

doi: 10.3724/SP.J.1201.2013.01081

长江江源高寒地区气候变化对水文环境影响研究综述

梁川¹, 赵莉花², 张博雄³

(1. 四川大学 水利水电学院, 成都 610065; 2. 河北省水利科学研究院, 石家庄 050057;

3. 河北农业大学, 河北 保定 071001)

摘要: 在全球气候变化背景下, 长江江源高寒地区的水文气象要素(气温、降水、蒸发、径流)和水文环境(冰川、冻土、积雪、湿地、沼泽、植被)已受到重大影响。尤其是随着气候变暖, 长江江源地区出现了冻土及冻土环境退化、植被退化、冻融侵蚀和土地荒漠化的四大生态环境问题。通过对该地区近 50 年气候变化对水文气象要素和水文环境影响研究现状的辨析, 从国家需求和科学问题两个层面上, 提出了当前亟待解决的主要问题并对今后的研究方向进行了展望。这对于促进长江、黄河上游地区和岷江、大渡河、嘉陵江的河源区生态屏障建设, 特别是保障三峡库区水资源安全利用研究能够起到一定的参考作用。

关键词: 长江源; 高寒地区; 气候变化; 水文气象要素; 水文环境

中图分类号: P461 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)01-0081-06

Effects of Climate Change on Hydrological Environment in the Extremely Frigid Zone of the Source Region of Yangtze River

LIANG Chuan¹, ZHAO Lihua², ZHANG Bo xiong³

(1. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Hebei Provincial Academy of Water Resources, Shijiazhuang 050057, China;

3. Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China)

Abstract: As a result of globe climate change, the meteorological and hydrological elements(temperature, precipitation, evaporation, and runoff) and the hydrological environment(glacier, permafrost, snow, wetlands, swamp, and vegetation) have been severely impacted in the extremely frigid zone of the source region of Yangtze River. With the increasing of temperature, four ecological environment problems occur in the source region of Yangtze River, including the permafrost degeneration, vegetation degeneration, freeze thaw erosion, and land desertification. Through the analysis of the effects of climate change in the recent 50 years on the meteorological and hydrological elements and the hydrological environment in this area, the needed scientific studies were proposed from two aspects of national needs and scientific problems. The research in this study can help to improve the ecological barrier construction in the source regions of Yangtze River, Yellow River, Minjiang River, Daduhe River, and Jialingjiang River, especially to provide references for the study of safe utilization of water resources in the Three Gorges Reservoir area.

Key words: source region of Yangtze River; extremely frigid zone; climate change; meteorological and hydrological elements; hydrological environment

近几十年来, 因大气中温室气体增加, 地球表面热量平衡发生改变而导致了全球气候变化, 并进一步加剧某些地区的旱涝灾害, 从而对水文循环和径流形成产生重要影响。国际上对此问题的研究不仅局限在全球尺度, 而且也深入到流域尺度。人们认为, 由于地球表面受热条件的不同及大气环流的改变, 必然引起水文循环的变化和水资源在时空上的重

新分配^[1]。

位于青藏高原腹地的长江江源地区, 集高寒、冰川、冻土和积雪等为一体, 湖泊和沼泽密布, 是世界上湿地分布海拔最高、面积最大与最集中的地区。近 50 年来, 在全球气候变暖变化背景下, 受自然因素和人类活动的影响, 源区的生态环境状况日趋恶化, 冰川后退、湿地萎缩、草场退化、水土流

收稿日期: 2012-09-29 修回日期: 2012-11-22 网络出版时间: 2013-01-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130124.1132.024.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271045)

作者简介: 梁川(1957-), 男, 四川雅安人, 教授, 博士生导师, 从事水文、水资源及水环境方面的教学与研究。E-mail: lchester@sohu.com

失加剧等环境问题日益突出,对整个长江流域的水资源条件、生态安全及社会经济的可持续发展构成了巨大威胁^[2,3],严重制约了当地社会、经济和文化的发展。

长江江源地区是整个长江流域水文循环的起始地,主要功能是保障长江的源远流长,并向下游输送优质水资源。源区内的冰川、冻土、积雪、湿地和沼泽等变化对水环境的影响也必将影响长江流域水资源的可持续利用。因而从 20 世纪 60 年代开始,青藏高原和江源区气候变暖对周围地区水资源与生态环境的影响一直备受国际学术界关注^[4,9],到目前为止,已经召开了四届青藏高原国际学术讨论会。国内也有不少专家学者围绕全球气候变化对该地区影响开展过大量的研究工作^[10,12],因此青藏高原气候变化及其对周围地区(黄河和长江源区)乃至全国的水资源影响已成为一个研究的热点问题^[13]。

