中断;低温条件下,污染物不易扩散,导致空气质量下降
	骤旱	引起突发性内涝和超标准洪水,威胁供水供电及人民生命财产安全,破坏动植物生存环境等,带来巨大经济损失 ^[49]
	旱涝急转	快速降低陆地生态系统碳汇功能,导致湖泊等地表水体迅速干涸,破坏农业生产;引起热浪、山火、电力短缺等,触发复合极端事件
水圈	水循环	供水条件急剧反转,严重威胁居民生活用水安全和农业灌溉用水稳定性
	水文过程	影响流域水量分布,自然水循环失衡会加剧水资源时空分布不均
岩石圈	地质运动	通过产汇流、河湖水量补给等影响流域水量平衡过程、水体连通状态等
	地貌演变	地壳的抬升、沉降、褶皱和断裂等构造运动改变河流流向,侵蚀基准面,从而影响流域的形成及发育过程 ^[50] ;地质运动形成的断层和裂隙可能成为地下水通道;岩性差异会影响地表径流的渗透和汇流;地壳的沉降或火山活动可能形成湖泊和湿地
	地质灾害	地貌演变会改变侵蚀作用,影响流域水沙过程和河道泥沙沉积过程;地形条件变化会影响栖息地分布和生物多样性;风化作用会影响土壤形成和分布,进而改变植被分布和生态系统类型;山脉和断层可能成为物种迁移的屏障或通道,影响生态系统连通性和物种分布
人类圈	国际国内形势	重塑或破坏流域系统的构成,引起河流改道或水库溃坝;在短时间内,对动植物的生存空间产生破坏性影响;破坏生产生活设施,甚至引起人员伤亡 ^[47]
生物圈	治理管理体制	导致人口和民族迁移,改变流域人口、民族、宗教和文化分布情况
	科学技术水平	影响自然环境、水沙供需情势等,改变流域治理面临的内外外部环境 ^[51-52]
生物圈	物种入侵	落后的科技和治理措施会引发水文泥沙、生态环境和社会经济问题
	动物迁徙	破坏当地水域生态系统,捕食养殖鱼类,破坏养殖设施,降低养殖产量,增加养殖成本;流域外的微生物可能通过水流、风、动物迁徙等进入流域,导致水质恶化,引发人类疾病,增加社会经济成本
	植被变化	动物迁徙并携带种子、营养物质、病原体等进入流域,影响当地生态平衡;珍稀、观赏性外来动物可以促进流域内生态保护和经济发展
生物圈	植被变化	外界植被变化会通过水循环改变局部气候,进而影响流域系统产汇流、产沙输沙过程

下,流域系统可持续运行面临的约束突出表现在气候变化、科技水平、政策法规、国际形势等方面。如图 2 所示,气候变化对流域系统可持续运行带来的约束主要通过温室气体排放、生产生活方式、能源开发模式、土地利用模式等体现;科技水平带来的约束主要体现在监测技术、模拟技术、预报技术、资源利用技术、生态保护技术、工程建设技术等方面^[55-57];政策法规带来的约束主要体现在法律框架、管理体制、规划执行和监管执法等方面,存在不完善、不成体系、落实不到位等问题^[58];国际形势带来的约束主要体现在流域国家之间的关系、大国之间的政治博弈、国际分工中的定位、国际社会价值观等方面^[59-62]。

表 3 给出了 4 种类型约束作用下流域系统可持续运行面临挑战的具体表现形式。为应对气候变化,联合国制定了“净零排放”目标,我国提出了“双碳”战略,这些目标的实现有赖于人类社会的深刻变革,将从土地、能源、产业结构、生活方式等方面全方位、全地域、全过程、全行业影响流域开发模式。科学和技术水平不仅制约着流域系统要素监测、模拟、预报的准确性和时效性,直接影响水沙资源的利用水平,还决定了流域生态环境的保护与修复能力,

