

· 研究进展 ·

大江大河源区河网结构与径流特性 研究前沿和重要基础科学问题*

王光谦^{1,2,5} 方红卫² 倪广恒² 阳坤³ 程春田⁴ 李万红^{5**}

(1. 青海大学, 西宁 810016; 2. 清华大学, 北京 100084;
3. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101; 4. 大连理工大学 116024;
5. 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部, 北京 100085)

[摘要] 基于第133期“双清论坛”, 本文总结了我国大江大河源区河网结构与径流特性研究所面临的重大需求, 阐述了江河源区河网结构与径流特性研究的国际前沿和重要基础科学问题, 提出了未来3—5年相关学科发展的科学目标与资助重点。

[关键词] 河源区; 河网结构; 径流特性

水是生命之源, 它哺育了众多古老的人类文明, 同时也是现代工业文明不可或缺的血脉, 对水资源的开发和利用贯穿了整个人类文明发展的历程。随着气候变化和人类活动影响的加剧, 全球水循环发生了显著变化, 并诱发系列资源、生态和环境等问题。《2011年中国气候变化监测公报》指出, 1961—2011年, 我国十大流域地表水资源总量除西北内陆河、东南诸河表现为增加趋势外, 其余七大流域均表现出减少趋势。在气候变化背景下, “风调雨顺”的年景可能减少。自1961年以来, 我国区域性干旱事件和区域性强降水事件频次趋多。天上来的水在减少, 地下存的水也在减少, 而用水需求仍在不断攀升, 我国未来水资源开发利用面临极大挑战。

大江大河源区是人类可利用水资源的主要来源区域, 其河网结构和径流特性研究对水资源开发利用、水旱灾害防治和经济社会可持续发展具有重要意义。西南河流源区是我国重要江河的发源地, 集中了长江、黄河、怒江、澜沧江、雅鲁藏布江等大型水系, 被称为“中华水塔”。其中, 25%的长江水和49%的黄河水来自于该地区。同时, 西南河流源区的水能资源十分丰富, 是我国水电“富矿区”; 其中雅鲁藏布江及西藏其他河流占我国水能资源的

15.63%, 长江流域上中游集中了我国丰富的水电资源, 国家在此布局有重大水资源开发利用工程和水电能源基地。另外, 怒江、澜沧江和雅鲁藏布江为跨境河流, 年出境水量约为5500亿方, 接近我国年总用水量的6000亿方, 是我国水资源的战略储备区, 同时也是南亚和东南亚国家的重要水源之一, 其开发利用对于我国的外交战略具有重要意义。

大江大河源区是气候变化敏感区。以西南源区为例, 近50年来, 西南地区冰川不断退缩, 冻土退化显著。在气候的长周期变化和人类活动影响下的暖化的耦合作用下, 西南地区的水资源形势呈现出复杂的变化特征。另外, 随着地球进入相对活跃期, 西南源区成为地震高发区, 由此导致的大型滑坡、群发性泥石流、冰湖溃决等巨灾, 对于已建和待建梯级水库的安全运行和下游地区经济社会可持续发展构成重大威胁, 需要及早开展相关研究, 未雨绸缪, 制定应对战略。

为了凝练大江大河源区河网结构与径流特性研究的基础性科学问题, 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部、地球科学部和政策局于2015年5月4—6日联合举办了以“大江大河源区河网结构与径流特性基础研究”为主题的第133期“双清论坛”,

收稿日期: 2015-11-13; 修回日期: 2016-01-04

* 本文内容根据第133期双清论坛讨论内容整理

** 通信作者, E-mail: liwh@nsfc.gov.cn

来自国内外 19 个单位的 40 余名专家学者应邀参加了本次论坛。与会专家通过充分研讨,明确了该领域面临的重大机遇和挑战,系统梳理了其中的重大关键科学问题,提出了国家自然科学基金对该领域进行资助的战略。