1 研究背景与现状

1.1 气候变化对水文气象要素的影响

1.1.1 气温

长江江源地区地势高亢,终年气候寒冷,年均气温一般只有 $-5.5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$,大部分地区年均气温低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,月均正温期只有 5 个月(5 月-9 月),楚玛尔河流域五道梁一带仅 6 月-9 月份为正温期,曲麻莱以东玉树地区正温期达到 7 个月。在江源地区中部的沱沱河沿(集镇)年平均气温为 $-4.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,绝对最低温度为 $-33.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,冻结期长达 7 个月^[14,15]。

然而,随着过去 50 年来全球变暖趋势的加强,青藏高原温度的升高已是不争的事实,温度的升幅也显著大于全国平均水平^[16]:源区的年平均气温从 20 世纪 60 年代开始缓慢上升,1991 年-2001 年温度平均值比 1991 年以前 30 多年的平均值上升了 $0.20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 0.88\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均上升 $0.39\text{ }^{\circ}\text{C}$;近 10 年,平均气温比 20 世纪 60 年代增加了 $1.42\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。康世昌等^[17]通过冰芯记录评估人类活动对大气环境的影响,并指出:20 世纪 40 年代气温较低;50 年代和 60 年代中期气温较高;70 年代中期气温下降到近 70 年来的最低值;80 年代仍然处在一个低温期;90 年代以来气温急剧升高的趋势延续到了 21 世纪初期。各拉丹冬冰芯恢复的气温记录显示 20 世纪 70 年代以来的增温率($0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$)要明显的高于各拉丹冬地区和北半球,而 90 年代以来的增温率($1.1\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$)约为 70 年代以来的 2 倍,表明近期的增温有加速趋势且高海拔区域对全球变暖的响应更为敏感。

由于受海拔高度和地形地貌等因素的影响,不同地区的气温变化幅度不尽相同,其中曲麻莱、玉树等地区升幅较大,西部的沱沱河等地区升温幅度较小^[18]。

不同月份气温的升幅也不相同。谢昌卫对长江、黄河源区 12 个站点的综合分析,总结出江河源区各月温度的升降变化存在较大差异^[19]。从不同台站近 50 年来不同月份气温的变化可以发现,长江、黄河源区升温幅度年内最大的时段是春末夏初 5 月、6 月份和下半年 9 月-11 月份,温度平均上升 $0.90\text{ }^{\circ}\text{C}$,大于年均温度升高幅度;而年内温度最高的 7 月、8 月份升温幅度并不大,平均上升仅 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,小于年均温度升高幅度。因此从总体上来说,长江江源区冬半年气温

升高幅度较大,即呈现出气候暖干化的变化趋势,这与我国北方大部分地区近百年以来出现的暖冬现象是一致的。

1.1.2 降水和蒸发

长江江源地区平均海拔在 $4\ 500\sim 5\ 000\text{ m}$,属高原亚寒带半湿润、半干旱区,日照时数较长,每年约达 $2\ 800\text{ h}$,年总辐射量高达 $670\text{ kJ}/\text{cm}^2$ 。降水主要来自孟加拉湾暖湿气流,年降水量自东南向西北递减,界于 $500\sim 200\text{ mm}$ 左右。年降水 $200\sim 400\text{ mm}$,5 月-9 月降水量占全年的 $90\%\sim 95\%$ 。由于源区的年平均气温在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,最暖月气温也仅为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,降水、蒸发及日照变化不明显,因此固态降水占很大比重^[20]。

王可丽^[21]利用长江江源地区气象站的降水资料 and NCEP/NCAR 的气候资料,探讨了降水的年际变化,对典型多雨年和少雨年 500 hPa 位势高度的风场、 600 hPa 流场、大气水汽含量和水汽输送进行了合成和对比分析。结果表明:降水近 50 年的长期变化趋势总体上不明显,而在近 10 年的降水有明显增加趋势。降水量序列各尺度震荡的形成原因可能与青藏高原热力作用和动力作用以及大气环流演变密切相关。

1.2 气候变化对水文环境变迁的影响

1.2.1 冰川、冻土和积雪

长江江源地区冰川属大陆型冰川,年消融深约 $1\sim 2\text{ m}$ 。冻土分布广阔,北界为昆仑山以北青藏公路 $61\text{ 道班西 }3\text{ km}$ (海拔 $4\ 350\text{ m}$),南至唐古拉山以南的西藏安多县青藏公路 $116\ 117\text{ 道班处}$ (海拔 $4\ 780\text{ m}$)。唐古拉山脉西部以格拉丹冬为中心,是现代冰川集中作用区,也是区域内温度最低的地区,格拉丹冬冰川区雪线处温度约为 $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[22]。

