

# 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展

陈亚宁, 李 稚, 范煜婷, 王怀军, 方功焕

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

**摘要:** 西北干旱区是对全球变化响应最敏感地区之一, 研究分析全球变暖背景下的西北干旱区水资源问题, 对应对和适应未来气候变化带来的影响具有重要意义。本文通过对西北干旱区气候变暖影响下的水资源形成、转化与水循环等关键问题最新研究成果的总结分析, 得出如下结论: (1) 西北干旱区温度、降水在过去的50年出现过“突变型”升高, 但进入21世纪, 温度和降水均处于高位震荡, 升高趋势减弱; (2) 西北干旱区冬季温度的大幅升高是拉动年均温度抬升的重要原因, 而西伯利亚高压活动和二氧化碳排放是引起冬季升温的重要影响因素; (3) 西北干旱区蒸发潜力在1993年出现了一个明显的转折变化, 由显著下降逆转为显著上升的趋势。气候变暖、蒸发水平增大对西北干旱区生态效应的负作用已经凸显; (4) 西北干旱区冰川变化对水资源量及年内分配产生了重要影响, 部分河流已经出现冰川消融拐点。在塔里木河流域, 冰川融水份额较大(50%), 可能在未来一段时期, 河川径流还将处在高位状态波动。全球气候变暖在加大极端气候水文事件发生频率和强度的同时, 加剧了西北干旱区内陆河流域的水文波动和水资源的不确定性。

**关键词:** 气候变化; 水资源; 西北干旱区

DOI: 10.11821/dlxb201409005

IPCC第五次气候变化评估报告指出: 过去半个多世纪以来, 全球几乎所有地区都经历了升温过程<sup>[1]</sup>, 变暖最快的区域为北半球中纬度地区<sup>[2]</sup>。报告指出全球气候变化是由自然影响因素和人为影响因素共同作用形成的, 人类活动极有可能是20世纪中期以来全球气候变暖的主要原因, 可能性在95%以上<sup>[1]</sup>。全球气温的持续上升加速了全球水循环, 加剧了极端水文事件发生, 导致全球不同尺度水资源的重新分配。全球气候变化对水系统影响一直是IPCC和其他一些国际组织(如AIACC项目组)及科研机构的重要研究内容。

中国西北干旱区地处中纬度地带的欧亚大陆腹地, 是对全球气候变化响应最敏感的地区之一<sup>[3]</sup>。多种模型模拟结果显示, 如果CO<sub>2</sub>的排放量以1%·年<sup>-1</sup>的速度递增, 中亚干旱区平均温度的上升将超过全球平均上升水平的40%<sup>[4]</sup>。在全球变暖的大背景下, 西北干旱区以冰雪融水为基础的水资源系统非常脆弱。气候变化引起的水资源量及其时空分布的改变, 将会使干旱区水资源与生产力分布空间不匹配的特性进一步突出, 加之人口压力的增加和不合理的水土资源开发活动的不断扩大, 西北干旱区绿洲经济与荒漠生态两大系统的水资源供需矛盾也将更加尖锐<sup>[5]</sup>, 气候变化对西北干旱区水系统脆弱性以及水资源安全影响的研究成为社会各界关注的热点。

## 1 西北干旱区气候变化特征

全球气候变暖、模拟及其影响等方面的研究成为目前众多学者关注的热点<sup>[6-9]</sup>。中国西

收稿日期: 2014-06-11; 修订日期: 2014-07-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2010CB951003) [Foundation: National Basic Research Program of China (973 Program): No.2010CB951003]

作者简介: 陈亚宁(1958-), 男, 研究员, 主要从事干旱区水资源与地表过程研究。E-mail: chenyn@ms.xjb.ac.cn

1295-1304 页

北干旱区作为亚洲中部山系最发育地区之一,分布有天山、昆仑山、喀喇昆仑山、阿尔金山、祁连山等一系列高大山系,以山、盆相间地貌格局为特点,对全球气候变化响应十分敏感。全球变暖加剧了水循环过程,使得这一特殊地区的气候变化更为复杂多变。我国西北干旱区的河流均发源于山区,主要由山区的冰川(雪)融水和降水组成,气温和降水变化都对地表水资源产生重要影响。

### 1.1 西北干旱区温度、降水的“突变型”升高

**1.1.1 升温幅度高于全球平均水平** 过去半个多世纪,西北干旱区气温上升速率高达 $0.34\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,明显高于全球平均水平( $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ )<sup>[1]</sup>。分析研究表明,气温显著上升发生在20世纪80年代后期,1960-1986年期间,平均气温增加幅度较小;1987年,西北干旱区年平均温度出现了“突变型”升高,并以每10年升高 $0.517\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的速度呈现出加速升高趋势。自1997年以来,温度一直处于高位震荡状态,升温趋势已不十分明显。

