

引用格式:王帅,宋爽,刘焱序,等.科学调控人水关系 促进黄河流域人水和谐.中国科学院院刊,2025,40(8):1347-1356,doi:10.3724/j.issn.1000-3045.20241224001.
Wang S, Song S, Liu Y X, et al. Scientifically improving integrated water governance for resilient flow of the Yellow River. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2025, 40(8): 1347-1356, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20241224001. (in Chinese)

科学调控人水关系 促进黄河流域人水和谐

王帅¹ 宋爽¹ 刘焱序¹ 武旭同¹ 江恩慧² 傅伯杰^{3*}

1 北京师范大学 地理科学学部/地表过程与水土风沙灾害风险防控全国重点实验室 北京 100875

2 黄河水利科学研究院 郑州 450003

3 中国科学院生态环境研究中心 区域与城市生态安全全国重点实验室 北京 100085

摘要 黄河水土流失严重与河道断流的态势已得到基本遏制,但人水关系矛盾突出的情势并没有改变,科学调控人水关系成为新时期黄河流域高质量发展的重要需求。文章总结了黄河流域人水系统变化的基本情势,认为主要表现为输沙量显著下降、水资源短缺加剧、人水关系显著改变3个特点,黄河流域可持续发展面临垂向水循环通量持续增大、自然水资源存量持续减少、局部功能性断流仍然存在、制度影响机制分析不足4项重点挑战。基于对黄河细水长流自然属性及流域人水耦合的理论认识,文章提出未来科技攻关方向应推进水储量的基础数据采集与监测、加强水利基础设施工程与制度建设、施行地表水与地下水的联合管理、完善生态保护修复与补偿机制等,稳定水通量、保护水存量,维系黄河细水长流。

关键词 黄河流域,人水关系,流域综合管理,生态水文,可持续发展

DOI 10.3724/j.issn.1000-3045.20241224001

CSTR 32128.14.CASbulletin.20241224001

黄河流经青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和华北平原等区域,是中华文明的摇篮,也是受人类活动影响最为剧烈的流域之一^[1-3]。黄土高原人类活动曾导致严重的水土流失,使黄河成为全球泥沙负荷最高的

河流之一^[4,5]。黄河流经华北平原时流速减缓,泥沙沉积,使下游河道不断抬升,形成“地上悬河”,频发的干旱和洪水灾害也使其成为中国的“忧患之河”^[1,6]。黄河还长期面临水资源短缺,其径流量仅占

*通信作者

资助项目:国家自然科学基金专项项目(42041007),国家自然科学基金联合基金项目(U2243601)

修改稿收到日期:2025年3月27日

全国年径流量的2%，但承担着全国15%耕地和12%人口的供水任务；水资源的开发利用率接近80%，远超全球公认的40%重度用水压力线^[7]。长期以来，黄河水沙异源、水少沙多的基本特征对应着诸多生态问题，如流域上游生态系统退化、中游水土流失严重、下游生态流量不足等^[4,8-10]。

黄河水沙调控能力近年来显著提升。①通过大规模的水利工程建设、植被恢复和水土保持工程，黄河泥沙入海量减少了90%以上，沙多问题得到了大幅度控制^[11]。②工程措施和严格的水资源管理显著提高了水资源利用效率，缓解了用水增加导致的黄河径流量下降，基本解决了干流断流问题，但供需矛盾仍然突出^[12]。例如，自小浪底水利枢纽工程运行以来，黄河流域的主要水库容量已远超过其多年平均径流量，能够有效地调节水流和泥沙输送^[13]。③生态恢复和农业灌溉促进了黄河流域植被绿化趋势，但也造成了蒸散发量增加、水分消耗过大等问题^[14-18]。

综上所述，过去几十年间强烈的人类活动已深刻改变了黄河流域的水文循环及水土流失、泥沙运输和沉积的过程，但黄河人水关系矛盾突出的基本情势没有改变，减沙的同时也减了水，加剧水资源供需矛盾，导致开发利用程度居高不下，科学提升流域综合管理能力成为新时期黄河流域高质量发展的重要需求^[19]。本文梳理了黄河流域水文要素的显著变化及其生态影响，总结了黄河流域可持续发展面临的重点挑战，就实现黄河流域人水关系和谐与高质量发展提出了相关对策建议。

1 黄河水文系统的变化情势

1.1 输沙量显著下降

“水少沙多、水沙异源”一直是黄河治理复杂性的主要原因。黄河曾是世界上含沙量最大的河流，20世纪最大年输沙量一度超过16亿吨^[11]。中游的黄土高原曾是全球水土流失最为严重的地区，是黄河泥沙

