

气候变化对西北干旱区水循环影响 机理与水资源安全研究

◆ 陈亚宁

荒漠与绿洲生态国家重点实验室(中国科学院新疆生态与地理研究所), 乌鲁木齐 830011

摘要 西北干旱区是对全球变化响应最敏感的地区之一,“气候变化对西北干旱区水循环影响机理与水资源安全研究”项目,以全球变化背景下的西北干旱区气候-水文过程、水循环机理、水资源形成与转化以及未来变化趋势为主线,重建了过去300年西北干旱区气候变化序列,分析了气候变化对水循环关键过程和水系统的影响,构建了适合山盆地貌格局的水文、水资源模型,分析了未来水资源变化趋势,得出了一系列有意义的结论:在过去300年间,西北干旱区以冷干、暖湿气候类型交替出现,存在40年的变化周期;在近50年,温度、降水出现了“突变型”升高,自1997年以来,升温滞缓,处于高位震荡;蒸发潜力由显著下降逆转为显著上升趋势,水循环过程加剧;极端气候水文事件频度增强、频率加大,水文波动性增强、水资源不确定性增大;天山山区冰川加速退缩,冰雪水储量呈减少态势,部分河流出现冰川消融拐点;水系统安全性降低,供需水矛盾会进一步加剧;伴随气温的高位震荡和地下水的超采,西北干旱区的生态隐忧和潜在风险加大。

关键词: 气候变化 水循环 冰川退缩 径流分割 极端事件

中图分类号: [P951] 文献标识码: A

文章编号: 1009-2412(2015)02-0015-07

DOI: 10.3969/j.issn.1009-2412.2015.02.003

收稿日期: 2015-1-20 修回日期: 2015-3-20

研究资助: 全球变化研究国家重大科学研究计划(2010CB951000)。

本文作者: 陈亚宁, 研究员, chenyn@ms.xjb.ac.cn。

一、引言

水资源是西北干旱区基本保障性自然资源和战略性经济资源,是制约经济社会发展、生态环境建设的最关键因素。气候变化引起的水资源无论在量上还是时空分布上的变化,都会使得西北干旱区资源开发利用过程中生态保护与经济矛盾的矛盾更加突出。“气候变化对西北干旱区水循环影响机理与水资源安全研究”项目,聚焦如下关键科学问题: (1) 西北干旱区水汽弱汇作用下,气候水文要素变化规律、机理及其对气候变化响应过程的阐明以及山区冰雪融水、森林降水和裂隙基岩水等径流构成的精细分割与未来不同情景下的山区来水量变化特征的预测; (2) 西北干旱区山地-绿洲-荒漠系统水循环关键过程的揭示以及山、盆相间特殊地貌格局下的分布式水文模型的构建; (3) 西北干旱区水循环过程变化对极端气候水文事件发生频度、强度以及水系统关键脆弱性的影响; (4) 气候变化对未来生产、生活用水和生态耗水过程与强度影响的评估以及干旱区“水-生态-社会经济”复杂系统的水资源分配合理阈值的确定。经过4年多的研究工作,得出了一些有意义的结论和科学发现,为科学应对气候变化、保障水资源安全、减缓中亚邻国水资源冲突和维护周边稳定提供了科学支撑;为提高国家应对气候变化的能力、制订未来气候变化下的应对策略提供了科学依据。

二、气候水文要素及对全球变化的响应

1. 重建与复演了过去300年气候变化序列,发现西北干旱区气候类型以冷干、暖湿交替出现。利用树轮重建和复演了过去300年西北干旱区气候变化序列。树轮的研究结果显示,新疆天山山区与北疆的气温在过去300年间经历了8个偏暖阶

段和7—8个偏冷阶段(Yang et al., 2012),存在40年的周期;历史时期的西北干旱区气候类型主要以冷干、暖湿交替出现;年降水量变化经历了7个偏干阶段和7个偏湿阶段(Chen et al., 2012a),最湿润阶段为1993以后,存在33年的周期。最近30年,天山山区出现了显著变湿趋势,河西走廊降水表现出恢复性上升,西北地区东部表现出变干趋势。天山干湿变化序列具有60.2年和2—5年周期变化,并通过空间相关分析证实北大西洋地区海温变化是中亚地区干湿变化的重要影响因素。河西走廊降水具有显著的11年和2—7年准周期变化,可能与太阳黑子活动和ENSO周期变化一致(Chen, et al., 2013)。西北地区东部降水具有显著的2—4年准周期变化,与ENSO周期变化类似。通过对典型干湿年份大气环流的特征分析,发现西北干旱区东部干湿变化与亚洲夏季风活动存在明显关联(Chen, et al., 2014)。