对西北干旱区78个站点的统计资料分析显示,在20世纪80年代后期,约有85%的台站温度显示升高趋势,而进入21世纪,温度升高的台站超过90%<sup>[10]</sup>,但是上升幅度较20世纪90年代减弱。与此同时,西北干旱区气温极值向暖趋势发展明显,异常偏暖的极端事件显著增加,而异常偏冷的极端事件显著减少<sup>[11]</sup>。

**1.1.2 降水量增幅呈动态变化** 在过去半个多世纪,西北干旱区的降水量也出现了类似变化。1960-1986年间,降水量变化处于相对稳定阶段,在1987年降水量出现了“突变型”增加,年降水量增加率达 $9.7\text{ mm}/10\text{a}$ <sup>[12]</sup>。

从台站统计看,整个西北干旱区由20世纪70年代的约80%的台站降水量减少,转变为80年代后期的75%和90年代的88%的台站降水量增加。20世纪90年代是西北干旱区过去半个多世纪里最为湿润的10年。值得一提的是,在最近10年,西北干旱区降水量的增加幅度降低,并且约有45%台站的降水量较20世纪90年代表现为减少趋势。

针对西北干旱区过去30年温度升高、降水增加这一变化特点,有学者提出新疆以天山西部为代表的地区呈现出气候向暖湿转变的信号<sup>[13-14]</sup>,也有学者提出可能是气候波动变化。树轮的研究结果显示,新疆天山山区与北疆的气温在过去200~300年间经历了8个偏暖阶段和7~8个偏冷阶段,以及7个偏干和7个偏湿阶段<sup>[15-16]</sup>。20世纪80年代以来是西北干旱区相对最为温暖的阶段<sup>[17]</sup>。

西北干旱区气候变化具有一定的复杂性,仅从短期内、个别角度很难准确揭示其变化过程及趋势,并且难以定论区域气候转型还是波动变化。国内外对于气候变化的研究主要针对气候变化特征的分析,从不同时间尺度、不同区域尺度上解析气候变化过程,然而,这些研究还多半是定性的描述,缺少定量化的研究,尚未系统揭示历史百年尺度气候变化规律及气候变化对水循环和水资源系统影响机理,对气候系统不同时空尺度演变及其相互作用规律的认识还有待提高。

### 1.2 冬季温度的升高有效拉升了年均温度

冬季温度升高的问题是近些年大家关注的热点。Hansen等早在1999年就提出,北半球中高纬度地区的冬季增暖明显<sup>[18]</sup>。我国学者也发现了中国冬季气温升高幅度要比年均大的多这一现象<sup>[19-20]</sup>。任国玉等研究指出<sup>[21]</sup>,中国大陆地区最明显的增温发生在北方和青藏高原地区,最显著的季节在冬季和春季。我们在对西北干旱区过去50年气温变化的研究过程中发现了同样的现象,对不同季节气温变化的研究分析表明,冬季气温变化对年平均气温升高的贡献率达57.01%<sup>[12]</sup>,西北干旱区冬季温度的大幅度升高可能是拉动年平均温度抬升的重要原因。

详尽分析冬季气温变化还可发现,西北干旱区冬季极端最低气温的升高非常剧烈。在过去的50年,西北干旱区冬季的极端最低气温升高了约 $3.11\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,由20世纪80年代以前的 $-15.08\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,升高到90年代 $-13.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和21世纪初(2000-2010年)的 $-12.97\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[10]</sup>。冬季极端

最低气温的大幅度升高拉动了冬季平均气温的升高。为了探究冬季气温升高速率快的原因, Li等选取了西伯利亚高压(SH)、北极涛动(AO), 北大西洋涛动(NAO), 北太平洋涛动(PNA), 南极涛动(AAO), 南方涛动(SO)和西风指数(WCI)共七种大尺度影响因子, 利用弹性理论, 对比分析了不同环流对西北干旱区气候系统的影响<sup>[9]</sup>。研究表明, 西伯利亚高压活动和二氧化碳排放是西北干旱区冬季气温变化的主要影响因素, 西北干旱区冬季气温与西伯利亚高压指数的相关性较高( $R = -0.715$ ,  $P < 0.001$ ), 明显高于与二氧化碳的相关性( $R = 0.51$ ,  $P < 0.001$ )。在20世纪80年代中期至90年代, 西伯利亚高压出现明显减弱趋势, 此阶段正是冬季气温上升最为明显的时期; 同时, 在近5年(2005-2010)西伯利亚高压略有回升, 而冬季气温也随之略有降低, 两者变化具有较好地同步性。值得指出的是, 在过去的50年, 为什么温度和降水都在1987年出现了一个跃动性增量变化<sup>[22]</sup>, 关于这个问题有诸多探索性研究, 但众说纷纭, 至今莫衷一是。

