

· 专题一：双清论坛“黄河流域生态保护与可持续发展” ·

黄河流域水循环规律与水土过程耦合效应^{*}

杨大文^{1**} 杨雨亭¹ 高光耀² 黄建平³ 江恩慧⁴

1. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084
2. 中国科学院 生态环境研究中心, 北京 100085
3. 兰州大学, 兰州 730000
4. 黄河水利委员会 黄河水利科学研究院, 郑州 450003

[摘要] 在气候变化和人类活动的共同影响下,黄河流域水循环和陆面过程正在发生深刻变化,其水资源和泥沙形成、分布和演变均呈现出显著的时空变异特征和高度的不确定性,并将影响流域未来的可持续发展。因此,揭示黄河流域水循环演变规律与水土过程耦合效应,对“黄河流域生态保护与高质量发展”国家重大战略实施具有重要意义。本文分析了黄河流域水循环与水土过程研究现状和面临的挑战,探讨了流域水循环和水土过程研究的发展趋势和关键科学问题,并针对黄河流域水循环规律与水土过程耦合效应研究提出了一些建议方向,为未来相关基础研究和应用基础研究提供参考。

[关键词] 黄河流域;水循环;水土过程;生态水文过程;水资源配置;水沙调控

1 研究背景与意义

黄河是中华民族的母亲河,亦是连接青藏高原、黄土高原、华北平原的生态廊道,在我国经济社会发展和生态安全等方面都具有十分重要的地位。新中国成立以来,中国共产党领导人民开创了治黄事业新篇章,创造了黄河岁岁安澜的历史奇迹。习近平总书记2019年9月在河南省考察期间的重要讲话,深刻阐明了黄河流域生态保护和高质量发展的重大意义,并做出加强黄河治理保护、推动黄河流域高质量发展的重大部署。

长期以来,黄河流域面临水资源供需矛盾尖锐、水沙关系复杂、水循环变化规律不明等一系列复杂问题,区域可持续发展面临严峻挑战^[1]。黄河以占全国2.2%的径流量承担全国15%耕地面积和12%人口的供水任务^[2,3],同时还承担着一般清水河流所没有的输沙任务。制约黄河流域发展的一个关键性问题就是“水资源短缺、水少沙多、水沙关系不协调”。在20世纪90年代,黄河流域水资源严重不足,



杨大文 清华大学水利系教授、国家杰出青年科学基金获得者、长江学者奖励计划特聘教授。长期从事流域生态水文机理与规律、分布式生态水文模拟与预测等方面的研究,独立开发了基于流域地貌特征的分布式水文模型(GBHM),主持建设了我国北方缺水地区不同典型下垫面的生态水文观测站网。在*Science Advances*等学术期刊发表论文200余篇,获教育部自然科学奖一等奖2项(2015和2020,均排名第1)、国际水文科学协会(IAHS) Tison Award(2003)。

黄河干流发生严重的断流现象,其中1997年断流时间长达265天,断流长度近800 km。黄河泥沙淤积导致下游河道成为地上悬河,洪水威胁乃是心腹之患,水沙调控成为维持下游河道防洪的重要措施,同时也进一步加剧了水资源供需矛盾。

如图1所示,“水沙异源”是黄河流域的基本水文特征,黄河在兰州水文站以上的流域面积不足全流域的30%,却贡献了全流域约60%的年径流量,是主要水源区。随着气温不断升高,受冰雪消融、冻土退化等影响,黄河上游的水文过程正在发生显著变化,进而影响全流域的水资源。黄河水患“害在下

收稿日期:2021-02-03;修回日期:2021-06-05

* 本文根据第274期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者,Email: yangdw@tsinghua.edu.cn