通过树木年轮重建,揭示了西北干旱区过去300多年来气温、降水的历史气候序列,并与北半球的典型气温变化曲线以及西部历史文献记载资料进行了对比验证(Chen et al., 2012b; 2013)。研究结果得到了国内外广泛关注,并被光明日报、中国气象报等媒体专门报道。重点开展的利用树轮密度进行百年来温度重建的工作,克服了过去单纯利用树轮宽度资料在我国西北干旱区难以有效进行温度重建的缺点,取得了一些可以和北半球温度重建序列相对比的结果。研究所获取的树轮气候资料被《新疆区域气候变化评估报告决策者摘要及执行摘要》采用。同时,基于树轮资料进行的气候预估资料还定期参与新疆气象局气候年景预测分析会,直接服务于应对气候变化工作。这些研究成果为进一步提高国家应对气候变化的能力、制订未来气候变化下的应对策略提供了科学依据。同时,对降水和水汽分布的研究,也推动了空中水资源基础和应用基础研究工作的开展,为解决新疆水资源短缺,在三大山系实施人工增水、合理开发空中水资源战略提供了科技支撑。

2. 西北干旱区气温在20世纪90年代后期升温过程滞缓,呈现高位震荡态势;降水突变型升高,水循环过程加剧

对西北干旱区78个站点过去半个多世纪的统计资料分析显示,西北干旱区气温在20世纪90年代后期出现突变型升高,突变点出现在1997年。

1997—2012年平均气温相比1960—1996年升高了 1.11°C ,但自此以后升温滞缓,呈现高位震荡态势;详细分析发现,年内冬季气温的升幅最大,西伯利亚高压活动减弱与冬季气温上升速率加快关系密切(Li et al., 2012)。西北干旱区降水在20世纪80年代后期也出现了突变型增加,增加幅度达22.7%,由20世纪70年代的80%台站减少,转变为20世纪80年代后期的75%和20世纪90年代的88%台站增加。值得一提的是,在近10余年(2000—2012年),西北干旱区降水量的增加幅度降低,并且约有35%的台站表现为降水量减少的趋势。伴随着全球变暖,水循环过程加剧,通过对热传输与水汽传输比例参数的改进,发展了适用于D20蒸发皿蒸发的Pen-Pan模型,该模型从物理机制上定量刻画了各要素对蒸发皿蒸发变化的贡献率,避免了传统相关分析法缺乏物理机制的缺陷。利用该模型的计算结果表明,西北干旱区蒸发潜力由1993年以前 $-6.0\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速率显著下降逆转为以 $10.7\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 速率显著上升的趋势(Li et al., 2013)。这一研究发现,向长期以来蒸发悖论的观点发出了不同信号,对过去的蒸发“正比”和“互补”观点提出了新的认识。研究结果得到热议,被BCAS作为最新研究亮点进行了专门报道。《中国科学报》、“科学网”等以“蒸发悖论受挑战,西北水管理需新思路”进行了专门报道。

3. 气候变暖加剧了西北干旱区极端气候水文事件,加大了水资源不确定性

全球变化导致西北干旱区极端水文事件和洪、旱灾害增加。研究表明,在西北干旱区,极端水文事件无论在范围和频率上都呈现显著增加趋势(Shi et al., 2007)。尤其是20世纪80年代以来,在气温极值方面,与暖相关的极值(暖夜日数、暖昼日数、热日持续指数)显著增加(Wang et al., 2013a)。对于降水极值(日降水强度、强降水事件、大雨日数、强降水量)也都表现为增加趋势。西北干旱区降水量增加是降水频率和降水强度共同增加的结果(Wang et al., 2013b)。极端水文事件的发生频率在20世纪80年代以前为40次/10a,而80年代后期以来增加到78次/10a(Sun et al., 2013; 2014; Wang et al., 2014a)。极端气候水文事件的加剧,导致西北干旱区水资源不确定性加大、水循环过程和生态需水规律改变,致使西北干旱区以山区降水和冰雪融水补给为基础的水资源系统更为脆弱,给水资源管理者带来了新的挑战(陈亚宁, 2014)。统计过去50年河

川径流变化发现 山区来水量变率加大、水文波动性增加。如塔里木河最小、最大径流量($14.02 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $72 \times 10^8 \text{ m}^3$)相差5倍多。项目组成员提出的“气候变暖加剧西北干旱区水资源波动性”的观点,在《中国科学报》和“科学网”等多家新闻媒体转载。

4. 分析了西北干旱区弱汇条件下的水汽来源及收支问题

基于NCEP资料研究了西北干旱区水汽通量的气候特征及其变化,结果表明,新疆主要受西风带系统的影响,西边界、北边界和南边界为净流入,东边界为净流出。东、西边界水汽输送量大于南、北边界水汽输送量(刘蕊等,2010)。流入新疆的总水汽量为26114亿吨,总流出量为25647亿吨,水汽净流入达467亿吨。新疆区域年平均水汽转化率为11.2%,略高于整个西北干旱区的平均水汽转化率(10.6%),最高年份可达15.0%。近40年新疆水汽转化率呈显著增加趋势,这也是降水增加的原因之一。近10年来西北干旱区东部的的水汽转化率偏低,变化幅度也不大,这可能也导致了西北干旱区东部降水减少。