的主要来源区^[11,20,21]。黄河下游泥沙沉积、河床抬高，导致了黄河在历史时期发生了频繁的改道与洪灾^[6,22]；泥沙在入海口附近沉积，造成黄河三角洲面积持续增长^[23,24]。

黄河沙多的问题已通过人为治理得到了大幅度控制。自20世纪70年代以来，大规模的水土保持工程和植被恢复措施显著减少了土壤侵蚀的面积与强度^[17,21,25,26]，万家寨水利枢纽工程、小浪底水利枢纽工程等干流水利工程的建设运行，大幅减少了泥沙量，并通过水沙调节改变了泥沙的时空分布^[12,24,27-31]，泥沙含量也大幅度下降^[11,22,31]。因此，黄河沙多的特征在近年来发生显著改变，其主要原因就是人类活动的影响^[33,34]。

黄河输沙量的大幅减少也引发了新的挑战。输沙量的下降使下游河床淤积抬升问题得到了明显缓解，2000年以来，河床冲刷下切有效降低了黄河下游洪涝灾害风险^[29,34-36]，但也导致下游引水工程普遍面临取水困难的问题^[37-39]。同时，干流水利工程建设也导致悬河段不断向上游回溯，如宁夏段河床已明显抬升。对黄河三角洲而言，来沙量下降导致了造陆面积下降，部分区域已转为蚀退，制约湿地扩张并带来现有湿地损失的风险，进而对生物多样性造成损害^[24,30,40]。因此，尽管输沙量下降在一定程度上缓解了黄河中下游的防洪压力，但也在生态、水文、社会多方面带来了新的挑战。

1.2 水资源短缺加剧

黄河流域一直面临着严重的水资源短缺问题，其人均水资源量约为400立方米，远低于我国人均2055立方米和世界人均7350立方米，也低于国际公认的500立方米极度缺水线^[2,7]。近年来，随着人口增长、城市化和工业化的加速，黄河流域的水资源需求持续增加，大量水库、引水工程的建设加剧了水资源的开发利用^[2,13,41]。当前，黄河流域的水资源开发利用率已经超过80%^[7]，虽然因过度开发引起的长时间断

流问题已得到解决,但部分河段仍面临季节性断流和功能性断流的威胁^[8,41-43]。在以上背景下,黄河流域的水循环过程发生剧烈改变,蒸散发显著增加^[14,44],地下水、土壤水分和冰川储量持续减少^[45-47],将过去缺水矛盾从干流转移到支流、从河道转移到坡面、从地表转移到地下、从集中性破坏转变为均匀破坏^[48,49],而这些水资源存量的不断减少意味着黄河流域的生态系统在面对未来气候风险时将变得更加脆弱。

1.3 人水关系显著改变

人类活动是黄河流域水文系统变化的主导力量,通过大规模的水利工程建设和流域综合管理政策的制定,最大化地利用和调控水资源,以满足农业、工业、城市生活及生态保护的多重需求。**① 通过水利工程建设水沙调控能力大幅提升。**20世纪中期的黄河流域治理强调通过工程手段对流域系统进行全面控制。例如,黄河上游和中游修建的三门峡水利枢纽工程、龙羊峡水利枢纽工程、万家寨水利枢纽工程等,不仅用于防洪、发电,还承担了灌溉、城市供水的功能。这些水利工程在支撑对黄河流量和泥沙的大规模调控、服务经济发展的同时,也持续压缩了维系流域生态功能的水资源,导致20世纪80年代出现频繁断流与严重生态退化的情况,迫使一系列针对黄河水治理改革的制度出台。**② 分水方案和统一调度政策效应明显体现。**1987年制定的黄河水资源分配方案是我国第一个流域分水方案,对于推进水资源科学分配和高效利用具有重大突破和示范意义。进入21世纪后,黄河流域的用水效率和生态用水优先级已得到了显著提升,并采取“最严格水资源管理制度”等措施平衡经济发展与生态保护之间的关系。这些政策有效控制了用水需求过快增长,协调了各地区用水关系,实现了黄河干流20多年不断流。然而,当前的水资源分配体系趋于僵化,不再适应当下经济形势及各地区用水结构的变化,加之制度通常存在路径依赖,若不及时出台适宜现状的管理方案,将难以应对未来环境变化与

随之而来的气候和生态风险。**③ 用水压力持续增大,水少成为主要矛盾。**如前所述,黄河沙多的问题得到了大幅度控制,但水少的形势还在向着更加不利的方向演化。社会经济发展需水量增加,同时黄河还承担着流域外的供水任务,水少问题不仅不能缓解,而且还将越来越严重。