大气环流是影响气候变化的一个主要因素, 利用遥相关指数研究气候变化是一个很好的方法<sup>[23-24]</sup>。在对北疆地区近50年来气候与水资源变化趋势研究发现, 冬季NAO指数与年均温度和冬季温度具有显著的正相关; AO年指数与年均温度正相关, 夏季AO指数与春、夏季温度正相关; 冬季AO指数与冬季温度正相关。NAO和AO指数对研究区域降水具有一定的影响, 但相对于温度而言, 影响北疆西部地区降水的主要因素是春季NAO指数<sup>[25]</sup>。而对天山南、北坡、昆仑山北坡以及祁连山北坡四个典型区域过去50年夏季0℃层高度与径流量的变化分析中发现, 不同区域的0℃层高度变化是不一致的, 且河川径流量变化与0℃层高度关系密切<sup>[26]</sup>。

受气候变化的影响, 特别是冬季气温升高的影响, 山区冰川消融和退缩加速, 改变着各不同水源在水资源构成中的份额。西北干旱区一些冰川和积雪融水补给大的河流, 出现了冰川和积雪消融期提前、汛期消融量增加现象。但从长远来看, 随着气温的进一步升高, 这些受冰雪融水补给为主的河流, 会由于冰川退缩和冰川储水量的减少, 出现冰川消融拐点, 届时, 夏季的水量将会减少, 地表可用水资源量出现锐减, 或因降水异常的影响而变率增大。同时, 冬季气温升高导致山区的冰川、积雪消长过程不确定性增加, 降水的时空过程改变, 难以把握和准确预估未来水资源变化趋势。

### 1.3 蒸发潜力由下降逆转为显著上升趋势

蒸发皿蒸发量作为大气蒸发潜力的一个重要指标, 其变化对于检测气候和水循环变化有重要指示意义。西北干旱区的蒸发潜力是全国最高的地区, 而蒸散发又是影响干旱区水循环的重要因素之一。不少学者对此开展了研究, 多数研究都发现蒸发潜力在全球, 尤其是北半球存在明显减少趋势<sup>[27-34]</sup>, 这一事实与全球变暖可能导致蒸发潜力增加的猜测相矛盾。围绕气候变化引起的实际蒸散发变化及水循环响应的研究, 以Penman蒸发正比假设<sup>[35]</sup>和Bouchet蒸发互补假设<sup>[36]</sup>的两大争论为主。然而, 最近的一项研究结果表明, 西北干旱区蒸发潜力在过去50年出现了一个明显的转折变化, 以1993年为转折点, 在1958-1993年时段内, 西北干旱区的蒸发皿蒸发量以-6.0 mm/a的速率呈现为下降趋势, 而在1993-2010年时段内, 蒸发皿蒸发量以10.7 mm/a的速率逆转为明显上升的趋势<sup>[37]</sup>。即: 中国西北干旱区蒸发水平以1993年为转折点, 由下降趋势逆转为显著上升的趋势, 这与全国范围的最新的一项研究结论一致<sup>[38]</sup>。

Li等根据PenPan模型的两个组成部分, 依据偏导数原理, 从模型物理机制出发探究了其原因为, 发现空气动力学项是引起该变化的主导因素。在1958-1993年时段内, 蒸发皿蒸发量以-5.6 mm/年的速率下降, 而在1993-2010年时段内, 蒸发皿蒸发量以8.6 mm/年的速率上升。辐射项的贡献作用较小<sup>[37]</sup>。对蒸发皿蒸发量影响很大的空气动力学项再拆分为风速、水汽压差和大气温度三个组成部分, 得出结论: 地表风速变化是引起1958-1993年蒸发皿蒸发量显著下降的主要驱动因素; 而在1994-2010年阶段, 地表风速和水汽压差对

蒸发皿蒸发的上升趋势共同起了重要的作用。这一研究发现对前人广泛报道的蒸发皿蒸发量下降趋势带来新的见解,并向长期以来蒸发悖论的观点发出了不同信号。

温度升高、蒸发潜力的增大可能会对干旱区生态效应带来负面影响。近期的多项研究成果表明,在2000年以前,西北干旱区植被覆盖率和NDVI值呈显著增加趋势,而在2000年以后都表现为减小的趋势<sup>[39-41]</sup>。植被覆盖率和NDVI值的降低和减少应该与西北干旱区过去30年温度、降水及蒸发变化存在一定联系。2000年以来,西北干旱区的降水量增幅下降,甚至有将近1/2台站的降水量表现为减少态势,而温度、蒸发潜力则以持续升高为主,由此造成大量土壤水分丧失,导致一些依靠地下水和土壤水维系生存的、抗旱性弱的浅根系荒漠植物开始死亡,物种多样性减少,植被覆盖率降低。