对西北干旱区降水量的精细化空间分布分析发现,在过去半个多世纪,降水量呈明显增加态势。在1988—2012年间,区域总降水量约为3997亿 m^3 /年,较1960—1987年增加了21.2%,呈现出明显增加趋势;其中,新疆全区的年平均总降水量为2757亿吨,约占整个西北干旱区的76.7%。最高达4225亿吨(2010年),最低为1963亿吨(1985年),线性趋势变化率为 $172 \times 10^8 \text{ m}^3/10\text{a}$,尤其是1986年以后增长显著(李军等,2010)。分析结果显示,1988年以后,夏季里海地区更易出现低值系统,在新疆西部更易出现西南气流,有利于新疆的降水增加;冬季情况类似,低值系统活动区位置较夏季偏北,西南风变化区域位置偏北,影响小于夏季。对流层中、低层索马里急流-阿拉伯半岛东南部-中亚和新疆三段式水汽接力输送是年代际降水偏多的重要水汽输送机制,索马里急流和热带印度洋是中亚和新疆年代际增湿的重要水汽补充源地之一。从地表热力强迫上看,冬季和春季孟加拉湾、青藏高原以及南疆地区地表潜热通量异常强(弱)导致南疆夏季降水偏多(少)(赵勇等,2013)。

5. 山区冰川、积雪变化对水资源影响日益加大,部分河流出现冰川“消融拐点”

西北干旱区冰川总体表现为后退和萎缩(Wang

et al., 2012) 冰川、永久积雪、冻土等固态水体呈明显减少态势(Chen, 2014)。模式预测显示,南疆在未来一段时间的水资源量仍保持高位震荡,东疆盆地、天山北麓及河西走廊的石羊河等将出现减少趋势,部分流域出现冰川消融拐点。气候变暖对冰川水资源的影响首先是使冰川融水径流增大,而这种增加以消耗冰川固体冰体为代价。冰川比较发育、受冰川融水补给较多的河流,可能会在相当长一段时期内,径流量变化处在高位波动。研究表明,冰川融水补给大的河流,水量增加显著。如北疆乌鲁木齐河冰川融水比例低于8%,径流量增加约10%;南疆的库马拉克河冰川水比例高于50%,径流量增加高达39%。那些冰川面积小、数量少的流域,会随着温度升高,冰川迅速消退,冰川水资源量减少,出现冰川“消融拐点”,冰川融水的调剂功能下降,河川径流或因降水异常的影响而变率增大。项目组成员提出的“气候变化致新疆冰川显著退缩”的观点在《中国科学报》和“科学网”等多家新闻媒体转载。

三、水文计算方法与水文模型的改进和发展

1. 提出了山岳冰川主流线厚度计算公式,发现天山山区的冰雪水储量处于减少态势

结合对冰川及冰川水资源动态变化的研究,研究提出了一套适用于山岳冰川的主流线厚度计算公式,以冰川几何形态等参数作为输入,适合在流域或区域尺度进行多条冰川厚度和储量的计算。基于流体动力学与理想塑性体理论,建立了将冰川坡度、宽度、冰的屈服应力与冰川厚度相联系的物理模型。在具备厚度实测数据的冰川上得到了良好的验证,尤其对我国广泛分布的山谷冰川,其模拟精度远高于其它同类模型。该方法可以直接用于估算无测厚资料冰川的厚度和储量、计算冰川水储量变化等方面研究,为预估未来冰川水资源变化提供了重要科学基础。该模型的建立弥补了国际上山岳冰川在厚度模拟方面的研究空白,在与山岳冰川相关的各类水文水资源研究中皆具有举足轻重的实际应用价值。同时,结合重力卫星资料,对过去10年(2003—2013年)西北干旱区陆地水储量进行了分析计算,结果发现西北干旱区陆地水储量呈减少态势(Yang et al., 2014),尤其是天山山区的冰川、永久积雪、冻土等固态水体呈明显减少态势。有“中亚水塔”之称的天山及其周边地区陆地水储量正在以平均每月

3.5mm 的速率减少。水资源开发潜力已经逼近、甚至个别区域超过阈值范围。伴随着目前气温的高位震荡,水资源问题日益突出。项目组提出的“未雨绸缪,应对中亚水塔危机”观点在《中国科学报》、“科学网”等多家媒体转载。