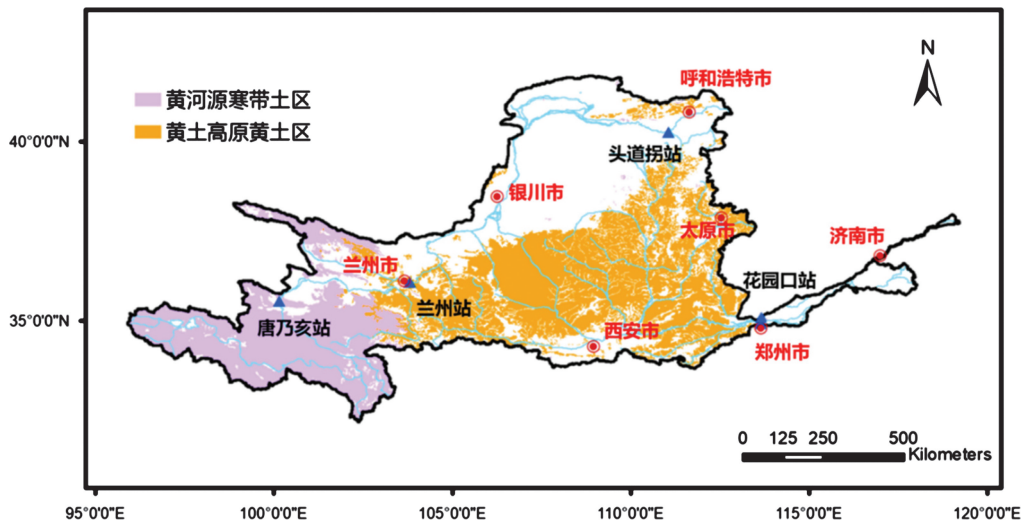


图 1 黄河流域主要水系及城市分布

游、病在中游”，约 90% 的泥沙来源于黄土高原。随着水土保持和生态修复工程的逐步实施，黄土高原土壤侵蚀强度明显降低，黄河干流泥沙含量在近 20 年间呈显著下降趋势^[4]；与此同时，黄土高原产流模式也发生了变化，导致径流减少，出现“水少沙少”的变化特点^[5]。此外，黄河流域的植被恢复等大规模人类活动也导致了土壤干化，并对区域气候产生强烈反馈作用，进而间接影响着区域水循环^[6]。黄河“水少沙多”的基本水文特征导致下游河道不断淤积形成地上悬河，控制下游“河床不抬高”成为水沙调控的主要目标之一^[7]。随着气候变化加剧，极端天气尤其是暴雨和干旱发生频率和强度不断增加，势必加剧黄河流域水文过程的变异，给流域水资源管理、防洪减灾和水沙调控带来挑战。

因此，从流域系统整体性出发，深入揭示气候变化和人类活动影响下黄河流域水循环规律与水土过程耦合效应，是认识黄河流域水资源和水沙变化规律、提升预测与调控能力的核心科学问题，对支撑黄河流域生态保护和高质量发展国家战略的实施、保障黄河流域水安全和生态安全具有重要的科学意义和现实紧迫性。

2 研究现状与未来发展趋势

2.1 气候变化和人类活动对黄河流域水循环和水资源的影响

气候变化改变了全球或区域水循环过程，进而影响到人类生存的地球环境。全球气候变化下的水循环，尤其是世界各大流域水循环变化受到国内外学者广泛关注。黄河流域的大部分地区属于干旱、半干旱气候，时空变化复杂，水资源对气候变化和人

类活动的响应较为敏感^[2]，图 2 给出了近 60 年（1960—2019 年）的降水、气温和天然径流量的变化。根据马柱国等的最新研究结果，1951—2018 年间黄河流域的年平均气温升高了 1.39℃，年平均降水量减少了 10 mm，黄河流域在过去 68 年间整体趋于暖干化^[8]。黄河流域的气候变化具有明显的区域差异，上游地区的年平均气温在近 68 年间上升了 0.82℃，年降水量增加了 33 mm；中游地区的年均气温上升了 1.67℃，年降水量减少了 31.6 mm。1951—2018 年黄河流域大部分地区降水集中度呈增大趋势，尤其是中下游地区，说明黄河流域的极端降水过程增多^[8]。黄河流域的气候变化与季风变化和大尺度环流异常密切相关，丁永建等发现黄河上游径流的变化与西北太平洋季风指数的变化比较一致^[9]，Zhang 等进一步指出 ENSO 和 PDO 对黄河流域极端降水有明显影响^[10]。在气候变化背景下，黄河花园口水文站的天然径流变化自 1960 年以来呈显著减少趋势。

除气候变化外，大规模的人类活动也深刻地影响着黄河流域水资源状况。刘昌明等（2019）分析了黄河近百年的径流量变化，指出受气候变化和人类活动双重影响，黄河干流各水文站年径流量呈现显著的下降趋势，且下降速率呈现累积效应^[2]；20 世纪 60 年代是近百年来黄河径流量最大的时期，而 90 年代后的径流量减少显著。针对气候变化和人类活动对径流的影响，有研究指出，20 世纪 70 至 90 年代黄河断流是气候变化和人类活动共同作用的结果，其中 90 年代黄河断流快速加剧的主要原因是降水量的显著减少^[11]。2000 年以来，黄河中游地区的径流量锐减，主要是受水土保持工程和植被恢复等

人类活动的影响所致^[12]。上述研究给出了类似的结论,但这些研究多以定性分析为主。如何定量区分气候变化和各种人类活动对径流的影响是尚待进一步研究的科学问题^[2]。

水循环对不同气候要素变化的响应存在区域性差异,同时人类活动和气候变化对水循环过程的影响机制也存在时空差异^[13]。马柱国等指出,黄河流域天然径流的下降趋势与该时段气候变化有关,其中降水减少是天然径流减少的主要原因,气温升高通过加速蒸散发过程,不利于径流形成^[8]。针对黄河源区径流变化的研究指出,由于气温升高导致的冻土退化是径流减少的原因之一^[14]。Wu 等指出黄河上游温度升高,蒸发加强不利于水源补充,另一方面升温导致积雪和冻土加速融化有利于水源的补充^[15]。张建云等指出黄河流域中游气温对径流的影响随降水的增加被进一步放大^[16]。在黄土高原,人工种植带来的植被覆盖增加也增大了植被蒸腾量,使土壤水分的供需不平衡,导致土壤水分减少和黄土中的干土层加厚^[17]。针对气候变化和人类活动影响下的黄河流域水循环变化研究已取得进展,但流域水循环演变机制尚需进一步深入研究。