1 大江大河源区河网结构和径流特性研究面临的重大机遇与挑战

1.1 高山峡谷地区水文过程监测与预测

大江大河源区是大气圈—冰冻圈—水圈—生物圈—土壤圈相互作用最强烈的地区之一,而水循环是相互作用的纽带。由于高原的特殊气候,复杂地形地貌、河网结构和植被格局,高原河流的水文特性非常复杂。水文过程除了受降水控制外,还受冰川、积雪、冻土的影响。降雨径流是一个水动力学过程,而融雪、融冰过程受能量驱动,冻土变化的影响则主要通过改变产流和土壤水而影响径流过程。

源区特殊的气候水文条件造成径流的多源特性,为准确预测其未来演变需要对径流水源进行解析。研究伊始,绘图手段成为划分水源类型的主要方法。根据经验判断和地下水退水原理,以流域径流过程线为基准,对径流过程进行滤波处理,分割出径流中的地下径流部分和地表径流部分。随着计算机技术的进步,基于线性和非线性图解分解的自动分割程序在很多流域得到了应用。随着研究进一步深入,野外观测成为划分流域径流水源的新手段。其中,最主要的是对环境稳定同位素的观测。例如,美国大陆主要河流 391 个水文站点进行的稳定同位素研究^[1]发现,在大空间尺度上,河水中氢氧稳定同位素保留了附近站点降水中同位素的特征,美国大陆河水中 δD 与 $\delta^{18}O$ 的关系线与全球大气水线(GWML)十分接近。此外,加拿大^[2]、印度^[3]等国都开展了以流域为单位进行的全国河水中稳定同位素研究工作。从 2002—2006 年间,IAEA 就组织了“大河径流同位素监测网络标准”的项目^[4]。组织在 20 多条不同类型的大河开展从上游到下游的河水稳定同位素监测,以期了解河水与周边水环境的相互作用过程、气候变化与人类活动对水文的影响。我国开展的河水中氢氧稳定同位素的研究工作也越来越得到重视,比如在黄河流域、长江流域、雅鲁藏布江流域。为了识别三种以上的水源,野外观测往往通过收集额外的水化学(如电导率、氯离子含量等)数据来辅助分析。通过水量平衡方程和水化学平衡方程求解各水源比例。然而,水化学和同位素

手段受到一定的时间和空间尺度制约,难以分析得到短时间尺度径流水源信息,而对大流域尺度,野外观测往往存在数据代表性不足的缺陷。近年来,随着观测技术的进步,多源数据观测的集成分析成为径流水源解析的新手段。多源数据包括卫星遥感影像,数字地形、水质全分析数据,及其区域气候模式等。基于大数据理论,对多源数据集成分析,综合水源正向和反向解析理论和方法对于径流水源问题的解决具有积极意义。

目前源区的水文气象观测站极其稀疏,实测水文气象资料严重缺乏,难以满足科研和生产的需求。当前的卫星数据产品(如 MODIS 积雪,GEWEX 辐射产品,TRMM 降水等)和依赖于气象模型的动力降尺度产品逐步在高原水文研究中使用,但具有较强的不确定性。如何综合空、天、地各自的观测优势,建立具有高时空分辨率的高精度观测系统,获取高质量的气象水文、植被、土壤、河流等信息是大江大河源区河网和径流研究面临的重大挑战和机遇。

水利工程的建设和运行需要预测未来百年的径流及其极值的演变。来源于不同水源的径流对于气候变化的响应特点不同,导致气候变化下的径流演变极为复杂,成为国内外研究的热点和难点,且不同研究的结果差异较大,亟待进一步深入机理研究。如对于西南河河源区水储量的问题,姚檀栋院士等^[5]根据典型冰川数据的观测结果,发现近 20 年西南河河源区水储量呈下降趋势;Jacob 等^[6]根据 GRACE 卫星的观测数据,发现西南河河源区水储量呈增加的趋势。