2. 解析了降水、降水-降雪转化、积雪-融雪产流、绿洲和荒漠耗散等关键过程,研制了适应西北干旱区山区-绿洲水循环过程特点的分布式水文模型

针对西北干旱区降水-产流-耗散过程认识的薄弱环节,重点研究了区域降水、降水-降雪转化、积雪-融雪产流、绿洲和荒漠耗散等关键过程,加深了对西北干旱区水循环过程的认识和理解。基于日有效活动积温改进了融雪过程的度日因子算法,提出了基于流域含水层释水特性的“快”、“慢”双线性库组合的含水层出流公式(Luo et al., 2011; Huang et al., 2012),系统地评价了含水层储水量与出流量非线性关系在西北干旱区内陆河流域的适应性,提出了适应大尺度模拟滴灌土壤水动力学过程的简易算法。在理论方法创新的基础上,研制了适应西北干旱区山区-绿洲水循环过程特点的分布式水文模型,解决了深入研究山区-绿洲系统水循环过程特征和预估气候变化影响的方法论问题;基于研制的水文模型,识别出西北干旱区内陆河流域雨、雪、冰“三元”产流随高程分布特征和总产流随高程分布特征。发现天山的主产流区位于海拔 3720 m 上下,帕米尔、喀喇昆仑山和昆仑山的主产流区位于海拔 4850 m 上下(Luo et al., 2012)。主产流区位置受雨、雪、冰产流的空间分布及其在总产流中的比例构成,以及流域面积-高程分布的综合影响;提出的分布式冰川水文过程模拟方法解决了流域区域尺度模拟冰川水文过程的个体冰川尺度效应问题和气候变化影响下冰川水文过程长时间尺度预测问题。

3. 构建了流域尺度冰川产流模型,实现了流域尺度雨、雪、冰“三元”产流过程分布式模拟

在气候变暖背景下,西北干旱区的径流对冰川产流响应敏感,而流域尺度冰川产流模型很少,因此,冰川产流模块成了西北干旱区水文模型中不可或缺的一部分。Luo 等(2013)提出了动态冰川水文响应单元(HRU)的概念和方法。该方法将流域中的各条冰川作为独立的动态变化的水文响应单元,模拟冰川单元物质积累、消融和物质平衡,冰川融水与消融区面积相关,冰川面积与冰川体积相关,冰川体积与冰川物质平衡相关,冰川水文过程与冰川面积

动态耦合。将这一方法耦合到已有降雨产流、融雪产流功能的流域分布式水文模型 SWAT,结果表明,在天山北坡玛纳斯河流域,1961—1999 年间冰川面积减少 11%,冰川融水对径流的贡献平均为 25%,模型 Nash-Sutcliffe 效率系数达到 0.65,实现了流域尺度雨、雪、冰“三元”产流过程分布式模拟。与 HBV 模型相比,本模型考虑了个体冰川的尺度效应,实现了冰川物质平衡与冰川面积变化的耦合作用,可以预估在季节、年际、年代际不同时间尺度上冰川水文过程及其对气候变化的响应。并且,提出了“双库”基流算法,模拟雪冰补给河流丰水期快速消退,枯水期保持长时间相对稳定的径流过程形态,模拟效果显著提高,Nash-Sutcliffe 效率系数由原来的 0.65 提高到 0.72。这种方法显著改善了西北干旱区内陆河河川径流过程,特别是枯水期的模拟效果。

西北干旱区水文模拟过程中还存在一个难点,即气象水文资料稀缺地区的径流模拟。西北干旱区流域气象站点稀少,水文过程复杂,准确模拟径流成为一个挑战。基于 SWAT 分布式水文模型,选取天山南坡开都河流域为典型研究区,通过耦合敏感性分析方法(MORRIS 敏感性分析和 SDP 敏感性方法)评估了模型参数的敏感性,通过参数率定方法模拟了出山口径流的变化。研究表明,在开都河流域,与地下水过程相关的水文参数(α_{bf} , gw , $Gwqmn$, gw , Gw_delay , gw 等)非常敏感,说明地下水过程是开都河流域的最重要的水文过程。尽管流域气象站稀少,但是模型模拟效果非常好,在率定期(1986—1989 年)和验证期(1990—2010 年),模型 Nash-Sutcliffe 效率系数达到 0.80 以上。

四、水资源未来变化趋势与供需水平衡

1. 分析了未来气候变化影响的态势和空间格局,预估了 1951—2100 年流域雨、雪、冰产流和径流的长期变化趋势

基于 CIMP5 中的 5 个气候模式的气候要素预估结果和分布式水文模型,从多模式、多情景、多流域研究了长时间序列气候变化对水循环发展态势和空间格局的影响。在未来低水平(RCP2.6)、中等水平(RCP4.5)、高水平(RCP8.5)排放 3 个气候变化情景下,预估了 1951—2100 年流域雨、雪、冰产流和径流的长期变化态势。对 34 个代表性流域的综合分析发现:(1) 低排放情景下,从历史时期(1966—

