

doi:10.13866/j.azr.2016.01.01

我国西北干燥区降水变化规律^①

任国玉¹, 袁玉江², 柳艳菊¹, 任玉玉¹, 王涛^{1,3}, 任霄玉¹

(1. 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081; 2. 中国气象局沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002; 3. 中国地质大学环境学院大气科学系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 利用多种资料并参考已有研究, 综合分析、讨论了我国西北干燥区现代降水变化的特征和可能原因, 获得如下认识: ① 在最近半个多世纪, 实测记录揭示出西北地区降水量存在较明显的上升趋势, 其中西部上升更加显著。进入 21 世纪以来, 全区降水量比 20 世纪 90 年代有进一步上升, 其前 10 a 平均降水量比 1961 年以来任何年代都高, 2010 年秋季和年总降水量达到有记录以来的最高值。② 新疆北部和天山地区树轮气候重建表明, 20 世纪 80 年代初期的大气降水增加现象很可能是近 200 a 未曾发生, 但并非史无前例, 现代降水量的增加没有明显超过历史时期的最湿润阶段, 这样就不排除其仍为多年代到世纪尺度上气候自然振动节律表现的可能性。③ 根据再分析资料, 1979 年以来, 整层积分的净水汽通量出现较明显增加趋势, 但这种增加并非是由西、南和北边界的输入通量增加造成的, 主要是东边界输出通量显著减少的结果, 同时大气可降水量增加并不显著。因此, 实测降水量增加似乎与全球大气水汽含量增加及区域外水汽输入通量变化关系不大, 可能是对区域内气候变化与变异响应的表现形式。④ 已有研究显示, 相比华北地区, 在过去和未来大气温室气体浓度持续上升条件下, 全球和区域气候模式更为一致地模拟出了西北地区降水量显著增加的趋势, 暗示西北降水量增加可能是对全球气候变暖的响应, 但与近几十年水汽通量趋势变化分析和多数古气候重建结论不完全一致。⑤ 区域和局地灌溉面积扩大以及城市发展等“绿洲化”过程, 可能显著增加了陆面的实际蒸发量, 成为西北地区气象观测站附近降水量增多的重要驱动因子。气候变暖与气溶胶排放引起的山地冰川融化及其河湖水位上升, 可能加强了这种局地人为气候效应。⑥ 在全球、区域和局地不同尺度的人类活动综合影响下, 预计西北干燥区绿洲及其城市和附近局部区域未来 20~30 a 降水量总体上仍将增多, 但这种长期变化趋势很可能与年代到多年代尺度的自然降水变异节律相互叠加, 而在新疆北部和天山等地, 自然气候演变预示可能进入一个多年代降水偏枯时期, 致使未来特定区域和时段的合成降水量变化情景趋于复杂化。

关键词: 气候变化; 降水量; 树轮; 水汽通量; 人类活动; 自然变异; 未来趋势; 干燥区; 西北地区

我国西北地区是亚洲内陆温带干燥、半干燥区的重要组成部分。大气降水和陆地水资源演化趋势关系到西北地区社会可持续发展, 是地球科学界关注的重大科学问题^[1-2]。

世纪之交, 施雅风等^[3-7]提出我国西北地区气候转型问题, 认为以新疆为代表的西北地区气候正由暖干型向暖湿型转变, 表现为地面气温继续升高、大气降水开始明显增加、地表径流和湖泊水位普遍上升。他们进一步推测, 20 世纪 80 年代后期开启的这一暖湿化现象是世纪尺度趋势, 西北地区未来至少半个世纪可能将处于气候偏暖、偏湿时期。获得这一判断的主要依据有两个: 一是西北地区最近的气候变化可能是对全球气候变暖的响应, 即全球

变化导致大气中水汽含量增加, 水循环过程增强; 二是古气候证据支持在气候暖期内西北地区大气降水和湖泊水位偏高的认识^[4]。

施雅风等^[3-4]的重要论述正式发表已 10 a 有余。在过去的 10 多年, 新的研究结果陆续发表, 仪器观测资料持续更新, 古气候代用资料不断涌现, 大气水汽通量分析和气候数值模拟工作也日益深入。

我们需要了解: 新的研究和资料是否仍然支持先前的发现? 当前对于西北地区暖湿化机理和未来可能趋势的认识是否有所深化? 本文结合近年相关研究成果和更新的观测、代用和模式等资料, 对这些问题进行初步探讨。

① 收稿日期: 2013-12-31; 修订日期: 2014-06-27

基金项目: 国家公益性行业专项(GYHY201206012)和“973”计划项目(2010CB428400)共同资助

作者简介: 任国玉(1958-), 男, 研究员, 主要研究方向为气候变化与古气候。E-mail: guoyoo@cma.gov.cn

1 近年研究进展

近 10 余年来,不少研究探讨了我国西北地区降水变化和气候转型问题。这些研究集中在对西北地区现代暖湿化趋势的认证、降水事件变化规律分析、干湿变化驱动机制探讨、古气候演化特征重建、未来降水或干湿度变化趋势预估等多个方面。

多数研究证实了西北地区现代气候变暖、变湿的总体趋势。针对区域气温和降水变化的分析表明,西北地区地面气温普遍显著上升,年降水量在新疆、青海和甘肃西部趋于增多,而甘肃东部、陕西西部和宁夏等地则处于我国北方近 20 a 干旱化地带的西部边缘,年和夏季降水趋向减少^[8-17]。杨晓丹等^[18]发现,西北地区降水量增多现象在西部更明显,表现为年降水频率和降水强度同时增加,而其东部年降水强度增强,但降水频率却显著减少;范丽红等^[19]研究表明,石河子地区近 40 多年也存在地面气温明显增加、降水总体趋于上升、干旱指数减小的暖湿化现象;傅小城等^[20]研究了过去 50 a 青海柴达木盆地气温明显升高、夏季降水增加的现象;刘芸芸等^[21]发现,西北地区西部降水量呈显著上升趋势,新疆北部、新疆南部和伊犁河谷降水的明显增多始于 20 世纪 90 年代,但近 10 a 西北大部分地区雨季降水波动呈增大趋势。

从现代不同级别降水变化来看,西北地区东、西部也存在一定差别。与全国多数地区一样,西北强降水出现的频率和降水量都趋于上升,强降水对总降水量的贡献增大^[16,22-23]。陈少勇等^[24]发现,西北地区年最大日降水量普遍呈增加趋势,除天山地区外多数增加不显著,大雨降水事件在 20 世纪 90 年代中期以后有所增多。西北东部各级别的降水减少,而西部仅小雨降水减少,其他级别降水却呈增加趋势^[25]。因此,几乎所有工作在地面气温显著上升方面结论是一致的,多数研究指出西北地区西部降水量有比较明显的增加过程,现代区域气候普遍增暖、变湿趋势得到证实,而西北东部则有增暖、变干现象。李林等^[26]指出,青海“三江源”地区近 53 a 地面气温普遍升高,夏、秋季降水量微弱减少,而冬、春季降水量显著增加,气候暖湿化特点表现出明显的季节性。局地 and 个别季节降水变化与西北总体趋势不一致是可以理解的,青藏高原北部或青海省作为一个整体,近几十年降水量也仅有微弱增加,变化趋势不明显^[27-29]。张强等^[30]认为,近半个世纪西

北地区地面气温显著上升,但降水变化空间差异突出,从气温和干旱指数变化来看,西北地区整体呈暖干化趋势,只有局部出现暖湿化现象。这里涉及到干旱指数的物理意义及其在干燥区的适用性问题。由于他们使用的是气象干旱指数,蒸发项对地面气温影响因子给予较高权重^[31],这可能是导致分析结果中气候趋向干旱范围显著扩大的主要原因。

与降水变化区域差异相似,西北地区西部的河川径流量在经过 20 世纪 70 年代枯水期后,多于 80 年代中期开始呈增加趋势,而河西走廊东部、陕甘宁区段黄河径流量持续减少^[14]。近几十年博斯腾湖水位也明显升高^[32]。尽管气温上升导致的河源区夏季冰川融水增加也具有很大贡献^[33-34],但天山地区降水增加无疑对湖水位上升具有一定影响。青海湖水位在 21 世纪之前长期趋于下降,可能在很大程度上反映了流域人类活动的影响,但最近几年湖水位持续上升,应该与降水量更为明显的增加有关^[35]。