2 黄河流域可持续发展重点挑战

2.1 垂向水循环通量持续增大

在“自然—人工”二元水循环框架下,水循环的垂向通量包括自然过程与社会过程对水的消耗,如蒸散发与取耗水等。近年来,气候变化和人类活动影响下,黄河流域生态需水等的自然过程水消耗量和人类用水等的社会过程水消耗量都在增长,黄河流域垂向水循环加剧。**① 自然过程。**主要是植被恢复与农业扩张使植被蒸腾作用增长显著^[14,51],导致黄河流域蒸散发量显著上升,相应增加了降水及水汽循环率。过去20年间源区降水量也有所增加,上游径流量表现稳定甚至略有增加,中下游径流量也逐渐回升并且趋于稳定^[13]。**② 社会过程。**城市化进程加速和工业发展,也使流域内人类社会更加依赖于水资源,尽管用水效率也在不断上升,但年均流域用水需求仍呈总体上升趋势,用水矛盾以中下游地区最为严峻。据黄河水资源公报的数据显示,人类用水占天然径流量的比例已从20世纪50年代的不足20%急剧攀升至21世纪以来的85%以上^[49],并在未来短期内无法达到拐点^[51,52]。

2.2 自然资源存量持续减少

尽管水循环通量不断增加,黄河流域的地下水、冰川积雪、土壤水等自然资源存量却持续减少,这些不同形式的自然资源存量的减少威胁到了流域生态系统的稳定性和可持续性,并加剧了水资源的短缺问题,预示着未来可能面临更为严重的水资源危机。**① 地下水。**黄河流域地下水被过度开采且开采总量仍呈上升趋势,同时地表用水增加使能够给予地下水的

补给量下降,因此地下水储量总体呈显著下降趋势^[53]。地下水位的不断下降还引发了地面沉降等一系列问题,黄河流域的城市和中下游农业目前大量依赖地下水作为主要的供水来源,银川平原、华北平原等地都出现了严重的地下水漏斗区^[47]。② **冰川积雪**。黄河流域源区的冰川、冻土等也是径流的重要来源之一,然而随着高原气候变暖的加剧,冰川面积和冻土深度均显著下降,冰川消退和积雪融化的加速导致黄河源区的水资源存量呈显著下降趋势^[47,54]。③ **土壤水**。生态恢复导致的土地利用转换(如从农田转为森林/草地)是区域土壤水分亏缺的主要驱动力,并且这种亏缺会随时间逐渐加剧^[46]。植被增加在改善生态环境方面发挥了重要作用,但也导致了土壤水的过度消耗^[55-58]。

2.3 局部功能性断流仍然存在

黄河“垂向通量增大、自然存量减少”的水文情势是人类影响和压力持续增加导致的结果。目前,局部功能性断流的现象仍然存在^[8,42,59]。例如,在枯水季期间的流域中下游地区,汾河、沁河、大汶河等部分支流的径流量仍时常不能满足水体自净、河道输沙、湿地维持等方面的需求^[43,60]。黄河的功能性断流不仅对沿岸的工农业用水和城市供水构成威胁,还对河道功能及流域的生态系统造成了严重影响^[60-63],以河口三角洲、乌梁素海、开封柳园口等中下游河滩地为代表的关键湿地生态系统的结构、功能与生物多样性受到严重威胁^[60,61]。随着未来干流水库因不断淤积而丧失调蓄能力,黄河的局部功能性断流的问题将更加严峻。

2.4 制度影响的强度与机制分析不足

随着黄河流域生态保护和高质量发展成为国家战略,上述人水关系矛盾突出的问题已得到高度重视。国家层面颁布了《中华人民共和国黄河保护法》,水利部及相关部委出台了“四水四定”等相关条例、开展了水权交易等政策试点,旨在通过制度建设促进人

水关系和谐。然而,黄河治理的紧迫性致使制度实践先于制度分析,目前的制度分析主要基于经验和理论,对政策影响的外溢效应及人水互馈机理认识不足。同时,由于流域内各方利益相关者的复杂性,制度的改革和调整难度极大,易因路径依赖造成灵活性和韧性的缺乏。例如,“八七”分水方案是基于1980年用水情况进行的指标分配,如今已与当下社会经济发展形势与生态系统功能维系有所脱节。因此,对高度依赖于行政手段和工程控制的黄河流域管理过程,应及时厘清人水系统结构,定量分析制度建设与制度改革对人水关系的短期与长期影响,进而指导相关制度的优化、改革工作,为黄河流域治理提供科学依据。