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所采用两期遥感影像资料,在地理信息系统技术的支持下分析了长江源区典型冰川作用区小冰期(LIA)、冰川范围变化、冰川进退情况,并运用由点到面的研究方法分析了冰川变化以及对河川径流的影响^[23,24]。分析表明:1969 年-1989 年间的 20 年中唐古拉山区的大冬克玛底和小冬克玛底冰川分别有小幅度前进,前进量分别为 9.4 m 和 2.1 m ;1989 年-1993 年间这两条冰川处于前进并维持相对稳定状态;1993 年以后转入退缩之中,但退缩幅度不大^[25]。刘潮海和康尔泗等^[26,27]根据航空和卫星遥感资料,结合 $1:100\ 000$ 地形图,通过综合分析获得小冰期最盛期、1969 年和 2000 年三个时期的冰川范围及变化情况。1969 年各拉丹冬冰川面积比小冰期最盛期减少 5.2% ,2000 年比 1969 年减少 1.7% ;但总的冰川面积变化不大。长江水利委员会利用历年遥感数据结合现场考察认为:源区冰川面积总体上处于退缩状态,其中有一定的波动;2004 年前缩小速度较快,此后缩小速度相对较慢;2009 年冰川总面积在 1977 年基础上缩减了 126.33 km^2 ,减少了 11.8% ^[28]。

在全球变暖背景下,随着长江江源地区温度的上升和降水量的减少,区域内冰川、冻土的冷储也减少了,同时冰川、冻土的年消融能力增强。特别是从 20 世纪 90 年代开始,冻土环境发生了显著变化,以冻土退化、活动层增厚、大量岛状冻土消失为表征的冻土变化对高寒生态系统产生较大影

响^[24, 29, 30]。源区的平均积雪量冬季增加比较显著, 秋季增加和春夏季减少均比较缓慢。11月至翌年2月, 各月平均积雪量近50年来呈现出持续增加的趋势, 冬季平均积雪量明显增加的趋势与西藏及高亚洲地区的演变基本一致^[31-32]。

1.2.2 湿地、沼泽和植被

长江江源地区的高寒湿地位于全球气候变化最敏感的川西北高原东北部, 冷湿的气候条件下沼泽相当发育。高寒湿地总面积为10 445.1 km², 其中沼泽占湿地总面积的49.71%, 集中分布在当曲、楚玛尔河、沱沱河的源头、通天河区域, 其余广泛散布在碟形凹地、河谷两岸及河滩地, 如杂尔曲、当曲、莫曲、布曲源头, 马璋错钦南部, 隆宝湖等地^[33]。近50年以来, 从结构上看, 草甸、沼泽和湖泊三种湿地类型的面积均有所减少, 分别减少了1 843.76 km²、186.54 km²和114.8 km²; 就变化幅度而言, 湿地减少率为1.48%/a, 其中高寒泥炭沼泽减少率3.83%/a为最大, 草甸、湖泊和河流的减少率分别为2.72%/a、0.85%/a和0.02%/a。在20世纪30年代前, 沼泽积水一般为20~40 cm, 最深可达1.0 m以上; 近10年的沼泽水深一般只有10~15 cm, 很多沼泽地仅呈过湿状态^[34]。沼泽湿地的减少, 致使区域水汽补给通量减少, 沙化和荒漠化面积增加, 干旱化趋势加速^[35]。王根绪等^[36]利用青藏高原长江、黄河源区以及若尔盖等典型高寒湿地分布地区1969年、1986年、2000年和2004年多期航片和卫星遥感数据, 从湿地主要组分分布、时空格局及水生生态功能方面, 对比分析了典型高寒湿地系统动态变化特征及其区域差异性; 他们还采用多因素逐次甄别方法与半经验理论方法相结合, 基于多年冻土的不同植被覆盖降水-径流观测场测试实验结果, 研究了长江源区气候-植被-冻土耦合系统中各要素变化对河川径流的影响^[37]。2007年, 潘竟虎^[38]根据长江和黄河源区1986年和2000年的两期土地利用现状数据, 利用ARCGIS软件对编辑处理后的各湿地类型面积进行统计, 结果表明长江江源地区河流径流形成区域的下垫面植被覆盖类型中, 高寒草甸是所有河流中所共有的植被类型。

1.3 气候变化对河川径流的影响

长江江源地区河川径流是以不同形态和经过不同转化途径的降水为补给来源, 河流水源形式主要有冰雪融水、沼泽与泉水(地下水)和降水直接汇流等, 且大多数河流三种形式并存, 是混合型水源河流。河川径流以冰雪融水和地下水补给为主, 分别占年径流的45%和40%, 雨水仅占15%。径流年内分配及变化随降水多少和气温高低而变。每年11月至次年4月河流封冻, 最小流量出现在大地冻结的12月-1月, 有的河流出现连底冻; 5月积雪开始融化, 但水量仍不大, 6月-7月河水上涨, 至8月达最大值, 6月-9月为连续最大4个月, 水量占年径流量的70%~85%。以季节而论, 夏季径流量最多, 占67%~75%, 秋季占15%~25%, 春季5%~8%, 冬季仅0.5%~0.6%。20世纪80年代之后, 源区径流量明显减少, 表明气温增加使融冰融雪的增加不足以抵消降水量减少和流域实际蒸发增加的综合效应^[39]。