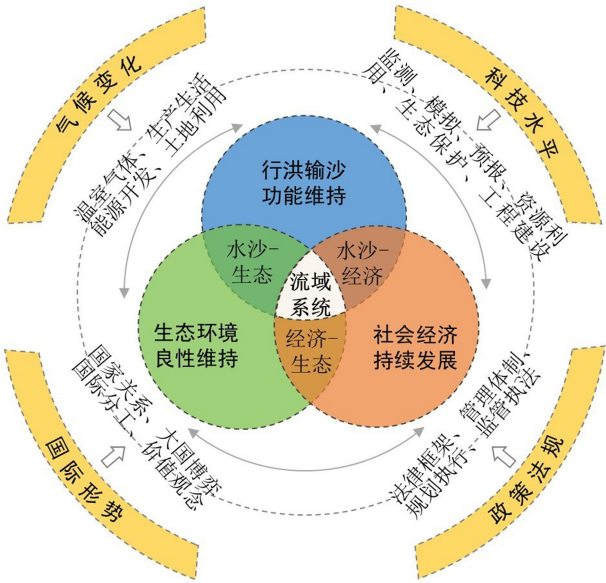


图 2 “人类世”背景下流域系统治理面临的约束
Fig. 2 Constraints on watershed system governance in context of “Anthropocene”

以及流域治理开发过程中工程建设技术的先进性、建设规模的合理性和不利影响的可控性。政策法规不仅制约着流域资源的合理利用、生态的良性维持与环境的有效保护,还影响着流域治理过程中治理

表 3 4 种类型约束作用下流域系统可持续运行面临挑战的具体表现

Table 3 Specific manifestations of challenges to sustainable operation of watershed systems under four types of constraints

约束类型	影响路径	具体表现
气候变化	温室气体排放	针对流域治理的任何工程、非工程措施,任何资源开发、利用与管理行为,任何生产生活基础设施的建设,都需要考虑温室气体排放量
	生产生活方式	为避免极端灾害带来巨大损失,需要调整人类与河流的距离;为减少日常生活的碳排放量,需要变革人们的衣食住行方式,倡导节约粮食、绿色出行等
	能源开发模式	在煤炭、石油、天然气等化石能源富集的流域,基于经济成本、供电稳定性和可靠性等因素,利用化石能源发电是最佳选择,但会排放大量温室气体,加剧气候变暖,为此必须大力发展水电、太阳能、风能等新能源
	土地利用模式	影响土地利用空间布局,气候变化会改变干湿界限,增加极端水文气象灾害,为应对这些挑战,需要对城镇用地、农业用地的分布做出调整
科技水平	监测技术	人工站点、定点采样等水文泥沙、生态环境要素监测手段覆盖范围有限,实时性和同步性差,难以支撑动态实时决策;偏远地区缺乏高分辨率遥感、物联网或无人机等新技术,导致灾害预警延迟
	模拟技术	水文模型、水质模拟等依赖历史数据和物理方程 ^[63] ,若数据质量低或模型不合理,将导致流域治理方案制定缺乏科学依据
	预报技术	受监测模拟技术、历史数据质量、误差修正方法等影响 ^[64] ,存在流域系统要素特别是水文泥沙要素预报不够准确和及时的问题
	资源利用技术	水资源调配、水力发电等技术老旧,存在灌溉系统漏损率高、小型水电站效率低等问题,导致资源利用率低下
	生态保护技术	微塑料、抗生素等新型污染物去除技术不成熟,生态修复成本过高,制约流域生态环境质量的改善 ^[65]
	工程建设技术	水资源调配、防洪减灾、农业水利、水力发电等工程是资源利用、社会经济发展、生态环境治理的重要抓手,而工程建设技术水平是其重要的制约因素
政策法规	法律框架	大部分流域涉及多部法律,如《中华人民共和国水法》《中华人民共和国水污染防治法》《中华人民共和国防洪法》等,但缺乏直接针对流域的法律,导致法规碎片化,执行标准不一
	管理体制	流域系统的治理涉及水利、环保、自然资源等多部门,存在监管盲区;流域管理机构的法律地位不明确,协调能力受限
	规划执行	流域综合规划对地方水事行为约束力弱,部分地区规划与流域目标冲突;上游保护、下游受益的补偿标准和方案缺乏制定依据等,导致横向补偿机制的实践推进缓慢 ^[66]
	监管执法	跨界水域因执法标准不一,易形成执法空白;传统监管依赖人工巡查,遥感、物联网等智能监测技术覆盖率低,难以实现全流域动态管控
国际形势	流域国家之间的关系	跨国界河流水资源开发利用与保护、水量水质信息监测与共享、污染治理及生态修复等受到上下游国家关系的影响 ^[67]
	大国之间的政治博弈	大型流域往往处于陆地的核心位置,是大国间博弈的重点,流域治理开发受到大国政治、军事、资金、技术等竞争与投入的影响 ^[68]
	国际分工中的定位	不同流域拥有独特的资源、环境和人口特征,在国际分工中的定位不同,发达国家通过国际分工将高耗水、高污染的制造业转移到发展中国家,加剧当地水资源短缺和环境污染;国际农产品贸易促使发展中国家扩大农业种植(如中亚棉花、南美大豆等),增加当地水资源消耗量;为提高产量,部分地区过度使用化肥农药,加剧流域面源污染,引发水生态危机
	国际社会价值观	涉水、环境和生态的国际公约与法律是跨国界流域治理的重要约束,包括但不限于《跨界水道和国际湖泊的保护和利用公约》《国际水道非航行利用法公约》《生物多样性公约》《拉姆萨尔湿地公约》;激进环保主义者以环保的名义干涉其他国家流域开发治理方案