3 科学推进流域综合管理以保障黄河人水和谐

重塑人水关系就是重塑人与自然的关系,事关黄河流域的生态保护与高质量发展。黄河是中国第二长河,全长约5 464公里,流域总面积79.5万平方公里,但天然年径流量小于长江、珠江、松花江,是长江的1/17^[7,64],长期自然条件形成了河道长但径流少的适应性格局。当前,黄河沙多的特点已基本得到改变,但黄河流域水资源通量显著增大、存量持续减少,已经不再符合细水长流的自然属性,人水矛盾依然突出。为应对上述人水关系变化及其挑战,本文提出应从基础数据监测与设施建设入手,推进地表水与地下水联合管理,结合生态保护修复和转移支付等手段,减小通量、保护存量、科学治理,优化黄河全流域水资源配置。

3.1 推进水储量的基础数据采集与监测

黄河流域的水资源储量正在持续减少,资源性缺水的基本情形预计在未来短时间内不会改变,这对水资源可持续高效利用提出较高要求。在灌区建设与城市工业用水领域的既有经验表明,精细的测量有助于

明确核算水资源利用的成本与收益，是支撑高效节水建设的基础。黄河流域在进库出库、径流断面、灌溉引水渠等通量水的监测方面走在全国前列，这是保证生态安全、社会公平、经济效率的重要基础，对于落实“四水四定”至关重要。然而，黄河流域对当前水资源存量的评估则主要依赖于大尺度的模型和遥感数据，数据不确定性较高，水存量数据不可得、不可见、不可用是制约生态与水文模型发展与流域水资源管理实践的重要因素。因此，建议从2个方面推进水储量的基础数据采集与监测。① **非常规水资源存量调查监测**。尤其需要注重全流域地下水、冰川水、土壤水等存量水资源的基础数据采集，在局部地区还应开展矿井水、冰凌水、再生水等非常规水资源的存量调查。② **数据动态监测与公开共享**。进一步完善动态监测网络、健全数据公开共享机制，让基础数据服务于支撑流域尺度的高精度水文模型，从而科学建设覆盖全流域取用水总量控制体系，合理配置干支流水资源并强化地下水水位管控，助力中下游地下水超采漏斗治理。

3.2 加强水利基础设施工程与制度建设

人类活动成为黄河流域水文系统变化的主导力量，水利基础设施工程与制度建设在流域综合管理中扮演着至关重要的角色，需随着经济社会与气候变化不断升级和优化。① **应对极端气候**。由于气候变化引发的极端降雨事件增加，黄河流域暴雨侵蚀和大洪水风险加剧，现有拦沙基础设施的容量正在减小，有必要进一步完善黄河干流水沙调控工程体系，从而进一步优化水沙关系，提升河道过流能力，增强下游河道的防洪能力，应对未来洪水与凌汛带来的潜在威胁。然而，由于水库的不断淤积，依赖水利工程建设控制河流存在局限性和不可持续性，就可通过生态补偿机制等制度建设引导加强淤沙资源再利用等工作。② **应对水资源短缺**。当务之急如稳步优化调整“八七”分水方案、构建高效的水资源保障管理体系，通

过建立用户、部门、省（自治区）、流域4级水市场，推动跨域调水机制、季节性水量交易以及长期水权交易，结合水资源费改税和水价合理化等经济激励手段促进节水行为的实施。③ **水利基础设施工程与制度建设有机融合**。将工程与制度设施利用现代智慧水利技术结合，通过水联网、大数据、数字孪生等技术手段提升决策与调控效率。

3.3 施行地表水与地下水的联合管理

地下水的过度开采在黄河中下游地区形成了严重的“漏斗”效应，强化地下水水位管控，加快地下水超采区的治理成为当务之急。① **加强模拟预测能力**。为确保水资源的可持续利用，应建立覆盖全流域的取水总量控制体系，以精细化的动态监测为基础，采取数字孪生等手段，对地表水或地下水开采带来的水文效应进行模拟，对政策制定后的外溢效应进行定量评估，全面推进“四水四定”，落实《中华人民共和国黄河保护法》中提出的地下水统一管理策略。② **及时治理超采地区**。在流域人地系统耦合模型、数字孪生等技术支撑下，针对不同地区地表、地下水的情况不同制定差异化的治理模式，大力治理银川平原和华北平原等地下水漏斗地区。③ **合理配置域内外资源**。基于“四横三纵”国家水资源配置总体格局，科学配置南水北调东中线水量，合理配置南水北调的调水量并置换引黄用水量，及时调整相应的地表、地下水的引水指标，减轻黄河引水的压力。