长江江源地区径流分布的区域间差异既受降水空间分布的影响, 也与河源地下水和冰川融水影响有关。冰川集中发育在通天河以上的江源区, 通天河流域冰川融水对径流的

补给主要集中在冰川融水型和湿地型河流, 占源区总径流量的5.12%; 该流域补给率最大的河流是沱沱河, 占33.7%; 其次是布曲流域占18.4%, 楚玛尔河流域仅有4.2%。由于过去30多年间源区冰川面积变化微弱, 直门达以上长江出源径流的冰川融水补给率总体上约为9%, 可见冰川融水对整个长江水系的补给作用较小^[40]。由于河流径流形成与湿地有关的河流总径流量为 $8.07 \times 10^9 \text{ m}^3$, 占源区总径流量的64.2%, 因此长江源区整体河流径流形成中沼泽湿地补给占据重要位置, 冰川融水补给仅在沱沱河与布曲河水系有较大作用^[41]。如何正确评价冰川退缩对河川径流的影响, 目前尚没有可靠方法, 通常冰川变化对流域径流过程的影响整体可以不予考虑^[9]。

总体而言, 长江江源地区气候变化剧烈, 也是青藏高原增温最为显著的地区之一, 高寒生态系统与冻土环境不断退化, 河川径流呈持续递减趋势, 年均径流量减少约15.2%, 频率大于20%的径流量亦显著降低, 而且大于550 m³/s的稀遇洪水发生频率增加, 变暖变干趋势较为明显^[42]。同时, 部分地区显现气候暖湿化变化的趋势, 虽然有利于植物的发芽和生长, 但对于区域内水资源量的贡献不大, 径流量仍然呈减小趋势。

2 亟待解决的问题

回溯近百年来全球平均气温已上升了0.4℃~0.8℃, 尤其是近10年来的升温最为显著。根据IPCC第三次气候变化评估报告, 预计21世纪全球气温将进一步变暖, 预测平均气温上升1.5℃~4.5℃。中国也和全球一样, 其中高海拔青藏高原变暖尤其令人注目^[43]。我国西部环境演变评估报告预测青藏高原到2050年气温可能上升2.2℃~2.6℃, 地处长江江源的川西北牧区变暖变干趋势明显。因此, 对于长江江源地高寒区域性水文环境特性的认识日益迫切, 查明这一敏感区对全球气候变化的响应, 辨识这里径流形成、演化过程及未来变化趋势, 不仅是一个水科学发展的前沿课题, 也是制定区域可持续发展战略亟需解决的一个现实问题。

从国家需求层面看, 由于川西北牧区是全国第二大藏区, 历史上素有“汉藏走廊”之称。草原是川西北少数民族赖以生存和发展的基础, 草原畜牧业是川西北牧区的主体产业及其农牧民生产生活的主要支撑。目前阿坝州牧业产值占农业总产值的54%, 农牧民的现金收入80%来自畜牧业。随着国民经济的持续发展, 穿过沼泽区的河川受细菌污染和腐殖质污染非常严重, 水质污染造成人、畜患多种疾病, 常见有人患大骨节病、牲畜肝片吸虫病、口蹄疫等。部分村庄大骨节患病率高达80%以上, 严重者发育畸形, 弯腰驼背, 形成跛子、侏儒等^[44]。研究青藏高原高寒地区的河川水文特征和气候变化对寒区环境的影响, 不仅对保护和建设川西北高寒草原并创造良好的生存发展环境, 使少数民族安居乐业, 加快越温脱贫奔小康步伐等有着重大的现实意义, 同时对于维护藏区稳定, 增强民族团结, 保持社会安定, 维护源区水涵养功能和流域水安全和推进民族地区经济社会的全面进步等有着深远的战略意义。

从科学问题层面看, 长江江源地区水文循环及水资源演变是受自然环境与人类活动众多驱动因子的影响, 人们所关

注的一个核心科学问题是该区域气候变化对其重要的水源涵养功能有何影响,冰川、冻土、积雪、湿地和沼泽以及植被覆盖如何共同作用来驱动长江江源区水文循环尤其是径流形成过程与产汇流的变化。在流域尺度上,长江江源地区范围较大,一方面由于全新世以来青藏高原的持续隆升,全球变暖和印度洋暖湿气流减少等气候变化的原因,冰川退缩,雪线上升,使得河川径流量不断减少。另一方面,植被的退化,高原草场沙化严重,水源涵养森林的减少和人类活动的增加,使得源区河流的流量,尤其是在枯水季节明显减少,洪枯期流量差距拉大。同时,由于受青藏高原的影响,源区内的气候变化还存在一定的差异,西部高原山地温度升幅达 $0.2 \sim 0.3 \text{ }^\circ\text{C}/(10\text{a})$,和全国平均值相近,东部四川盆地却呈降温的趋势,为 $-0.12/(10\text{a})$ 。为此,急需厘清气候变化对径流的可能影响程度,包括径流的形成、时空格局及其变化规律、未来发展变化趋势等,进而为长江江源高寒地区水资源定量估算和评价,合理利用长江流域水资源、恢复江源区生态环境提供科学的理论依据,并为保护川西北高寒草原并创造良好的生态环境提供科学的决策依据。