王秀荣等^[36]发现,西北地区夏季大气水汽含量在 20 世纪 80 年代中期以后有较明显增加。魏娜等^[37]研究指出,自 80 年代中期以来西北地区东部的水汽输入减少,水汽总收支也减少,而西部的水汽输入增加,北边界的输出却减少,水汽总收支有增加趋势。大气水汽收支和水汽含量的变化在一定程度上解释了西北地区降水量变化趋势及其空间差异。张庆云等^[38]认为,西北地区夏季降水型具有与东部季风区不同的年代际变化特点和机理,主要与中纬度西风带扰动动能的年代际减弱有关,而与北太平洋中纬度海温年代际变化(PDO)关系很弱。

增加的大气降水和冰川融水,以及农业灌溉面积扩张等因素,可能也对西北地区陆面实际蒸发和大气水汽含量变化产生影响,但这方面研究很少。张强等^[39]、赵文智等^[40]和黄荣辉等^[17]指出,我国西北干燥区陆面水循环过程十分复杂,目前,对异质性突出的区域陆面实际蒸发和土壤水分传输过程的理解还很欠缺,需要加强研究。

一些研究对西北地区 20 世纪和未来气候的模拟结果进行了分析。赵宗慈等^[41-42]、丁一汇^[43]、高学杰等^[44-45]、徐影等^[46]、姜大膀等^[47-48]利用气候模式模拟结果,对人类活动影响下西北地区降水可能变化趋势做了评价。多数气候模式模拟结果表明,在各种温室气体排放情景下,西北地区过去和未来几十年地面气温明显上升,降水量一般也表现出

显著增加。姜大膀等^[48]根据气候模式模拟结果认为,大气中温室气体浓度增加将导致新疆南部 21 世纪晚期降水显著上升,气候可能变得更湿润,新疆其他地区的气候一般也将比今天湿润。这一结果与先前的研究结论总体上是一致的。

目前,气候模式还处于不断改进完善之中,模拟结果仍存在较大的不确定性^[43]。在各种温室气体排放和大气浓度情景下,IPCC 全球气候模式集成结果表明,中国东部地区未来降水和径流明显增加,而地中海及其周边地区降水和径流大幅度减少,包括中国西北在内的中亚干燥区处于中纬度欧亚大陆东部变湿、西部趋干的过渡地带,但以降水量增加、气候变湿为主^[49]。这一结果同样具有很大的不确定性。

高质量的长时间观测资料序列,不仅可以用来理解过去气候变化的特征和规律,而且也可以直接用于未来年代以上时间尺度气候趋势预估。但西北地区缺少时间长度达到 60 a 以上的器测资料。刘芸芸等^[21]利用半个世纪左右器测资料,根据序列中存在的准周期现象,推测未来几年西北西部降水将以偏少为主,2015 年前后再次过渡到偏多的阶段,阿拉善高原未来 8~11 a 中降水可能增加。李林等^[35]综合利用统计方法和区域气候模式模拟结果的分析认为,2010—2020 年青海湖地区降水可能减少,青海湖水位可能再度出现下降趋势。

先前的研究揭示了西北地区现代和过去气候变化的若干事实,探讨了未来降水的可能趋势,为深入认识亚洲内陆干燥区气候变化特别是降水变化机理和可预测性奠定了基础。但是,现有的研究和科学认识距离完全理解和可靠预估西北地区降水或干湿变化趋势仍有较大差距。

2 现代降水变化

根据具有连续记录的长序列降水资料,在质量控制的基础上,更新了西北地区 1956—2011 年共 56 a 区域平均降水量距平百分率时间序列(图 1 和图 2)。台站降水资料未做均一化处理,也没有进行雨量计“低捕获”影响误差订正^[50]。降水量距平是相对 1981—2010 年 30 a 平均值的差值。区域平均序列建立采用网格化和面积加权平均方法^[11],即取 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的经纬度网格,计算单站和网格平均降水量

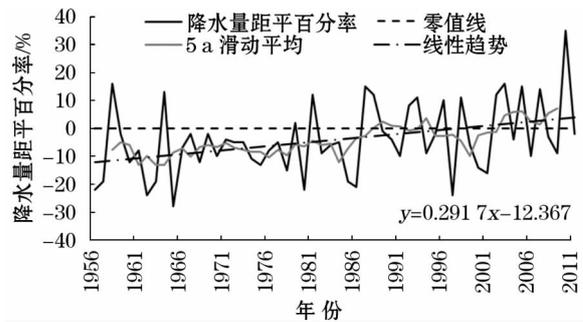


图 1 1956—2011 年西北地区(110°E 以西,33°N 以北)年降水量距平百分率

Fig. 1 Annual precipitation percentage anomalies of Northwest China (west of 110°E, north of 33°N) over time period 1956–2011

距平百分率,然后计算所有网格的面积加权平均值。无资料网格不参与计算。西北地区定义为 110°E 以西、33°N 以北的中国境内区域,主要包括新疆、青海、西藏西北部、甘肃、宁夏、陕西西部和内蒙古西部。采用 Mann-Kendall 方法^[51]检验区域平均降水量距平百分率变化趋势的显著性。

由图 1 可知,西北地区平均年降水量呈波动上升趋势,1956—2011 年线性增加趋势约为 16%,增加速率达到 $2.9\% \cdot (10a)^{-1}$,通过了信度为 95% 的显著性水平检验。降水量的增加始于 20 世纪 80 年代中期,至 90 年代末多数年份年降水量高于多年平均值,进入 21 世纪后多数年份年降水量更明显高于多年平均值,2010 年全区年降水量达到 55 a 最高值。20 世纪 80 年代中期以后降水增多,这与施雅风等^[3-4]所得结论一致,结合地面气温明显增加的分析结论^[7,52],说明当时西北地区发生了气候变暖、转湿的现象。最近 10 a 西北降水量较 20 世纪 90 年代有进一步增多,尽管地面气候仍维持偏暖的特征,但气温增加速率明显减缓^[53],具有气候偏暖和持续增湿特征。2010 年降水量异常偏高,主要与当年夏秋季新疆南部地区的大到暴雨过程有关,阿克苏地区夏季降水量异常偏多,其中拜城等多个气象站较常年偏多近 1 倍以上。

由图 2 可知,1956—2011 年,各个季节降水量均有增加,秋季和冬季增加幅度更大,分别为 27% 和 19%,增加速率分别达到 $4.9\% \cdot (10a)^{-1}$ 和 $3.4\% \cdot (10a)^{-1}$,通过了信度为 95% 的显著性水平检验。2010 年秋季降水量距平百分率为 1956 年以来最大值,达到 70% 以上,而秋、冬季最近 10 a 的降水量在绝大多数年份都为正距平。

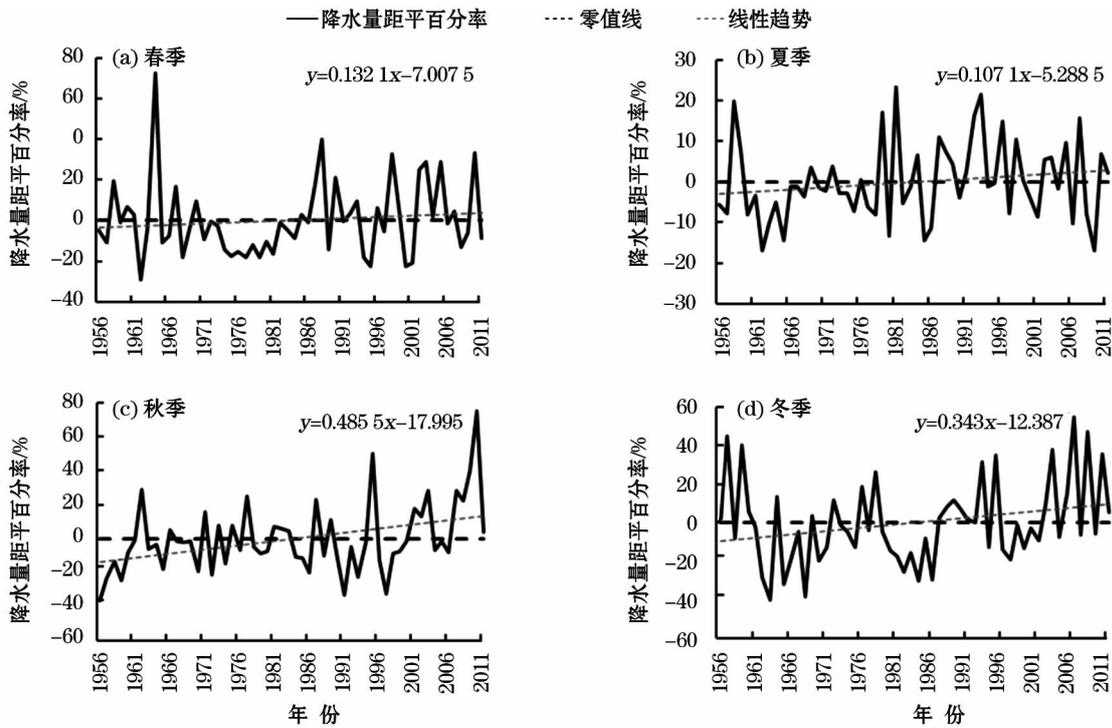


图2 1956—2011年西北地区(110°E以西,33°N以北)季节降水量距平百分率

Fig. 2 Seasonal precipitation percentage anomalies of Northwest China (west of 110°E, north of 33°N) over time period 1956–2011