干旱荒漠区土壤蒸发速率和强度随水热等气象条件而变化,虽然实际蒸散发很难直接测定,加之缺乏长期观测资料,蒸散发对干旱区土壤水分消耗的影响程度和定量关系还没有一个确定性的结论,但可以认为,气候变暖对西北干旱区生态效应的负作用已经凸显出来,至于影响程度还需要进一步研究。在气候变暖的影响和作用下,蒸散发水平、降雨模式、地表径流等都将发生变化,土壤水、地下水以及地表水资源也随之发生变化,但是目前尚缺乏对此的系统分析和研究。

## 2 西北干旱区水资源与水系统脆弱性

西北干旱区的水资源形成、时空分布、水源补给转化等方面的特点十分鲜明,水循环过程独特,在世界干旱区都具有很强的代表性。西北干旱区的河流均发源于山区,主要有高山区的冰(川)雪融水、中山森林带的降水和低山带的基岩裂隙水等,多元构成,组分复杂,它们在山区汇流,共同构成了干旱区地表水资源。长期以来,西北干旱区水资源依靠自然界独特的水分循环过程保持着脆弱的平衡关系。在全球变暖影响下,水系统脆弱性加大,水资源不确定性增加。

### 2.1 西北干旱区水汽弱汇作用下的水文、水资源变化

西北干旱区水汽弱汇作用下气候水文要素变化对流域水资源形成及时空变化产生着重要影响。西北干旱区水系统脆弱,全球气候变暖在加大极端气候水文事件发生频率和强度的同时,加剧了西北干旱区内陆河流域的水文波动和水资源的不确定性。

最新研究结果显示,西北干旱区的水文、水资源有以下三方面变化:1) 径流出现“突变型”增加。对西北干旱区河川径流量的长时期序列检测发现,一些冰川融水补给较大的河流在1994年前后普遍出现了一次径流“突变型”增加的过程。如位于南疆的开都河流域,1994-2010年期间径流量比1960-1993年期间增加了26.5%,但突变增加的时间迟于温度、降水“突变型”升高的1987年<sup>[42]</sup>;2) 径流量在汛期增加。对西北干旱区径流的年内变化分析发现,一些冰川和积雪融水补给大的河流,出现了冰川和积雪消融期提前、汛期径流量增加现象,这些现象也多在20世纪90年代初以后表现最为突出:例如,塔里木河流域在1991-2006年冰川融水对河流径流的补给比例由1961-1990年的41.5%增加到46.5%<sup>[43]</sup>;3) 径流的丰、枯变化加剧。气候变化加剧了内陆河流域的水文波动和水资源的不确定性。对过去50年塔里木河流域水文资料的统计分析显示,2009年和2010年塔里木河上游三源流(阿克苏河、叶尔羌河、和田河)汇入干流(阿拉尔水文站)的水量分别为14.02和 $72 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,是塔里木河流域有水文记录以来径流量最少和最多年份,二者比值相差5倍多。

在西北干旱区,水循环各环节受陆表格局和气候影响显著,水资源构成复杂,径流和水资源的弹性非常大,气候变化导致的降水和温度较小的变化均会引起径流较大幅度的改变,给干旱区生态水文过程带来重大影响。气候变化对山区水循环要素的改变加剧了水系

统的不稳定性,在全球气候变暖背景下,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,人类活动在强烈改变着流域的自然水循环过程。

## 2.2 冰川水资源与冰川消融拐点

西北干旱区的河川径流对冰川(积雪)的依赖性较强,随着气候变暖和极端气候水文事件的加剧,冰川水资源变化将更为复杂。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。而那些冰川面积小、数量少的流域,会随着温度升高、冰川退缩和冰川水资源量的减少,出现冰川消融拐点,冰川融水量锐减,冰川调剂功能下降,河川径流或因降水异常的影响而变率增大。

研究结果显示,在过去50年,中国西部82.2%的冰川处于退缩状态,冰川面积减少了4.5%<sup>[44]</sup>。尤其自20世纪90年代以来,西北干旱区冰川退缩趋势加剧,冰川的退缩数量和幅度都是20世纪以来最多和最大的时期,处在加速退缩和强烈消融过程中<sup>[45]</sup>。在全球变暖背景下,天山北坡和天山东段的那些面积和规模较小的冰川反应十分敏感。新疆在未来20~30年,小于2 km<sup>2</sup>的冰川产流量会急剧减少,50年后,这些占天山冰川总条数80%以上的小冰川,大多会消融殆尽<sup>[45]</sup>。