3 结语与展望

(1) 长江江源地区位于青藏高原腹地,地势高亢,由于受海拔高度和地形地貌等因素的影响,年平均气温在 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下,最暖月气温仅为 $4 \text{ }^\circ\text{C} \sim 10 \text{ }^\circ\text{C}$,且不同地区气温变化幅度不尽相同。降水主要来自印度洋孟加拉湾沿嘉陵江北上的水汽和部分沿青藏高原中部北上的水汽形成,受水汽输送途径和江河源区地形地貌的影响,降水主要集中在东部地区,深居高原腹地的西部广大地区降水稀少,而且固态降水占很大比重。因此,需要深化研究高寒湿地区域性气温、降水空间分布特征,年内和年际变化的统计特征,并对各水文要素进行趋势预测,以揭示研究区水汽输送通道和降水时空分布规律。

(2) 长江江源高寒地区作为冰雪融水类区域,冰川、冻土的消融退化,虽然对径流量的短期补给是有利的,但作为多年稳定的固态水资源,过度的消融退缩必将引起径流及其它地表水资源调节作用的减弱乃至丧失。所以应进一步加强各拉丹东冰川、唐古拉山区的大冬克玛底和小冬克玛底冰川的系统观测,利用航空和卫星遥感资料对不同时期冰川范围变化情况量化分析,以查明冰川和冻土对径流补给的贡献。

湿地和沼泽的减少,将导致源区水汽补给通量减少,沙化和荒漠化面积增加,使干旱化趋势加速;反之,湿地和沼泽的扩张,将造成因蒸发水面扩大、蒸发量增加而丧失源区内更多的水汽,因此湿地和沼泽对径流的调控也是不得不加以慎重考虑。当前,重点探索其区域性蒸发量的估算方法、蒸发量的空间分布及其年内和年际变化统计特征,以弄清研究区蒸发力水平分布规律、随海拔高度变化规律、年内及年际演变规律及其成因。

(3) 长江江源段河流流动于高寒平原上,河道宽浅,多汉流。由于降水少,且年际、年内变率较大,成为长江上游流域径流量和径流模数最小,而径流变化又是最大的河段。据此,有必要细化水文气象要素变化和人文环境变迁条件下的产汇流特征与水文过程变化、与径流量的相互作用、以及对

地区分布影响等的研究。进而加强分析长江江源地区河流水文情势、径流的年内和年际变化统计特征,预测未来气候变化情景下径流的可能变化趋势,探明基本的水文气象要素的分布模式与时空格局,这同时也是明确长江江源地区水文环境变迁的有效方法。

总之,借助现代卫星遥感信息及 3S 技术手段,对长江江源地区冰川和冻土分布、积雪量、湿地沼泽变化展开系统的定位观测,在注重对数据的综合分析和水文过程机理探索的同时,通过构建具有流域尺度效应的分布式水文模拟模型,进一步弄清水文气象要素如何共同作用来驱动水文循环变迁的关系,从而形成较为完整的径流形成演化过程与其变化趋势预测的研究体系,正确识别这一敏感的高寒湿地区域河川径流对全球气候变化的响应,这无疑在理论上和实践上都是十分重要的。

参考文献(References):

- [1] S. Antunes, O. Pires, A. Rocha. Detecting Spatio Temporal Precipitation Variability in Portugal Using Multi channel Singular Spectral Analysis [J]. International Journal of Climatology, 2006, 10: 1358-1373.
- [2] 谢昌卫,丁永建,刘时银.近 50 年来长江-黄河源区气候及水文环境要素变化趋势分析[J].生态环境,2004,13(4): 520-523. (XIE Changwei, DING Yongjian, LIU Shiyin. Changes of Weather and Hydrological Environment for the Last 50 Years in the Source Regions of the Yangtze and the Yellow Rivers [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2004, 13(4): 520-523. (in Chinese))
- [3] Kang Lingling, Wang Jinhua, Wang Yunzhang, et al. Analysis on Basic Characteristics and Variations of Runoff in Area above Lanzhou of the Yellow River[A]. The 2nd International Yellow River Forum on Keeping Healthy Life of the River and Modern River Basin Management, Vol. 0 [C]. Zhengzhou: The Yellow River Conservancy Publishing House, 2005.
- [4] V. I. Koren, B. D. Finnerty, J. C. Schaake, et al. Scale Dependencies of Hydrologic Models to Spatial Variability of Precipitation [J]. Journal of Hydrology, 1999, 217: 285-302.
- [5] S. M. S. Shah, P. E. O'Connell, J. R. M. Hosking. Modelling the Effects of Spatial Variability in Rainfall on Catchment Response 2. Experiments with Distributed and Lumped Models [J]. Journal of Hydrology, 1996, 175: 89-111.
- [6] Keeley R. Costigan, James E. Bossert, David L. Langley. Atmospheric Hydrologic Models for the Rio Grande Basin: Simulations of Precipitation Variability [J]. Global and Planetary Change, 2000, 25: 83-110.
- [7] J. P. Iorio, P. B. Duffy, B. Govindasamy, et al. Effects of Model Resolution and Subgrid-Scale Physics on the Simulation of Precipitation in the Continental United States [J]. Climate Dynamics, 2004, 23: 243-258.
- [8] Roberto Deidda, Maria Grazia Badas, Enrico Piga. Space-time Multifractality of Remotely Sensed Rainfall Fields [J]. Journal of Hydrology, 2006, 322: 2-13.
- [9] 孙广友,唐邦兴.长江源区自然环境研究[M].北京:科学出版社,1995: 1-98. (Sun Guangyou, Tang Bangxing. Research