理念、治理目标、治理手段在全流域的推进和实施。国际形势全方位制约着跨国界河流的资源利用与分配方式、生态环境保护与治理、社会发展模式、产业结构等,还通过政治、经济、社会的溢出效应,影响流域的人口和民族分布。

4 结 语

本文总结了流域系统从河源到河口的自然和人文地理特征规律,分析了流域系统内部要素和子系统之间相互作用的复杂性,阐明了地球圈层对流域系统治理及其可持续运行的影响。流域系统由河源、上游、中游、下游和河口五大单元构成,通过径流、泥沙、地貌、物质、生态等联结为一个有机整体;流域系统内部要素和子系统之间相互作用机制的累积效应、阈值效应和滞后效应等带来的复杂性,是造

成流域系统复杂难治的内在根源;大气圈、水圈、岩石圈、人类圈和生物圈是导致流域系统复杂难治的外部因素;在“人类世”背景下,流域系统可持续运行面临着气候变化、科技水平、政策法规和国际形势等约束作用带来的挑战。

针对流域系统整体性规律、相互作用机制的复杂性、地球圈层的外部影响和流域系统可持续运行面临的挑战,提出了保障流域系统可持续运行的重点研究方向:①流域五大单元的水沙、社会经济、生态环境存在紧密的联系,某一组成部分的可持续运行并不代表整个流域的可持续运行。因此,必须考虑流域水沙、经济、生态要素在不同单元之间的级联效应,在水沙资源支撑条件下,构建流域河源、上游、中游、下游、河口一体化可持续运行研究理论框架和技术体系。②流域不同要素时空分异性受到水沙条

件、气象、地貌、政策、科技水平等的影响,叠加累积效应、阈值效应和滞后效应带来的复杂性,子系统之间耦合关系的时空分异性规律、系统状态转变临界阈值及其驱动因素具有高度复杂性和不确定性。因此,需要量化识别不同要素对流域系统的影响程度,计算不同时期和不同区域各驱动要素的贡献率,提出流域系统局部和整体内部要素和子系统关系状态转变的临界阈值与韧性区间。③处于各圈层作用下的流域构成了一个典型的开放复杂巨系统,其治理和可持续运行面临的挑战是自然和人为交互作用的结果,必须综合自然规律和人类社会规律,突破还原论的制约。将还原论与整体论辩证统一,结合大数据技术和人工智能技术,构建全新的流域系统模拟机制,综合应对“人类世”背景下流域系统可持续运行面临的挑战。

参考文献:

[1] 苏建宾,陈都鑫,郑东海,等. 追索为什么? 地球系统科学中的因果推理[J]. 中国科学:地球科学,2023,53(10):2199-2216. (Su Jianbin, Chen Duxin, Zheng Donghai, et al. The insight of why: causal inference in earth system science[J]. Scientia Sinica(Terrae),2023,53(10):2199-2216. (in Chinese))

[2] 周卫健,赵雪,陈宁. 中国人类世科学研究新进展[J]. 地球科学进展,2024,39(1):1-11. (Zhou Weijian, Zhao Xue, Chen Ning. New progress in the Anthropocene science in China[J]. Advances in Earth Science,2024,39(1):1-11. (in Chinese))

[3] Gleeson T, Wang-Erlandsson L, Porkka M, et al. Illuminating water cycle modifications and Earth system resilience in the Anthropocene [J]. Water Resources Research,2020,56(4):e2019WR024957.

[4] 王梓萌,刘勇胜,鲁安怀,等. 水脉相连:从元素相关性解析水在地球-人类系统的纽带作用[J]. 中国科学:地球科学,2023,53(10):2425-2429. (Wang Zimeng, Liu Yongsheng, Lu Anhuai, et al. Water: the lifeblood of the Earth-human system revealed in elemental correlations [J]. Scientia Sinica(Terrae),2023,53(10):2425-2429. (in Chinese))

[5] 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 Hao, Hu Peng. 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. (in Chinese))

[6] 郝林钢,江恩慧,屈博,等. 可持续发展理论及其在流域系统中应用研究综述[J]. 水资源保护,2025,41(2):173-183. (Hao Lingang, Jiang Enhui, Qu Bo, et al. Review of sustainable development theory and its application in

watershed system [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (2) : 173-183. (in Chinese))

[7] 司雨,王英. 习近平治水思路的系统哲学基础[J]. 水利经济,2024,42(5):41-46. (Si Yu, Wang Ying. System philosophy foundation of Xi Jinping' s thought on water governance [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42 (5) : 41-46. (in Chinese))

[8] 张万益,杜璨,胡雅璐,等. 地球系统科学基本原理与应用展望[J]. 地质通报,2024,43(8):1277-1288. (Zhang Wanyi, Du Can, Hu Yalu, et al. Basic principles and application prospects of earth system science [J]. Geological Bulletin of China, 2024, 43 (8) : 1277-1288. (in Chinese))

[9] 郑永飞,郭正堂,焦念志,等. 地球系统科学研究态势[J]. 中国科学:地球科学,2024,54(10):3065-3090. (Zheng Yongfei, Guo Zhengtang, Jiao Nianzhi, et al. A holistic perspective on earth system science [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2024, 54 (10) : 3065-3090. (in Chinese))

[10] 陈文龙,徐宗学,宋利祥,等. 基于流域系统整体观的城市洪涝治理研究[J]. 水利学报,2021,52(6):659-672. (Chen Wenlong, Xu Zongxue, Song Lixiang, et al. Research on the control measures of pluvial and fluvial urban floods based on holistic view of watershed system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52 (6) : 659-672. (in Chinese))

[11] 汪芳,苗长虹. 系统性、整体性与协同性:黄河流域高质量发展的思维与策略:写在专辑刊发之后的话[J]. 自然资源学报,2021,36(1):270-272. (Wang Fang, Miao Changhong. Systematicity, integrity, and synergy: perspectives and strategies for high-quality development of the Yellow River Basin: reflections following the publication of special issue [J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36 (1) : 270-272. (in Chinese))

[12] Wang Yichu, Ni Jinren, Wan Jinbo, et al. Global river economic belts can become more sustainable by considering economic and ecological processes [J]. Communications Earth & Environment, 2024, 5 (1) : 18.