值得指出的是,对那些冰川面积小、数量少的流域而言,由于冰川融水所占份额有限,由冰川水资源变化对径流造成的影响是有限的,在温度升高过程中的径流增加也不甚明显,但随着冰川萎缩或冰川消失所出现的冰川消融拐点的影响将不容忽视。如东疆盆地西段和东段冰川面积缩小比例分别为25%和11%<sup>[45]</sup>,部分流域的冰川处于强烈消融或消融殆尽,已经出现冰川消融拐点,冰川变化对水资源的影响已经凸现出来。再如,位于祁连山中段的黑河流域,过去50年冰川面积缩小比例达29.6%<sup>[46]</sup>,冰川由20世纪60年代的967条减少到2010年左右的800条<sup>[47]</sup>,位于祁连山东段的石羊河流域冰川面积缩小比例达到30%<sup>[48]</sup>,冰川处于强烈消融和退缩状态。尤其河西走廊东段的石羊河流域,由于冰川水资源量的锐减,河流水文过程将会变得更为复杂。

在西北干旱区一些冰川融水补给份额较大的河流,冰川融水量的增加会使得河川年径流量在较长一段时期仍处在高位波动,这些河流受冰川融水的调剂作用较大。如塔里木河流域的阿克苏河、叶尔羌河、和田河以及河西走廊的疏勒河等。近些年伴随气候变暖,径流增加也十分明显。如位于南疆的阿克苏河主要支流库玛拉克河,冰川融水组分占径流总量的比例高达47%,在过去的30年,山区来水量增加了约31.2%<sup>[49]</sup>。

## 2.3 西北干旱区水资源的构成与冰川径流分割

西北干旱区的水资源形成和水源补给转化等方面特点鲜明,尤其在径流组分和水资源构成方面,在世界干旱区都具有很强的代表性。西北干旱区的河流几乎全部发源于山区,主要有高山区的冰(川)雪融水、中山森林带的降水和低山带的基岩裂隙水等,多元构成,组分复杂,它们在山区汇流,共同构成了干旱区地表水资源。气候变暖,加剧了水资源的不确定性,加速了山区冰川消融和退缩,改变着各不同水源在水资源构成中的份额。为此,定量分割干旱区内陆河的径流组分,精细刻画山区冰川、积雪融水、大气降水等在水资源构成中所占比例,对预估不同变化情景下水资源未来变化趋势有着重要参考。

对西北干旱区塔里木河流域的最新研究结果表明,山区的冰川、积雪融水和降水是塔里木河流域四大源流(阿克苏河、和田河、叶尔羌河、开都河)河川径流的主要补给来源,低山带的基岩裂隙水作为基流主要是由前者补给形成。从径流构成的年内分布看,冰雪融水的贡献比例以4-7月所占比例较大,都超过了55%,尤以6月份最高,达65%以上<sup>[50]</sup>。4-5月份比例较高的原因是由于伴随山区温度的回升,大量浅山带的季节性积雪融化补给所致。而年平均温度最高的7月份,冰(川)雪融水的比例却不及6月份,次高月8月份更是降至37%左右,究其原因,一是,这期间山区的季节性积雪已经消融殆尽,融雪水的补给量大幅减少。再是,西北干旱区通常7-8月山区的降水量较大,大量雨水参与了

径流的形成,从而降低了冰川、积雪融水在水资源构成中的比例;从不同海拔的径流构成分析,冰川融水比例随海拔降低而表现出减少趋势。在流域上游山区,冰雪融水接近70%,中游约45%,在下游河流的较低海拔处,冰雪融水仅占38%左右<sup>[50]</sup>。

对塔里木河流域不同河流的水资源构成分析发现,不同河流由于其形成环境的差异,冰雪融水在水资源构成中的份额也存在着差异。发源于天山南坡的阿克苏河,冰雪融水的比例约为59.3%,而发源于喀喇昆仑山的叶尔羌河约为54.0%,也有研究表明发源于昆仑山北坡的和田河约为59.5%;同时,分析不同河流的基流变化发现,除开都河的多年稳定基流指数较大外(32.1%),其余三源流均较小,如阿克苏河14.4%,和田河9.3%,叶尔羌河20.5%<sup>[51]</sup>。并且,表现为降水相对较多年份的基流量比例普遍大于降水相对较少的旱年,这一研究结果对Wittenberg等提出的退水法理论是一个修正<sup>[52]</sup>。在西北干旱区的内陆河流域,冰川、积雪融水在径流构成中占有重要份额,因此,这在一定程度上使得基流在不同时期构成和组分复杂化。

### 3 基于山盆结构的西北干旱区水文模型改进

西北干旱区水循环过程独特,产汇流过程复杂,地表水与地下水频繁转换,构建适合于该区的基于特殊山盆结构的分布式水文水资源模型,探讨水资源时空分布及对经济社会系统和生态系统可能造成的重大影响,成为西北干旱区水文循环研究的关键。

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等提出了模拟冰川面积变化的动态HRU (Hydrological Response Unit) 的概念<sup>[53]</sup>,模拟冰川面积渐变过程及冰川物质积累、融化、蒸发过程,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,从而实现了西北干旱区内陆河流域雨、雪、冰“三元”产流过程的分布式模拟。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<sup>[54]</sup>。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。

