

中国国际河流水文地理研究进展

罗 贤,李运刚,季 漩,何大明

(云南大学国际河流与生态安全研究院 云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室,昆明 650500)

摘要: 中国发育了亚洲主要的国际河流,丰富的跨境水资源在区域“水—能源—粮食—生态”安全维持中发挥着重要作用。近几十年来,受全球气候变化特别是大规模水利水电工程建设驱动,国际河流水文及生态过程变化与跨境影响等问题备受关注。国内对这些问题的研究,重点聚焦于水文及生态过程变化规律与变化归因、跨境影响与安全风险调控,探讨跨境流域“水—能源—粮食—生态”纽带关系,构建适应全球变化的跨境水资源协调机制等方面,取得了突出的研发成效。面对全球变化影响下日益突出的跨境水安全与生态安全风险问题,国际河流的水文地理研究,更需要借助空天地一体化精准监测技术、现代空间地理信息技术和智能技术等,通过提供可量化、可参与、可公开的研发成果,更好地为国家对国际河流的合理利用与地缘合作、健康维持与风险管控、跨境水外交与环境外交等提供科学依据和决策支持。

关键词: 国际河流;气候变化;人类活动;水文过程变化;水安全

DOI: 10.11821/dlxb202307011

1 引言

国际河流包含两种基本类型,一种为流经两个或两个以上国家的河流,另一种作为国家边界一部分,分隔两个或两个以上国家的河流(湖泊)^[1]。全球310个国际河流流域占据了陆地面积的47.1%,居住着全世界52%的人口^[2]。因发育亚洲大陆主要的国际河流,中国是全世界最为重要的上游水道国^[3],境内国际河流流域水量约占全国水资源总量的1/4^[4]。中国国际河流直接关系到边疆稳定、社会经济发展及国家安全,同时为周边邻国可持续发展做出了很大贡献^[4]。当前中国国际河流存在着洪水灾害、水权分配、水污染及水生态等复杂水问题^[5]。随着中国及周边国家越来越重视国际河流的开发利用及地缘合作,国际河流研究已成为水文地理重点关注领域之一^[6]。

中国国际河流众多,最为重要的有18条,除内流河外,分别流向太平洋、印度洋及北冰洋。其中,西南地区9条(包括狮泉河—印度河、雅鲁藏布江—布拉马普特拉河—恒河—梅格纳河、独龙江—伊洛瓦底江、怒江—萨尔温江、澜沧江—湄公河、元江—红河、珠江、披劳河及北仑河),西北地区5条(包括塔里木河、伊犁河、额敏河、额尔齐斯河—鄂毕河及乌伦古河),东北地区4条(包括黑龙江—阿穆尔河、绥芬河、图们江及

收稿日期: 2023-03-01; 修订日期: 2023-07-13

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFA0601600); 云南省科学家工作室项目(KXJGZS-2019-005); 云南省科技厅科技计划项目(202101AT070075) [Foundation: National Key R&D Program of China, No.2016YFA0601600; Scientist Workstation of Yunnan Province, China, No.KXJGZS- 2019- 005; The Science and Technology Planning Project of Yunnan Province, China, No.202101AT070075]

作者简介: 罗贤(1985-), 男, 云南玉溪人, 副研究员, 主要从事水文水资源研究。E-mail: luoxian@ynu.edu.cn

通讯作者: 何大明(1958-), 男, 四川南充人, 特聘教授, 主要从事国际河流与跨境水资源及生态安全研究。

E-mail: dmhe@ynu.edu.cn

鸭绿江)。这些国际河流,涉及中国周边的阿富汗、印度、巴基斯坦、尼泊尔、不丹、孟加拉国、缅甸、老挝、泰国、柬埔寨、越南、塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦、哈萨克斯坦、蒙古、俄罗斯及朝鲜等国家,在维系和协调国家及区域“水—能源—粮食—生态”安全格局中发挥着重要作用。中国西藏和南亚地区的洪水及干旱灾害、中国西南地区 and 东南亚的水文变化及其跨境影响、中国西北地区和中亚的跨境水及生态安全、中国东北地区和东北亚的防洪及水污染等国际河流相关问题受到越来越多的关注^[3]。

气候变化及人类活动影响下水文过程的变化规律及其机制是当前水文地理研究的热点和难点,这些科学问题的解析有助于未来水文过程变化的准确预估^[7-8]。全球变化背景下,国际河流水文过程发生改变,水资源供需矛盾日渐突出,加剧了地缘紧张关系^[9-10]。但在流域尺度上,对跨境水文、生态过程对气候变化及人类活动响应机制等方面的研究,仍然相对较少^[11]。由于河流连通性及流域生态系统完整性,突破了流域国家的边界约束,导致国际河流区的跨境资源环境与水安全及生态安全等问题,极具复杂性与敏感性,增大了全球变化背景下国际河流水文地理的研究难度^[3]。

在全球变化及影响的不确定性日益增加、中国大力推进的绿色“一带一路”倡议不断深入等大背景下,国际河流区的跨境水安全与生态安全等问题,在国家及地缘合作区域等多层面广受关注,凸显出中国国际河流水文地理面向国家需求开展多学科综合研究的重要性和时效性。结合领域内的研究需求及研究重点,本文从中国国际河流流域水文过程变化规律、跨境水灾害及水安全调控、水文生态变化归因及跨境影响、水—能源—粮食—生态纽带关系研究、国际合作进展等多个方面,对相关水文地理研究进行综述,为中国国际河流的河流健康维持及流域生态安全维护、跨境水安全及生态安全等风险管控、跨境水合作与水外交提供科学依据及支撑。

2 研究进展

2.1 研究动态与研究区分布

围绕中国国际河流水文地理研究,检索发表时间为1949—2022年,文献来源为《科学引文索引》(Science Citation Index, SCI)、《工程索引》(The Engineering Index, EI)、《中文核心期刊要目总览》、《中文社会科学引文索引》(Chinese Social Sciences Citation Index, CSSCI)、中国科学引文数据库(Chinese Science Citation Database, CSCD)及中国人文社会科学期刊综合评价指标体系(AMI)的期刊论文,最终整理获得946篇有效文献(由于珠江及塔里木河流域大部分位于中国境内,未进行检索)。

从有效文献发文数量变化来看,1999年之前,中国国际河流水文地理论文数量相对较少;2000年之后,发文数量有了明显提升;2010年之后,相关论文发文量比较稳定(图1)。有效论文的研究区比较显示,不同国际河流流域水文地理研究具有很大差异(图2)。澜沧江—湄公河流域水文地理论文数量远多于其他流域,“澜湄”合作、干旱灾害、水文及生态变化、水电开发使该流域持续受到关注。黑龙江—阿穆尔河、雅鲁藏布江—布拉马普特拉河—恒河—梅格纳河论文数量仅次于澜沧江—湄公河流域,黑龙江—阿穆尔河流域中国境内部分社会经济发展及水资源利用基础相对较好,雅鲁藏布江水资源及水能资源非常丰富,气候变化对水文过程的影响深远,两个流域的水文地理均是研究热点。怒江—萨尔温江及元江—红河为西南地区另外2条重要的国际河流,具有一定的研究成果,也体现了西南国际河流较受关注。伊犁河及额尔齐斯河—鄂毕河水文过程变化及归因复杂,水文地理研究为流域生态系统健康维护提供了科学依据。

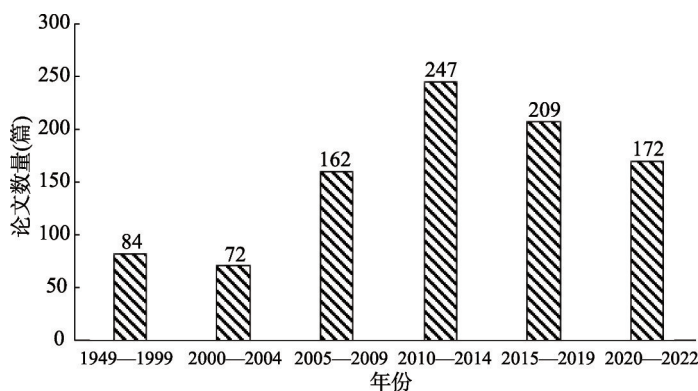


图1 1949—2022年6项检索来源期刊发表中国国际河流水文地理研究领域论文数量变化

Fig. 1 Changes in the number of papers published in the journals of the six retrieval sources in the field of hydro-geographical researches on Chinese international rivers