- on Natural Environment in the Source Area of the Yangtze River[M]. Beijing: Science Press, 1995: 1-98. (in Chinese)
- [10] 王涛, 吴薇, 薛娟, 等. 近 50 年来中国北方沙漠化土地的时空变化[J]. 地理学报, 2004, 59(2): 203-21. (WANG Tao, WU Wei, XUE Xian, et al. Spatial-Temporal Changes of Sandy Desertified Land During Last 5 Decades in Northern China[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(2): 203-21. (in Chinese))
- [11] 杨永兴. 若尔盖高原生态环境恶化与沼泽退化及其形成机制[J]. 山地学报, 1999, 17(4): 318-323. (YANG Yongxing. Ecological Environment Deterioration, Swamp Degeneration and Their Formation Mechanism in the Zoige Plateau[J]. Journal of Mountain Science, 1999, 17(4): 318-323. (in Chinese))
- [12] 燕华云, 贾绍凤. 近 50 年来青海水文要素变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 193-198. (YAN Huayun, JIA Shaofeng. Hydrological Elements Change of Qinghai Province in Past 50 Years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 193-198. (in Chinese))
- [13] 王云璋, 康玲玲, 王国庆. 近 50 年黄河上游降水变化及其对径流的影响[J]. 人民黄河, 2004, 26(2): 5-8. (WANG Yunzhang, KANG Lingling, WANG Guoqing. Precipitation Variations Happened in the Upper Stream of the Yellow River and Effects to Its Runoff in the Last 50 Years[J]. Yellow River, 2004, 26(2): 5-8. (in Chinese))
- [14] 康玲玲, 王金花, 刘红梅, 等. 黄河上游兰州站径流量的历史变化分析[J]. 水利学报, 2005(增刊): 76-80. (KANG Lingling, WANG Jinghua, LIU Hongmei, et al. Analysis on Historical Change of Runoff Volume at Lanzhou Station in the Upper Reaches of the Yellow River, Journal of Hydraulic Engineering[J]. 2005, (Supp.): 76-80. (in Chinese))
- [15] 靳立亚, 秦宁生, 毛晓亮. 近 45 年来长江上游通天河径流量演变特征及其气候概率预报[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(2): 220-228. (JIN Liya, QIN Ningsheng, MAO Xiaoliang. Features of Runoff in the Upper Reaches of the Tongtian River and Its Climatic Probability Forecast in Recent 45 Years[J]. Climatic and Environmental Research, 2005, 10(2): 220-228. (in Chinese))
- [16] 周长进, 董锁成, 王国. "三江"河源地区主要河流水资源特征[J]. 自然资源学报, 2001, 16(6): 493-498. (ZHOU Changjin, DONG Suocheng, WANG Guo. Water Resources Characteristics of the Major Rivers in the Source Areas of the Yangtze River, the Yellow River and the Lancang River[J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(6): 493-498. (in Chinese))
- [17] 康世昌, 张拥军, 秦大河, 等. 近期青藏高原长江源区急剧升温的冰心证据[J]. 科学通报, 2007, 52(4): 457-462. (KANG Shichang, ZHANG Yongjun, QIN Dàhe, et al. Recent Temperature Rapid Increase Recorded in Ice Core in the Source Region of the Yangtze River, Qinghai Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(4): 457-462. (in Chinese))
- [18] 梁川, 潘妮, 刘睿. 气候变化对长江源高寒区区域气温影响分析[J]. 中国科技论文在线, A201107371. (LIANG Chuan, PAN Ni, LIU Rui. Influence Analysis of Temperature with Climate Change on in the Cold Source Regions of the Yangtze River[J]. Sciencepaper Online, A201107371. (in Chinese))