由图1和图2可以看出,以20世纪60年代中期和80年代中期为时间节点,降水量年际相对变率呈明显的大-小-大演化规律,即降水的年际相对变异性在1956—1966年高、1967—1985年低、1986—2011年又升高(表1)。在降水年际相对变率高的时期,一般降水量也偏多;而在降水年际相对变率低的时期,降水量通常偏少。1967—1985年除秋季外,其他季节降水量多数年份偏少。这表明,在降水接近常年或偏少的时期,降水的年际稳定性或持续性比较好;而较大的降水年际相对变异性主要与异常偏多的降水年份或极端强降水事件有关,异常偏少的降水年份或极端干旱事件频率并未增加。

西北地区近期年和春季降水量年际相对变率偏高,与刘芸芸等^[21]得出的西北近10a大部分地区雨

季降水有波动增大现象结论有一致性,但本文表明的春季相对高的年际变异性开始时间早得多,出现在20世纪80年代早、中期,并持续到现在,而其他季节近10多年降水量年际波动未见明显增大趋势。

由图3可知,从年降水量的相对变化趋势来看,近56a我国西北地区大多数区域具有较明显的增加,尤其在新疆南部、西藏西北部、青海西部和新疆北部阿尔泰山等区域增加更明显,达到 $5\% \cdot (10a)^{-1}$ 以上;西北地区的东南部,主要包括陕西、宁夏、甘肃东南部,年降水量距平百分率经历较明显的减少,构成我国北方现代大范围干旱化地带的组成部分。其中,陕西和陇东地区年降水量相对减少最多,内蒙古西部局部站点年降水量也呈下降趋势。

由于本文定义的西北地区包含了东部较大范围降水趋于减少的区域,图1和图2给出的区域平均降水量距平百分率增加趋势在很大程度上被抵消了;如果选取河西走廊以西区域,则平均年和季节降水量增多趋势将更为明显。另外,由于这里采用的降水距平百分率是测度降水变异和变化的相对指标,在一定程度上夸大了常年降水量很低区域,如塔里木盆地的趋势显著性,并掩藏了降水量相对丰富区域,如阿尔泰山脉和天山地区趋势的显著性。

表1 西北地区不同时期年、季节降水量变差系数

Tab. 1 Annual and seasonal precipitation variance coefficients of Northwest China for varied time period

	1956–1966年	1967–1985年	1986–2011年
年	0.13	0.06	0.09
春季	0.24	0.12	0.19
夏季	0.17	0.11	0.11
秋季	0.20	0.16	0.16
冬季	0.34	0.23	0.20

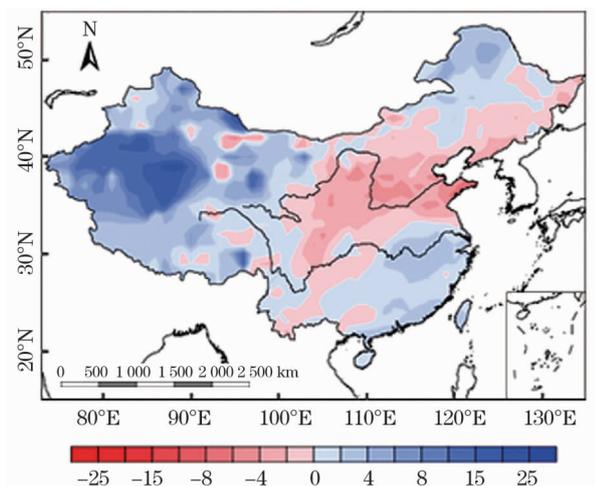


图3 1956—2011年中国年降水量距平百分率线性趋势分布 $[\% \cdot (10a)^{-1}]$

Fig. 3 Distribution of trends of annual precipitation percentage anomalies of Northwest China over 1956 - 2011 $[\% \cdot (10a)^{-1}]$

表2 西北地区3个时段年降水量变化线性趋势

Tab. 2 Linear trends of annual precipitation percentage anomalies of Northwest China for varied time periods

	1956 - 1990年	1956 - 2000年	1956 - 2011年
降水量趋势/ $[\% \cdot (10a)^{-1}]$	2.4	2.1	2.9*

*表示通过信度为95%的显著性水平检验。

由表2和图4可知,1956—1990年和1956—2000年,年降水量距平百分率的线性增加趋势均较小,没有通过信度为95%的显著性水平检验;但在1956—2011年,年降水量距平百分率的线性增加趋势却达到 $2.9\% \cdot (10a)^{-1}$,通过了信度为95%的显著性水平检验。显然,如果不包括西北地区东部,每个阶段特别是整个时段的年降水量增加趋势更加明显。

从西北地区1956—1990年、1956—2000年、1956—2011年3个时段的年降水量距平百分率线性趋势空间分布来看,最初的35 a降水增加和减少区域范围相差不大,减少最多在内蒙古西部的阿拉善地区;随着时间推移,降水量增加区域范围具有向东北、东南、西南和西北方向扩展趋势,减少区域范围在缩小,青藏高原东部尤其明显。20世纪90年代以前,阿拉善地区存在较明显的变干趋势,但迄今明显变干地带范围已经很小。1956—1990年、1956—2000年2个时段西藏南部降水减少的地带目前已不存在了。

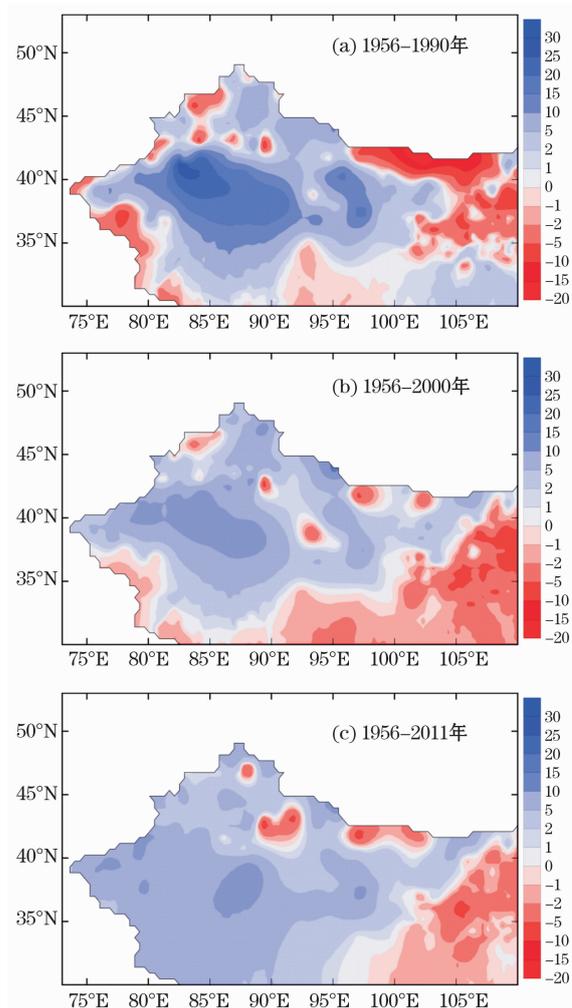


图4 西北地区3个时段年降水量距平百分率线性趋势分布 $[\% \cdot (10a)^{-1}]$

Fig. 4 Distribution of trends of annual precipitation percentage anomalies of Northwest China over three stages $[\% \cdot (10a)^{-1}]$

3 古代降水变化

西北地区特别是西北西部缺少长序列器测资料。古气候代用资料对于认识多年代尺度降水变化规律以及最近半个世纪降水异常具有重要意义。近年来,包括中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所的科研人员,利用树轮资料重建了西北众多地点不同长度的季节或年降水量(干旱指数)时间序列^[54-59],国内其他研究机构的学者也利用树轮资料重建了西北地区近几百年到上千年的降水序列^[60-70]。这些研究为与现代观测资料结合起来,综合分析当地长期降水变化的规律性及其原因提供了新的视角。