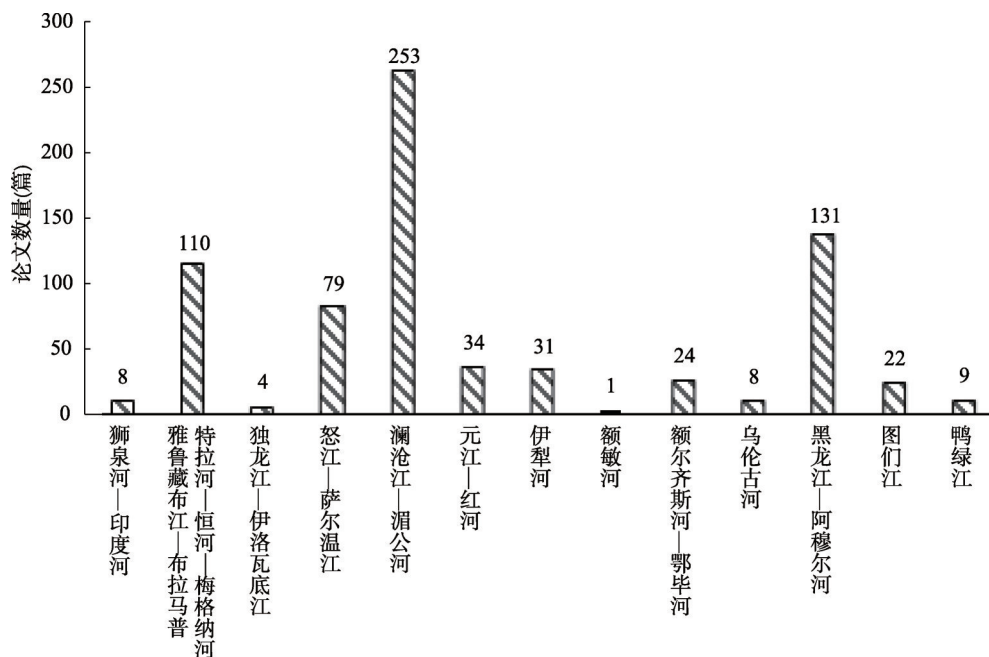


图2 1949—2022年6项检索来源期刊发表中国国际河流水文地理研究领域论文研究流域分布

Fig. 2 Spatial distribution of the study areas of the papers published in the journals of the six retrieval sources in the field of hydro-geographical researches on Chinese international rivers

2.2 水文过程变化规律

中国国际河流流域下游社会经济发展严重依赖上游提供的水资源保障,在气候变化及人类活动影响下,全面认识河流径流量对全球变化的响应机制,是维护沿岸国家水安全和社会经济可持续发展的迫切需要。

2.2.1 西南地区国际河流 青藏高原发源了多条中国西南地区与南亚、东南亚重要的国际河流。1980—2018年间青藏高原气温变化率达到 $0.42\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,为全球平均水平的两倍,剧烈的增温已经在很大程度上改变了该区域的水循环过程以及下游国家的水资源^[12]。

1980—2016年狮泉河—印度河流域的年平均气温呈显著增加的趋势,其变化率为 $0.30\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,年降水量则呈少—多—少—多的年代际振荡^[13],流域洪涝灾害可能将增加^[14]。另一方面,狮泉河—印度河流域上游径流补给以冰川融水为主,占径流总量的比例高达 40.6% ^[15]。预计2050年前冰川径流将持续增加,但未来融水“拐点”到来后,冰川退缩将导致地表径流减少^[16]。

雅鲁藏布江流域在1961—2014年期间气温呈现出升高趋势,升温率在 $0.20\sim 0.60\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 之间^[17];随气温的增加,流域潜在蒸散发以 $2.3\text{ mm}/10\text{a}$ 的速率上升^[18];降水在1979—2018年整体上呈增加趋势,年降水量的变化率为 2.5 mm/a ^[19];1961—2015年期间奴下站年径流量表现出先减后增的变化趋势,转折点在1992年^[20];降水、潜在蒸散发、下垫面及冰川变化对径流量增加的贡献率依次为 39.62% 、 -2.74% 、 32.32% 及 30.94% ^[17]。受气候变化影响,未来雅鲁藏布江流域地下水补给可能将减少,而雨水补给可能将占据主导地位^[21]。

怒江流域整体上呈现增温增湿趋势,年平均气温的增幅达到 $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,大部分站点年降水量变化趋势不显著^[22],1960—2009年道街坝站冬季及春季流量存在显著的增加趋势^[23]。

澜沧江流域1958—2015年间气温呈显著增加趋势^[24],且变暖速率高于下游湄公河流域^[25]。澜沧江流域降水及径流则呈减少趋势,其中径流下降趋势显著,年平均气温、降水量及径流深的倾向率分别为 $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $-4.2\text{ mm}/10\text{a}$ 及 $-14.9\text{ mm}/10\text{a}$ ^[24]。未来气候变化将加剧澜沧江—湄公河流域水循环,受降水增加的影响,年及季节流量都将增长^[26],而未来澜沧江—湄公河流域境外河段拟建的电站也将对水文过程产生重大的影响^[27]。Lauri等^[28]模拟分析了气候变化及电站运行对澜沧江—湄公河流域水文情势的影响,结果表明未来电站运行的影响可能比气候变化更大,尤其是在旱季。

1961—2012年元江流域气温显著增加,其增温率为 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$;流域降水在整体上呈现减少趋势,平均变化率为 $-14.0\text{ mm}/10\text{a}$ 。1956—2013年元江—红河干流出境控制站蛮耗站和最大支流李仙江的出境控制站李仙江站年径流量均呈减少趋势,其变化率分别为 $-3.56\text{ 亿 m}^3/10\text{a}$ 及 $-4.45\text{ 亿 m}^3/10\text{a}$,其中李仙江站径流减少趋势显著。降水量的减少是元江及李仙江径流量降低的主要原因,而人类活动则在一定程度上改变了径流的年内分配特征^[29]。

在升温 $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情景下,发源于青藏高原的主要国际河流径流量未来预计都将有所增加,但变化幅度具有较大差异。雅鲁藏布江及恒河的流量增幅比较大,21世纪70年代上述2条河流流出青藏高原的年平均流量预计将分别较历史时期(1985—2014年)增加 $(7.3\pm 11)\%$ 及 $(9.5\pm 11)\%$,狮泉河、怒江及澜沧江的变化则相对较小,其增加幅度分别为 $(1.5\pm 9)\%$ 、 $(1.9\pm 5)\%$ 及 $(2.6\pm 7)\%$ ^[30]。

2.2.2 西北地区国际河流 西北国际河流所处的亚洲中部干旱区为对气候变化的响应最敏感及复杂的区域之一,水文过程变化剧烈、生态环境较为脆弱^[31]。

1962—2013年额尔齐斯河流域富蕴、阿勒泰及哈巴河站年降水量显著上升,且增幅较大,其变化倾向率分别达到 $17.9\text{ mm}/10\text{a}$ 、 $17.5\text{ mm}/10\text{a}$ 及 $17.4\text{ mm}/10\text{a}$ (3站年平均降水量分别为 191.2 mm 、 197.3 mm 及 189.8 mm)^[32]。

伊犁河汇入的巴尔喀什湖为哈萨克斯坦境内的最大湖泊,该湖近年来主要入湖河流水量减少,湖泊水位持续下降,造成湖泊退化、水质恶化及水体盐碱化等生态环境问题,伊犁河中国境内流量变化及其原因广受关注^[33]。1961—2009年伊犁河流域的年降水量呈增加趋势^[34],气温上升引起了伊犁河流域冰川的加速消融^[35],伊犁河最重要支流特

克斯河流域冰川退缩较为严重,与20世纪70年代的1511 km²相比,流域2007年的冰川面积已缩减332 km²[36]。降水增加及冰川加速消融导致了伊犁河流域产水量的增加,伊犁河由中国流入哈萨克斯坦的水量呈现增加趋势[37]。下游哈萨克斯坦境内部分水文过程受人类活动影响较大,哈萨克斯坦水利工程尤其是普恰盖水库蓄水以及农业用地的增加使伊犁河下游水量减少,并导致巴尔喀什湖水位的下降[33, 38-39]。