黄河流域未来气候变化情景和水循环变化趋势预估,是制定未来黄河流域生态保护和高质量发展战略规划科学基础的重要组成部分^[8]。以往的研究通常采用基于历史观测数据的统计分析方法来预测未来黄河流域气候和径流变化,蓝永超等认为随着黄河上游气温进一步上升,未来 30 年降水量与上游

径流量将显著增加^[8];匡晓为研究认为黄河流域径流总体呈现显著减少趋势,但偶有回升趋势,21 世纪会出现“枯转丰”的迹象^[19]。张建云等通过实测长系列资料分析指出,北方降水量在近几年有所回升,但仍低于多年平均值,尚不能得出已经“转湿”的结论^[20]。由于目前对黄河流域水循环变化机制的认识不足,因此预测未来黄河流域水循环和水资源变化趋势极具挑战性。

2.2 变化环境下流域水文过程与径流和泥沙变化

以降水和气温为主要表征形式的气候变化对径流和泥沙的形成及其地域分布起着重要作用。研究表明,世界上 71% 大流域的径流变化与降水变化显著相关^[21]。相对于降水,升温对全球范围内径流变化影响则相对较小^[22],但在黄河流域升温的影响却存在争议。Zhang 等的研究指出在黄土高原,潜在蒸发每增加 1%,年径流量仅减小 0.3%,敏感度低于降水^[23]。但 Lan 等的分析却发现黄河上游在 1957 到 2009 年间的径流变化主要是由升温导致,其次才是降水和风速变化的影响^[24]。相对于降水和温度等传统中研究广泛关注的气候变化要素,大气 CO₂ 浓度上升的生态水文效应往往被忽略^[25]。

气候变化不仅影响了流域径流,同时也影响着流域土壤侵蚀和泥沙输运过程。降雨是土壤侵蚀发生的动力,较高的降雨量与更大的降雨强度对土体的击打冲刷作用更强,通常导致更多的径流和更大的土壤流失^[26]。与降雨对侵蚀产沙的直接影响不同,温度和 CO₂ 浓度升高则主要是通过影响流域的