采用中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所获得

表 3 西北地区树轮重建降水量(干旱指数)序列基本信息
Tab.3 Information of tree-ring based reconstruction of precipitation (drought index) in Northwest China

序列代码	地点	省区	序列长度/a	重建时段	文献
PS1	北疆	新疆	459	1543 - 2001 年	[58]
PS2	天山	新疆	235	1770 - 2004 年	[71]
PS3	伊犁尼勒克	新疆	336	1671 - 2006 年	[72]
PS4	呼图壁河	新疆	313	1691 - 2003 年	[56]
PS5	乌鲁木齐河源	新疆	467	1535 - 2001 年	[73]
PS6	天山中部	新疆	348	1753 - 1993 年	[54]
PS7	特克斯河	新疆	236	1770 - 2005 年	[57]
PS8	巴仑台	新疆	505	1500 - 2004 年	[74]
PS9	山丹	甘肃	224	1783 - 2006 年	[75]
PS10	伊犁	新疆	354	1652 - 2005 年	[76]
PS11	贺兰山北部	内蒙/宁夏	247	1759 - 2005 年	[77]

的 11 条树轮重建降水序列(表 3),探讨西北地区 20 世纪 80 年代以来降水或干湿变化的历史地位。11 条序列多数位于新疆北部和天山地区,山丹和贺兰山北部 2 条序列位于西北地区东部。树轮宽度或密度年表按国际标准进行交叉定年和质量控制,利用国际树轮数据库的 ARSTAN 程序进行插值处理和去生长趋势订正,生成标准化年表,并根据附近气象站观测资料重建年或季节降水量(干旱指数)。为进行比较,对重建序列进行了标准化处理,得到标准化的降水(干旱指数)距平序列。由于在制作树轮年表过程中,不同作者采用不同形式的函数(对数函数、线性函数和样条函数等)拟合并去除生长趋势,目前多数树轮年表还不适合指示多年代时间尺度以上的气候振动和线性趋势变化,但用来表征年际到多年代尺度之间气候振动特征具有较高可信度。

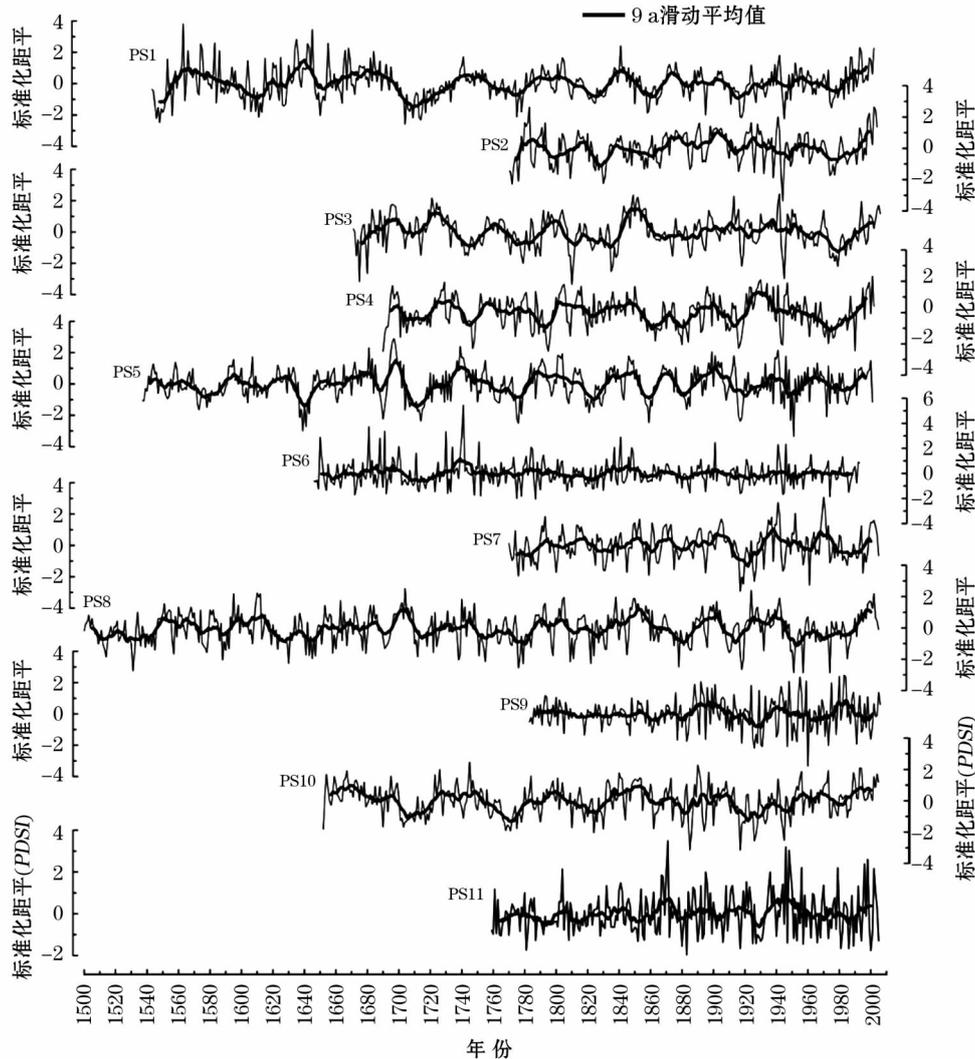
由图 5 可见,多数降水量序列展示出明显的年际到多年代尺度波动特征。在新疆北部和天山地区,树轮重建的降水序列清楚地反映出始于 20 世纪 80 年代初的降水增多趋势,其中,新疆北部(PS1)和天山(PS2)地区平均序列均表明,这一增湿现象在过去 200 a 内没有发生过,但并非过去更长时期未发生;20 世纪 80 年代初以来,天山地区多数单点重建序列(PS3、PS4、PS5、PS8、PS10)也表现出明显的增湿现象,但这一现象在天山中部(PS6)和特克斯河(PS7)序列中并不明显,而且在所有指示后 20 多年明显增湿的序列中,其增湿的程度亦未显著超出过去 200 ~ 300 a 最高水平;西北地区东部的山丹和贺兰山北部重建序列,没有显示 20 世纪 80 年代以

后的增湿特征,其中甘肃的山丹序列表现出降水减少趋势。

可见,树轮重建序列反映的 20 世纪 80 年代初以后西北地区西湿、东干降水变化空间分布型与器测资料分析结果基本一致,说明重建的降水(干旱指数)序列具有很高的可信度,也表明新疆北部和天山地区现代气候变湿事件属于历史上罕见现象,但不是独有现象,其在一定程度上与当地降水量从 20 世纪 60—70 年代的异常干旱期恢复性增加有关。

各重建降水(干旱指数)序列的滑动平均值还展示了年代以上尺度准周期现象。例如,新疆北部地区年降水量大致具有 40 ~ 70 a 和 200 a 左右显著周期特征^[58];天山地区的降水量具有 24 ~ 25 a 的周期性^[71];乌鲁木齐河源地区春季降水量序列具有 31 ~ 50 a 和 65 a 左右的准周期振荡^[73]。此外,研究表明,阿勒泰西部夏季降水量存在 29 a 和 60 ~ 74 a 的准周期^[74];天山南坡阿克苏河流域降水序列存在 45 ~ 58 a 的准周期波动^[78]。检测出的降水量周期波长差异很大,尽管 20 ~ 30 a 和 50 ~ 70 a 波长的波动似较普遍。明显的地点或序列间差异可能与树轮生长趋势订正方法、资料序列长度、资料序列所代表的季节、原始年表序列滤波方法、周期分析方法以及自然气候变异性的空间结构特性等有关。但是,这些准周期性现象确实说明,20 世纪 80 年代初以来持续 30 余年的降水增加趋势可能部分是气候低频振荡的表现形式。