西北地区国际河流所处的西北干旱区气候变化整体上表现为气温升高及降水增加[40-41]。由于河流径流成分复杂,水文过程对气候变化的响应敏感,气温及降水量比较小的改变都会引发水文循环过程的变化[42-45]。虽然降水增加,但由于其对径流的补给较为有限,未必能弥补由于气温上升而增多的蒸散发[41];尽管短期内由于冰雪融水增加,径流量有所增加,但是在未来持续的气候变暖条件下,部分流域可能达到冰川消融拐点,冰雪融水将会有减少的趋势[43]。受气候变暖的影响,干旱区中依靠降水及冰雪融水补给的水资源系统会更加脆弱,水资源的不确定性将加剧[44],并可能导致生态退化和国际河流争端等问题更加突出[46]。研究西北国际河流水文过程变化规律,进一步协调社会经济发展和生态用水间的矛盾,是亟待解决的问题[38]。

2.2.3 东北地区国际河流 1954—2012年黑龙江流域年平均气温呈显著的增加趋势,增温率达到了0.31 °C/10a[47]。另一方面,黑龙江—阿穆尔河流域降水变化并不大,其线性趋势变化率仅为-0.74 %/10a,且大多变化趋势并不显著[48],仅下游有显著的变化趋势[49]。1960—2009年松花江流域大部分地区年径流量呈下降趋势[50];1897—2005年黑龙江—阿穆尔河主要控制站哈巴罗夫斯克站的年径流量呈微弱下降趋势,其变化率为30.68 亿m³/10a(该站多年平均径流量为2604.06 亿m³),各年代径流量经历了减少—增加—减少的过程[51]。目前关于黑龙江—阿穆尔河流域的研究尚相对不足[52]。

2.3 跨境水灾害及水安全调控

气候变化可能导致部分中国国际河流洪水持续时间、洪峰量级和发生频率增加;此外,流域一些地区极端高温及干旱也在加剧[14, 53],日益加剧的跨境水灾害需要流域国共同合作应对。同国内河流相比,国际河流防洪及抗旱调度机制构建的难度更大,如何有效利用不同国家水利工程,开展全流域水安全调控,是流域各国较为关注的问题[54-55]。

澜沧江—湄公河流域已建、在建及规划的127个库容较大水库总库容已达1339.5 亿m³[54]。在完全依照防洪目标进行水库调度的情况下,能够将湄公河主要断面200 a一遇的洪水削减至20~50 a一遇[54]。在干旱应对方面,澜沧江梯级水库已多次发挥积极作用。2016年澜沧江—湄公河流域枯水季节(2015年12月—2016年5月)遭受了严重的旱灾,旱情较为严重的湄公河三角洲水位降到了近90年来最低,社会经济损失巨大。2016年3—5月,中国增大景洪水库出库流量,对湄公河进行应急补水,累计补水量达到126.5 亿m³,湄公河干流的沿程流量增多600~1010 m³/s,水位抬升0.18~1.53 m[55]。2019年汛期初期湄公河的水位降低到有记录来的最低。湄公河委员会认为干旱的主要原因在于降水不足及异常高温[56]。在此次干旱过程中,小湾及糯扎渡水库补水172 亿m³,一定程度上对下游旱情起到了缓解作用[57]。在未来澜沧江—湄公河流域水文地理研究过程中,还需要重点开展流域支流水利工程运行对水文过程的影响研究,以更好地进行全流域洪水及干旱应对[55]。

中国国际河流多发源于冰冻圈,气候变化加剧冰湖溃决等环境灾害问题,影响到下游防洪安全[58]。冰湖溃决洪水突发性强、洪峰流量大、流量变化快、破坏力强、影响范围广,会导致下游居民生命及财产的巨大损失[59]。全球约1500万人面临着冰湖溃决洪水的威胁,其中很大一部分集中于中国国际河流及其下游[60]。受到冰川退缩、冰川融水增

加、冰碛湖扩大及潜在溃决风险加大的影响,位于中国国际河流上游的青藏高原及天山等地区,冰湖溃决洪水发生频率增多、影响程度加剧^[61-62],需加强冰湖监测及溃决灾害预警^[59]。

黑龙江—阿穆尔河流域是跨境水灾害方面另一个备受关注的国际河流流域。2013年汛期,黑龙江右岸的嫩江及松花江干流均遭遇1998年来的最大洪水,同时,黑龙江左岸的结雅河及布列亚河流域发生持续强降水^[63]。由于干支流洪水的遭遇叠加,洪水量级较大,抚远站出现了重现期超过100 a一遇的大洪水^[64],其下游哈巴罗夫斯克河段的最大洪水流量为46000 m³/s,重现期达到了200~250 a一遇^[65]。在此次洪水过程中,嫩江的尼尔基水库、第二松花江的白山与丰满水库的削峰率达到了40%~60%^[66];位于结雅河总库容达到684.2 亿m³的结雅水库与位于布列亚河的布列亚水库也发挥了重要的拦蓄洪水作用,在很大程度上缓解了黑龙江干流的防洪压力^[65]。

黑龙江—阿穆尔河流域水环境直接关系到沿岸中俄人民的饮水需求^[67]。流域曾经多次发生跨境水污染事件,加强中俄两国在跨境水污染方面的合作具有现实意义^[68]。2005年松花江水污染事故发生后,中方为保证黑龙江—阿穆尔河流域下游俄罗斯远东地区的用水安全,在黑龙江省抚远水道入口处开展筑坝拦截工程,以防止污染水团流向俄罗斯境内^[69]。张波等^[70]构建了系统动力学模型,对2005年松花江水污染事故进行了水质模拟,模型能够预测不同情况下的污染物浓度变化,进而为跨境水环境调控提供决策支持。

国际河流流域洪旱灾害防治对于流域国社会经济可持续发展至关重要,然而目前相关水安全调控机制仍不健全。以澜沧江—湄公河流域为例,流域国涉水权、责、利尚待厘清,仍然缺乏常态、规范、技术操作可行的洪旱灾害联合应对合作机制,不具备水利工程联合调度的工作流程^[71]。气候变化及人类活动对国际河流水文过程影响深远且复杂,需要从流域和多学科尺度,评估流域气候、水文、水资源、水环境变化,以及这些变化对流域一区域社会经济和地缘关系发展的当前影响及未来预期风险,通过自然、工程和技术等多种措施的优化组合,提出并制定适应气候变化、促进水资源合理利用和减少水灾害危害的跨境水安全综合调控方案。

2.4 水文生态变化归因及跨境影响

在全球变化影响下,水文生态变化及其原因较为复杂,是国际河流研究的重点及难点之一,对于流域可持续开发利用具有重要意义。

水坝对全球淡水物种多样性构成重大威胁^[72],和国内河流相比,水电开发对国际河流的跨境生态影响更受关注^[3]。澜沧江—湄公河是世界上生物多样性第二丰富的河流,干支流上修建的大坝将对其生物多样性产生影响^[73]。在受梯级电站影响较大的澜沧江梯级开发河段,本地鱼类物种显著减少;在上游水文过程变化较小的河段,本地鱼类物种的消失则较少^[74]。大坝阻隔导致了河流生境的破碎化,对广布种与洄游物种的生存空间及自然分布范围形成限制,外来物种入侵大坝库区也影响到本地物种^[74]。鱼类的分类学多样性和系统发育多样性都表现出时空分异,上游的变化较小,而下游则变化较大^[75]。另一方面,以往常被忽略的堰和小型水坝是澜沧江栖息地碎片化的主要原因,在澜沧江—湄公河生物多样性保护中,其影响必须和大型水坝同时考虑^[76]。

额尔齐斯河河谷平坦宽阔,两岸滩地分布着次生林及草场,形成了独特的河谷生态系统。毁林开荒、过度放牧及捕捞、水利工程建设及运行等人类活动对流域生态系统造成威胁。邓铭江^[77]认为,修复额尔齐斯河生态系统,需要揭示3个科学问题:林草生态系统物候节律及生态需耗水机理;鱼类产卵繁殖生境条件及其水文机理;乌伦古湖水循环及水平衡机理,以及水生态保护及水污染防治对策。

在黑龙江—阿穆尔河流域, 梯级水电对鱼类的影响也有研究。杨净等^[78]分析了梯级水电开发对黑龙江—阿穆尔河的支流第二松花江鱼类种类的影响, 结果表明梯级水库阻碍了鱼的迁移, 对保护鱼类物种具有负面作用。湿地变化是黑龙江—阿穆尔河流域水文生态变化另一个关注的重点。Jia等^[79]分析了黑龙江—阿穆尔河流域中国一侧河漫滩湿地变化, 结果表明, 1990—2018年该区域河漫滩湿地从8867 km²减少至6630 km², 减幅高达25%, 损失的河漫滩湿地以转移为农田为主。