[13] 程国栋,李新. 流域科学及其集成研究方法[J]. 中国科学:地球科学,2015,45(6):811-819. (Cheng Guodong, Li Xin. Integrated research methods in watershed science [J]. Scientia Sinica(Terrae),2015,45(6):811-819. (in Chinese))

[14] 刘小勇,陈晓. 推动构建流域上下游贯通一体的河湖保护治理体系[J]. 水利发展研究,2025,25(1):37-42. (Liu Xiaoyong, Chen Xiao. Promote the establishment of an integrated river and lake protection and governance system that connects the upstream and downstream of the river basin [J]. Water Resources Development Research, 2025, 25 (1) : 37-42. (in Chinese))

[15] 王元元,蔡梅,江宸宇,等. 跨区域水系协同治理规划与

- 思考[J]. 水利经济, 2025, 43(2): 23-28. (Wang Yuanyuan, Cai Mei, Jiang Chenyu, et al. Planning and thinking of cross-regional collaborative governance of river-lake system[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2025, 43(2): 23-28. (in Chinese))
- [16] 江恩慧,王远见,田世民,等. 流域系统科学初探[J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1026-1037. (Jiang Enhui, Wang Yuanjian, Tian Shimin, et al. Exploration of watershed system science[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(9): 1026-1037. (in Chinese))
- [17] 王艳芬,陈怡平,王厚杰,等. 黄河流域生态系统变化及其生态水文效应[J]. 中国科学基金, 2021, 35(4): 520-528. (Wang Yanfen, Chen Yiping, Wang Houjie, et al. Ecosystem change and its ecohydrological effect in the Yellow River Basin[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35(4): 520-528. (in Chinese))
- [18] Zhao Gaolei, Tian Shimin, Jing Yongcai, et al. Spatiotemporal variations in runoff and sediment load of the mainstem and major tributaries of the Yellow River Basin from the headwater to the estuary(1960-2023)[J]. Journal of Environmental Management, 2025, 380: 124723.
- [19] 许炯心,蔡强国,李炳元,等. 中国河流地貌研究进展: 纪念沈玉昌先生 100 年诞辰[J]. 地理学报, 2016, 71(11): 2020-2036. (Xu Jiongxin, Cai Qiangguo, Li Bingyuan, et al. Research progress in river geomorphology in China: in memory of 100-year anniversary of Shen Yuchang's birth[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(11): 2020-2036. (in Chinese))
- [20] 顾朝林,顾江,高喆,等. 莱茵河流域考察研究报告[J]. 城市与区域规划研究, 2022, 14(2): 151-192. (Gu Chaolin, Gu Jiang, Gao Zhe, et al. Research report on the Rhine River Basin[J]. Journal of Urban and Regional Planning, 2022, 14(2): 151-192. (in Chinese))
- [21] 赵纯厚,朱振宏,周端庄. 世界江河与大坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [22] Wang Yichu, Borthwick A G L, Ni Jinren. Human affinity for rivers[J]. River, 2022, 1(1): 4-14.
- [23] 陈聪,唐英,史承勇,等. 黄河流域遗产资源空间分布与区域协同保护[J]. 干旱区地理, 2024, 47(7): 1220-1230. (Chen Cong, Tang Ying, Shi Chengyong, et al. Spatial distribution and regional cooperative conservation of heritage resources in the Yellow River Basin[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(7): 1220-1230. (in Chinese))