3.4 完善生态保护修复与补偿机制

生态保护修复需要大量水资源支撑，如黄河河源区三江源、甘南、祁连山等重点地区的水源保护，黄河中游黄土高原的水土保持与植被恢复，黄河下游河口地区黄河三角洲的湿地保护与生态修复等；各地水资源使用效率与回报率存在明显差异，使得水资源向更具有经济效率的地区和部门倾斜。以上情况都加剧了黄河流域的水资源分配与使用的不平衡，使流域整体人水关系矛盾突出，因此在黄河局部功能性断流的

背景下,流域生态保护与修复工程需在科学支撑下有针对性地持续推进。① 完善流域生态补偿机制。除逐步优化调整“八七”分水方案等现行的水资源配置外,还可以引入合理的资金转移支付机制,以促进水资源在不同区域的均衡分配与使用。例如,人均用水量较高(如黄河上游)、单位水资源产出较大(黄河中下游)的区域提供更多的转移支付资金给生态保护责任更重的区域(如黄河源区),以支持水土保持与水源涵养。② 生态保护修复与水权交易相结合。通过将生态保护修复转移支付的义务与水权交易相结合,并在地区尺度实施,使生产效率较高的地区在购置水资源发展经济的同时承担更多生态义务。这种资金调配不仅能够缓解区域水资源压力,还能促进黄河流域各地市通过地区间合作实现资源和经济效益的双赢。

参考文献

- Pietz D A. The Yellow River: The Problem of Water in Modern China. Massachusetts: Harvard University Press, 2015.
- Ringler C, Cai X M, Wang J X, et al. Yellow River basin: Living with scarcity. *Water International*, 2010, 35(5): 681-701.
- Wohlfart C, Kuenzer C, Chen C, et al. Social-ecological challenges in the Yellow River basin (China): A review. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(13): 1066.
- Wu X T, Wei Y P, Fu B J, et al. Evolution and effects of the social-ecological system over a millennium in China's Loess Plateau. *Science Advances*, 2020, 6(41): eabc0276.
- Song S, Wang S, Fu B J, et al. Sediment transport under increasing anthropogenic stress: Regime shifts within the Yellow River, China. *AMBIO*, 2020, 49(12): 1-11.
- Chen Y Z, Syvitski J P M, Gao S, et al. Socio-economic impacts on flooding: A 4000-year history of the Yellow River, China. *AMBIO*, 2012, 41(7): 682-698.
- 傅伯杰, 王帅, 沈彦俊, 等. 黄河流域人地系统耦合机理与优化调控. *中国科学基金*, 2021, 35(4): 504-509.
Fu B J, Wang S, Shen Y J, et al. Mechanisms of human-natural system coupling and optimization of the Yellow River basin. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2021, 35(4): 504-509. (in Chinese)
- Ni J R, Qian Z H. Functional no-flow events and their identification in the Lower Yellow River. *Science in China Series E: Technological Science*, 2002, 45(5): 449-457.
- Qiu M Q, Liu Y X, Tian F Y, et al. Marsh decrease was much faster than the water increase among the Yellow River Source wetlands during 1986-2022. *Science of The Total Environment*, 2024, 947: 174377.
- 郑子彦, 吕美霞, 马柱国. 黄河源区气候水文和植被覆盖变化及面临问题的对策建议. *中国科学院院刊*, 2020, 35(1): 61-72.
Zheng Z Y, Lyu M X, Ma Z G. Climate, hydrology, and vegetation coverage changes in source region of Yellow River and countermeasures for challenges. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(1): 61-72. (in Chinese)
- Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 38-41.
- Song S, Wang S, Wu X T, et al. Identifying regime transitions for water governance in the Yellow River basin, China. *Water Resources Research*, 2023, 59(12): e2022WR033819.
- Wang Y P, Zhao W W, Wang S, et al. Yellow River water rebalanced by human regulation. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1-10.
- Jiang Z Y, Yang Z G, Zhang S Y, et al. Revealing the spatio-temporal variability of evapotranspiration and its components based on an improved Shuttleworth-Wallace model in the Yellow River basin. *Journal of Environmental Management*, 2020, 262: 110310.
- Xu S, Yu Z, Yang C, et al. Trends in evapotranspiration and their responses to climate change and vegetation greening over the upper reaches of the Yellow River basin. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 263: 118-129.
- Bryan B A, Gao L, Ye Y Q, et al. China's response to a national land-system sustainability emergency. *Nature*, 2018, 559: 193-204.