2.5 水—能源—粮食—生态纽带关系

河流具有供水、灌溉、渔业、航运、水力发电和生态系统服务等多种功能, 这些功能在流域内可能存在空间差异, 由此导致的不同地区用水偏好也可能有所不同, 上游和下游用水之间可能存在争议和冲突^[80]。传统水文学难以准确地刻画水文系统及人类活动之间的互馈关系与协同演化过程, 不能对耦合系统变化进行合理的预测^[81-82]。基于水文学及相关交叉学科, 社会水文学将社会及自然驱动力作为内生变量, 对“人—水”耦合系统演化过程进行理解及预测^[82-83], 进而为国际河流水资源合理开发利用提供依据。

中国和南亚、东南亚地区国际河流流域下游人口密集的洪泛平原严重依赖上游山地的水资源。例如, 狮泉河—印度河流域具有全球最大的灌溉系统, 下游灌溉抽取了95%的水资源^[84], 巴基斯坦1/3的电力来自于水力发电^[85]。流域人口为2.37亿, 预计到2050年将增长到3.83亿^[84]。尽管预计未来青藏高原降水及河流径流量将增加, 这些变化依然无法满足国际河流下游国家不断增加的用水需求^[12]。应对及适应全球变化、建立可持续发展路径已成为这些流域的当务之急^[16]。

在澜沧江—湄公河流域, 中国及缅甸对水资源的需求主要在航运及水电方面, 老挝集中于水电开发及农(渔)业, 泰国水产养殖、灌溉和水电开发需求较大, 柬埔寨依赖于湄公河向洞里萨湖补水以维持当地居民生活, 越南则重视湄公河在生态安全及农业生产等方面的作用^[86]。国际河流流域国家都需要最大限度提高用水效率, 统筹考虑流域能源、粮食、生态和水资源间的均衡关系, 以应对水短缺危机^[4]。由于涉及到多主体与多生产部门的利益关联和协同, 国际河流水—能源—粮食—生态纽带关系复杂, 如何进行水资源分配以满足水力发电、粮食生产及生态系统维护等流域国的不同需求是国际河流水资源的一个核心问题。

通过耦合水文模拟、水库调度、效益计算、生态约束及政策反馈等模块的流域水—能源—粮食—生态纽带关系模型, 一些研究对不同自然社会情景的水文、效益及合作等进行模拟, 并探讨各水文条件及目标情景组合下的多目标耦合作用与互馈关系。澜沧江—湄公河流域水库调度能够减少5.6%~6.4%的洪水量级及17.1%~18.9%的洪水频率, 代价是全流域水力发电量9.8%~14.4%的损失。当水库调度以防洪为主要目标时, 上游水库水力发电量的损失较下游大5.4倍^[87]。澜沧江—湄公河流域水利共享方案的评估表明, 合作可以为流域国带来更多的增量效益, 尤其是在枯水年^[88-89]。Do等^[90]量化了澜沧江—湄公河流域水库运行对水力发电、灌溉作物生产及洞里萨湖渔业生产等的作用, 在不严重影响水电生产的前提下, 水库运行可通过增加灌溉供水量, 将灌溉作物收入提升49%, 并将干旱期间作物损失减少30%; 另一方面, 生态友好的管理使渔业生产增加75%, 但灌溉作物及电力产量分别减少48%及17%。Gao等^[91]研究流域国价值偏好、水库运行政策及未来大坝建设的影响, 结果表明水电及农业偏好对合作下的水—能源—粮食关联关系影响很大, 凸显了考虑各种社会水文条件的灵活合作政策的重要性。Lu等^[80]构建了澜沧江—湄公河流域社会水文模型, 对水文过程、水库运行、经济效益、政策反馈及合作动态等开展综合模拟, 结果表明水文变化及水库运行影响着流域国间的合作动

态, 尽管上游国家可能因采取有利于下游国家的措施而损失一些水力发电的经济利益, 但其也将获得一定的间接利益。

在雅鲁藏布江—布拉马普特拉河流域, 水—能源—粮食—生态纽带关系研究结果也表明了国际河流域水力发电、航运及农业灌溉之间的协同效应。流域干流水电开发可将水电生产提高 33.7%~75.0%, 增加旱季的最小流量, 为孟加拉国提供更高的灌溉用水保证率, 使马久利岛至下游的通航时间延长 1~4 个月, 同时使下游印度及孟加拉国受洪水影响区域分别减少 32.6% 及 14.8%^[92]。

2.6 国际合作进展

中国目前与周边国家国际河流合作的范围涵盖整个河流利用及保护领域, 包括: ① 为防灾减灾而进行的水情信息交换和应急事件合作处置; ② 专门领域合作; ③ 全面合作^[4]。

水文测验及资料整编、水文分析计算、水文数据交换是国际河流开展合作开发的基础工作。黑龙江—阿穆尔河及澜沧江—湄公河流域在这方面具有良好的合作基础。2013 年黑龙江—阿穆尔河特大洪水期间, 中国及俄罗斯在黑龙江—阿穆尔河流域开展了积极的跨境联合防洪, 俄罗斯向中方发送结雅及布列亚水库的泄洪信息, 以利于中俄双方准确的水情研判^[93]; 2020 年中国和湄公河五国共同启动了澜湄水资源合作信息共享平台网站, 加强流域各国在水资源数据、信息、知识、经验及技术等的共享, 以更好地应对洪旱灾害^[94]。

由于中国不同区域国际河流面临的主要水问题具有较大差异, 合作内容也不尽相同。西南地区的国际河流流域近年来频繁受到干旱影响, 旱灾是流域国共同面临的问题。2016 年和 2019 年澜沧江—湄公河流域下游遭遇严重旱灾, 澜沧江水库对下游进行补水, 在一定程度上对下游旱情起到了缓解作用^[57]。西北地区的国际河流流域地处于旱区, 需要加强水资源规划及技术合作, 合理分配跨境水资源以满足各流域国家灌溉需求^[95]。东北地区的国际河流以界河为主, 洪涝灾害及水污染为面临的主要跨境水问题^[95]。刘宗瑞等^[63]认为需要从防洪组织层次、洪灾历时阶段进行跨时段多层次跨境防洪机制的构建; 周海炜等^[68]提出跨境水污染防治需以政府间合作为主, 辅以市场及公众参与, 从战略、管理及技术等 3 个层面构建合作机制, 进而逐渐形成长期稳定的合作模式。

尽管国际河流合作开发取得一些进展, 但仍面临诸多困难。另一方面, 在全球变化背景下, 原有国际河流管理方式及合作模式都会受到新的挑战, 需建立健全合作机制来适应。陈霖巍^[4]认为未来中国与周边国家的国际河流合作, 需要更为重视全球变化下的流域管理, 关注跨境水—能源—粮食—生态纽带关系, 注重探索跨境水利益共享机制。

3 研究展望

目前, 国际河流的研究中各流域国家多关注各自国家的需求, 针对国际河流全流域尺度水文水资源本底的综合研究相对较少, 缺乏对流域水文地理的整体科学认识, 也导致流域水文、水资源、生态环境等基础数据混乱和难于共享。从中国的情况来看, 国际河流水文地理相关研究长期以来重点关注境内部分, 且研究多集中于少数几条国际河流, 从区域至全国层面的综合研究不足, 尤其缺乏全流域尺度系统研究^[1]。未来需要从流域地理、气候、水文、生态、水资源与水电能源、社会经济与历史文化、跨境问题与地缘关系等多方面, 发挥地理学综合分析及多学科交叉的优势, 开展全流域科学考察和综合研究, 明晰跨境资源环境本底及其在各流域国家的互补特征、开发潜力和合作利益。