- [24] 黄进,李后强,廖冲绪. 中华民族共同体视域下的黄河河源文化[J]. 西华大学学报(哲学社会科学版), 2022, 41(2): 1-8. (Huang Jin, Li Houqiang, Liao Chongxu. Source culture of the Yellow River from the perspective of Chinese national community[J]. Journal of Xihua University (Philosophy & Social Sciences), 2022, 41(2): 1-8. (in Chinese))
- [25] Li Wei, Jiao Jianping, Qi Jianwu, et al. The spatial and temporal differentiation characteristics of cultural heritage in the Yellow River Basin[J]. PLoS One, 2022, 17(6): e0268921.
- [26] 伍光 and 王乃昂,胡双熙,等. 自然地理学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [27] 邓雅文,侯鹏,蒋卫国,等. 基于多特征指标和层次聚类分析的河源区范围自动划分方法研究[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(3): 469-482. (Deng Yawen, Hou Peng, Jiang Weiguo, et al. Automatic extraction of river source region boundary based on multi-characteristic indexes and hierarchical cluster analysis[J]. Journal of Geo-information Science, 2022, 24(3): 469-482. (in Chinese))
- [28] 樊杰,王亚飞,王怡轩. 基于地理单元的区域高质量发展研究: 兼论黄河流域同长江流域发展的条件差异及重点[J]. 经济地理, 2020, 40(1): 1-11. (Fan Jie, Wang Yafei, Wang Yixuan. High quality regional development research based on geographical units: discuss on the difference in development conditions and priorities of the Yellow River Basin compared to the Yangtze River Basin[J]. Economic Geography, 2020, 40(1): 1-11. (in Chinese))
- [29] 汪越骐,慕玮,丁晓,等. 莱茵河流域可持续发展案例研究[M]. 成都: 西南财经大学出版社, 2016.
- [30] 刘晓燕,王瑞玲,张原锋,等. 黄河河川径流利用的阈值[J]. 水利学报, 2020, 51(6): 631-641. (Liu Xiaoyan, Wang Ruiling, Zhang Yuanfeng, et al. Threshold of the runoff utilization of the Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(6): 631-641. (in Chinese))
- [31] 景唤,钟德钰,张红武,等. 河流过程的累积现象和随机模型[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 1079-1094. (Jing Huan, Zhong Deyu, Zhang Hongwu, et al. The accumulation phenomenon and stochastic model in fluvial processes[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 1079-1094. (in Chinese))
- [32] Wang Yue, Liu Yue, Luo Ying, et al. Research on the relative threshold of sustainable development of the complex system in the Yellow River Basin[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 472: 143448.
- [33] Chen Yiping, Wang Kaibo, Fu Bojie, et al. 65% cover is the sustainable vegetation threshold on the Loess Plateau[J]. Environmental Science and Ecotechnology, 2024, 22: 100442.
- [34] 肖洋,刘扬扬,王中敏,等. 引调水工程对汉江中下游水文情势的累积影响[J]. 水资源保护, 2025, 41(3): 161-170. (Xiao Yang, Liu Yangyang, Wang Zhongmin, et al. Cumulative influence of water diversion projects on hydrological regime of middle and lower reaches of the