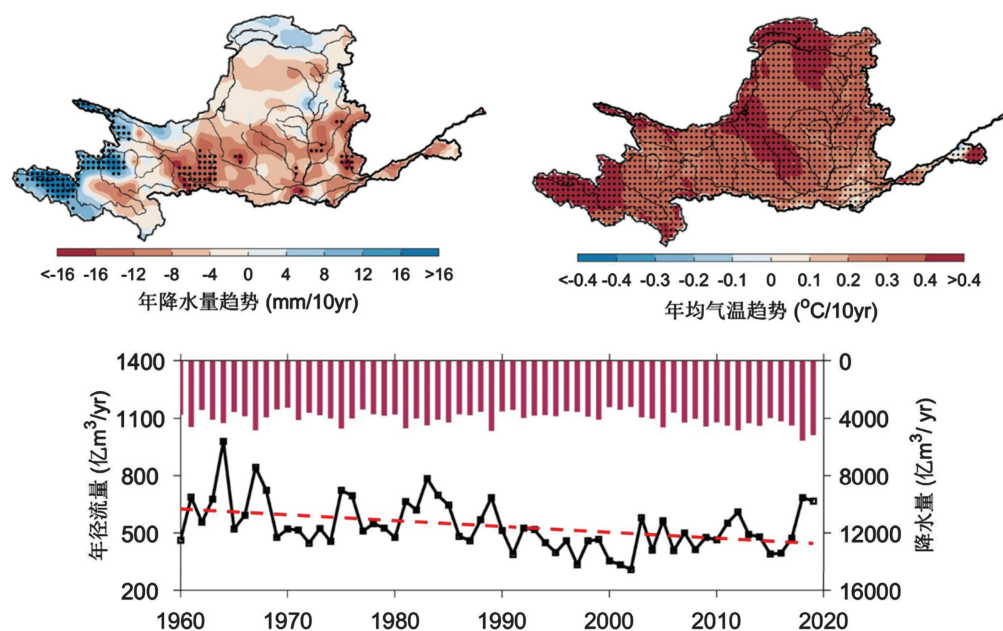


图 2 黄河流域近 60 年的降水、气温及花园口水文站天然径流变化

径流和植被覆盖而间接地影响流域侵蚀产沙。气候变化对土壤—植被—水文过程相互作用的影响是改变流域水沙过程的重要原因,但气候变化的流域水沙效应和机制尚不清楚。

人类活动对流域产流和产沙的影响主要体现在通过工程措施和生产生活取水等的直接作用,以及通过改变下垫面条件尤其是土地利用的间接影响两个方面。在世界范围的河流取样证据表明,水坝建设是陆地海洋泥沙流量下降的最重要影响因素^[27]。除筑坝影响外,土地利用变化和水土保持措施等也会对河流泥沙产生影响^[28]。就黄河流域而言,水土保持措施(包括植被恢复、梯田和淤地坝修建等)、建造水库、人工取调水等显著影响着流域的水沙过程^[15]。Wang 等研究发现,20 世纪 70 至 90 年代之间黄河主要是由工程措施减沙,1999 年中国启动退耕还林工程以来,主要是由生态修复措施减沙^[4]。如图 3 所示,自 2000 至 2018 年,黄土高原地区的林草植被覆盖率有大幅度增长,与此同时花园口站的实测年径流量和年输沙量均显著下降。

黄河流域在近几十年的径流量与输沙量总体呈显著下降趋势,输沙量从 20 世纪 70 年代每年 16 亿吨下降到目前 3 亿吨左右^[4]。有研究指出,植被恢复对径流和泥沙的影响仍有争议,近年来许多学者从气候变化、植被变化和人类用水等方面归因径流和泥沙变化仍未获得清晰的认识^[29]。黄河中游地区有暖干化趋势,水土保持工程和退耕还林还草等

生态恢复措施显著改变地表下垫面,在过去 60 年间径流量和输沙量减少约 70%^[4]。黄河上中游农业灌溉和生活需水量的剧增导致黄河下游径流急剧减少^[30]。有研究指出 1951—2018 年黄河流域大部分地区降水集中度为增大趋势,但是针对极端气象条件下黄河流域水沙特征的研究不足、认识有限。为全面揭示黄河流域水沙情势变化特征与机制,应考虑流域系统的整体性,加强对流域水沙演变的时空尺度特征尤其是水沙关系非线性特征的定量研究,量化极端水文事件对水沙变化的关键作用。

黄河水沙情势在过去几十年发生剧变,水沙通量大大幅度减少,水沙关系也发生了很大调整,大坝等水利工程建设彻底和不可逆地改变了黄河自然地理属性,严重影响流域生态系统特别是黄河三角洲地理形态^[4, 31]。水沙变化使得黄河下游存在河道变动活跃、河床被抬高、洪涝风险增大等问题,直接影响三角洲面积变化及海岸线迁移^[32]。河口悬沙粒径和悬沙浓度变化也会导致输送到三角洲泥沙格局的变化,影响三角洲的平衡^[28]。近几十年来,黄河下游和三角洲区域沉积减少,甚至转为侵蚀^[33]。以冲刷下游河道为导向的水库水沙调控措施可以有效降低下游河床和增加行洪能力,减轻水库淤积的同时,改变了河流和三角洲形态^[30]。因此,河水沙变化影响下游河道沉积和河流三角洲进退,河道地貌变化反馈调节水沙输送,下游河道与三角洲在地貌上具有连续性。然而,以往的研究通常将流域水沙变化、河