由于中国国际河流流域下垫面地理环境及水文过程空间差异大,气候变化及人类活动影响下的水循环要素时空变化复杂,水文过程的变化特征、机制及其生态、社会经济效应未来仍将是中国国际河流水文地理的研究重点。需在多源数据融合的基础上,对流域内气候及人类活动状况进行全面分析,构建多尺度分布式水文模型,耦合区域地球系统模式,开展跨境水文过程模拟研究,对国际河流径流变化及其跨境影响进行评估,更为深入地揭示国际河流流域水文及生态过程变化对全球变化的响应规律^[11]。除长江及黄河源区外,中国冰冻圈几乎全部位于国际河流区。在气候变暖影响下,冰冻圈的快速变化很大程度上改变了冰川融水、融雪径流及冻土水文等^[96],其对国际河流水安全的影响深远且复杂^[11]。需加强冰冻圈气温、降水、冰川、融雪及冻土等的观测,并提高流域尺度全要素综合模拟能力,以全面理解不同要素对径流变化的影响^[17]。

中国的国际河流主要分布于陆疆的沿边地区,观测资料尤其是高海拔地区数据稀缺,水文过程及其变化的深入研究受到了很大的制约^[11, 41]。针对国际河流流域观测数据获取难度大、部分数据质量不高等问题,日趋成熟的降水量、蒸散发、土壤水及水储量变化等水循环变量遥感产品,可以为国际河流水文地理研究提供较好的数据支持,同时以多源数据为支撑的流域水文模拟是国际河流流域水文过程及水资源研究的重要手段^[41]。

国际河流流域水—能源—粮食—生态纽带关系研究所需的相关数据涉及不同流域国家,收集难度比较大,未来需应用“大数据”及知识挖掘技术,拓宽数据的获取渠道。另一方面,结合陆面—水文—社会耦合模拟,从过程、多时间尺度及对比分析等对国际河流流域人—水耦合系统互馈机制及其变化开展进一步的研究,全面揭示国际河流“水—能源—粮食—生态”纽带关系^[97-98]。

4 结论

本文从水文过程变化规律、跨境水灾害及水安全调控、水文生态变化归因及跨境影响、水—能源—粮食—生态纽带关系、国际合作进展等5个方面,对中国国际河流水文地理研究进行了综述,主要结论为:

(1) 中国国际河流水文及生态过程对气候变化与人类活动的响应敏感且复杂,由于自然地理特征、气候变化及人类活动等差异,中国不同区域国际河流水文过程变化规律不尽相同。需要量化这些变化的关键驱动因子及贡献,聚焦其在各流域国家间的差异,为跨境流域的合作利用、保护和管理提供具有水文地理科学基础的综合性水文科学技术知识体系。

(2) 全球变化背景下,中国国际河流径流过程变化复杂、极端事件频发。以往在澜沧江—湄公河、黑龙江—阿穆尔河等流域均已开展过典型的跨境水安全调控,但目前相关水安全调控机制仍不健全。需要利用共识性、规范化及空天地一体化精准监测技术获取多源信息,建设规范化大数据平台,提高研究成果的规范性、统一性、可视化和可应用性;流域国家也应重视加强水灾害应对方面的合作,制定更为合理的水安全综合调控方案。

(3) 满足流域国水力发电、粮食生产及生态系统维护等不同需求是国际河流水资源的一个核心问题,水—能源—粮食—生态纽带关系的模拟,揭示了中国国际河流流域各水文条件及目标情景组合下的多目标耦合作用与互馈关系,有利于开展水文过程及格局变化对国际河流相关法律法规、政策、机制的影响研究,为跨境水合作与水外交提供科学依据及支撑。

参考文献(References)

- [1] He Daming, Li Yungang, Feng Yan. International river development and geo-cooperation challenges in China. *Education of Geography*, 2013(7/8): 4-6. [何大明, 李运刚, 冯彦. 我国国际河流开发与地缘合作挑战. *地理教育*, 2013(7/8): 4-6.]
- [2] McCracken M, Wolf A T. Updating the register of international river basins of the world. *International Journal of Water Resources Development*, 2019, 35(5): 732-782.
- [3] He Daming, Liu Changming, Feng Yan, et al. Progress and perspective of international river researches in China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9): 1284-1294. [何大明, 刘昌明, 冯彦, 等. 中国国际河流研究进展及展望. *地理学报*, 2014, 69(9): 1284-1294.]
- [4] Chen Jiwei. Cooperation and prospective on transboundary rivers between China and its neighboring countries. *Journal of Boundary and Ocean Studies*, 2019, 4(5): 60-70. [陈霁巍. 中国跨界河流合作回顾与展望. *边界与海洋研究*, 2019, 4(5): 60-70.]
- [5] Xia Jun, Shi Wei. Perspective on water security issue of changing environment in China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(3): 292-301. [夏军, 石卫. 变化环境下中国水安全问题研究与展望. *水利学报*, 2016, 47(3): 292-301.]
- [6] Guo Lidan, Jing Peiran, Zhang Yukuo. Visualization analysis on the research hotspots and frontiers of China's international rivers. *World Regional Studies*, 2022, 31(3): 490-502. [郭利丹, 井沛然, 张玉阔. 中国国际河流研究热点与前沿的可视化分析. *世界地理研究*, 2022, 31(3): 490-502.]
- [7] Liu Changming, Liu Xuan, Yang Yafeng, et al. A discussion on some issues of hydro-geographical research. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(1): 3-15. [刘昌明, 刘璇, 杨亚锋, 等. 水文地理研究发展若干问题商榷. *地理学报*, 2022, 77(1): 3-15.]
- [8] Xu Zongxue, Jiang Yao. Studies on runoff evolution mechanism under changing environment: A state-of-the-art review. *Hydro-Science and Engineering*, 2022(1): 9-18. [徐宗学, 姜瑶. 变化环境下的径流演变与影响研究: 回顾与展望. *水利水运工程学报*, 2022(1): 9-18.]
- [9] Wang Tao, Liu Chengliang, Du Debin. Spatio-temporal dynamics of international freshwater conflict events and relations from 1948 to 2018. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(7): 1792-1809. [王涛, 刘承良, 杜德斌. 1948—2018年国际河流跨境水冲突的时空演化规律. *地理学报*, 2021, 76(7): 1792-1809.]
- [10] Zhai Chenyang, Du Debin, Hou Chunguang, et al. The evolution of geo-relation network in countries around the Asian Water Tower based on cooperation and conflict perspectives. *Geographical Research*, 2021, 40(11): 3118-3136. [翟晨阳, 杜德斌, 侯纯光, 等. 基于合作与冲突视角的“亚洲水塔”周边国家地缘关系网络演化研究. *地理研究*, 2021, 40(11): 3118-3136.]
- [11] He Daming, Liu Heng, Feng Yan, et al. Perspective on theories and methods study of transboundary water resources under the global change. *Advances in Water Science*, 2016, 27(6): 928-934. [何大明, 刘恒, 冯彦, 等. 全球变化下跨境水资源理论与方法研究展望. *水科学进展*, 2016, 27(6): 928-934.]
- [12] Yao T D, Bolch T, Chen D L, et al. The imbalance of the Asian water tower. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(10): 618-632.
- [13] Zhao Jianting, Wang Yanjun, Su Buda, et al. Spatiotemporal distributions of temperature, precipitation, evapotranspiration, and drought in the Indus River Basin. *Arid Land Geography*, 2020, 43(2): 349-359. [赵建婷, 王艳君, 苏布达, 等. 印度河流域气温、降水、蒸发及干旱变化特征. *干旱区地理*, 2020, 43(2): 349-359.]
- [14] Deng Wei, Zhao Wei, Liu Bintao, et al. Water security and the countermeasures in South Asia based on the "Belt and Road" initiative. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(7): 687-701. [邓伟, 赵伟, 刘斌涛, 等. 基于“一带一路”的南亚水安全与对策. *地球科学进展*, 2018, 33(7): 687-701.]
- [15] Lutz A F, Immerzeel W W, Shrestha A B, et al. Consistent increase in High Asia's runoff due to increasing glacier melt and precipitation. *Nature Climate Change*, 2014, 4(7): 587-592.
- [16] Wang Xiaoming, Zhang Jinglin, Liu Shiwei, et al. Socioeconomic significance of Asian Water Tower in High Asia region. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1332-1340. [王晓明, 张靖琳, 刘世伟, 等. “亚洲水塔”在高亚地区的社会经济作用. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1332-1340.]
- [17] Xu Zongxue, Ban Chunguang, Zhang Rui. Evolution laws and attribution analysis in the Yarlung Zangbo River basin. *Advances in Water Science*, 2022, 33(4): 519-530. [徐宗学, 班春广, 张瑞. 雅鲁藏布江流域径流演变规律与归因分析. *水科学进展*, 2022, 33(4): 519-530.]
- [18] Li C Y, Hao J S, Zhang G T, et al. Runoff variations affected by climate change and human activities in Yarlung Zangbo