- [19] 谢昌卫, 丁永建, 刘时银, 等. 长江-黄河源寒区径流时空变化特征对比[J]. 冰川冻土, 2003, 25(4): 414-422. (XIE Changwei, DING Yongjian, LIU Shiyin, et al. Comparison Analysis of Runoff Change in the Source Region of the Yellow and Yangtze Rivers[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(4): 414-422. (in Chinese))
- [20] 严华生, 杨素雨, 万云霞, 等. 近百年高低层大气环流的演变特征及其与中国降水变化的关系[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2005, 27(7): 397-403. (YAN Huasheng, YANG Suyu, WAN Yunxian, et al. The Long Term Change Characteristics of Atmospheric Circulation at Lower and Upper Level and Its Correlation with China Rainfall in Recent 100 years[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2005, 27(7): 397-403. (in Chinese))
- [21] 王可丽, 程国栋, 丁永健, 等. 黄河、长江源区降水变化的水汽输送和环流特征[J]. 冰川冻土, 2006, 28(2): 8-14. (WANG Kelì, CHENG Guodong, DING Yongjian, et al. Water Vapor Transportation and Circulation Characteristics by Precipitation Change in the Source Region of the Yangtze River and the Yellow River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(2): 8-14. (in Chinese))
- [22] 施雅风. 中国冰川与环境-现在、过去和未来[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 161-189. (SHI Yafeng. Glaciers and Related Environment in China[M]. Beijing: Science Press, 2002: 161-189. (in Chinese))
- [23] 杨建平, 丁永建, 刘时银, 等. 长江黄河源区冰川变化及其对河川径流的影响[J]. 自然资源学报, 2003, 18(5): 595-603. (YANG Jianping, DING Yongjian, LIU Shiyin, et al. Glaciers Change and Its Effect on Surface Runoff in the Source Regions of the Yangtze and the Yellow Rivers[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(5): 595-603. (in Chinese))
- [24] 鲁安新, 姚檀栋, 刘时银, 等. 青藏高原格丹丹东地区冰川变化的遥感监测[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 559-562. (LU Anxin, YAO Tandong, LIU Shiyin, et al. Monitoring to Glaciers Change of the Geladainong Region in Qinghai Tibetan Plateau by Remote Sensing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 559-562. (in Chinese))
- [25] 沈永平, 刘时银, 甄丽丽, 等. 祁连山北坡流域冰川物质平衡波动及其对河西水资源的影响[J]. 冰川冻土, 2001, 23(3): 244-250. (SHEN Yongping, LIU Shiyin, ZHEN Lili, et al. Fluctuations of Glacier Mass Balance in Watersheds of Qilian Mountain and Their Impact on Water Resources of Hexi Region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(3): 244-250. (in Chinese))
- [26] 刘潮海, 宗国平, 金明燮. 祁连山冰川的近期变化及其趋势研究[A]. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊(第7号)[C]. 北京: 科学出版社, 1992: 1-8. (LIU Chaohai, ZONG Guoping, JIN Mingxie. Glacier Changes of Qilian Mountains in Recent Years and Their Trend Study[A]. The No. 7 Collected Papers of Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Chinese Academy of Sciences[C]. Beijing: Science Press, 1992: 1-8. (in Chinese))
- [27] 康尔泗, 杨针娘, 赖祖铭, 等. 冰雪融水径流与山区河川径流[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 190-205. (KANG Ersi, YANG Zheniang, LAI Zuming, et al. Meltwater Runoff and River Runoff in Mountainous Areas[M]. Beijing: Science Press, 2000: 190-205. (in Chinese))