早期河流径流变化研究主要是通过古洪水观测、河流阶地测量等方法获得过去事件性的径流变化特征^[7,8],优点是可以获得径流变化的极少量几个极值,但是无法获得径流变化序列。目前全球径流数据中心搜集的全球河流径流数据大多不超过 200 年,并且在西南河河源区数据搜集点较少。对于更长时间的径流研究主要采用利用气候变化介质来估计,因为河流的长期径流变化主要受气候变化的影响,并且可以建立径流与气候参数之间的定量关系^[9-11]。其中树轮水文学是在 20 世纪 90 年代发展起来的研究径流变化的较好方法,并且已经在很多地区建立了干热河谷径流系列^[12],其优点是可以定量重建过去数百年的季节性径流变化,并且有较好的年龄控制。但树轮年龄一般在数百年之内,无法提供更长时间的径流变化。因此一般通过冰芯、河流、湖泊或海洋沉积物重建更长时期内的径流变化。

河流沉积物只能提供事件性径流变化^[13]。海洋沉积物可以反映整个河流流域的过去径流变化,但其时间分辨率一般较低^[14]。而湖泊沉积物具有不可替代的优势,可以提供时间分辨率较高的连续沉积序列,并用来重建过去径流变化^[15]。在河流源区,可以通过树轮、冰芯和湖泊沉积物重建过去一万年以来不同时段降水、温度、粒径变化,进而耦合古气候学—水文学、河床演变学、河流动力学,重建过去径流变化历史。

径流预测的基本手段是水文模型。水文模型研究经历了由“黑箱子”模型向过程机理模型发展的过程。人们最早建立的是系统模拟模型,将流域视为一个“黑箱子”,不考虑内部的水文过程;随着对水文过程机理的逐步认识,过程机理模型代替了系统模拟模型,包括概念性模型和物理性模型两种;近些年来随着物理性水文模型的“异参同效”问题被逐步揭示^[16],人们开始尝试直接在宏观上建立描述流域水文过程的物理方程,并寻求建立宏观尺度的“流域水文本构关系”^[17]。目前的分布式模型对水文过程有很好的数学物理描述,但缺乏径流不同水源信息,模型参数的不确定性大;缺乏对流域系统动态演变的描述,未来预测的不确定性大。水文模型的另一个趋势是从单一过程模拟向多过程耦合模拟发展。流域水文循环不仅仅是水的运动,水、泥沙、碳、氮等多种物质循环是紧密耦合的,存在复杂的非线性作用和反馈机制,仅从水出发难以对流域水文过程的全程及全貌有深入了解^[18]。因此发展了多个综合考虑水、泥沙、营养物质和碳等循环的水文模型,如SWAT模型和GBHM-CWSP^[19]等。但目前尚处于单向耦合阶段,模拟的中心仍然是水,不同物质循环之间的反馈机制并没有真正体现。当前的研究趋势是通过多源径流解析获取更多径流信息,并以流域协同演化为突破点,构建水文、生态和土壤等多系统耦合模型,以适应变化环境下的预测需求。

1.2 山地灾害研究面临的重大机遇与挑战

根据IPCC^[20]第五次报告,全球平均温度近50年来快速升高约0.4℃—0.6℃,全球变暖趋势明显;高原山地气温对全球气候变化的响应更为敏感,增温幅度更大。以青藏高原为代表的高山地区50年来均温增高超过1.0℃,显著高于全球平均水平。日益变暖情况下,地质灾害发生的风险相应增加。此外,20世纪90年代以来,青藏高原山区年际极端最高气温和年际极端最低气温都有上升趋势,且极端最低气温平均值增幅较大。气候变暖引起高原冻土

严重退化,一方面为土壤补充水源,增加土壤孔隙水压力,使得山体破坏对自然降雨导致地质灾害的临界阈值降低,增大山地灾害爆发风险;另一方面,水分的补充增加了土体的重力负担,易造成滑坡、崩塌等灾害。研究表明,近年来高原地区冻土逐渐退化,冻土面积减少,多年冻土下界升高,季节性冻土活动层增加。常年冻土区和季节性冻土区的冻融交替活跃,致使高原山地斜坡土体失稳,产生滑坡体,为山地灾害提供物源或直接成灾,从而进一步促进灾害链形成。