- River, southeastern Tibetan Plateau. *Catena*, 2023, 230: 107184. DOI: 10.1016/j.catena.2023.107184.
- [19] Zhang Yihui, Liu Changming, Liang Kang, et al. Spatio-temporal variation of precipitation in the Yarlung Zangbo River basin. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(3): 603-618. [张仪辉, 刘昌明, 梁康, 等. 雅鲁藏布江流域降水时空变化特征. *地理学报*, 2022, 77(3): 603-618.]
- [20] Li Hao, Niu Qiankun, Wang Xuanxuan, et al. Variation characteristics of runoff in Yarlung Zangbo River basin from 1961 to 2015. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 110-115. [李浩, 牛乾坤, 王宣宣, 等. 1961—2015年雅鲁藏布江流域径流演变规律分析. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 110-115.]
- [21] Xuan W D, Xu Y P, Fu Q, et al. Hydrological responses to climate change in Yarlung Zangbo River basin, Southwest China. *Journal of Hydrology*, 2021, 597: 125761. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125761.
- [22] Fan Hui, He Daming. Regional climate and its change in the Nujiang River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(5): 621-630. [樊辉, 何大明. 怒江流域气候特征及其变化趋势. *地理学报*, 2012, 67(5): 621-630.]
- [23] Luo Xian, He Daming, Ji Xuan, et al. Low flow variations in the middle and upper Nujiang River basin and possible responds to climate change in recent 50 years. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(1): 107-113. [罗贤, 何大明, 季漩, 等. 近50年怒江流域中上游枯季径流变化及其对气候变化的响应. *地理科学*, 2016, 36(1): 107-113.]
- [24] Li Haichuan, Wang Guoqing, Hao Zhenchun, et al. Characteristics analysis of hydrometeorological elements in Lancang River Basin. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2017, 28(4): 21-27, 34. [李海川, 王国庆, 郝振纯, 等. 澜沧江流域水文气象要素变化特征分析. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(4): 21-27, 34.]
- [25] Liu J G, Chen D L, Mao G Q, et al. Past and future changes in climate and water resources in the Lancang-Mekong River basin: Current understanding and future research directions. *Engineering*, 2022, 13: 144-152.
- [26] Hoang L P, Lauri H, Kumm M, et al. Mekong River flow and hydrological extremes under climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(7): 3027-3041.
- [27] Trung L D, Duc N A, Nguyen L T, et al. Assessing cumulative impacts of the proposed Lower Mekong Basin hydropower cascade on the Mekong River floodplains and Delta: Overview of integrated modeling methods and results. *Journal of Hydrology*, 2020, 581: 122511. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.01.029.
- [28] Lauri H, de Moel H, Ward P J, et al. Future changes in Mekong River hydrology: Impact of climate change and reservoir operation on discharge. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(12): 4603-4619.
- [29] Li Xue, Li Yungang, He Jiaonan, et al. Analysis of variation in runoff and impacts factors in the Yuanjiang-Red River Basin from 1956 to 2013. *Resources Science*, 2016, 38(6): 1149-1159. [李雪, 李运刚, 何娇楠, 等. 1956—2013年元江—红河流域径流变化及其影响因素分析. *资源科学*, 2016, 38(6): 1149-1159.]
- [30] Cui T, Li Y K, Yang L, et al. Non-monotonic changes in Asian Water Towers' streamflow at increasing warming levels. *Nature Communications*, 2023, 14: 1176. DOI: 10.1038/s41467-023-36804-6.
- [31] Chen Fahu, Dong Guanghui, Chen Jianhui, et al. Climate change and silk road civilization evolution in arid central Asia: Progress and issues. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(6): 561-572. [陈发虎, 董广辉, 陈建徽, 等. 亚洲中部干旱区气候变化与丝路文明变迁研究: 进展与问题. *地球科学进展*, 2019, 34(6): 561-572.]
- [32] Ju Bin, Ye Wen, Hu Dan. Variation characteristics and trend of precipitation in Irtysh River basin of Xinjiang. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2015, 26(4): 115-119. [鞠彬, 叶文, 胡丹. 新疆额尔齐斯河流域降水量变化特征及趋势分析. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(4): 115-119.]
- [33] Duan Weili, Zou Shan, Chen Yaning, et al. Analysis of water level changes in Lake Balkhash and its main influencing factors during 1879-2015. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(9): 950-961. [段伟利, 邹珊, 陈亚宁, 等. 1879—2015年巴尔喀什湖水位变化及其主要影响因素分析. *地球科学进展*, 2021, 36(9): 950-961.]
- [34] Zhao Li, Yang Qing, Han Xueyun. Analysis of temporal and spatial distribution and variation characteristics of precipitation index in Ili during 1961-2009. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(10): 82-89. [赵丽, 杨青, 韩雪云. 1961—2009年伊犁地区降水指数的时空分布及变化特征分析. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(10): 82-89.]
- [35] Xing Wucheng, Li Zhongqin, Zhang Hui, et al. Spatial-temporal variation of glacier resources in Chinese Tianshan Mountains since 1959. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(9): 1594-1605. [邢武成, 李忠勤, 张慧, 等. 1959年来中国天山冰川资源时空变化. *地理学报*, 2017, 72(9): 1594-1605.]
- [36] Xu B R, Lu Z X, Liu S Y, et al. Glacier changes and their impacts on the discharge in the past half-century in Tekes watershed, Central Asia. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2015, 89/90: 96-103.
- [37] Zhang Zhibin. Hydrological and ecological effects of water resources development and utilization in Ili River Basin. *Energy and Energy Conservation*, 2022(7): 68-70. [张志斌. 伊犁河流域水资源开发利用的水文及生态效应分析. *能*