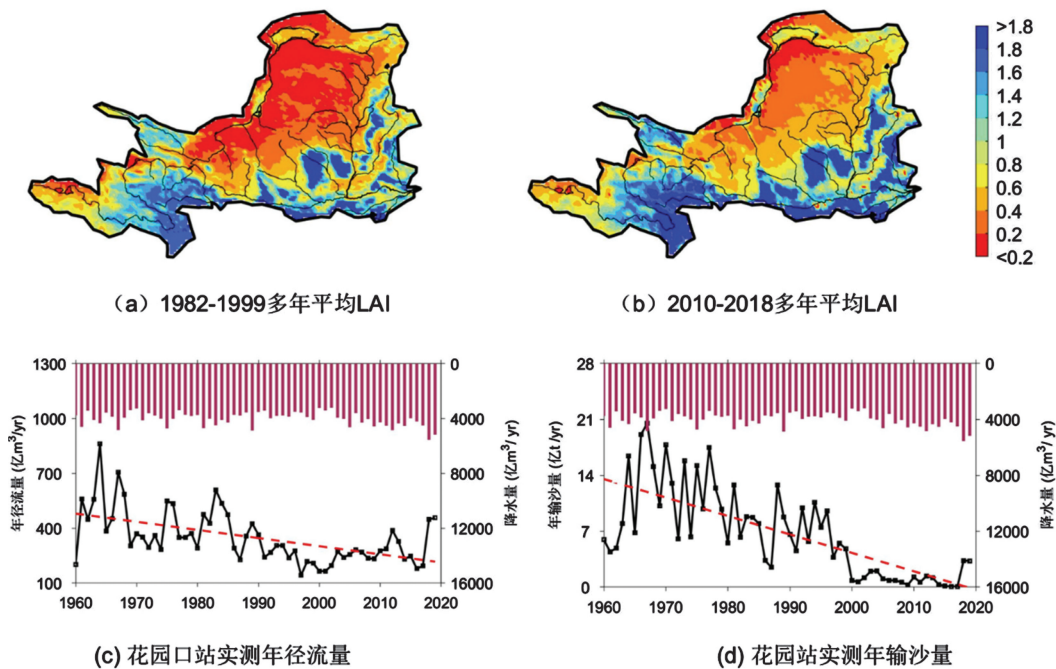


图 3 黄土高原生态—水文—泥沙变化

流和三角洲地貌过程割裂开来,缺乏对流域水文—泥沙—地貌耦合作用机制的系统认知。因此,亟需开展水沙调控驱动下河流水沙变化—下游河道沉积和形态变化—三角洲演化之间的耦合关系研究。

2.3 流域生态—水文—泥沙耦合模拟与预测

在流域水循环系统中,生态—水文耦合关系密切,在流域水文模型中耦合植被生长过程,发展分布式生态水文模型,是提高流域水文模拟和预测能力的发展方向^[34];基于植被生理过程与水文过程耦合的生态水文模型成为流域水循环过程模拟的主要工具^[35]。在人类干扰条件下,土地利用与覆被变化引起的水文效应以及生态系统响应是当前生态水文学研究的热点^[36, 37]。针对径流和泥沙对植被变化响应,张志强等总结了现有模型的不足,认为模型对植被的表征过于简单,难以模拟由于生物及非生物因素引起的植被动态变化对径流和泥沙过程的影响,且较少考虑植被与水文过程的反馈作用^[38]。此外,极端暴雨条件下的水文过程对土壤侵蚀和河道输沙都起到关键作用,是未来水文—泥沙耦合方法研究需要重点突破之处。此外,流域生态水文模型主要描述植被与水文过程的耦合作用,水沙动力学模型侧重于描述河道输沙过程,当前仍缺乏流域尺度的分布式生态—水文—泥沙耦合模型。

未来气候情境下的流域水资源和泥沙预测研究主要包括对径流量和输沙量的预测,以及水沙特性和水沙过程的预测。以往的研究主要集中于径流量和输沙量预测,而对水沙特性和水沙过程的预测相对较少。针对黄河流域,姚文艺等以黄河花园口断面现有天然径流量序列为本底,结合古树年轮资料,重建了花园口断面约500年(1470—2007)的天然径流量序列,并对未来的输沙量进行了预测^[31]。王光谦等对黄河输沙变化的主要气象要素进行了归因分析,建立了气象要素与黄河潼关站年输沙量之间的统计关系,分析了水保措施对入黄沙量的影响,预测在未来较长一个时期内潼关站年均径流量约为247亿立方米,在现有水利水保措施拦沙效率不变的条件下,潼关站年平均输沙量约为3亿吨,均呈现缓慢增长的趋势^[39]。流域气候—生态—水文—泥沙变化具有高度的非线性特征,基于历史观测数据的经验关系可能难以反映未来变化环境下的水沙关系。此外,统计相关分析方法也难以量化气候变化和人类活动的影响程度。由于气候变化尤其是极端气候变化的不确定性,加之人类活动影响下流域水文过程的非稳态性,未来黄河流域的水资源和泥沙变化

趋势预测具有较大的不确定性,需要发展流域生态—水文—泥沙耦合模型,提升流域水资源和泥沙变化的预测能力^[40]。

2.4 流域水资源配置和水沙调控

人类经济社会发展依赖水资源,同时人类对水资源的开发和利用也影响着流域水循环。王浩等在研究我国北方地区水资源合理配置的过程中提出了“自然—社会”二元水循环理论^[41]。Sivapalan等指出,作为交叉学科的社会水文学,致力于研究水文系统与人类系统的双向互馈机制,需更好地刻画和预测人类—自然水循环耦合系统的协同演化过程,为水资源管理提供有力的理论支持^[42]。国际水文科学协会(IAHS)围绕学科未来发展,发起了十年研究计划Panta Rhei(2013—2022年),旨在通过研究人类活动与水文循环的动态变化,提高预测能力和支持变化环境下水资源可持续利用和经济社会可持续发展^[43]。水资源“空间均衡”是我国新时期的治水方针,有学者对相关概念和研究框架进行了讨论^[44],但空间均衡的内涵及面向空间均衡的水资源适应性配置方法等核心内容的研究还比较薄弱。基于流域水循环特点,未来水资源配置需要进一步考虑空间和时间两个维度上的均衡,实现流域上、中、下游之间和人与自然之间的协调发展。如图4所示,黄河花园口下游河段的河道演变、沿河两岸的供水、以及河口三角洲演变等均受到上游来水来沙的直接影响,需在流域尺度上对水资源和水沙进行综合调控。