升温导致冰雪消融加剧,增加山地灾害水源供给。全球变暖背景下,大部分高山区的冰川面积和体积有明显减少,有些小规模冰川甚至消失,低纬度和中纬度的冰川退缩尤其显著。《第二次气候变化国家评估报告》^[21]指出,1951—2009年青藏高原冰川退缩速度达到7.8 m/a。其中,1970—2000年藏西南地区冰川数量减少10%,冰川后退9%,冰储量减少8.4%,2000年后冰川持续后退。《中国西部环境演变评估综合报告》^[22]指出,20世纪60年代以来是小冰期至今冰川退缩最大的时期,到2050年中国西部冰川面积约减少一半,冰川融水径流量将增加50%左右。冰川退缩以后在冰川的前缘会形成冰碛湖。冰川融水补给湖泊,直接导致冰湖水位上升,冰湖面积扩张。1990—2010年,中喜马拉雅冰湖扩张了17%,面积更大的冰川扩张更明显。一些突发因素,如冰舌断裂、冰湖岸坡的崩塌等,所形成的涌浪会对冰碛坝产生强烈的冲击破坏作用,导致冰碛坝的溃决。喜马拉雅山脉在1930—2010年内冰湖溃决事件发生的频次大幅度增加。据统计,1930年至今,西藏境内共有23处冰湖发生溃决,累计溃决事件34次。冰湖溃决主要由冰崩、冰滑坡或冰川跃动引起,少数由冰崩和管涌共同诱发。从历次冰湖溃决事件来看,大部分冰湖都属于瞬时部分溃决或全部溃决,峰值流量大部分超过了1000 m³/s。巨大的流量为沟床内松散物质的起动提供了强大的水动力条件,在松散物质丰富的沟道,冰湖溃决将直接演化成泥石流,形成灾害链,造成下游地区重大损毁和伤亡。灾害链将造成灾害在时空尺度的延展,形成巨灾。比如:1954年7月16日康马县桑旺错冰湖溃决,特大洪水和泥石流顺年楚河及其支流奔腾而下,造成约400人死亡,2万多人受灾。

此外,受季风气候影响,藏东南部地区夏季气温升高,降雨增多,呈现雨热同期。通过分析西藏1951—2010年的气温和降水资料发现,喜马拉雅山

脉中部和东部表现出气温升高和降雨增加同步的趋势。高强度降雨往往直接激发泥石流或形成山洪,升温增加的冰雪融水可能和暴雨径流叠加,更易于激发泥石流或形成山洪。泥石流不仅破坏下游村镇、农田和道路,大规模泥石流还会堵塞主河道形成堰塞湖。堰塞湖雍水会给江河上游造成淹没灾害,而堰塞湖溃决后又会造成巨大的溃决洪水,危害下游更多的地区。比如:2000年4月9日,西藏波密县易贡乡发生巨大山体崩滑,产生约3亿 m^3 的堆积物,堵塞易贡藏布河,形成天然坝体;溃决后,下游几十公里的道路和多座桥梁被毁;大峡谷下游的印度境内有30人死亡,100多人失踪,5万人无家可归,20多座桥梁被毁。可见,雨热同期的条件组合将加剧大规模滑坡、泥石流和溃决洪水的形成,并增大其衍生为灾害链而造成重大损失的风险。而全球气候变暖条件下,高山地区降水波动增加,总体表现为暖湿气候条件;气候变化引起极端降雨强度增大,部分山区高强度降雨频次增多,强度增大,成为大规模灾害的激发因素。统计表明,持续高温和小于5 mm降雨条件下以冰雪消融泥石流为主;持续高温和5—10 mm降雨以冰水混合型泥石流为主;持续高温和大于10 mm降雨以降雨泥石流为主;冰舌前缘连续20日均温大于 11°C 和当日或前日降雨量大于20 mm容易激发大规模灾害性泥石流。暖气候条件下,特大灾害出现频繁,灾害链的特征明显,灾情时空延拓显著。