- 17 Liu J G, Li S X, Ouyang Z Y, et al. Ecological and socioeconomic effects of China's policies for ecosystem services. *PNAS*, 2008, 105(28): 9477-9482.
- 18 Liu C X, Zhang X D, Wang T, et al. Detection of vegetation coverage changes in the Yellow River basin from 2003 to 2020. *Ecological Indicators*, 2022, 138: 108818.
- 19 江恩慧, 王远见, 田世民, 等. 流域系统科学初探. *水利学报*, 2020, 51(9): 1026-1037.
- Jiang E H, Wang Y J, Tian S M, et al. Exploration of watershed system science. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(9), 1026-1037. (in Chinese)
- 20 Wang H J, Yang Z S, Saito Y, et al. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950-2005): Impacts of climate change and human activities. *Global and Planetary Change*, 2007, 57(3): 331-354.
- 21 Fu B J, Wang S, Liu Y, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45(1): 223-243.
- 22 Wu X L, Feng X M, Fu B J, et al. Managing erosion and deposition to stabilize a silt-laden river. *Science of The Total Environment*, 2023, 881: 163444.
- 23 Saito Y, Yang Z S, Hori K. The Huanghe (Yellow River) and Changjiang (Yangtze River) deltas: A review on their characteristics, evolution and sediment discharge during the Holocene. *Geomorphology*, 2001, 41(2): 219-231.
- 24 Peng J, Chen S L, Dong P. Temporal variation of sediment load in the Yellow River basin, China, and its impacts on the lower reaches and the river delta. *CATENA*, 2010, 83(2-3): 135-147.
- 25 Yin R S, Yin G P, Li L Y. Assessing China's ecological restoration programs: What's been done and what remains to be done?. *Environmental Management*, 2010, 45(3): 442-453.
- 26 Qiu Z Q, Liu D, Duan M W, et al. Four-decades of sediment transport variations in the Yellow River on the Loess Plateau using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2024, 306: 114147.
- 27 Best J. Anthropogenic stresses on the world's big rivers. *Nature Geoscience*, 2019, 12(1): 7-21.
- 28 Wang H J, Wu X, Bi N S, et al. Impacts of the dam-orientated water-sediment regulation scheme on the lower reaches and delta of the Yellow River (Huanghe): A review. *Global and Planetary Change*, 2017, 157: 93-113.
- 29 Kong D X, Miao C Y, Wu J W, et al. The hydro-environmental response on the lower Yellow River to the water-sediment regulation scheme. *Ecological Engineering*, 2015, 79: 69-79.
- 30 Kong D X, Miao C Y, Zheng H Y, et al. Dynamic evolution characteristics of the Yellow River Delta in response to estuary diversion and a water-sediment regulation scheme. *Journal of Hydrology*, 2023, 627: 130447.
- 31 Kondolf G, Gao Y X, Annandale G, et al. Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents. *Earth's Future*, 2014, 2(5): 256-280.
- 32 Wang H J, Bi N S, Saito Y, et al. Recent changes in sediment delivery by the Huanghe (Yellow River) to the sea: Causes and environmental implications in its estuary. *Journal of Hydrology*, 2010, 391(3-4): 302-313.
- 33 Li H, Ping J H, Liu C S, et al. Changes in sediment load in the Lower Yellow River and its driving factors from 1919 to 2021. *Science of The Total Environment*, 2024, 946: 174012.
- 34 吴晓, 范勇勇, 王厚杰, 等. 黄河下游与河口对2015—2017年调水调沙中断的沉积响应. *科学通报*, 2021, 66(23): 3059-3070.
- Wu X, Fan Y Y, Wang H J. Geomorphological responses of the lower river channel and delta to interruption of reservoir regulation in the Yellow River, 2015-2017. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(23): 3059-3070. (in Chinese)
- 35 刘欣, 刘远征. 小浪底水库调水调沙以来黄河下游游荡河段河床演变研究. *泥沙研究*, 2019, 44(5): 56-59.
- Liu X, Liu Y Z. Fluvial processes of channel geometry in wandering reach of the Lower Yellow River since water-sediment regulation of Xiaolangdi reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2019, 44(5): 56-59. (in Chinese)
- 36 侯志军, 孙赞盈, 侯俊建. 黄河下游防洪形势分析. *泥沙研究*, 2018, 43(5): 65-72.
- Hou Z J, Sun Z Y, Hou J J. Analysis on flood control situation in the Lower Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 2018, 43(5): 65-72. (in Chinese)
- 37 黄继文, 宫永波, 林琳, 等. 黄河调水调沙对下游山东段的