在几个波动幅度较大的重建降水序列中,历史上持续性严重干旱事件值得关注。例如,发生在新疆北部地区(PS1)和天山地区(PS3、PS4、PS5、PS6、PS10)1700—1720 年的特大干旱事件,无论从持续时间还是干旱程度来看,都比 20 世纪 70 年代的干旱严重得多;甘肃山丹(PS9)和贺兰山北部(PS10)地区 1925—1932 年的持续性严重干旱事件,也都是当地过去有代用记录的 200 余年所经历过的最严重干旱,与器测记录、历史记载和其他树轮重建结果一致^[10,79-80]。此外,邵雪梅等^[61]研究表明,青海的德令哈地区 1430—1500 年和 1650—1730 年曾发生了持续半个世纪以上时间的严重干旱,20 世纪是近 1 000 a 历史上最湿润的阶段之一。历史上这类严重的长期干旱事件是当地大气降水多年代尺度自然波动的组成部分,说明在今后仍将重现,并将对人类社会-经济系统和自然生态系统造成难以估量的影响。



PS1:新疆北部地区(上年7月至当年6月降水量) PS5:乌鲁木齐河源(4—5月降水量) PS9:甘肃山丹(上年8月至当年6月降水量)
 PS2:天山地区(年降水量) PS6:天山中部(上年7月至当年2月降水量) PS10:伊犁(1—8月PDSI指数)
 PS3:伊犁尼勒克(7—8月降水量) PS7:特克斯河(上年7月至当年6月降水量) PS11:贺兰山北部(5—7月PDSI指数)
 PS4:呼图壁河(上年8月至当年7月降水量) PS8:巴仑台(上年7月至当年6月降水量)

图5 西北地区11条树轮重建的降水量(干旱指数)标准化距平序列

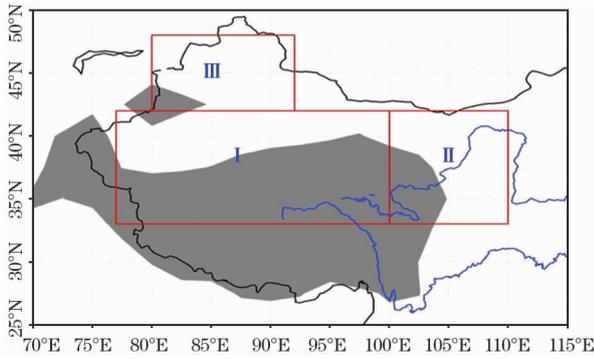
Fig. 5 Reconstructed standardized precipitation (dtyness index) anomalies based on tree-ring data over Northwest China

4 水汽通量变化

水汽通量是表示单位时间内流经整个区域或分区不同经纬度剖面上单位面积的水汽输送量,反映出水汽输送的量值和方向。20世纪70年代末以来是西北降水开始明显增加阶段,分析其水汽通量变化有助于了解降水趋势变化的原因。本文整层垂直积分的水汽通量矢量计算参照丁一汇^[81]介绍的方法,范围为地面到300 hPa位势高度。西北地区全区和分区水汽收支主要反映各自区域内大气水汽源汇强度,它取决于流经各经纬度剖面的水汽通量的总和或净收支情况。水汽通量和收支分析采用美国

国家环境预报中心/国家大气研究中心(NCEP/NCAR)(1948—2012年)和欧洲中期数值预报中心(ECMWF)(1979—2012年)的月平均再分析格点资料^[82],分别简称NCEP和ERA-Interim。NCEP再分析资料在1979年以前可能存在较大的系统偏差^[83-84],统一取1979—2012年资料。

格点水汽资料处理和分析方法同降水资料。采用 t -检验方法检验趋势的显著性,为计算分析方便,定义以下3个分区:I区为 $77^{\circ} \sim 100^{\circ}E, 33^{\circ} \sim 42^{\circ}N$; II区为 $100^{\circ} \sim 110^{\circ}E, 33^{\circ} \sim 42^{\circ}N$; III区为 $80^{\circ} \sim 92^{\circ}E, 42^{\circ} \sim 48^{\circ}N$ (图6)。西北地区全区为3个分区的合成。



I 区为 77° ~ 100°E, 33° ~ 42°N; II 区为 100° ~ 110°E, 33° ~ 42°N; III 区为 80° ~ 92°E, 42° ~ 48°N。

图 6 西北地区及其 3 个分区范围

Fig. 6 Division of three sub-regions over Northwest China

由图 7 和表 3 可以看出,1979—2012 年西北地区整层积分的水汽在各个边界上都存在较大的年际波动,除北边界上输入较明显的减少趋势和东边界上输出很显著的下降趋势外,其他边界上水汽输送通量长期趋势变化都很小,没有通过显著性检验。根据 2 套资料计算,西和北边界水汽输送通量年际变化更相似,东和南边界 NCEP 资料结果系统高于 ERA-Interim 数值,南部边界二者差异更大,并表现出不同的趋势,可能与同化了不同的青藏高原观测资料有关。各个分区除东部区即 II 区的东边界水汽输出通量具有显著的减少趋势,西部区即 I 区北边界上的输入有较明显的增加,根据 ERA-Interim,

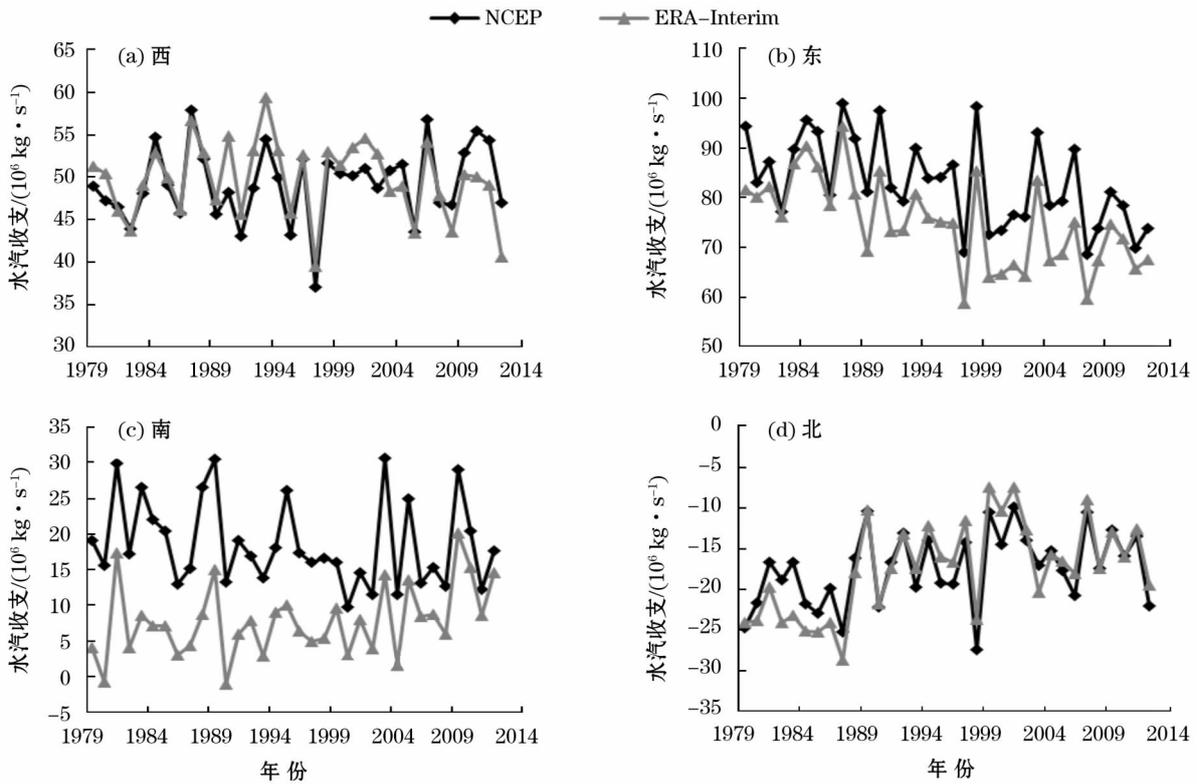


图 7 1979—2012 年西北地区水汽输送通量变化

Fig. 7 Annual mean moisture transport passing through western, eastern, southern and northern boundaries of Northwest China over 1979 - 2012

除新疆北部即 III 区北界输入通量有一定增加外,其他分区各边界水汽输送通量变化均很小。

由图 8 和表 4 可知,近 30 多年全区水汽净输送通量具有从负平衡向正平衡转化的趋势,20 世纪 90 年代末以来,西北地区多数年份水汽输入量大于输出量,其中 ERA-Interim 资料计算获得的增加趋势通过了显著性检验。根据 NCEP 分析表明,1956 年以来全区水汽净通量表现出较明显减少趋势,2000

年前的 45 a 减少更多。但早期 NCEP 资料质量不高,结果的可信性较低。各分区 1979—2012 年整层水汽净通量尽管也表明一定上升的趋势,但均未通过统计显著性检验。