克服了冰川产流和基流模拟的问题,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,采用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<sup>[55-57]</sup>,通过参数率定方法,在天山南坡开都河流域模拟了出山口径流的变化。研究表明,与地下水过程相关的水文参数(Alpha\_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。尽管流域气象站点稀少,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,总体偏差在5%以内。

### 4 总结

(1) 西北干旱区温度、降水在过去的50年出现过“突变型”升高,其中,降水变化出现在1987年,自此以后一直处在高位波动状态。但进入21世纪,降水的增加幅度减弱,甚至有近1/2台站的降水表现为减少态势;温度在1997年出现“突变型”升高,自此以后处于高位震荡,升高趋势减缓;西北干旱区冬季温度的大幅升高是拉动年均温度抬升的重

要原因,而冬季极端最低气温的大幅度升高对冬季平均气温的升高起到了重要作用。

(2) 西北干旱区蒸发潜力在1993年出现了一个明显的转折变化,由显著下降逆转为显著上升的趋势。进入21世纪,气候变暖、蒸发水平增大对西北干旱区生态效应的负作用已经凸显;

(3) 西北干旱区冰川变化对水资源量的年际、年内分配产生了重要影响,部分河流已经出现冰川消融拐点。塔里木河流域的阿克苏河、叶尔羌河、和田河等河流的冰川融水补给份额较大(50%左右),可能在未来一段时期,地表水资源量仍将处在高位状态波动。

水资源是制约西北干旱区社会经济发展、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。气候变暖引起的水资源变化,将会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。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,部分河流已经出现冰川消融拐点。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。因此,未雨绸缪,积极应对和适应未来气候变化带来的可能影响,尤其是对水资源的影响,科学规划,确保西北干旱区生态安全和绿洲经济的可持续发展。

## 参考文献 (References)

- [1] IPCC. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Summary for Policymakers.
- [2] Ji F, Wu Z H, Huang J P et al. Evolution of land surface air temperature trend. *Nature Climate Change*, 2014. doi: 10.1038/NCLIMATE2223.
- [3] Chen Yaning, Yang Qing, Luo Yi et al. Ponder on the issue of water resources in the arid region of Northwest China. *Arid Land Geography*, 2012, 35(1): 1-9. [陈亚宁, 杨青, 罗毅等. 西北干旱区水资源问题研究思考. *干旱区地理*, 2012, 35(1): 1-9.]
- [4] Aðalgeirsdóttir G, Guðmundsson G H, Jörnsson H B. Volume sensitivity of Vatnajökull Ice Cap, Iceland, to perturbations in equilibrium line altitude. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: F04001.
- [5] Richard S. Chinese probe unmasks high-tech adulteration with melamine. *Science*, 2008, 320(4): 34.
- [6] Crowley T J. Causes of climate change over the past 1000 years. *Science*, 2000, 289(5477): 270-277.
- [7] Barnett T P, Adam J C, Lettenmaier D P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 2005, 438(7066): 303-309.
- [8] Sanchez E, Dominguez M, Romera R et al. Regional modeling of dry spells over the Iberian Peninsula for present climate and climate change conditions. *Climatic Change*, 2011, 107(3/4): 625-634.
- [9] Li B F, Chen Y N, Shi X. Why does the temperature rise faster in the arid region of northwest China? *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117: D16115.
- [10] Li B F, Chen Y N, Li W H et al. Spatial and temporal characteristics of temperature and precipitation in the arid region of China from 1960-2010. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2013, 22(2): 362-371.
- [11] Wang H J, Chen Y N, Shi X et al. Changes in daily climate extremes in the arid area of northwestern China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2013, 112(1/2): 15-28.
- [12] Chen Y N, Deng H J, Li B F et al. Abrupt change of temperature and precipitation extremes in the arid region of Northwest China. *Quaternary International*, 2014, 336: 35-43.
- [13] Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 219-226. [施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 219-226.]
- [14] Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(2): 152-164. [施雅风, 沈永平, 李栋梁等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164.]
- [15] 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*, 2012, 56(4): 765-774.
- [16] Yang Y H, Chen Y N, Li W H et al. Climatic change of inland river basin in arid area: A case study in northern Xinjiang, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2012, 107(1/2): 143-154.