- 源与节能, 2022(7): 68-70.]
- [38] Wang Jiaoyan, Lu Jingxuan. Hydrological and ecological impacts of water resources development in the Yili River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(7): 1297-1307. [王姣妍, 路京选. 伊犁河流域水资源开发利用的水文及生态效应分析. *自然资源学报*, 2009, 24(7): 1297-1307.]
- [39] Long Aihua, Deng Mingjiang, Xie Lei, et al. A study of the water balance of Lake Balkhash. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(6): 1341-1352. [龙爱华, 邓铭江, 谢蕾, 等. 巴尔喀什湖水量平衡研究. *冰川冻土*, 2011, 33(6): 1341-1352.]
- [40] Yao Junqiang, Liu Zhihui, Yang Qing, et al. Temperature variability and its possible causes in the typical basins of the arid Central Asia in recent 130 years. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(3): 291-302. [姚俊强, 刘志辉, 杨青, 等. 近130年来中亚干旱区典型流域气温变化及其影响因子. *地理学报*, 2014, 69(3): 291-302.]
- [41] Yang Shengtian, Yu Xinyi, Ding Jianli, et al. A review of water issues research in Central Asia. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 79-93. [杨胜天, 于心怡, 丁建丽, 等. 中亚地区水问题研究综述. *地理学报*, 2017, 72(1): 79-93.]
- [42] Chen Yaning, Li Zhi, Fan Yuting, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9): 1295-1304. [陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展. *地理学报*, 2014, 69(9): 1295-1304.]
- [43] Chen Yaning, Li Zhi, Fang Gonghuan, et al. Impact of climate change on water resources in the Tianshan Mountains, Central Asia. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 18-26. [陈亚宁, 李稚, 方功焕, 等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究. *地理学报*, 2017, 72(1): 18-26.]
- [44] Chen Y N, Li Z, Fang G H, et al. Large hydrological processes changes in the transboundary rivers of Central Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123: 5059-5069.
- [45] Chen Yaning, Li Zhi, Fang Gonghuan. Changes of key hydrological elements and research progress of water cycle in the Tianshan Mountains, Central Asia. *Arid Land Geography*, 2022, 45(1): 1-8. [陈亚宁, 李稚, 方功焕. 中亚天山地区关键水文要素变化与水循环研究进展. *干旱区地理*, 2022, 45(1): 1-8.]
- [46] Li Zhi, Li Yupeng, Li Hongwei, et al. Analysis of drought change and its impact in Central Asia. *Advances in Earth Science*, 2022, 37(1): 37-50. [李稚, 李玉朋, 李鸿威, 等. 中亚地区干旱变化及其影响分析. *地球科学进展*, 2022, 37(1): 37-50.]
- [47] Yan Bo, Xia Ziqiang, Huang Feng, et al. Climate change detection and extreme temperature return level analysis of Heilongjiang Basin. *Water Resources and Power*, 2016, 34(10): 5-8. [鄢波, 夏自强, 黄峰, 等. 黑龙江流域气温突变诊断及极值重现期分析. *水电能源科学*, 2016, 34(10): 5-8.]
- [48] Yan Bo, Zhang Xiao, Xia Ziqiang, et al. Characteristics of precipitation variation in Heilongjiang River basin. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(7): 14-17, 22. [鄢波, 张潇, 夏自强, 等. 黑龙江流域降水变化特征分析. *长江科学院院报*, 2019, 36(7): 14-17, 22.]
- [49] Yu L L, Xia Z Q, Li J K, et al. Climate change characteristics of Amur River. *Water Science and Engineering*, 2013, 6(2): 131-144.
- [50] Li F P, Zhang G X, Xu Y J. Spatiotemporal variability of climate and streamflow in the Songhua River basin, Northeast China. *Journal of Hydrology*, 2014, 514: 53-64.
- [51] Yan Bo, Xia Ziqiang, Zhou Yanxian, et al. Variation of runoff at Khabarovsk Station on Heilongjiang River. *Water Resources Protection*, 2013, 29(3): 29-33. [鄢波, 夏自强, 周艳先, 等. 黑龙江哈巴罗夫斯克站径流变化规律. *水资源保护*, 2013, 29(3): 29-33.]
- [52] Dai Changlei, Wang Sicong, Li Zhijun, et al. Review on hydrological geography in Heilongjiang River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(11): 1823-1834. [戴长雷, 王思聪, 李治军, 等. 黑龙江流域水文地理研究综述. *地理学报*, 2015, 70(11): 1823-1834.]
- [53] Wang W, Lu H, Ruby Leung L, et al. Dam construction in Lancang-Mekong River Basin could mitigate future flood risk from warming-induced intensified rainfall. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(20): 10378-10386.
- [54] Hou Shiyu, Tian Fuqiang, Lu Ying, et al. Potential role of coordinated operation of transboundary multi-reservoir system to reduce flood risk in the Lancang-Mekong River Basin. *Advances in Water Science*, 2021, 32(1): 68-78. [侯时雨, 田富强, 陆颖, 等. 澜沧江—湄公河流域水库联合调度防洪作用. *水科学进展*, 2021, 32(1): 68-78.]
- [55] Li Yanqing, Li Zhongping, Dai Minglong, et al. Effect evaluation of emergency water supplement from cascade reservoirs on Lancang River to Mekong River in 2016. *Yangtze River*, 2017, 48(23): 56-60. [李妍清, 李中平, 戴明龙, 等. 2016年澜沧江梯级水库对湄公河应急补水效果分析. *人民长江*, 2017, 48(23): 56-60.]
- [56] Mekong River Commission. Understanding the Mekong River's hydrological conditions: A brief commentary note on

- the "Monitoring the quantity of water flowing through the upper Mekong Basin under natural (unimpeded) conditions" study by Alan Basist and Claude Williams. www.mrcmekong.org/assets/Publications/Understanding-Mekong-River-hydrological-conditions_2020.pdf, 2020-04-21/2023-07-09.
- [57] Xia Ting, Zhang Muzi, Gu Hongbin, et al. Analysis on the impact of Lancang River hydropower development on the 2019 drought in the Mekong River basin. *Journal of China Hydrology*, 2022, 42(3): 84-88. [夏婷, 张木梓, 顾洪宾, 等. 澜沧江水电开发对缓解2019年湄公河干旱影响分析. *水文*, 2022, 42(3): 84-88.]
- [58] Tang Qihong, Liu Xingcai, Zhou Yuanyuan, et al. Cascading impacts of Asian Water Tower change on downstream water systems. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1306-1312. [汤秋鸿, 刘星才, 周园园, 等. “亚洲水塔”变化对下游水资源的连锁效应. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1306-1312.]
- [59] Yao Xiaojun, Liu Shiyin, Sun Meiping, et al. Study on the glacial lake outburst flood events in Tibet since the 20th century. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(8): 1377-1390. [姚晓军, 刘时银, 孙美平, 等. 20世纪以来西藏冰湖溃决灾害事件梳理. *自然资源学报*, 2014, 29(8): 1377-1390.]
- [60] Taylor C, Robinson T R, Dunning S, et al. Glacial Lake outburst floods threaten millions globally. *Nature Communications*, 2023, 14: 487. DOI: 10.1038/s41467-023-36033-x.
- [61] Yao Zhijun, Duan Rui, Dong Xiaohui, et al. The progress and trends of glacial lakes research on Qinghai-Tibet Plateau. *Progress in Geography*, 2010, 29(1): 10-14. [姚治君, 段瑞, 董晓辉, 等. 青藏高原冰湖研究进展及趋势. *地理科学进展*, 2010, 29(1): 10-14.]
- [62] Wang Xin, Wu Kunpeng, Jiang Lianghong, et al. Wide expansion of glacial lakes in Tianshan Mountains during 1990-2010. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7): 983-993. [王欣, 吴坤鹏, 蒋亮虹, 等. 近20年天山地区冰湖变化特征. *地理学报*, 2013, 68(7): 983-993.]
- [63] Liu Zongrui, Zhou Haiwei, Hu Xingqiu. Multi-period and multi-layer cooperation mechanism of cross-border flood prevention in Heilongjiang Basin. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(3): 163-168. [刘宗瑞, 周海炜, 胡兴球. 黑龙江流域跨境洪灾防治的跨时段多层次合作机制研究. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(3): 163-168.]
- [64] Li Yingjing, Li Xin, Tian Changtao. Analysis of flood characteristics in the midstream region of Heilongjiang River in 2013. *Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy*, 2015, 43(5): 20-23. [李英晶, 李新, 田长涛. 2013年黑龙江中游段洪水特征分析. *黑龙江水利科技*, 2015, 43(5): 20-23.]
- [65] Bellevenkiel E, Zuo Zhian, Zhao Qiuyun. The role of Russian two hydropower stations in the flood of 2013. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2014, 35(8): 23-27. [E.贝尔连基尔, 左志安, 赵秋云. 俄罗斯两座水电站在2013年洪灾中的作用. *水利水电快报*, 2014, 35(8): 23-27.]
- [66] Wang Rong, Yin Zhijie, Zhu Chunzi. Analysis of rainstorms and floods occurred in Heilongjiang and Songhua River basins in 2013. *Journal of China Hydrology*, 2014, 34(6): 67-71, 76. [王容, 尹志杰, 朱春子. 2013年黑龙江、松花江暴雨洪水分析. *水文*, 2014, 34(6): 67-71, 76.]
- [67] Zhou Hongtao. Analysis of water environment management and water pollution prevention. *Siberian Studies*, 2007, 34(2): 68-70. [周洪涛. 浅析黑龙江流域水环境管理与水污染的防治. *西伯利亚研究*, 2007, 34(2): 68-70.]
- [68] Zhou Haiwei, Zheng Ying, Jiang Qian. Multilayer cooperation mechanism of cross-border water pollution prevention in Heilongjiang Basin. *China Population, Resources and Environment*, 2013, 23(9): 121-127. [周海炜, 郑莹, 姜骞. 黑龙江流域跨境水污染防治的多层合作机制研究. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(9): 121-127.]
- [69] Xie Yonggang, Wang Jianli, Pan Juan. Discussion on Sino-Russia cross-border water pollution and cooperation mechanisms for regional disaster reduction. *Northeast Asia Forum*, 2013, 22(4): 82-91, 129. [谢永刚, 王建丽, 潘娟. 中俄跨境水污染灾害及区域减灾合作机制探讨. *东北亚论坛*, 2013, 22(4): 82-91, 129.]
- [70] Zhang Bo, Wang Qiao, Li Shun, et al. Simulation of water quality for Songhua River water pollution accident using a one-dimensional water quality simulation model based system dynamics. *China Environmental Science*, 2007, 27(6): 811-815. [张波, 王桥, 李顺, 等. 基于系统动力学模型的松花江水质污染事故水质模拟. *中国环境科学*, 2007, 27(6): 811-815.]
- [71] Huang Hanwen, Li Changwen, Xu Chi. Lancang-Mekong River water resources cooperation: Reality, challenge and direction. *Yangtze River*, 2021, 52(7): 88-94. [黄汉文, 李昌文, 徐驰. 澜沧江—湄公河水资源合作的现实、挑战与方向. *人民长江*, 2021, 52(7): 88-94.]
- [72] Liermann C R, Nilsson C, Robertson J, et al. Implications of dam obstruction for global freshwater fish diversity. *BioScience*, 2012, 62(6): 539-548.
- [73] Ziv G, Baran E, Nam S, et al. Trading-off fish biodiversity, food security, and hydropower in the Mekong River basin.