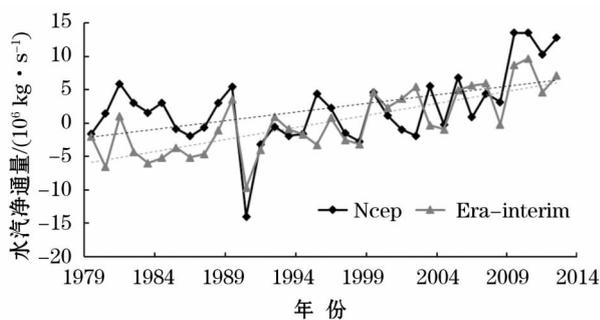
由于西边界和南边界的输入量趋势变化不明显,北边界的输入还有一定减少,整个西北地区 1979—2012 年水汽净通量的明显增加,显然主要与区域东边界水汽输出通量的显著下降有关。

表 4 1979—2012 年西北全区和各分区水汽输送量、水汽净通量及大气可降水总量趋势变化

Tab. 4 Linear trends of annual mean moisture transport at different boundaries of Northwest China and the sub-regions, moisture transport budget and atmospheric precipitable water over 1979–2012

	全区		西部		东部		新疆北部	
	NCEP	ERA	NCEP	ERA	NCEP	ERA	NCEP	ERA
西边界	0.083	-0.069	0.042	-0.007	-0.260	0.221	0.041	0.062
东边界	-0.475 *	-0.569 *	-0.260	-0.221	-0.429 *	-0.399 *	-0.046	-0.170
南边界	-0.133	0.181	-0.082	0.118	-0.051	0.063	-0.018	0.093
北边界	0.168	0.320	0.198	0.209	0.041	0.046	-0.089	0.158
净通量/($10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.259	0.360 *	0.021	0.123	0.078	0.195	0.159	0.042
可降水量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	0.003	0.005	0.013	0.004	-0.012	0.012	0.007	-0.003

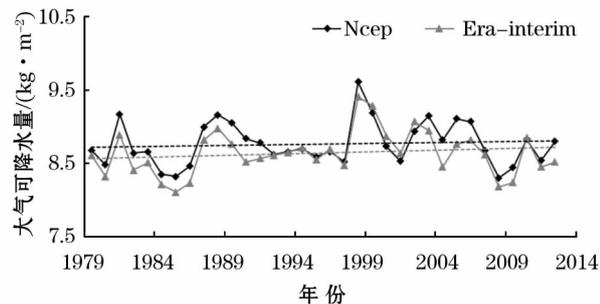
根据 NCEP/NCAR 和 ERA-Interim 再分析资料。* 表示通过信度为 95% 的显著性水平检验。



虚线表示线性趋势。

图 8 1979—2012 年西北地区水汽净通量变化

Fig. 8 Annual mean net moisture transport budget in Northwest China over 1979–2012



虚线表示线性趋势。

图 9 1979—2012 年西北地区大气可降水量变化

Fig. 9 Annual mean precipitable water amount and its trend in Northwest China over 1979–2012

由图 9 和表 3 可以看到,20 世纪 90 年代末之前,西北地区大气可降水量呈增加趋势,此后则有减少趋势,整个时期仅有微弱的增加,总体趋势变化不明显。最高值出现在 1998 年,这与异常强的 El Niño 事件及全球对流层大气温度异常偏高有关。各分区大气可降水量有增有减,但均不显著。NCEP 资料计算结果表明,20 世纪 60 年代初或 70 年代初

至今,全区大气可降水量仍未表现出明显趋势性变化。

比较图 8 和图 9 表明,最近 15 a 水汽净通量和大气可降水量变化出现了相反趋势,前者保持上升,而后者表现为下降。大气可降水量的下降与全球陆地平均比湿的减少一致^[85],但更加明显;水汽净通量的持续上升,特别是 2008 年以后的偏高异常,主要与区域东边界输出水汽明显偏少有关(图 7)。

上述结果与前人研究具有一致性,但也存在明显差异。根据再分析资料的研究表明^[86–89],西北东部的陕甘宁地区与华北地区一样,最近几十年来自太平洋和印度洋的水汽输送通量明显减少,区域内水汽净通量也下降,导致大气可降水量和实际降水量均减少;已有研究也表明^[36–37,90–94],西北西部的新疆地区,以及把西北地区作为一个整体,来自西风输入的水汽通量呈增加趋势,并致使区域内水汽收支增加。近几年,采用地面和探空资料的分析表明,中国大陆对流层中下层 20 世纪 80 年代以来大气可降水量呈显著上升趋势,西北地区上升尤其显著^[95–97]。Song 等^[98]研究表明,1960—2010 年全国地表大气比湿呈现一致的上升趋势,其中西北地区上升趋势最明显。本文分析发现,最近 30 多年通过西、南、北边界的水汽输入通量均没有明显增加,但通过东边界的输出却显著减少了,并导致水汽净通量出现较明显的上升,而大气可降水量并未显著增加。造成不同分析结果差异的原因可能与所用资料以及时间段和区域划分方法不一致有关。

5 降水变化原因

对于现代全球和区域气候变化原因的研究即所

谓归因研究,一般通过模式与观测分析相结合的方法,评价各种外强迫驱动下模拟结果与观测资料之间的时空关联性,识别气候对某一特别强迫因子的可能响应,并确定不同强迫因子对气候变化的贡献。归因研究需要证实:检测分析获得的某一气候变化信号(如近几十年地面气温显著增加)不可能由气候系统内部自然变异性引起,同时其时空分布图式又与输入了人为和自然强迫的模式气候响应具有一致性^[99-101]。

对全球和大陆尺度降水量变化的归因研究很少。这是因为不同于地面气温,现代全球和区域尺度降水量长期变化(趋势)不显著,噪音强,气候趋势变化信号难以检测^[49,101]。Zhang 等^[102]通过比较模式和观测的降水变化分布型,认为人类排放的温室气体可能对全球陆地降水产生了影响,包括对北半球中高纬度地带降水增加和副热带、热带降水减少均有贡献。这一结论的可信性还需要更多研究验证。全球降水观测资料和全球气候模式分析结果均存在较大的不确定性。

与全球陆地比较,我国西北地区空间尺度仍然太小,探讨近半个世纪特别是 20 世纪 80 年代初以来的降水量增加原因,困难更大,本文结合上述分析和已有研究做初步讨论。

近半个多世纪西北地区年降水量显示出较明显的上升趋势。如果不考虑东部三分之一区域,狭义西北地区的降水量增加将更为显著。当然,50 ~ 60 a 的降水观测资料序列仍比较短,无法反映多年代到世纪尺度降水变化规律。

树轮重建的气候序列显示,包括天山和新疆北部在内的西北西部若干地点于 20 世纪 80 年代初降水异常增多现象为最近 200 a 历史上罕见,但在更长历史时期不是没有先例^[69,103];其他地区的研究表明,青海德令哈市附近 20 世纪的降水增加十分异常,可能是过去 1 000 a 中最湿润的一个世纪^[61,104],但 Sheppard 等^[105]重建的青海都兰(接近德令哈市)降水量序列没有反映出现代异常湿润的现象;即使在最近的 200 a 内,西北地区也有不少地点没有表现出近 20 ~ 30 a 降水增加显著不同于历史最湿润时期的特征,如天山的乌鲁木齐河源^[73]和特克斯河^[57]地区,天山南麓的阿克苏河和库车河流域^[78,69],20 世纪 80 年代初以后的降水量增加趋势都没有明显超出历史时期水平,而西北东部的甘肃

山丹^[75]和兰州^[69]、贺兰山北部^[77]、腾格里沙漠南缘^[63,77]等地,因处于西北与华北的过渡地带,最近几十年甚至成为历史上罕见的干旱阶段,与器测时期西北东部降水明显趋向减少现象具有一致性^[11-12]。

对于部分地点树轮重建的 20 世纪 80 年代初以来降水异常增多现象也需慎重对待,因为它可能与树轮资料处理方法以及大气中 CO₂ 浓度增加等其他因子的协同影响有关^[106-107]。因此,目前还没有令人信服的代用证据表明,西北地区作为一个整体近几十年的降水量已明显超过了过去数百年历史时期最高水平。王绍武等^[108]根据树轮重建降水资料,结合旱涝史料和冰芯记录,综合评估了西北地区过去 400 a 的降水量变化,表明 20 世纪 70 年代以后的 30 a 全区年降水量均为正距平,但其偏多的幅度亦未明显超出历史上其他偏湿年代。