- 不利影响. 水资源保护, 2012, 28(1): 9-12.
- Huang J W, Gong Y B, Lin L, et al. Adverse influences of water and sediment regulation on lower reach of Yellow River in Shandong Province. Water Resources Protection, 2012, 28(1): 9-12. (in Chinese)
- 38 李素梅, 王瑞, 张锡林. 人民胜利渠渠首引水问题研究与建议. 中国水利, 2014, (16): 44-46.
- Li S M, Wang R, Zhang X L. Studies on issues related to water diversion at head of People's Victory Canal and recommendations. China Water Resources, 2014, (16): 44-46. (in Chinese)
- 39 于晓龙, 李希宁. 黄河调水调沙以来山东引黄能力分析. 人民黄河, 2011, 33(12): 85-87.
- Yu X L, Li X N. Analysis of the Yellow River diversion capacity in Shandong Province since the implementation of water-sediment regulation. Yellow River, 2011, 33(12): 85-87. (in Chinese)
- 40 Kong D X, Miao C Y, Borthwick A G L, et al. Evolution of the Yellow River Delta and its relationship with runoff and sediment load from 1983 to 2011. Journal of Hydrology, 2015, 520: 157-167.
- 41 Xu Z X, Takeuchi K, Ishidaira H, et al. An overview of water resources in the Yellow River basin. Water International, 2005, 30(2): 225-238.
- 42 赵勇, 何凡, 何国华, 等. 全域视角下黄河断流再审视与现状缺水识别. 人民黄河, 2020, 42(4): 42-46.
- Zhao Y, He F, He G H, et al. Review the phenomenon of Yellow River cutoff from a whole perspective and identification of current water shortage. Yellow River, 2020, 42(4): 42-46. (in Chinese)
- 43 于守兵, 凡姚申, 余欣, 等. 黄河河口生态需水研究进展与展望. 水利学报, 2020, 51(9): 1101-1110.
- Yu S B, Fan Y S, Yu X, et al. Advances and prospects of ecological water demands in the Yellow River Estuary. Journal of Hydraulic Engineer, 2020, 51(9): 1101-1110. (in Chinese)
- 44 Li C Y, Yuan X, Jiao Y, et al. High-resolution land surface modeling of the irrigation effects on evapotranspiration over the Yellow River basin. Journal of Hydrology, 2024, 633: 130986.
- 45 Lou D, Wang G J, Shan C, et al. Changes of soil moisture from multiple sources during 1988-2010 in the Yellow River basin, China. Advances in Meteorology, 2018, (1): 1950529.
- 46 Wang Y Q, Hu W, Sun H, et al. Soil moisture decline in China's monsoon loess critical zone: More a result of land-use conversion than climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2024, 121(15): e2322127121.
- 47 韩双宝, 李甫成, 王赛, 等. 黄河流域地下水资源状况及其生态环境问题. 中国地质, 2021, 48(4): 1001-1019.
- Han S B, Li F C, Wang S, et al. Groundwater resource and eco-environmental problem of the Yellow River basin. Geology in China, 2021, 48(4): 1001-1019. (in Chinese)
- 48 杨大文, 杨雨亭, 高光耀, 等. 黄河流域水循环规律与水土过程耦合效应. 中国科学基金, 2021, 35(4): 544-551.
- Yang D W, Yang Y T, Gao G Y, et al. Water cycle and soil-water coupling processes in the Yellow River basin. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35(4): 544-551. (in Chinese)
- 49 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. 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. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(1): 52-60. (in Chinese)
- 50 Chen S Y, Tian L, Zhang B Q, et al. Quantifying the impact of large-scale afforestation on the atmospheric water cycle during rainy season over the Chinese Loess Plateau. Journal of Hydrology, 2023, 619: 129326.
- 51 赵勇, 李海红, 刘寒青, 等. 增长的规律: 中国用水极值预测. 水利学报, 2021, 52(2): 129-141.
- Zhao Y, Li H H, Liu H Q, et al. The law of growth: Prediction of peak water consumption in China. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(2): 129-141. (in Chinese)
- 52 Liu K, Bo Y, Li X K, et al. Uncovering current and future variations of irrigation water use across China using machine learning. Earth's Future, 2024, 12(3): e2023EF003562.
- 53 Zhang K, Xie X H, Zhu B W, et al. Unexpected groundwater recovery with decreasing agricultural irrigation in the Yellow River basin. Agricultural Water Management, 2019, 213: 858-867.
- 54 王浩, 胡鹏. 水循环视角下的黄河流域生态保护关键问题. 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. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(9): 1009-1014. (in Chinese)
- 55 Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(4): 437-448.
- 56 Jia X X, Shao M A, Zhu Y J, et al. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 113-122.
- 57 Ge J, Pitman A J, Guo W D, et al. Impact of revegetation of the Loess Plateau of China on the regional growing season water balance. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, 24(2): 515-533.
- 58 Wang X X, Xiao X M, Zou Z H, et al. Gainers and losers of surface and terrestrial water resources in China during 1989-2016. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3471.
- 59 李剑锋, 张强, 陈晓宏, 等. 考虑水文变异的黄河干流河道内生态需水研究. *地理学报*, 2011, 66(1): 99-110.
- Li J F, Zhang Q, Chen X H, et al. Study of ecological instream flow in Yellow River, considering the hydrological change. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 99-110. (in Chinese)
- 60 邱梦琪, 韩美, 焦晨泰, 等. 黄河口湿地生态需水量估算研究. *生态学报*, 2023, 43(21): 9096-9105.
- Qiu M Q, Han M, Jiao C T, et al. Estimation of ecological water requirement of the Yellow River estuary wetlands. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(21): 9096-9105. (in Chinese)
- 61 刘晓燕, 连煜, 可素娟. 黄河河口生态需水分析. *水利学报*, 2009, 40(8): 956-961.
- Liu X Y, Lian Y, Ke S J. Analysis on water demand for ecosystem protection in Yellow River Delta. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(8): 956-961. (in Chinese)
- 62 王梓宇, 乔晓英, 安宇廷, 等. 黄河流域甘肃段河道生态需水阈值的探讨. *水资源与水工程学报*, 2023, 34(2): 81-90.
- Wang Z Y, Qiao X Y, An Y T, et al. Exploration of ecological water demand thresholds for rivers in Gansu section of the Yellow River basin. *Journal of Water Resource and Water Engineering*, 2023, 34(2): 81-90. (in Chinese)
- 63 刘晓燕, 王瑞玲, 张原锋, 等. 黄河河川径流利用的阈值. *水利学报*, 2020, 51(6): 631-641.
- Liu X Y, Wang R L, Zhang Y F, et al. Threshold of the runoff utilization of the Yellow River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(6): 631-641. (in Chinese)
- 64 张建云, 章四龙, 王金星, 等. 近50年来中国六大流域年际径流变化趋势研究. *水科学进展*, 2007, 18(2): 230-234.
- Zhang J Y, Zhang S L, Wang J X, et al. Study on runoff trends of the six larger basins in China over the past 50 years. *Advances in Water Science*, 2007, 18(2): 230-234. (in Chinese)