- [17] Li B F, Chen Y N, Shi X et al. Temperature and precipitation changes in different environment in the arid region of northwest China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2013, 112(3/4): 589-596.
- [18] Hansen J, Rudy R, Glaseoe J et al. GISS analysis of surface temperature change. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D24): 30997-31022.
- [19] Wang Shaowu. *Advances in Climate Research*. Beijing: China Meteorological Press, 2001. [王绍武. 现代气候学研究进展. 北京: 气象出版社, 2001.]
- [20] Li Qingxiang, Dong Wenjie, Li Wei et al. Assessment of the uncertainties in temperature change in China during the last century. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(16): 1544-1554. [李庆祥, 董文杰, 李伟 等. 近百年中国气温变化中的不确定性估计. *科学通报*, 2010, 55(16): 1544-1554.]
- [21] Ren Guoyu, Chu Ziyang, Zhou Yaqing et al. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China. *Climatic and Environmental Research*, 2005, 10(4): 701-716. [任国玉, 初子莹, 周雅清 等. 中国气温变化研究最新进展. *气候与环境研究*, 2005, 10(4): 701-716.]
- [22] Chen Yaning, Xu Zongxue. The possible impact of global climate change on water resources in the Tarim River Basin. *Science in China: Series D*, 2004, 34(11): 1047-1053. [陈亚宁, 徐宗学. 全球气候变化对新疆塔里木河流域水资源的可能性影响. *中国科学: D辑*, 2004, 34(11): 1047-1053.]
- [23] Mishra A K, Singh V P. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 2010, 391: 204-216.
- [24] Sheffield J, Andreadis K M, Wood E F et al. Global and continental drought in the second half of the twentieth century: Severity-area-duration analysis and temporal variability of large-scale events. *Journal of Climate*, 2009, 22(8): 1962-1981.
- [25] Yang Y H, Chen Y N, Li W H et al. Impacts of climatic change on river runoff in northern Xinjiang of China over last fifty years. *Chinese Geography Sciences*, 2010, 20(3): 193-201.
- [26] Chen Z S, Chen Y N, Li W H. Response of runoff to change of atmospheric 0A degrees C level height in summer in arid region of Northwest China. *Science China-Earth Sciences*, 2012, 55(9): 1533-1544.
- [27] Peterson T, Golubev V, Groisman P. Evaporation losing its strength. *Nature*, 1995, 393(6551): 687-688.
- [28] Brutsaert W, Parlange M B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. *Nature*, 1998, 396(6706): 29-30.
- [29] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, 2002, 298(5597): 1410-1411.
- [30] Gong L B, Xu C Y, Chen D L et al. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) Basin. *Journal of Hydrology*, 2006, 329: 620-629.
- [31] Burn D H, Hesch N M. Trends in evaporation for the Canadian Prairies. *Journal of Hydrology*, 2007, 336(1/2): 61-73.
- [32] Roderick M L, Rotstayn L D, Farquhar G D et al. On the attribution of changing pan evaporation. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L17403.
- [33] Szilagyi J. On Bouchet's complementary hypothesis. *Journal of Hydrology*, 2001, 246: 155-158.
- [34] Szilagyi J. On the inherent asymmetric nature of the complementary relationship of evaporation. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L02405.
- [35] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare and grass. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1948, 193(1032): 120-145.
- [36] Bouchet R J. Evapotranspiration reele et potentielle, signification climatique. *General Assembly of Berkeley*, Red Book, 1963, 62: 134-142, IAHS, Gentbrugge, Belgium.
- [37] Li Z, Chen Y N, Shen Y J et al. Analysis of changing pan evaporation in the arid region of Northwest China. *Water Resources Research*, 2013, 49(4): 2205-2212.
- [38] Liu X M, Luo Y Z, Zhang D et al. Recent changes in pan-evaporation dynamics in China. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: L13404.
- [39] Zhao X, Tan K, Zhao S et al. Changing climate affects vegetation growth in the arid region of the northwestern China. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(10): 946-952.
- [40] Wang Y F, Shen Y J, Chen Y N, et al. Vegetation dynamics and their response to hydroclimatic factors in the Tarim River Basin, China. *Ecology*, 2013, 94(6): 927-936.
- [41] Li Qihu, Chen Yaning. Response of spatial and temporal distribution of NDVI to hydrothermal condition variation in arid regions of Northwest China during 1981-2006. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(2): 327-334. [李奇虎, 陈亚宁. 1981-2006年西北干旱区NDVI时空分布变化对水热条件的响应. *冰川冻土*, 2014, 36(2): 327-334.]
- [42] Chen Yaning, Du Qiang, Chen Yuebin et al. Sustainable Water Resources Utilization in Bosten Lake Basin. Beijing: Science Press, 2013: 45-74. [陈亚宁, 杜强, 陈跃滨 等. 博斯腾湖流域水资源可持续利用研究. 北京: 科学出版社, 2013: 45-74.]
- [43] Gao Xin, Ye Bosheng, Zhang Shiqiang et al. Glacier runoff variation and its influence on river runoff during 1961-