- Hanjiang River[J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (3): 161-170. (in Chinese))
- [35] 刘昌明,刘小莽.从地球系统圈层互馈与地理综合角度探讨水循环研究[J].地理学报, 2023, 78(7): 1593-1598. (Liu Changming, Liu Xiaomang. Water cycle research from the perspective of earth system's sphere feedback and geographic synthesis[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(7): 1593-1598. (in Chinese))
- [36] 兰恒星,祝艳波,李郎平,等.黄河流域地质-地貌-气候多过程相互作用及其孕灾机制研究[J].中国科学基金, 2021, 35(4): 510-519. (Lan Hengxing, Zhu Yanbo, Li Langping, et al. Research on multi-process interaction of geology, geomorphology and climate in the Yellow River Basin and its gestation mechanisms on major disasters [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35(4): 510-519. (in Chinese))
- [37] Li Xin, Cheng Guodong, Lin Hui, et al. Watershed system model: the essentials to model complex human-nature system at the river Basin scale[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(6): 3019-3034.
- [38] 张航,郭雨臣,张红娟,等.极端高温对黄河流域经济增长的时空影响探测[J].地理学报, 2025, 80(5): 1353-1369. (Zhang Hang, Guo Yuchen, Zhang Hongjuan, et al. Spatio-temporal impacts of extreme heat on economic growth in the Yellow River Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2025, 80(5): 1353-1369. (in Chinese))
- [39] Yuan Xing, Wang Yumiao, Ji Peng, et al. A global transition to flash droughts under climate change [J]. Science, 2023, 380(6641): 187-191.
- [40] Wang Rong, Li Xianghu, Zhang Qi, et al. Projection of drought-flood abrupt alternation in a humid subtropical region under changing climate[J]. Journal of Hydrology, 2023, 624: 129875.
- [41] 刘成,王兆印,何耘,等.黄河下游治理方略的历史回顾[J].泥沙研究, 2020, 45(6): 67-73. (Liu Cheng, Wang Zhaoyin, He Yun, et al. Review on the historical control strategies of the Lower Yellow River [J]. Journal of Sediment Research, 2020, 45(6): 67-73. (in Chinese))
- [42] 王煜,彭少明,武见,等.黄河“八七”分水方案实施 30a 回顾与展望[J].人民黄河, 2019, 41(9): 6-13. (Wang Yu, Peng Shaoming, Wu Jian, et al. Review of the implementation of the Yellow River water allocation scheme for thirty years[J]. Yellow River, 2019, 41(9): 6-13. (in Chinese))
- [43] Shumilova O, Sukhodolov A, Osadcha N, et al. Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine[J]. Science, 2025, 387(6739): 1181-1186.
- [44] Shumilova O, Tockner K, Sukhodolov A, et al. Impact of the Russia-Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure [J]. Nature Sustainability, 2023, 6 (5): 578-586.
- [45] 尹北直.近代中国水利工程理念的变革:以民国前期官厅水库规划为例[J].自然辩证法通讯, 2019, 41(3): 18-25. (Yin Beizhi. The transformation of hydraulic engineering concepts in modern China: a research on planning of Kuan-Ting Reservoir in Early Republican China[J]. Journal of Dialectics of Nature, 2019, 41(3): 18-25. (in Chinese))
- [46] 谢宝华,韩广轩.入侵植物互花米草防治:理念、技术与实践[J].中国科学院院刊, 2023, 38(12): 1924-1938. (Xie Baohua, Han Guangxuan. Control of invasive plant *Spartina alterniflora*: concept, technology and practice[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(12): 1924-1938. (in Chinese))
- [47] 兰恒星,彭建兵,祝艳波,等.黄河流域地质地表过程与重大灾害效应研究与展望[J].中国科学:地球科学, 2022, 52(2): 199-221. (Lan Hengxing, Peng Jianbing, Zhu Yanbo, et al. Research on geological and surfacial processes and major disaster effects in the Yellow River Basin [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2022, 52(2): 199-221. (in Chinese))
- [48] 彭建兵,兰恒星,钱会,等.宜居黄河科学构想[J].工程地质学报, 2020, 28(2): 189-201. (Peng Jianbing, Lan Hengxing, Qian Hui, et al. Scientific research framework of livable Yellow River [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 189-201. (in Chinese))
- [49] Kotz M, Levermann A, Wenz L. The effect of rainfall changes on economic production [J]. Nature, 2022, 601 (7892): 223-227.
- [50] 刘国纬.江河治理的地学基础[M].北京:科学出版社, 2017.
- [51] 左其亨,张志卓,马军霞.我国现代治水研究进展与展望[J].水利水电科技进展, 2025, 45(5): 102-111. (Zuo Qiting, Zhang Zhizhuo, Ma Junxia. Progress and prospects of modern water control research in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45 (5): 102-111. (in Chinese))
- [52] 曹永强,刘子华,常隼宇,等.种植制度对中国主粮农田补水需求量时空特征的影响[J].水利水电科技进展, 2025, 45(5): 148-154. (Cao Yongqiang, Liu Zihua, Chang Huanyu, et al. Impact of cropping systems on spatiotemporal characteristics of irrigation water demand in China's staple croplands [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45 (5): 148-154. (in Chinese))
- [53] Best J. Anthropogenic stresses on the world's big rivers [J]. Nature Geoscience, 2019, 12(1): 7-21.
- [54] Best J, Darby S E. The pace of human-induced change in large rivers: stresses, resilience, and vulnerability to extreme events[J]. One Earth, 2020, 2(6): 510-514.
- [55] 张原锋,王平,张凯文.黄河水沙调控技术及应用实践