高山区山高谷深,受地形限制,人类密集活动区也多为滑坡、泥石流和山洪的危险区,容易形成灾害链。近年来,山区经济和人口密度呈增长趋势,作为承灾体的经济和人口,其体量越大,灾害带来的风险也越大;一旦灾害发生,会造成巨大的损失。全球气候变化背景下,气温升高,降水增加,导致山地灾害爆发频次和规模均有增加的趋势。因此,深入研究山地灾害链过程,揭示气候变化与高原山地灾害关系,建立基于动力过程灾害链的风险评估方法,是减少高原山区山地灾害影响的关键。今后需要重点关注:高原山区冰碛物力学特性与灾害形成(如:冰碛物物理力学特性的分析与量化,水热耦合条件下土体破坏与冰湖溃决形成机理);泥石流堵江与堰塞湖溃决过程与机理(如:建立统一的泥石流堵江判识模型,认识泥石流堵江动力过程;考虑泥石流堆积体高粘性的堰塞坝溃决过程和机理);定量预测气候变化条件下的高山区特大灾害等。

1.3 变化环境下梯级水电站群运行及风险防控

全球面临日益严峻的能源及环境压力,气候变

化加剧了这种紧迫感,减少化石能源消耗,大力发展清洁能源,遏制气候变暖,已经成为全人类共同使命和行动指南。2015年8月3日,美国总统奥巴马提出了美国历史上“最强减排”计划—新能源方案,方案旨在限制发电厂的碳排放量,大力推动太阳能和风能发电,将美国温室气体排放在未来15年减少三分之一。我国作为最大的发展中国家、世界第二大经济体和碳排放总量最大的国家,已经在实现能源低碳化和经济转型方面做出了庄严承诺。2015年11月30日,国家主席习近平宣布,中国计划在2030年左右达到二氧化碳排放峰值,到2020年非化石能源占一次能源消费比重提高到15%左右,2030年非化石能源占一次能源消费比重提高到20%左右。水电是我国仅次于煤炭的第二大常规能源资源,更是目前可再生和非化石能源中资源最明确、技术最成熟、最清洁和最经济的宝贵能源,推动我国电力结构优化调整水电首当其冲,推进实现节能减排目标水电当仁不让。

我国未来水利工程建设和开发的主战场在长江及其西南诸河的上中游流域,这些流域梯级水电站群的主要特点是大电站、大机组、大容量、跨流域、跨省、跨区域和大范围、远距离电力输送。梯级水电站群对环境影响将更为敏感,发电、供水、防洪、灌溉、航运、泥沙、生态等综合利用矛盾将更加突出;新的电力市场条件下需要协调复杂的梯级水电站群多利益主体矛盾;单站和梯级水电站群输送范围广,需要响应更加复杂的负荷需求,水电消纳和调峰问题将更加突出,导致电站发电流量、水位变化频繁,同时将引起更加复杂的高水头多振动区运行控制、分区协调优化、差异化目标控制、对环境的影响更严重等新问题^[23-25];多馈入大规模直流水电输送将对受、送端电网产生重大影响,如何优化我国电源结构布局,减少受端电网低谷电量消纳困难和缓解受端电网的调峰压力,通过市场化手段促进水电大规模消纳,需要全新理论方法和技术调控手段;全球气候变化、自然环境的持续恶化等变化环境下的不确定因素给未来梯级水电运行带来一系列风险,需要采取有效措施规避其潜在风险与灾害,制定大坝风险防控与应急处置机制,制定影响水电和电网安全运行的风险控制方法。如何在兼顾多元利益主体与复杂水力、电力等时空约束的前提下,以提高和保证社会效益、经济效益、电网的安全运行为主要目的,在协调好综合利益目标,处理好不同部门、上下游和相邻省区之间矛盾基础上,充分考虑梯级水电站调节性能、降雨

时空分布、径流时变特性等差异化特征,利用水库间的库容补偿、水文补偿、不同电网间负荷特性差异、电源差异等综合开展梯级水能资源联合调蓄与运行控制,提出应对能源及环境压力的水电合理开发策略及其方法,促进水电大规模、有效、有序消纳,是未来我国流域梯级水电站群运行面临的重大挑战。