水沙调控依赖于水库调节,传统的水库调度多以系统发电量最大为优化目标,而水沙调度需以水库淤积成本与拦沙效益为主,综合考虑防洪、发电、供水、维持河流健康等要求确定优化目标函数和约束方程。我国现有的流域水量调度模型有“数字黑河”流域综合模型^[45]、数字流域系统^[46]、二元水资源



图4 黄河水沙关系变化对下游河道和三角洲演化的影响

模拟系统^[41],以及数字黄河模拟系统^[47]等,但缺乏全流域的水资源和水沙综合调度系统,对流域水资源和水沙综合调度研究有待进一步加强。黄河流域水库群水沙联合优化调度系统建设是新形势下黄河水资源配置与水沙调控的迫切需求。

3 黄河流域水循环与水土过程耦合效应的关键科学问题

“水资源短缺、水少沙多、水沙关系不协调”是黄河流域生态保护与可持续发展面临的瓶颈问题。未来黄河流域的水沙情势和水沙关系如何演变及其对下游河道及三角洲带来什么影响都不清楚。提升对黄河流域径流、泥沙的预测能力,探索未来变化条件下的水沙优化调控方法,是未来黄河治理的迫切需求。面向这一生产实践的迫切需求,必需回答以下两方面的关键科学问题。

3.1 气候变化和人类活动对黄河流域水循环的影响机制

气候变化影响黄河流域水循环的主要机制包括气候变化—大气环流—水汽输送—降水的动力机制、地表能量收支—地表蒸散—大气层结的热力机制、人为影响气候变化对黄河流域水循环的贡献和外强迫机制。同时,人类活动通过改变流域下垫面条件以及灌溉等活动直接或间接影响水循环过程。气候变化和人类活动综合作用对流域水循环的影响机制,是准确预测黄河流域未来水资源和泥沙变化趋势的关键科学问题。

3.2 黄河流域生态—水文—泥沙相互作用与耦合机制

气候变暖导致冰川退缩、冻土融化、高寒草甸退化正不断影响着黄河上游生态水文过程和水资源。黄河中游经过近 20 年的退耕还林还草工程和生态修复,泥沙出现显著减少趋势,与此同时也伴随有土壤干化和径流量减小等负面影响。受气候变化和人类活动影响,黄河流域径流和泥沙的形成、分布和演化均呈现显著的时空变异性和不确定性,未来黄河水沙变化趋势不明成为制约黄河治理与保护工作的瓶颈问题。科学认识气候变化和人类活动影响下黄河流域生态—水文—泥沙相互作用与耦合机制,是量化变化环境下黄河流域水土过程变化的另一关键科学问题。

4 黄河流域水循环与水土过程耦合效应研究的建议

面向黄河流域生态保护与高质量发展国家重大

战略需求,针对黄河流域水循环与水土过程耦合效应的关键科学问题,未来的主要研究方向有以下五个方面。

4.1 黄河流域水循环时空变化特征与驱动机制

黄河流域水循环时空变化特征包括气象要素在不同时空尺度上的变化特征和主要模态,以及气候变化和人类活动对流域水文过程和水资源的影响及其时空分异特征。气候变化和人类活动对黄河流域水循环的影响机制包括:气候变化—大气环流—水汽输送—降水的动力机制、人类活动影响下地表能量收支—地表蒸散—大气层结的热力机制。

4.2 黄河流域土壤—植被—水文相互作用与水土过程

考虑黄河流域水土过程的区域特征,在黄河上游,通过分析冰川—积雪—冻土—生态—水文过程相互作用和产流、产沙机制及其空间变异特征,明晰气候变化下冰雪—冻土—植被协同变化机制及其水源涵养和径流效应;在黄河中游,通过分析人类活动影响下的生态—水文—土壤过程耦合作用及其产水产沙机制,揭示人类活动影响下的生态、水文和泥沙效应。

4.3 黄河流域水沙变化与上中下游水文—泥沙耦合关系

通过分析黄河流域土地利用、植被覆盖、景观格局以及坝库工程等地表覆被时空变化特征,以及水沙变化在上中下游、干支流、不同时间尺度间的关联特征,揭示黄河流域水沙情势变化的整体性特征和时空演变规律。建立河道和三角洲演化对流域水沙变化的响应关系及其动态特征,揭示水沙调控对河道和三角洲演化的作用机制,阐明流域水沙变化—河道演变—三角洲和河口演化的耦合关系。

4.4 黄河流域分布式生态—水文—泥沙耦合模型与预测

刻画上游高寒山区受冰雪融化和土壤冻融主导的水文过程和中游地区受到人类活动影响生态—水文—泥沙过程,构建黄河流域分布式生态—水文—泥沙耦合模型;通过数值模拟,重构黄河流域在历史气候和植被条件下的长系列径流、泥沙序列,分析其时空变化特征和驱动机制;预估未来气候和土地利用情境下黄河流域水文和泥沙变化过程,分析黄河流域未来水资源和泥沙的时空变化趋势。