- 综述[J]. 水利发展研究, 2025, 25(2): 6-12. (Zhang Yuanfeng, Wang Ping, Zhang Kaiwen. Review on water-sediment regulation technology and practice[J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(2): 6-12. (in Chinese))
- [56] 李肇桀, 张旺, 刘璐. 大力发展新质生产力助推水利高质量发展: 关于水利行业发展新质生产力的认识和思考[J]. 水利发展研究, 2024, 24(6): 1-6. (Li Zhaojie, Zhang Wang, Liu Lu. Boosting high-quality development of water conservancy by vigorously developing new quality productive forces: understanding and thoughts on developing new quality productive forces in the water sector[J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(6): 1-6. (in Chinese))
- [57] 姚文艺, 肖培青, 张文敏. 黄河流域水土保持发展过程及高质量发展面临的科学挑战[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(5): 36-46. (Yao Wenyi, Xiao Peiqing, Zhang Wenmin. Development process of soil and water conservation in the Yellow River Basin and scientific challenges for its high-quality development[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(5): 36-46. (in Chinese))
- [58] Yang Kun, Peng Minggang, Huang Jiying. Ambiguity in China's integrated water resources management: the case of the Yuan River Basin comprehensive planning[J]. Humanities and Social Sciences Communications, 2026, 13(1): 421.
- [59] 于宏源, 李坤海. 中亚“水-能源-粮食”安全纽带: 困境、治理及中国参与[J]. 俄罗斯东欧中亚研究, 2021(1): 84-105. (Yu Hongyuan, Li Kunhai. “water-energy-food” security ties in central Asia: dilemma, governance and China's participation[J]. Russian, East European and Central Asian Studies, 2021(1): 84-105. (in Chinese))
- [60] Atef S S, Sadeqinazhad F, Farjaad F, et al. Water conflict management and cooperation between Afghanistan and Pakistan[J]. Journal of Hydrology, 2019, 570: 875-892.
- [61] Tian Peipei, Zhong Honglin, Chen Xiangjie, et al. Keeping the global consumption within the planetary boundaries[J]. Nature, 2024, 635(8039): 625-630.
- [62] 张汶海, 邓翠玲, 佟宇晨, 等. 中国推动澜湄流域水资源合作的模式与经验总结[J]. 水利发展研究, 2025, 25(7): 53-59. (Zhang Wenhai, Deng Cuiling, Tong Yuchen, et al. Models and experiences of China's promotion of water resources cooperation in the Lancang-Mekong River Basin[J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(7): 53-59. (in Chinese))
- [63] 冯钧, 邵萍萍, 张继茹, 等. 物理引导数据驱动方法研究综述及其在水文模型构建中的应用与展望[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(5): 1-9. (Feng Jun, Shao Pingping, Zhang Jiru, et al. Research review of physics-guided data-driven methods and their application and prospects in hydrological model development[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(5): 1-9. (in Chinese))
- [64] 杨雨蒙, 石朋, 瞿思敏, 等. 不同误差校正方法在衢江流域洪水预报中的应用对比[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(3): 8-14. (Yang Yumeng, Shi Peng, Qu Simin, et al. Application comparison of different error correction methods in flood forecasting in Qujiang River watershed[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(3): 8-14. (in Chinese))
- [65] 陆卞和, 王沛芳, 钱进, 等. 农田生态系统中新污染物的生态环境效应与去除技术研究[J]. 水资源保护, 2025, 41(3): 244-254. (Lu Bianhe, Wang Peifang, Qian Jin, et al. Research on ecological and environmental effects and removal technologies of emerging contaminants in agricultural ecosystems[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(3): 244-254. (in Chinese))
- [66] 张倩. 黄河流域横向生态补偿的协同治理困境与实践路径[J]. 人民黄河, 2023, 45(8): 54-58. (Zhang Qian. Synergistic governance dilemma and practical approach of horizontal ecological compensation in the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2023, 45(8): 54-58. (in Chinese))
- [67] Wang Xuanxuan, Chen Yaning, Li Zhi, et al. Water resources management and dynamic changes in water politics in the transboundary river basins of Central Asia[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25(6): 3281-3299.
- [68] 赵玉明. 中亚地区水资源问题: 美国的认知、介入与评价[J]. 俄罗斯东欧中亚研究, 2017(3): 79-89. (Zhao Yuming. Water resource problem in Central Asia: American cognition, intervention and evaluation[J]. Russian, East European and Central Asian Studies, 2017(3): 79-89. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-11-19 编辑: 施业)