1995 平均) 到中期(2016—2045 平均) 至远期(2066—2095 平均) 的长期变化趋势来看, 24 个代表性流域的径流量表现出先减后升的变化态势, 这些流域主要分布在天山; 10 个代表性流域的径流量表现出先升后减的态势, 这些流域主要分布在帕米尔高原、喀喇昆仑山和昆仑山。中期径流量增加总和可达 $33 \times 10^8 \text{ m}^3$, 减少总和可达 $16 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。(2) 高排放情景下, 冰川面积较大的流域径流量呈现逐渐增大的态势, 冰川面积较小的流域, 径流量呈现逐渐减小的态势。远期增加总量可达 $57 \times 10^8 \text{ m}^3$, 将极大地缓解这些流域水资源紧缺局面。然而, 径流减少总量亦高达 $39 \times 10^8 \text{ m}^3$, 相当于天山北坡最大河流玛纳斯河多年平均径流量的 3.3 倍, 一些流域的远期径流量相对于历史时期的减少幅度高达 20% 以上, 将严重威胁这些流域的水资源安全(Luo et al., 2013)。

2. 西北干旱区水资源短缺程度进一步加剧, 供需水矛盾更加突出

西北干旱区多数流域需水占供水比例超过 0.4, 整体水资源供需关系比较紧张。水资源供需紧张的地区主要位于耕地集中的流域。利用分布式水资源模型, 模拟分析了西北干旱区农业灌溉需水量的时空分布特征, 发现近 30 年, 西北干旱区农业灌溉需水量呈现增加趋势。2010 年末西北干旱区作物灌溉需水量达到 443 亿 m^3 , 其中北疆、南疆、河西分别为 198、205 和 46.5 亿 m^3 (Shen et al., 2013)。天山北麓东段与石羊河流域需水量甚至大于水资源总量, 需水/供水比例超过 1.0, 已不能满足农业生产与居民生活耗水, 存在过渡开发地下水的问题。新疆北部额尔齐斯河、伊犁以及新疆东南等地, 降雨或地表水资源量丰富, 而耕地又相对较少, 用水形势较缓和。就时间变化来看, 多数流域由于用水量的增加, 用水矛盾越来越紧张。开孔河流域、哈密盆地和河西荒漠区需水占水资源总量的比例在 2010 年已经超过 0.4 的警戒值, 而水资源供需紧张的地区需水量占水资源总量的比例也在逐年升高, 在天山北麓中段需水量甚至已经超过水资源总量。黑河流域由于 20 世纪 90 年代以来大力推行节水灌溉, 与 1990 年相比, 2000 和 2010 年的用水总量呈逐渐下降趋势。

未来气候情景下, 水资源量为增加趋势, 但是增加幅度小。在未来气候变化和社会经济发展影响下, RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 三个排放情景下,

2016—2045 年比 1971—2000 年的年均社会经济需水量分别增加 245、242 和 245 亿 m^3 , 2046—2075 年时段的增加量分别达到 265、277 和 290 亿 m^3 , 并且需水增加量表现为北疆 > 南疆 > 河西。

3. 气候变化对西北干旱区地表生态过程影响日益加剧, 生态负效应凸显

气候变暖和目前的高位震荡, 强烈影响着区域蒸散发水平、降雨模式、冰川融化以及水资源构成, 使得西北干旱区以山区降水和冰雪融水补给为基础的水资源系统更为脆弱, 水资源与生态水文问题日益突出。2000 年前后, 西北干旱区的生态效应出现了逆转(Wang et al., 2013c; 2014b), 荒漠区植被出现了覆盖度先增后减的变化过程, 荒漠区植被指数(NDVI) 降低, 部分区域还出现了草场灌丛化。1997 年以来虽然升温滞缓, 但一直处于高位震荡, 加之蒸发潜力的逆转, 加大了干旱区土壤耗水散失, 一些浅根系抗逆性差的天然植被因干旱胁迫而死亡, 生物多样性降低。与此同时, 伴随水土资源开发强度的加大, 灌溉面积不断扩大, 农业用水强烈挤占了生态用水, 湖泊湿地萎缩、地下水位大幅下降, 这说明在西北干旱区气候变暖的生态负效应已经凸显, 气候变化和人类活动引发的生态隐忧和风险正在加剧。针对生态效应逆转的突出问题, 结合我国最大内陆淡水湖——博斯腾湖的水位、水质变化等(陈亚宁等, 2013), 提出了博斯腾湖生态水位、水质和最低入湖流量的生态红线等保护对策与建议被《决策参考》全文刊出(2012 年第 80 期), 并被国务院办公厅《专报信息》和中央办公厅《每日汇报》刊用。项目研究成果引起了国家和社会各界的关注, 在服务于生产实践方面发挥了重要科技支撑作用。