Scientifically improving integrated water governance for resilient flow of the Yellow River

WANG Shuai¹ SONG Shuang¹ LIU Yanxu¹ WU Xutong¹ JIANG Enhui² FU Bojie^{3*}

(1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Disaster Risk Reduction, Faculty of Geographical Science,

Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2 Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China;

3 State Key Laboratory of Regional and Urban Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract The severe soil erosion and river channel disconnection along the Yellow River have been curbed. Still, the fundamental situation of prominent contradictions in the relationship between humans and water has not changed. Scientifically enhancing comprehensive management capabilities has become an important demand for high-quality development in the Yellow River basin during this new era. This study summarizes the fundamental ecological and hydrological changes in the Yellow River basin, and identifies three main characteristics, namely, sediment transport has significantly decreased, water resource shortages have intensified, and the relationship between humans and water has changed significantly. The four key challenges for sustainable development in the Yellow River basin are listed as continuous increase in water resource utilization flux, ongoing decrease in water resource stock, persistent local ecological disconnections, and insufficient institutional analysis of human impacts. Based on a theoretical understanding of human-land coupling systems in arid regions, the study proposes future directions for scientific research to promote data collection and monitoring of water reserves, improve hydraulic infrastructure through engineering and institutional reforms, implement joint management of surface water and groundwater, and balance ecological project construction with transfer payments to reduce water fluxes while protecting water stocks to maintain a steady flow of the Yellow River.

Keywords the Yellow River, human-water interactions, integrated water management, ecohydrology, sustainable development

王 帅 北京师范大学教授。主要研究领域:社会水文、人地系统耦合与可持续发展等。E-mail: shuaiwang@bnu.edu.cn

WANG Shuai Professor of Beijing Normal University. His research focuses on social hydrology, human natural system coupling and sustainable development, etc. E-mail: shuaiwang@bnu.edu.cn

傅伯杰 中国科学院院士。中国科学院生态环境研究中心研究员。国际地理联合会副主席,《中国科学院院刊》副主编。主要从事综合自然地理学和景观生态学研究。E-mail: bfu@rcees.ac.cn

FU Bojie Academician of Chinese Academy of Sciences (CAS). Professor of Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS. Vice President of International Geographical Union (IGU), Associate Editor-in-Chief of *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*. His research fields are integrated physical geography and landscape ecology. E-mail: bfu@rcees.ac.cn

■责任编辑: 文彦杰

*Corresponding author