2 前沿科学问题

水是可持续发展的核心,直接关系到粮食安全、能源安全,与人类和环境健康密切相关。水资源需求很大程度上受到人口增长、经济发展、城市化、粮食和能源安全政策影响,全球面临严重水资源短缺问题,如何应对水资源危机已成为全人类共同的挑战^[26-28]。针对径流变化、水资源危机及其适应性利用的基础研究问题,欧美发达国家基础研究部门和国际专业协会纷纷提出专门的研究计划。例如国际水文科学协会2013年起设立新的十年研究计划,其主题即“变化的水文和变化的社会”,强调自然变异和人类影响下径流的变化以及适应性利用的策略;美国国家研究理事会2012年出版的战略报告《水文学的机遇和挑战》中认为变化的水文循环是水文学研究面临的重大挑战和机遇。美国、德国、英国等西方发达国家行业部门、基础研究部门纷纷制定了“水—能”、“水—能—粮食安全耦合”等研究计划,从全局、多维、多时空尺度研究水资源问题,以应对水资源危机挑战。众多知名学者在 *Nature* 和 *Science* 等顶尖期刊撰文呼吁发展径流非一致性条件下的工程水文设计 and 水资源适应性管理的新理论和新方法^[29, 30]。

2.1 气候变化下径流源解析与协同演变

当前径流源解析方法可以粗略区分降雨形成径流的途径(如地表、壤中、地下),但是解析精度较低,对于具有复杂水源(降雨、冰川、积雪、冻土等)的西南河流源区径流情况难以应用。其根本原因在于已有示踪物质的示踪能力不足,需要建立综合多因素全水源解析的理论,重点解决以下关键问题:揭示宽谱系生物地球化学物质针对不同水源的示踪能力,识别具有较强水源识别能力的综合性示踪物质,建立全水源解析理论。

2.2 巨灾与极值径流突变

当前研究基于近期短径流序列(50—100年)推测未来径流演变和突变,无法预测未来百年径流及其极值的演变,其根本原因是缺乏对过去长时间径流序列周期性和随机性的识别研究。需要重点解决

以下关键问题:在过去万年径流系列的基础上,研究巨灾洪水的重建方法,包括滑坡泥石流形成的涌浪、堰塞湖淹没的区域,以及可能的溃决洪水造成的溃坝波;构建气候洪水和巨灾洪水在径流系列中的解耦途径;建立巨灾洪水的形成机制与预测理论和工程洪水风险的分析理论。

2.3 径流生境变异关系

梯级水库河流物理生境格局和生源物质循环是当前研究的挑战,主要原因是在水库群的耦合作用,径流变化及相应的河流生境格局和生源物质循环异变过程表现出多要素、多过程、高度不确定性的复杂过程特征,经典连续河流理论或单一水库模拟分析方法已不能满足解释梯级水库调蓄强烈扰动的河流过程。需要重点解决以下关键问题:梯级水库群径流调蓄对河流生境格局异变的影响机理及定量表征;梯级水库河流关键生源物质循环规律及其动态过程耦合模拟;生境格局和生源物质循环异变水生态灾变效应的发生机制以及定量辨识、适应性调控的方法理论。

2.4 径流规模利用的水能质互馈关系及复杂系统建模理论方法

大江大河源区径流利用必然会由于大量水利工程建设与运用改变自然状态下的水文过程(包括流量、频率、出现时间、持续时间和变化率等要素),以及由此引起的物理化学过程、地貌过程,从而影响生态过程;由于本地电力消纳有限,大部分西南地区水电需要通过交流并网,由特高压直流实现远距离、大规模送出,特高压直流水电将能够改善受端电网的电源结构,促进水电清洁能源大规模消纳,由于其优良调节性能,与其他电源等互联调度,通过电力补偿,能够减少火电开机,有效消纳风电、光伏电等清洁能源,实现清洁能源直接和间接替代。西南河源区径流利用过程中,存在非常复杂的水(供水、防洪、航运、泥沙)、能(发电)、质(生态)互馈关系,这三者之间合理的阈值既取决于未来国家及区域水资源需求及其政策演变,也取决于国家总的能源布局,还受制于不确定的径流预报、河道内生态环境约束,是大规模、不确定性、高维、时变、时空高度耦合的复杂建模问题,需要全新的建模思路和求解方法。