五、结 语

全球气候变化是当今国际社会共同关心的热点, 气候变化引起的水资源变化, 使得西北干旱区在资源开发利用过程中生态维护与经济矛盾的矛盾更加突出。西北干旱区水资源补给来源单一, 均来自山区降水和冰雪融水, 而这部分水资源对全球气候变化的响应十分敏感, 具有很大的不确定性。在西北干旱区, 水资源是制约社会经济发展、影响生态安全的关键要素, 对未来经济社会可持续发展起着至关重要的作用。本文对一些关键科学问题和研究进行了总结, 主要结论如下:

(1) 在西北干旱区,河川径流对冰川的依赖性强,冰川的变化已经对水资源量及年内分配产生重要影响。气候变暖引起的水资源变化,将会使西北干旱区资源开发利用过程中生态维护与经济矛盾的矛盾更加突出。在全球气候变化背景下,西北干旱区极端水文事件的频度和强度都在增加,水系统安全受到影响,水资源脆弱性和不确定性将加剧。

(2) 西北干旱区的水资源全部来自山区,由高山区冰川积雪融水、中山森林带降水和基岩裂隙水构成,其中,干旱区河流的冰雪融水比例高达50%左右。伴随全球变暖,山区冰川加速退缩,冰雪水储量呈减少态势,部分河流出现冰川消融拐点;在目前气温高位振荡的背景下,发源于西部山地的一些河流将继续保持一定水平,但东部水危机加剧,水资源短缺程度会加大,供需水矛盾会进一步加剧。

(3) 气候变化强烈影响着区域蒸散发水平、降雨模式、冰川融化和水资源构成,使得西北干旱区以山区降水和冰雪融水补给为基础的水资源系统更为脆弱。加之,人类经济社会活动规模和强度不断扩大,水资源开发过程中生态与经济的矛盾日益突出。西北干旱区生态效应出现逆转,地下水位大幅下降,生态隐忧和潜在风险加大,建议有计划、分步骤地在西北干旱区实施退耕、减地、还生态水行动计划,确保干旱区生态安全与绿洲经济的可持续发展。

参考文献

- [1] 陈亚宁,等. 中国西北干旱区水资源研究. 北京: 科学出版社. 2014
- [2] 陈亚宁,杜强,陈跃滨. 博斯腾湖流域水资源可持续利用研究. 北京: 科学出版社. 2013
- [3] 李军,杨青,史玉光. 基于DEM的新疆降水量空间分布. 干旱区地理, 2010, 33(6): 868—873
- [4] 刘蕊,杨青. 新疆大气水汽通量及其净收支的计算和分析. 中国沙漠, 2010, 30(5): 1221—1228
- [5] 赵勇,杨青,黄安宁,等. 青藏和伊朗高原热力异常与北疆夏季降水的关系. 气象学报, 2013, 7(4): 660—667
- [6] Chen F, Yuan Y, Wen W, et al. Tree-ring-based reconstruction of precipitation in the Changling Mountains, China, since AD 1691. International journal of biometeorology, 2012a, 56(4): 765—774
- [7] Chen Feng, Yuan Yujiang, Wei Wenshou, et al. Temperature reconstruction from tree-ring maximum latewood density of Qinghai spruce in middle Hexi Corridor, China. Theoretical and Applied Climatology, 2012b, 107(3—4): 633—643
- [8] Chen Feng, Yuan Yujiang, Wei Wenshou, et al. Tree-ring-based annual precipitation reconstruction for the Hexi Corridor, NW China: consequences for climate history on and beyond the mid-latitude Asian continent. Boreas An International Journal of Quaternary Research, 2013, 42(4): 1008—1021
- [9] Chen Feng, Yuan Yujiang. May-June Maximum Temperature Reconstruction from Mean Earlywood Density in North Central China and Its Linkages to the Summer Monsoon Activities. Plos one, 2014, DOI: 10.1371/journal.pone.0107501
- [10] Fan Yuting, Chen Yaning, Li Xingong, et al. Characteristics of water isotopes and ice-snowmelt quantification in the Tizinafu River, North Kunlun Mountains, Central Asia. Quaternary International. DOI: 10.1016/j.quaint.2014.05.020
- [11] Fan Yuting, Chen Yaning, Liu Yongbo, Li Weihong. Variation of baseflows in the headstreams of the Tarim River Basin during 1960—2007. Journal of Hydrology, 2013, 487: 98—108
- [12] Huang Yue, Chen Xi, Li Yongping, BaoAnming, et al. A simulation-based two-stage interval-stochastic programming model for water resources management in Kaidu-Konqi watershed, China. Journal of Arid Land, 2012, 4(4): 390—398
- [13] Li Baofu, Chen Yaning, Shi Xun. Why does the temperature rise faster in the arid region of northwest China? Journal of Geophysical Research, 2012, 117, D16115
- [14] Li Zhi, Chen Yaning, Shen Yanjun, et al. Analysis of changing pan evaporation in the arid region of Northwest China. Water Resources Research, 2013, 49: 2205—2212
- [15] Luo Yi, Arnold J, Allen P, Chen Xi. Baseflow simulation using SWAT model in an inland river basin in Tianshan Mountains, Northwest China. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16: 259—1264
- [16] Luo Yi, Arnold J, Liu Shiyin, Wang Xiuying, Chen Xi. Inclusion of Glacier Processes for Distributed Hydrological Modeling at Basin Scale with Application to a Watershed in Tianshan Mountains, Northwest China. Journal of Hydrology, 2013, 477: 72—85
- [17] Luo Yi, MariosSophocleous. Two-way coupling of unsaturated-saturated flow by integrating the SWAT and MODFLOW models with application in an irrigation district in arid region of West China. Journal of Arid Land, 2011, 3(3): 164—173
- [18] ShenYanjun, LiShuo, ChenYaning, et al. Estimation of regional irrigation water requirement and water supply risk in the arid region of Northwestern China 1989—2010. Agricultural Water Management, 2013, 128: 55—64
- [19] Shi Yafeng, Shen Yongping, Kang Eesi, et al. Recent and future climate change in Northwest China. Climatic Change, 2007, 80(3—4): 379—393
- [20] Sun Guili, Chen Yaning, LiWeihong et al. Spatial distribution of the extreme hydrological events in Xinjiang, north-west of China. Natural Hazards, 2013, 67(2): 483—495
- [21] Sun Guili, Chen Yaning, LiWeihong et al. Intra-annual distribution and decadal change in extreme hydrological events in Xinjiang, Northwestern China. Natural Hazards, 2014, 70(1): 119—133
- [22] Wang Huaajun, Chen Yaning, Chen Zhongsheng. Changes in annual and seasonal temperature extremes in the arid region of China,