4.5 流域水资源配置和水沙调控的级联效应与优化

分析黄河流域水资源配置与水沙调控措施对水

沙时空变化的影响,构建流域水沙配置和调控措施的级联效应分析框架,量化不同级联效应模式下流域水资源配置和水沙调控措施的阈值和非线性叠加效应。构建黄河流域水资源适应性配置整体模型和梯级水库—河道耦合的水沙调控模型,建立流域水资源和水沙综合调度模型系统。通过情景模拟,分析不同配置与调控方案下的水沙级联效应并形成优化方案库,提出变化条件下的水资源配置和水沙调控自适应优化方法;根据流域未来水资源和泥沙变化预估结果,提出适应流域生态保护和高质量发展的水资源配置方案和水沙调控对策。

参 考 文 献

- [1] 傅伯杰. 生态系统服务与生态安全. 北京: 科学出版社, 2013.
- [2] 刘昌明, 田巍, 刘小莽, 等. 黄河近百年径流量变化分析与认识. 人民黄河, 2019, 41(10): 11—15.
- [3] 夏军, 彭少明, 王超, 等. 气候变化对黄河水资源的影响及其适应性管理. 人民黄河, 2014, 36(10): 1—4.
- [4] Wang S, Fu BJ, Piao SL, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 38—41.
- [5] 穆兴民, 顾朝军, 孙文义, 等. 植被恢复改变黄土高原产流模式问题初探. 人民黄河, 2019, 41(10): 31—29.
- [6] Li Y, Piao S, Li LZ, et al. Divergent hydrological response to large-scale afforestation and vegetation greening in China. *Science Advances*, 2018, 4(5): eaar4182.
- [7] 水利部黄河水利委员会. 黄河首次调水调沙试验. 黄河水利出版社, 2003.
- [8] 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.
- [9] 丁永建, 叶柏生, 韩添丁, 等. 过去 50 年中国西部气候和径流变化的区域差异. 中国科学: 地球科学, 2007, 37(2): 206—214.
- [10] Zhang R, Corte-Real J, Moreira M, et al. Downscaling climate change of water availability, sediment yield and extreme events: application to a Mediterranean climate basin. *International Journal of Climatology*, 2019, 39(6): 2947—2963.
- [11] Yang DW, Li C, Hu H, et al. Analysis of water resources variability in the Yellow River of China during the last half century using historical data. *Water Resources Research*, 2014, 40: W06502.
- [12] 杨大文, 张树磊, 徐翔宇. 基于水热耦合平衡方程的黄河流域径流变化归因分析. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(10): 1024—1034.
- [13] Kong D, Miao C, Wu J, et al. Impact assessment of climate change and human activities on net runoff in the Yellow River basin from 1951 to 2012. *Ecological Engineering*, 2016, 91: 566—573.
- [14] Wang T, Yang H, Yang D, et al. Quantifying the streamflow response to frozen ground degradation in the source region of the Yellow River within the Budyko framework. *Journal of Hydrology*, 2018, 558: 301—313.
- [15] Wu P, Liang S, Wang X, et al. Climate-induced hydrologic change in the source region of the Yellow River: a new assessment including varying permafrost. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2018, doi: 10.5194/hess-2017-744.
- [16] 张建云, 王国庆, 贺瑞敏, 等. 黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应. 水科学进展, 2009, 20(2): 153—158.
- [17] Jia X, Shao M, Zhu Y, et al. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 113—122.
- [18] 蓝永超, 林舒, 李州英, 等. 近 50a 来黄河上游水循环要素变化分析. 中国沙漠, 2006, 26(5): 849—854.
- [19] 匡晓为. 全球变化背景下黄河流域径流变化特征及其插值预测研究. 南京: 南京信息工程大学, 2015.
- [20] 张建云, 贺瑞敏, 齐晶, 等. 关于中国北方水资源问题的再认识. 水科学进展, 2013, 24(3): 303—310.
- [21] Hu CH. Implications of water-sediment co-varying trends in large rivers. *Science Bulletin*, 2020, 65(1): 4—6.
- [22] Wagener T, Sivapalan M, Troch PA, et al. The future of hydrology: an evolving science for a changing world. *Water Resources Research*, 2010, 46: 1—10.
- [23] Zhang S, Yang D, Xu X. Attribution analysis for runoff decline in Yellow River Basin during past fifty years based on Budyko hypothesis. *Scientia Sinica*, 2015, 45(10): 1024.
- [24] Lan C, Zhang Y, Gao Y, et al. The impacts of climate change and land cover/use transition on the hydrology in the upper Yellow River basin, China. *Journal of Hydrology*, 2013, 502: 37—52.
- [25] Yang Y, Roderick M, Zhang S, et al. Hydrologic implications of vegetation response to elevated CO₂ in climate projections. *Nature Climate Change*, 2019, 9: 44—48.
- [26] Lu XX, Ran LS, Liu S, et al. Sediment loads response to climate change: a preliminary study of eight large Chinese rivers. *International Journal of Sediment Research*, 2013, 28(1): 1—14.
- [27] Nilsson C, Catherine A, Reidy M, et al. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*, 2005, 308(5720): 405—408.
- [28] Wang HJ, Wu X, Bi NS, 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] Lv M, Ma Z, Lv M. Effects of climate/land surface changes on streamflow with consideration of precipitation intensity and catchment characteristics in the Yellow River basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123: 1942—1958.
- [30] Liu Y, Song H, An Z, et al. Recent anthropogenic curtailing of Yellow River runoff and sediment load is unprecedented over the past 500 y. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(31): 18251—18257.