总之,将仪器观测记录和以树轮为代表的代用资料结合起来看,西北地区西部现代降水量变化趋势展示出一定程度的异常,但多数并未明显超出几个世纪气候自然变异的范围。这一判断有助于支持现代降水变化可能仍为多年代以上时间尺度气候自然变异性表现的解释。因此,当前的古气候资料和器测资料分析不支持、但也不否认现代大气降水增加与某种大尺度人为强迫持续性影响存在关联的推测。

这种大尺度持续性人为强迫主要指大气中温室气体浓度增加及其全球和区域性气候变暖(图 10)。全球变暖可能已导致海洋表面实际蒸发加强,对流

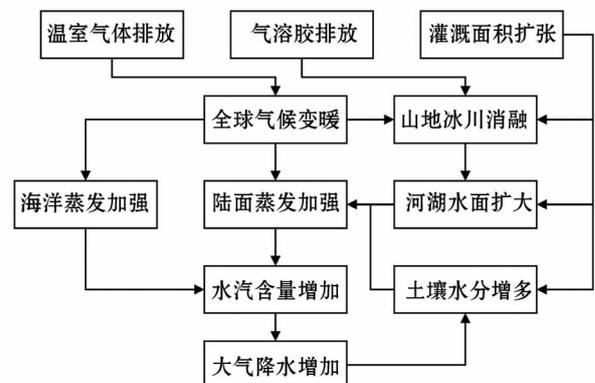


图 10 人类活动影响下西北地区水循环和大气降水变化可能机理

Fig. 10 Mechanism of water cycle and atmospheric precipitation change over Northwest China under the background of varied-scale human activities

层大气水汽含量增加,降水量和强降水事件频率增多^[109-111,49,85,23]。Zhang 等^[102]认为,北半球中高纬度地区降水增加,可能是对全球气候变暖的响应。西北地区是北半球中高纬度地带的组成部分,其降水量增加现象可能也与全球变暖有关。显然,不仅古气候资料不完全支持这一推测,前述西北地区西、南和北边界水汽输入通量趋势变化事实似乎也不支持这一推测,整个区域净水汽通量的增加主要与东边界的输出通量明显减少有关,表明区域内部大气水汽转化为降水的效率提高了。因此,即使全球变暖已经对西北地区的降水变化产生了影响,至少这种影响的信号目前还没有突显出来。

当输入实际和设定的大气温室气体浓度增加情景时,大部分气候模式模拟的西北地区年降水量将明显增加^[43,46,48-49,2,112-113],与现代降水变化的观测分析结果基本一致。这说明,相比华北地区,观测到的西北地区降水量增加,有更大的可能性是对人为温室气体排放及其全球变暖的响应。在华北地区,多数全球气候模式表明,在温室气体浓度增加情景下降水量增加^[43,46,49],但区域气候模式却给出相反的结果^[44,114],模式之间存在明显差异,全球模式结果与观测趋势之间几乎完全相反,因此,将近几十年华北地区降水量的减少归因于大气中温室气体浓度增加或全球气候变暖,目前仍缺少充足依据;在西北地区,现代降水量增加至少与理论预期和模拟结果没有矛盾,但后者与观测的大气水汽输送通量变化和古气候证据不一致。

与可能的人为气候变暖相关的是 20 世纪 80 年代以来西北地区天山、祁连山等山地冰川的消融^[2,114-115]。尽管存在争议,局地和外源性黑碳等气溶胶沉降可能也在一定程度上加速了山地冰川的消融^[116-118]。冰川消融在降水量增加所产生影响的基础上,进一步导致河川径流和湖泊面积增加,山区和山麓地带以及内陆河河道附近下垫面土壤水分含量增加,陆面实际蒸发量和区域内大气水汽含量进一步上升,增加降水量(图 10)。但 2009 年以来,由于气温偏低,天山 1 号冰川开始出现物质正平衡,冰川消融速率趋于下降^[119]。

另一个更可能的人为持续性强迫因子是区域或局地性土地利用变化。近几十年新疆山麓地带和绿洲区域的农业灌溉面积以及生态用水量有大幅度增加^[1-2,108]。截至 2008 年,全疆农业灌溉总面积超过 $5 \times 10^6 \text{ hm}^2$,其中,只有 20% 实现了高效节水灌溉,

用水量大,蒸发量高。农业灌溉,以及快速城市化引起的生态、工业和生活用水量的增加,可能在一定程度上增强了区域内部水循环过程,引起陆面实际蒸发量上升,并与外部输入的水汽增加和水循环过程加强一起,导致西北地区西部特别是天山山区和山麓、绿洲地带大气降水量增加(图 10)。

杨青和何清^[120]认为,与塔里木河上中游地区比较,下游流域 20 世纪 90 年代以来降水量增加幅度明显偏小,可能与人为引起的径流减少和生态退化有关。他们还发现,阿克苏河流域同样存在上游降水增加趋势比平原灌区明显的现象,并引述张学文^[121]的观点,认为可能与山麓地带的农业灌溉有联系。全国和流域尺度的蒸发量变化分析表明,西北地区西部蒸发皿蒸发量或潜在蒸发量存在显著下降趋势^[122-123],可能在一定程度上与观测点附近陆面实际蒸发量上升、大气低层水汽含量相对增加和云量增多有关。姚俊强等^[124]发现,天山山麓地带 20 世纪 80 年代以后地面平均水汽压明显增加,表明实际蒸发量和近地表大气中水汽含量确有显著上升现象。荒漠绿洲区域夏季低层气温相对低,湿度较高,风速较小,地表能量交换以潜热通量为主^[125],在人工绿洲实际上就反映了灌溉和植被蒸散发的重要影响。李霞等^[91]认为,20 世纪 80 年代以后,中天山北麓降水量增加的主要原因,可能是区域内部的水循环速率提高引起的,但他们把区域水循环速率加强主要归因于气候增暖造成的冰川消融和径流量增加。

前述大气水汽输送和水汽净通量变化的分析结果,一般支持上述推断。从整体上看,西北地区经由西、南、北边界的水汽输入通量并没有明显增加,ERA-Interim 资料计算获得全区水汽净通量上升,一方面与水汽输出通量显著减少有关,另一方面可能也与区域内部实际蒸发作用加强有联系。

总之,区域和局地农业开发、灌溉面积扩大以及城市发展等“绿洲化”过程,很可能已成为西北干燥地区气候和水循环变化不可忽视的因子。这些过程可能通过显著增加陆面的实际蒸发量,增加了低层大气含水量,减弱了干燥区域雨滴降落途中的强烈蒸发效应,增加了绿洲及其附近地带的大气降水频次和降水量。“绿洲化”似乎提高了我国西北干燥区的大气水汽-降水转化效率,有使整个区域向“水汽汇”方向变化的趋势。

6 未来可能趋势

对未来几十年降水量变化趋势预估,其可能性和可信性依赖于对过去不同时间尺度降水变化规律的认识程度。由于目前对西北地区过去降水或干湿变化规律的了解整体上还很粗浅,任何对于未来年代到多年代尺度降水趋势的预估结论都存在很大的不确定性。

主要的不确定性来自器测、再分析和代用资料的精度、气候模式的模拟能力以及对于降水变化机理认识的程度。最近几十年的器测降水资料本应具备最高的观测精度,但由于近现代气象观测系统的建立与维持很少考虑气候变化监测和研究的需求,现有长序列降水资料用于年代以上尺度气候变化特别是长期趋势变化分析,实乃差强人意^[126,50]。树轮重建的降水序列还需要解决生长趋势订正方法和近现代大气中 CO₂ 浓度增加协同效应影响的分离等问题,也应该发展与器测资料序列的有效对接方法。气候模式对降水变化特别是年代以上自然变异的模拟能力还有限,无法对其模拟和预估结果给予足够信任。当前对于西北地区降水变化机理的认识仍不完善,今后特别需要深入了解全球、区域和局地等不同空间尺度人类活动影响的性质、程度及其与年代以上尺度气候自然变异的相互作用机理。

假设目前资料、模式和认识上的不确定性处于可控范围之内,则现有研究倾向于:在全球和区域、局地人类活动的共同影响下,西北地区未来 20~30 a 降水量总体上将趋于增加。如果过去几十年观测到的西北地区降水增加主要是对全球气候变暖响应的结果,区域和局地实际蒸发加强等因素也发挥了作用,则未来降水的增加趋势可能会较强;但如果过去几十年观测到的西北地区降水增加主要与扩大的农业灌溉和城市化等“绿洲化”因素有关,对全球气候变化的响应不明显,则由于灌溉面积增加趋缓和节水灌溉技术的推广等因素,未来降水量增加趋势可能较弱。