- 1960—2010. *Natural Hazards*, 2013a, 65(3): 1913—1930
- [23] Wang H J, Chen Y N, Chen Z S. Spatial distribution and temporal trends of mean precipitation and extremes in the arid region, north-west of China, during 1960—2010. *Hydrological Processes*, 2013b, 27(12): 1807—1818
- [24] Wang Huaijun, Chen Yaning, and Li Weihong. Characteristics in streamflow and extremes in the Tarim River, China: trends, distribution and climate linkage. *International Journal of Climatology*, 2014a. DOI: 10.1002/joc.4020
- [25] Wang Puyu, Li Zhongqin, Li Huilin, et al. Glacier No. 4 of Sigong River over Mt. Bogda of eastern Tianshan, central Asia: thinning and retreat during the period 1962—2009. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(1): 265—273
- [26] Wang Yanfang, Michael L. Roderick, Yanjun Shen, et al. Attribution of satellite observed vegetation trends in a hyper-arid region of the Heihe River Basin, Central Asia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014b. DOI: 10.5194/hessd-11-4529-2014
- [27] Wang Yanfang, Shen Yanjun, Chen Yaning, Guo Ying. Vegetation dynamics and their response to hydroclimatic factors in the Tarim River Basin, China. *Ecohydrology*, 2013c, 6(6): 927—936
- [28] Yang Peng, Chen Yaning. An analysis of terrestrial water storage variations from GRACE and GLDAS: The Tianshan Mountains and its adjacent areas, central Asia. *Quaternary International*, 2014, doi: 10.1016/j.quaint.2014.09.077
- [29] Zhou Yang, Huang Anning, Zhao Yong, et al. Influence of the Sea Surface Temperature Anomaly over the Indian Ocean in March on the Summer Rainfall in Xinjiang. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, DOI: 10.1007/s00704-014-1149-4

Impacts of Climate Change on the Water Cycle Mechanism and Water Resources Security in the Arid Region of Northwest China

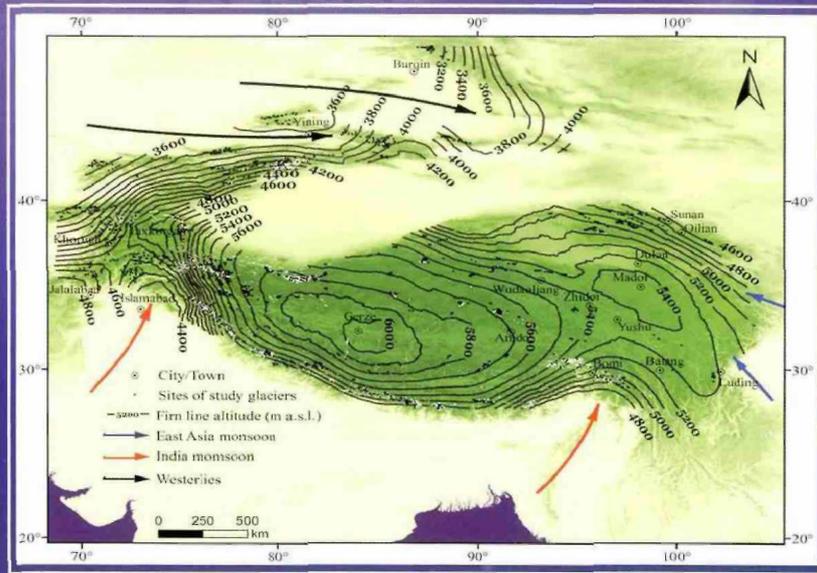
Chen Yaning

State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology,
Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese
Academy of Sciences, Urumqi 830011