- PNAS, 2012, 109(15): 5609-5614.
- [74] Zhang C, Ding L Y, Ding C Z, et al. Responses of species and phylogenetic diversity of fish communities in the Lancang River to hydropower development and exotic invasions. *Ecological Indicators*, 2018, 90: 261-279.
- [75] Zhang C, Ding C Z, Ding L Y, et al. Large-scale cascaded dam constructions drive taxonomic and phylogenetic differentiation of fish fauna in the Lancang River, China. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2019, 29: 895-916.
- [76] Sun J R, Du W L, Lucas M C, et al. River fragmentation and barrier impacts on fishes have been greatly underestimated in the upper Mekong River. *Journal of Environmental Management*, 2023, 327: 116817. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116817.
- [77] Deng Mingjiang. A great river lies on the south of the Altai Mountains (Part 1): Studies on coupling mechanism between ecological protection and hydrological process of the Irtysh River. *China Water Resources*, 2023(5): 67-72. [邓铭江. 金山南面大河流(上): 额尔齐斯河生态保护与水文过程耦合机理研究. *中国水利*, 2023(5): 67-72.]
- [78] Yang Jing, Wang Ning, Chen Yan. Impact of cascade hydropower development on ecological environment. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2013, 24(4): 58-62. [杨净, 王宁, 陈燕. 河流水电资源的梯级开发对生态环境的影响. *水资源与水工程学报*, 2013, 24(4): 58-62.]
- [79] Jia M M, Mao D H, Wang Z M, et al. Tracking long-term floodplain wetland changes: A case study in the China side of the Amur River Basin. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 92: 102185. DOI: 10.1016/j.jag.2020.102185.
- [80] Lu Y, Tian F Q, Guo L Y, et al. Socio-hydrologic modeling of the dynamics of cooperation in the transboundary Lancang-Mekong River. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, 25(4): 1883-1903.
- [81] Srinivasan V, Sanderson M, Garcia M, et al. Prediction in a socio-hydrological world. *Hydrological Sciences Journal*, 2017, 62(3): 338-345.
- [82] Tian Fuqiang, Cheng Tao, Lu You, et al. A review on socio-hydrology and urban hydrology. *Progress in Geography*, 2018, 37(1): 46-56. [田富强, 程涛, 芦由, 等. 社会水文学和城市水文学研究进展. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 46-56.]
- [83] Sivapalan M, Savenije H H G, Blöschl G. Socio-hydrology: A new science of people and water. *Hydrological Processes*, 2012, 26(8): 1270-1276.
- [84] Laghari A N, Vanham D, Rauch W. The Indus basin in the framework of current and future water resources management. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(4): 1063-1083.
- [85] Pritchard H D. Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress. *Nature*, 2019, 569(7758): 649-654.
- [86] Sun Zhouliang, Liu Yanli, Liu Ji, et al. Analysis on the present situation and demand of water utilization in the Lancang-Mekong River Basin. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(4): 67-73. [孙周亮, 刘艳丽, 刘冀, 等. 澜沧江—湄公河流域水资源利用现状与需求分析. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(4): 67-73.]
- [87] Yun X, Tang Q, Sun S, et al. Reducing climate change induced flood at the cost of hydropower in the Lancang-Mekong River basin. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48: e2021GL094243. DOI: 10.1029/2021GL094243.
- [88] Li D N, Zhao J S, Govindaraju R S. Water benefits sharing under transboundary cooperation in the Lancang-Mekong River Basin. *Journal of Hydrology*, 2019, 577: 123989. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.123989.
- [89] Yu Y, Zhao J S, Li D N, et al. Effects of hydrologic conditions and reservoir operation on transboundary cooperation in the Lancang-Mekong River basin. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2019, 145(6): 04019020. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001075.
- [90] Do P, Tian F Q, Zhu T J, et al. Exploring synergies in the water-food-energy nexus by using an integrated hydro-economic optimization model for the Lancang-Mekong River basin. *Science of the Total Environment*, 2020, 728: 137996. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137996.
- [91] Gao J Y, Zhao J S, Wang H. Dam-impacted water-energy-food nexus in Lancang-Mekong River basin. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2021, 147(4): 04021010. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001347.
- [92] Lyu H Y, Tian F Q, Zhang K E, et al. Water-energy-food nexus in the Yarlung Tsangpo-Brahmaputra River Basin: Impact of mainstream hydropower development. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2023, 45: 101293. DOI: 10.1016/j.ejrh.2022.101293.
- [93] Wang Chunlei, Zhou Shaofei, Qiu Hailong, et al. Flood of the upper and middle reaches of Heilongjiang River in 2013 August. *Journal of Engineering of Heilongjiang University*, 2014, 5(2): 23-32. [王春雷, 周绍飞, 邱海龙, 等. 2013年8月黑龙江干流洪水. *黑龙江大学学报*, 2014, 5(2): 23-32.]
- [94] Li Anyun, Liu Lifang, Wei Renwei. Research on information sharing method in international rivers: Case of Lancang-

- Mekong River. Yangtze River, 2022, 53(6): 45-53. [李岸昀, 刘莉芳, 韦人玮. 国际河流信息共享方法研究: 以澜沧江—湄公河为例. 人民长江, 2022, 53(6): 45-53.]
- [95] Zhou Haiwei, Zheng Liyuan, Guo Lidan. Development of international river basin organizations and implication for China. Resources Science, 2020, 42(6): 1148-1161. [周海伟, 郑力源, 郭利丹. 国际河流流域组织发展历程及对中国的启示. 资源科学, 2020, 42(6): 1148-1161.]
- [96] Ding Yongjian, Zhang Shiqiang, Wu Jinkui, et al. Recent progress on studies on cryospheric hydrological processes changes in China. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 690-702. [丁永建, 张世强, 吴锦奎, 等. 中国冰冻圈水文过程变化研究新进展. 水科学进展, 2020, 31(5): 690-702.]
- [97] Lu Zhixiang, Wei Yongping, Feng Qi, et al. Progress on socio-hydrology. Advances in Water Science, 2016, 27(5): 772-783. [陆志翔, 韦永平, 冯起, 等. 社会水文学研究进展. 水科学进展, 2016, 27(5): 772-783.]
- [98] Yang Dawen, Xu Zongxue, Li Zhe, et al. Progress and prospect of hydrological sciences. Progress in Geography, 2018, 37(1): 36-45. [杨大文, 徐宗学, 李哲, 等. 水文学研究进展与展望. 地理科学进展, 2018, 37(1): 36-45.]

Progresses in hydrographic research on international rivers in China

LUO Xian, LI Yungang, JI Xuan, HE Daming

(Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Yunnan Key Laboratory of International Rivers and Transboundary Eco-security, Kunming 650500, China)

Abstract: Most of Asian major international rivers originate from China. Their abundant transboundary water resources play an important role in regional "water-energy-food-ecology" security. In recent decades, influenced by global change, especially by the construction of large hydraulic and hydroelectric engineering, the changes in hydrological and ecological processes and their transboundary impacts in the international river regions have attracted more and more attention. The research on these issues in China has achieved prominent results in several aspects, including the changes in hydrological and ecological processes and their attributions, the transboundary impacts and risk regulation, the "water- energy- food- ecology" nexus in transboundary watersheds, and the construction of transboundary water resources coordination mechanism to adapt to global changes. In the face of the increasing risks of transboundary water security and ecological security under global change, the hydro-geographical research on international rivers needs to make use of space-air-ground integrated monitoring technology, modern spatial geographic information technology, intelligent technology, and so on. By providing quantifiable, participatory, and public results, these researches can better provide scientific basis and decision support for the rational utilization of international rivers and geopolitical cooperation, health maintenance and risk control, transboundary water diplomacy and environmental diplomacy.

Keywords: international rivers; climate change; human activities; hydrological processes change; water security