- 2006 in the Tarim River Basin, China. *Science in China: Earth Sciences*, 2010, 40(5): 654-665. [高鑫, 叶柏生, 张世强. 1961-2006年塔里木河流域冰川融水变化及其对径流的影响. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(5): 654-665.]
- [44] Liu Shiyin, Ding Yongjian, Li Jing et al. Glaciers in response to recent climate warming in western China. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(5): 762-771. [刘时银, 丁永建, 李晶 等. 中国西部冰川对近期气候变暖的响应. *第四纪研究*, 2006, 26(5): 762-771.]
- [45] Li Zhongqin, Li Kaiming, Wang Lin. Study on recent glacier changes and their impact on water resources in Xinjiang, northwestern China. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(1): 96-106. [李忠勤, 李开明, 王林. 新疆冰川近期变化及其对水资源的影响研究. *第四纪研究*, 2010, 30(1): 96-106.]
- [46] Chen Hui, Li Zhongqin, Wang Puyu et al. Change of glaciers in the central Qilian Mountain. *Arid Zone Research*, 2013, 30(4): 588-593. [陈辉, 李忠勤, 王璞玉 等. 近年来祁连山中段冰川变化. *干旱区研究*, 2013, 30(4): 588-593.]
- [47] Huai Baojuan, Li Zhongqin, Sun Meiping et al. RS analysis of glaciers change in the Heihe River Basin in the last 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(3): 365-377. [怀保娟, 李忠勤, 孙美平, 等. 近50年黑河流域的冰川变化遥感分析. *地理学报*, 2014, 69(3): 365-377.]
- [48] Wang Youkui, Jia Wenxiong, Liu Chaohai et al. Ecological environment change in north slope of the Qilianshan Mountains. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(4): 21-26. [汪有奎, 贾文雄, 刘潮海 等. 祁连山北坡的生态环境变化. *林业科学*, 2012, 48(4): 21-26.]
- [49] Shen Yongping, Wang Gioya, Ding Yongjian. Changes in glacier mass balance in watershed of Sary Jaz-Kumarik rivers of Tianshan Mountains in 1957-2006 and their impact on water resources and trend to end of the 21st century. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(5): 792-800. [沈永平, 王国亚, 丁永建. 1957-2006年天山萨雷扎兹库玛拉克河流域冰川物质平衡变化及其对河流水资源的影响. *冰川冻土*, 2009, 31(5): 792-800.]
- [50] Fan Y T, Chen Y N, Li X G 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.
- [51] Fan Y T, Chen Y N, Liu Y B. Variation of baseflows in the headstreams of the Tarim River Basin during 1960-2007. *Journal of Hydrology*, 2013, 487: 98-108.
- [52] Wittenberg H, Sivapalan M. Watershed groundwater balance estimation using streamflow recession analysis and baseflow separation. *Journal of Hydrology*, 1999, 219(1): 20-33.
- [53] Luo Y, Arnold J, Allen P et al. Baseflow simulation using SWAT model in an inland river basin in Tianshan Mountains, Northwest China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(4): 1259-1267.
- [54] Luo Y, Arnold J, Liu S. 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.
- [55] Morris M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. *Technometrics*, 1991, 33(2): 161-174.
- [56] Ratto M, Pagano A, Young P. State dependent parameter metamodelling and sensitivity analysis. *Computer Physics Communications*, 2007, 177(11): 863-876.
- [57] Yang J, Liu Y, Yang W et al. Multi-objective sensitivity analysis of a fully distributed hydrologic model WetSpa. *Water Resources Management*, 2012, 26(1): 109-128.

## Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China

CHEN Yaning, LI Zhi, FAN Yuting, WANG Huaijun, FANG Gonghuan

(State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China)

**Abstract:** The arid region of Northwest China is a special natural unit, which responds sensitively to the global climate change. Studies on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China have a significant effect on the adaptability of future climate change. Based on the latest research results, this paper analyzes the impacts of climate change on the formation and transformation of water resources and water cycle in the arid region of Northwest China. The results can be shown as follows: (1) The air

temperature and precipitation in the arid region of Northwest China had a significant increasing trend in the past 50 years, however, the sharp increasing trend has retarded since the 21st century. (2) The temperature change in winter could be the most important factor for the unusually sharp rise in annual air temperature in this region. Moreover, the Siberian High and carbon dioxide emissions could be the most important reasons for the higher rate of the winter temperature rise. (3) Pan evaporation in the region exhibited an obvious decreasing trend until the early 1990s (1993), however, the downward trend reversed to go upward since 1993. The negative effects of warming and increasing evaporation on ecology have been highlighted in the arid region of Northwest China. (4) The glacier change has exerted great impact on water resources and its annual distribution in the arid region of Northwest China, and many rivers have passed the "Glacier inflexion". In the Tarim River Basin, the proportion of glacier melt water to runoff is high (e.g., as much as 50%) and it is supposed that the runoff may show a great fluctuation in the near future. Global warming not only increases the frequency and intensity of hydrological extremes, but also intensifies the fluctuation and uncertainty of inland rivers.

**Key words:** climate change, water resources, arid region of Northwest China