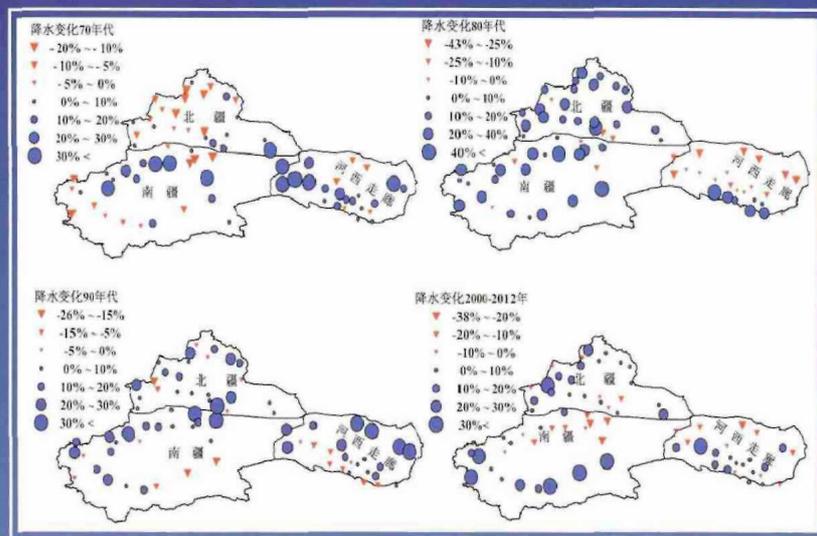
The arid region of Northwest China is a special nat-

ural unit, which responds sensitively to the global climate change. The project of “Impacts of climate change on the water cycle mechanism and water resources security in the arid region of Northwest China” focused on the key issues of climate-hydrological processes, mechanism of water formation and transformation, and its responses to climate change; reconstruction of the climate change series during the past 300 years, hydrological and water resources model, and estimation of future trends in water resources. The main findings are as follows: (1) the cold-dry and warm-wet climate types appeared alternately during the past 300 years, which has about 40 years cycle. (2) The air temperature and precipitation in the arid region of northwest China had a significant step increasing trend in the past 50 years, however, the sharp increasing trend has retard since 1997. (3) Pan evaporation in the region exhibited an obvious decreasing trend until early 1990s, and then reversed to upward, the water cycle is intensifying. (4) The frequency of climate and hydrological extreme events increased; also the uncertainty of water resources has increased. (5) The glacier change has exerted great impact on water resources, and many rivers have passed the “Glacier inflexion”; also the water storage decreased in the Tianshan Mountains. (6) Water system security has reduced the contradictions of water supply and demand will be intensified. (7) the negative effects on ecology have been highlighted. In the future, the water crisis in the eastern in this region will be exacerbated.

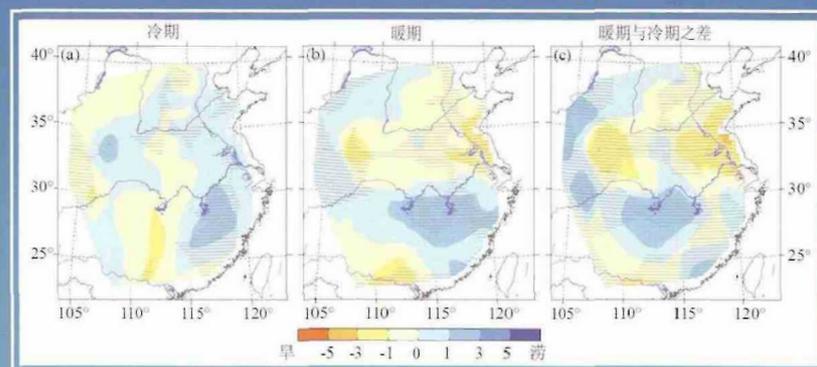
Keywords: climate change; water cycle; glacial recession; runoff and base flow separation; extreme events



2010 年高亚洲冰川雪线高度分布 (详见本期 “北半球冰冻圈变化及其对气候环境的影响” 一文)



西北干旱区 1960-2010 年不同年代降水量变化趋势 (详见本期 “气候变化对西北干旱区水循环影响机理与水资源安全研究” 一文)



过去 2000 年冷、暖期间的中国东部旱涝分布格局及其差异 (详见本期 “过去 2000 年全球典型暖期的形成机制及其影响研究” 一文)