3 未来3—5年科学目标及资助重点

3.1 科学目标

瞄准水文水资源学科的国际研究前沿,面向国家重大战略需求,以水资源和人类社会耦合影

响的共性科学问题为核心,以西南河流源区径流变化特殊性为基础,在理论和方法的源头创新上取得突破;揭示西南源区径流和流域生境的耦合作用机制,发展径流变化分析和测量新手段,建立径流变化的工程风险和生态风险评估模型。通过相对稳定和较高强度的支持,吸引和培育一支具有国际先进水平的研究队伍;开展学科交叉的变化环境下径流变化和适应性利用研究,为我国水资源、能源和外交安全提供科学支撑。

3.2 资助重点

(1) 径流源解析与径流变化方向的资助重点为:气象—水文—径流—地形的多要素空地观测体系、宽谱系示踪元素组合的多水源解析、气候和下垫面协同变化的多源径流效应、基于古水文、河床演变和河流动力学方法的历史径流反演、变化环境下径流演变和非一致性变异规律。

(2) 山地灾害与河网结构方向的资助重点为:山地灾害链产生机理及演化过程、河网结构调整与突发性灾害事件的响应关系、灾害链过程所导致的极值洪水及产生的环境生态效应。

(3) 径流与区域环境质量演变及风险评估方向的资助重点为:径流与河流生境变化交互作用、径流变化对生物质循环过程影响机制、径流变化下环境质量变化的累积效应、径流适应性利用的生态风险评估。

(4) 径流适应性利用的理论与对策方向的资助重点为:径流适应性利用的用水—发电—生态互馈理论方法、径流适应性利用调度规则及调控方法、径流适应性利用机制与信息集成、天河动力学与云水资源利用探索。

4 结 语

大江大河源区河网结构和径流特性研究对我国水资源持续利用、重大水利工程安全、一带一路外交战略等有重大意义,同时也是国际相关学科前沿的热点和难点问题。在深刻把握国内外研究趋势的基础上,凝练得到的四个前沿科学问题为:气候变化下径流源解析与协同演变、巨灾与极值径流突变、径流生境变异关系、径流规模利用的用水—发电—生态互馈关系及复杂系统建模理论方法,据此提出了基金委在该领域未来3—5年的科学目标和资助重点。

参 考 文 献

[1] Kendall C, Coplen TB. Distribution of oxygen-18 and deuterium in river waters across the United States. *Hydrological Processes*, 2001, 15(7):1363—1393.

- [2] Gibson JJ, Edwards TWD, Birks SJ, et al. Progress in isotope tracer hydrology in Canada. *Hydrological Processes*, 2005, 19(1):303—327.
- [3] Lambs L, Balakrishna K, Brunet F, et al. Oxygen and hydrogen isotopic composition of major Indian rivers: a first global assessment. *Hydrological Processes*, 2005, 19(17):3345—3355.
- [4] Gibson JJ, Aggarwal P, Hogan J, et al. Isotope studies in large river basins: A new global research focus. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2002, 83(52):613—617.
- [5] Yao T, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nature Climate Change*, 2012, 2(9):663—667.
- [6] Jacob T, Wahr J, Pfeffer W T, et al. Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise. *Nature*, 2012, 482(7386):514—518.
- [7] Baker VR. Paleoflood hydrology and extraordinary flood events. *Journal of Hydrology*, 1987, 96(1):79—99.
- [8] Van Riet Lowe C. The Vaal River chronology: an up-to-date summary. *The South African Archaeological Bulletin*, 1952, 7(28):135—149.
- [9] Blanchet CL, Frank M, Schouten S. Asynchronous Changes in Vegetation, Runoff and Erosion in the Nile River Watershed during the Holocene. *PLOS ONE*, 2014, 9(12):e115958.
- [10] Polyakova YI, Klyuvitkina T S, Novichkova E A, et al. Changes in the Lena River runoff during the Holocene. *Water Resources*, 2009, 36(3):273—283.
- [11] Sidorchuk AY, Panin A V, Borisova O K. River runoff decrease in North-Eurasian plains during the Holocene optimum. *Water Resources*, 2012, 39(1):69—81.
- [12] Sauchyn D, Vanstone J, Jacques J M S, et al. Dendrohydrology in Canada's western interior and applications to water resource management. *Journal of Hydrology*, 2014, doi:10.1016/j.jhydrol.2014.1011.1049.
- [13] Sidorchuk AY, Panin AV, Borisova O K. Climate-induced changes in surface runoff on the North-Eurasian plains during the late glacial and Holocene. *Water Resources*, 2008, 35(4):386—396.
- [14] Ménot G, Bard E, Rostek F, et al. Early reactivation of European rivers during the last deglaciation. *Science*, 2006, 313(5793):1623—1625.
- [15] Blanchet CL, Tjallingii R, Frank M, et al. High- and low-latitude forcing of the Nile River regime during the Holocene inferred from laminated sediments of the Nile deep-sea fan. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 364(2):98—110.
- [16] Beven K, Freer J. Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modeling of complex environmental systems using the GLUE methodology. *Journal of Hydrology*, 2001, 249(1):11—29.
- [17] Tian F, Hu H, Lei Z. Thermodynamic watershed hydrological model: Constitutive relationship. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2008, 51(9):1353—1369.
- [18] Kumar P. Variability, Variability, feedback, and cooperative process dynamics: elements of a unifying hydrological theory. *Geography Compass*, 2007, 1(6):1338—1360.
- [19] Tang L, Yang D, Hu H, et al. Detecting the effect of land-use change on streamflow, sediment and nutrient losses by distributed hydrological simulation. *Journal of Hydrology*, 2011, 409(1):172—182.