- [31] 姚文艺, 冉大川, 陈江南. 黄河流域近期水沙变化及其趋势预测. 水科学进展, 2013, 24(5): 607—616.
- [32] Kong D, Miao C, Wu J, et al. Bi-objective analysis of water-sediment regulation for channel scouring and delta maintenance: a study of the lower Yellow River. *Global and Planetary Change*, 2015, 133: 27—34.
- [33] Gao P, Wang YM, Li PF, et al. Land degradation changes in the Yellow River Delta and its response to the streamflow-sediment fluxes since 1976. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(5): 3212—3220.
- [34] 杨大文, 雷慧闽, 丛振涛. 流域水文过程与植被相互作用研究现状评述. 水利学报, 2010, 41(10): 1142—1149.
- [35] 王根绪, 刘桂民, 常娟. 流域尺度生态水文研究评述. 生态学报, 2005, 25(4): 892—903.
- [36] 罗娅, 杨胜天, 刘晓燕, 等. 黄河河口镇—潼关区间 1998—2010 年土地利用变化特征. 地理学报, 2014, 69(1): 42—53.
- [37] 杨胜天, 周旭, 刘晓燕, 等. 黄河中游多沙粗沙区(渭河段)土地利用对植被盖度的影响. 地理学报, 2014, 69(1): 31—41.
- [38] 张志强, 王盛萍, 孙阁, 等. 流域径流泥沙对多尺度植被变化响应研究进展. 生态学报, 2006, 7: 2356—2364.
- [39] 王光谦, 钟德钰, 吴保生. 黄河泥沙未来变化趋势. 中国水利, 2020(1): 9—12+32.
- [40] 张亦弛, 刘昌明, 杨胜天, 等. 黄土高原典型流域 LCM 模型集总、半分布和分布式构建对比分析. 地理学报, 2014, 69(1): 90—99.
- [41] 王浩, 贾仰文, 王建华, 等. 黄河流域水资源及其演化规律演研究. 北京: 科学出版社, 2010.
- [42] Sivapalan M, Savenije HH, Blöschl G. Socio-hydrology: a new science of people and water. *Hydrological Processes*, 2012, 26: 1270—1276.
- [43] Montanari A, Young G, Savenije HHG, et al. “Panta Rhei—everything flows”: change in hydrology and society—the IAHS scientific decade 2013-2022. *International Association of Scientific Hydrology Bulletin*, 2013, 58(6): 1256—1275.
- [44] 左其亭, 韩春辉, 马军霞, 等. 水资源空间均衡理论方法及应用研究框架. 人民黄河, 2019, 41(10), 113—118.
- [45] 程国栋. 黑河流域水—生态—经济系统综合管理研究. 北京: 科学出版社, 2009.
- [46] 王光谦, 李铁键. 黄河数字流域模型. 中国科技论文在线, 2007(7): 492—499.
- [47] 水利部黄河水利委员会. “数字黄河”工程数学模拟系统建设规划报告. 2009.

Water Cycle and Soil-water Coupling Processes in the Yellow River Basin

Yang Dawen^{1*} Yang Yuting¹ Gao Guangyao² Huang Jianping³ Jiang Enhui⁴

1. Department of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084

2. Research Center for Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085

3. Lanzhou University, Lanzhou 730000

4. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003

Abstract With ongoing climate change and intensified human activities, the hydrological cycle and its relations with land surface processes have been experiencing dramatic alternations, resulting in significant changes and great uncertainties in the formations, spatial patterns and temporal evolutions of water resources and sediment across the Yellow River basin, with consequent impacts on the basin’s sustainable development. Hence, a better understanding of the water cycle and soil-water coupling processes is of great practical significance to the implementation of the nation’s “Ecological Protection and High-quality Development of the Yellow River Basin” strategy. This paper reviews the current status and challenges and discusses further research directions and key scientific topics in the study of the water cycle and soil-water coupling processes in the Yellow River basin, which provide guidance to basic researches and applied basic researches in relevant fields.

Keywords Yellow River basin; water cycle; runoff and sediment processes; eco-hydrological processes; water and sediment regulation; water resources allocation

(责任编辑 张强)

* Corresponding Author, Email: yangdw@tsinghua.edu.cn