- [28] 苏珍, 刘宗香, 王文梯, 等. 青藏高原冰川对气候变化的响应及趋势预测[J]. 地球科学进展, 1999, 14(6): 607-612. (SU Zhen, LIU Zong-xiang, WANG Wen-ti, et al. Response to Climate Change by Glaciers of the Qinghai-Tibet Plateau and the Trend Prediction[J]. Advances in Earth Science, 1999, 14(6): 607-612 (in Chinese)).
- [29] 沈永平, 谢自楚, 丁良福, 等. 流域冰川平均物质平衡计算方法及其应用[J]. 冰川冻土, 1997, 19(4): 302-307. (SHEN Yong-ping, XIE Zi-chu, DING Liang-fu, et al. Estimation of Average Mass Balance for Glaciers in a Watershed and Its Application[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997, 19(4): 302-307. (in Chinese)).
- [30] 王根绪, 丁永建, 王建, 等. 近 15 年来长江黄河源区的土地覆被变化[J]. 地理学报, 2004, 59(2): 163-173. (WANG Gen-xu, DING Yong-jian, WANG Jian, et al. Land Cover Change in the Source Regions of the Yangtze River and the Yellow River in Last 15 Years[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(2): 163-173. (in Chinese)).
- [31] 王根绪, 程国栋, 沈永平, 等. 江河源区的生态环境变化及其综合保护研究[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2001. (WANG Gen-xu, CHENG Guo-dong, SHEN Yong-ping, et al. Ecological Environment Change and Its Comprehensive Protection Research in the River Source Areas[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2001 (in Chinese)).
- [32] 赵林, 程国栋, 李述训, 等. 青藏高原五道梁附近多年冻土活动冻结和融化过程[J]. 科学通报, 2000, 45(11): 1205-1210. (ZHAO Lin, CHENG Guo-dong, LI Shu-xun, et al. The Permafrost Freezing and Melting Process in Wudaoliang, Qinghai Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(11): 1205-1210. (in Chinese)).
- [33] 若尔盖县志编纂委员会. 若尔盖县志[M]. 北京: 民族出版社, 1996: 95-110. (The Chronicles Compilation Committee of Ruoergai County. Ruoergai County Annals[M]. Beijing: Nationalities Publishing House, 1996: 95-110. (in Chinese)).
- [34] 余烜, 申宿慧, 杨舒媛, 等. 长江源区径流演变特征及其预测[J]. 水电能源科学, 2008, 26(6): 14-16. (YU Xuan, SHEN Su-hui, YANG Shu-yuan, et al. Characteristics and Forecast of Runoff Change in Source Region of the Yangtze River[J]. Water Resources and Power, 2008, 26(6): 14-16. (in Chinese)).
- [35] 杨针娘, 刘新任, 曾群柱. 中国寒区水文[M]. 北京: 科学出版社, 2000. (YANG Zhen-niang, LIU Xin-ren, ZENG Qun-zhu. The Hydrology in the Cold Region of China[M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)).
- [36] 王根绪, 李元寿, 王一博, 等. 近 40 年来青藏高原典型高寒湿地系统的动态变化[J]. 地理学报, 2007, 62(5): 481-491. (WANG Gen-xu, LI Yuan-shou, WANG Yi-bo, et al. Typical Alpine Wetland System Changes of the Qinghai-Tibet Plateau in Recent 40 Years[J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(5): 481-491. (in Chinese)).
- [37] 王根绪, 李元寿, 王一博, 等. 长江源区高寒生态与气候变化对河流径流过程的影响分析[J]. 冰川冻土, 2003, 29(4): 161-168. (WANG Gen-xu, LI Yuan-shou, WANG Yi-bo, et al. Impacts of Alpine Ecosystem and Climate Changes on Surface Runoff in the Source Area of the Yangtze River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 29(4): 161-168 (in Chinese)).
- [38] 曹建廷, 秦大河, 罗勇, 等. 长江源区 1956-2000 年径流量变化分析[J]. 水科学进展, 2007, 18(1): 29-33. (CAO Jian-ting, QIN Da-he, LUO Yong, et al. Discharge Changes in the Source Area of the Yangtze River during 1956-2000[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(1): 29-33. (in Chinese)).
- [39] 梁川, 刘睿, 潘妮. 长江源高寒区降水和径流周期变化及突变性分析[J]. 中国科技论文在线, A2010121184. (LIANG Chuan, LIU Rui, PAN Ni. Discontinuity Analysis and Periodic Variation of Runoff and Precipitation in the Source Cold Region of the Yangtze River[J]. Sciencepaper Online, A2010121184. (in Chinese)).
- [40] 梁川, 侯小波, 潘妮. 长江源高寒区域降水和径流时空变化规律分析[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(1): 53-59. (LIANG Chuan, HOU Xiao-bo, PAN Ni. Spatial and Temporal Variations of Precipitation and Runoff in the Source Region of the Yangtze River[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(1): 53-59. (in Chinese)).
- [41] Lu Qingbai, Zhu Yuanlin, Liu Yonzhi. Evaluation Model Permafrost Thermal Stability and Thawing Sensibility Under Human Activity[J]. Cold Regions Science and Technology, 2002, 34: 19-30.
- [42] Chuan Liang, Hou Xiaobo, Pan Ni. Study on the Spatial-Temporal Variation of Runoff in the Source Region of the Yangtze River, China[A]. 9th International Conference on Hydroinformatics, IHC 2010[C]. Tianjin: 2010: 1075-1083.
- [43] 王绍武. 近百年气候变化与变率的诊断研究[J]. 气象学报, 1994, 52(3): 261-273. (WANG Shaowu. Diagnosis and Research on Climate Change and the Changing Rate in Recent 100 Years[J]. Journal of Meteorology, 1994, 52(3): 261-273. (in Chinese)).
- [44] 陈文光. 加强四川省草原治理建设长江黄河上游草地生态屏障西北草原退化沙化的调查与思考[J]. 四川草原, 2002, 10(3): 1-4. (CHENG Wen-guang. Survey and Thinking on the Northwest Prairie Degeneration and Desertification for Strengthening the Management of the Prairie in Sichuan Province and Constructing the Grassland Ecological Barrier in the Upper Reaches of the Yangtze River and the Yellow River[J]. Sichuan Grassland, 2002, 10(3): 1-4. (in Chinese)).