- [20] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013; 1—261.
- [21] 第二次气候变化国家评估报告编写委员会, 第二次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2011
- [22] 秦大河. 中国西部环境演变评估综合卷: 中国西部环境演变评估综合报告. 北京: 科学出版社, 2002; 12-27, 61—65.
- [23] Cheng C, Shen J, Wu X. Short-term scheduling for large-scale cascaded hydropower systems with multivibration zones of high head. *Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE*, 2012, 138(3):257—267.
- [24] Cheng C, Shen J, Wu X, et al. Operation challenges for fast-growing China's hydropower systems and response to energy saving and emission reduction. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(5):2386—2393.
- [25] Olivares MA, Haas J, Palma-Behnke R, et al. A framework to identify Pareto-efficient subdaily environmental flow constraints on hydropower reservoirs using a grid-wide power dispatch model. *Water Resources Research*, 2015, 51(5): 3664—3680.
- [26] Cosgrove WJ, Loucks DP. Water management: Current and future challenges and research directions. *Water Resources Research*, 2015, 51(6):4823—4839.
- [27] Hall JW, Grey D, Garrick D, et al. Water Security: Coping with the curse of freshwater variability. *Science*, 2014, 346(6208):429—30.
- [28] Tarroja B, Aghakouchak A, Sobhani R, et al. Evaluating options for balancing the water-electricity nexus in California: part 1 -securing water availability. *Science of the Total Environment*, 2014, 497—498:697—710.
- [29] Milly PCD, Betancourt J, Falkenmark M, et al. Stationarity is dead: Whither water management?. *Science*, 2008, 319(5863):573—574.
- [30] Hall JW, Grey D, Garrick D, et al. Water Security. Coping with the curse of freshwater variability. *Science*, 2014, 346(6208):429—430.

River networks and runoff characteristics in Tibetan Plateau: advancements and future strategies

Wang Guanqian^{1,2,5} Fang Hongwei² Ni Guanghen² Yang Kun³ Cheng Chuntian⁴ Li Wanhong⁵

(1. Qinghai University, Xining 810016; 2. Tsinghua University, Beijing 100084;

3. Institute of Tibetan Plateau Research, CAS, Beijing 100101; 4. Dalian University of Technology, Dalian 116024;

5. Department of Engineering and Material Science, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085)

Abstract Based on the presentations and discussions at the 133th “Shuangqing Forum”, we summarized the fundamental advancements and future strategies in the researches of river networks and runoff characteristics in Tibetan plateau. In accordance with both the national development demands on water resources and the water-related research frontiers, scientific objectives and funding emphases in this area were put forward for the next 3—5 years.

Key words Tibetan plateau; river networks; runoff characteristics