西北地区未来几十年降水总体增加趋势将与多年代尺度自然气候振动节律相互叠加,导致不同区域、不同时期降水量增加速率、幅度存在显著差异,甚至一些地点和时段出现降水量减少现象。例如,在新疆北部和天山等地区 20 世纪 80 年代以后的暖湿气候当前很可能已达到峰值期,在自然气候变异条件下,未来降水可能将进入一个多年代偏枯时期,

在很大程度上掩盖甚至逆转由于人类活动影响造成的降水增加趋势;如果阿勒泰西部夏季降水量准周期性规律稳定,在自然驱动机制下,2010—2019 年夏季气候将进入一个干暖期^[127],那么未来 10 余年当地夏季降水量增加趋势也将被掩盖甚至转而下降;青海德令哈市附近自然驱动下的多年代时间尺度年降水量振幅似乎已接近峰值区域^[104],未来几十年降水可能趋向减少,并在很大程度上控制着当地降水量总体走势。

上述讨论主要针对西北地区的主体部分,特别是多数气象观测站所在的绿洲和城市区域。至于西北地区东部,其长期降水变化驱动因子与华北地区有较大相似性,可能在很大程度上取决于东亚季风系统自然变异和气溶胶排放等区域性人类活动影响,未来 20~30 a 降水变化总体上可能趋于增加^[128]。

7 结束语

最近 60 余年长序列观测资料分析表明,包括新疆在内的西北地区降水量存在较明显的上升趋势,近 10 a 降水量比 20 世纪 90 年代进一步增多。现代降水量明显增加从理论和模拟结果来看,可能部分是对全球气候变暖的响应,特别是与华北地区比较,存在这种联系的可能性更大,但目前观测证据仍不充分。西北地区降水增加可能部分是、也可能完全不是对全球变暖的响应;另一方面,区域和局地灌溉面积扩张和城市发展等“绿洲化”过程,很可能是引起城镇区域及其气象观测站附近最近几十年降水量增加的主要驱动因素之一,需要引起足够重视。此外,多年代尺度上的气候自然变异性对西北地区现代降水变化的影响不容忽视,新疆北部和天山等地区年轮重建的历史降水序列清楚地表明这一点。

在全球、区域和局地不同空间尺度人类活动的共同影响下,预计西北地区未来 20~30 a 降水量总体上仍将趋向上升,但这种长期变化趋势将与年代和多年代自然降水振动节律相互叠加,致使具体区域或时段的合成降水量变化情景趋于复杂化。

西北地区大部分区域年降水量很低,荒漠内部甚至只有几十毫米,未来几十年年降水量即使增加 50%,仍然不足以支撑大规模区域开发和人口迁入。但是,西北的高山地区年降水量通常可以达到 300 mm 以上,天山山脉中段最大降水带则在 500 mm 以

上。这些高山地带年降水量即使升高 10% ,也可以明显增加山区和山麓地带的水资源供应量,缓解干燥区人类密集居住带社会经济发展的水资源供应困境。在这个意义上,不论什么原因造成的未来大气降水增加,对于西北地区的经济发展和生态建设来说都不是一个坏消息。

本文分析和讨论建立在仪器观测资料、树轮重建资料、再分析资料和模式模拟资料可信度较高,因而可以被用来分析年代以上尺度降水变化规律的假设基础上。事实上,所有上述资料都存在误差和偏差,代用资料、再分析资料和模式模拟结果在长期降水量变化趋势估计方面存在诸多缺陷,根据这些资料分析所获得的科学认识仍然是初步的,今后需要开展深入研究。

参考文献(References):

- [1] 钱正英,张光斗. 中国可持续发展水资源战略研究(综合报告)[J]. 中国工程科学,2001(8):5-17. [Qian Zhengying, Zhang Guangdou. Strategic research on sustainable development of water resources in China[J]. Engineering Sciences,2001(8):5-17.]
- [2] 秦大河. 中国西部环境演变评估(综合卷)[M]. 北京:科学出版社,2002:80. [Qin Dahe. Assessment of Environmental Evolution in the West of China[M]. Beijing: Science Press,2002:80.]
- [3] 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[J]. 冰川冻土,2002,24(3):219-226. [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[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2002,24(3):219-226.]
- [4] 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[J]. 第四纪研究,2003,23(2):152-164. [Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China[J]. Quaternary Sciences,2003,23(2):152-164.]
- [5] 胡汝骥,樊自立,王亚俊,等. 近 50 a 新疆气候变化对环境的影响评估[J]. 干旱区地理,2001,24(2):97-103. [Hu Ruji, Fan Zili, Wang Yajun, et al. Assessment about the impact of climate change on environment in Xinjiang since recent 50 years[J]. Arid Land Geography,2001,24(2):97-103.]
- [6] 胡汝骥,马虹,樊自立,等. 近期新疆湖泊变化所示的气候趋势[J]. 干旱区资源与环境,2002,16(1):20-27. [Hu Ruji, Ma Hong, Fan Zili, et al. The climate trend demonstrated by changes of the lakes in Xinjiang since recent years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2002,16(1):20-27.]
- [7] 李栋梁,魏丽,蔡英,等. 中国西北现代气候变化事实与未来趋势展望[J]. 冰川冻土,2003,25(2):135-142. [Li Dongliang, Wei Li, Cai Ying, et al. The present facts and the future tendency of the climate change in Northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2003,25(2):135-142.]
- [8] 丁一汇,王守荣. 中国西北地区气候与生态环境概论[M]. 北京:气象出版社,2001:77-154. [Ding Yihui, Wang Shourong. Climate and Ecological Environment in Northwest of China[M]. Beijing: China Meteorological Press,2001:77-154.]
- [9] 张家宝,袁玉江. 试论新疆气候对水资源的影响[J]. 自然资源学报,2002,17(1):28-34. [Zhang Jiabao, Yuan Yujiang. A tentative discussion on the impact of climate on surface water resources in Xinjiang[J]. Journal of Natural Resources,2002,17(1):28-34.]
- [10] 宋连春,张存杰. 20 世纪西北地区降水量变化特征[J]. 冰川冻土,2003,25(2):143-148. [Song Lianchun, Zhang Cunjie. Changing features of precipitation over Northwest China during the 20th century[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2003,25(2):143-148.]
- [11] 任国玉,郭军,徐铭志,等. 近 50 年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报,2005,63(6):942-956. [Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, et al. Climate changes of China's mainland over the past half century[J]. Acta Meteorologica Sinica,2005,63(6):942-956.]
- [12] 任国玉,姜彤,李维京,等. 气候变化对中国水资源情势影响综合分析[J]. 水科学进展,2008,19(6):772-779. [Ren Guoyu, Jiang Tong, Li Weijing, et al. An integrated assessment of climate change impacts on China's water resources[J]. Advances in Water Science,2008,19(6):772-779.]
- [13] Chen Y N, Xu Z X. Plausible impact of global climate change on water resources in the Tarim River Basin[J]. Science in China Series D: Earth Sciences,2005,48(1):65-73.
- [14] 程国栋,王根绪. 中国西北地区的干旱与旱灾变化趋势与对策[J]. 地学前缘,2006,13(1):3-14. [Chen Guodong, Wang Genxu. Changing trend of drought disaster in northwest China and countermeasures[J]. Earth Science Frontiers,2006,13(1):3-14.]
- [15] 任朝霞,杨达源. 西北干旱区近 50 年气候变化特征与趋势[J]. 地球科学与环境学报,2007,29(1):99-102. [Ren Zhaoxia, Yang Dayuan. Trend and characteristics of climatic change in arid region of Northwest China in recent 50 years[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2007,29(1):99-102.]
- [16] 陈峪,陈鲜艳,任国玉. 中国主要河流域极端降水变化特征[J]. 气候变化研究进展,2010,6(4):265-269. [Chen Yu, Chen Xianyan, Ren Guoyu. Variation of extreme precipitation over large river basins in China[J]. Advances in Climate Change Research,2010,6(4):265-269.]
- [17] 黄荣辉,周德刚,陈文,等. 关于中国西北干旱区陆-气相互作用及其对气候影响研究的最近进展[J]. 大气科学,2013,37(2):189-210. [Huang Ronghui, Zhou Degang, Chen Wen, et al. Recent progress in studies of air-land interaction over the arid area of Northwest China and its impact on climate[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2013,37(2):189-210.]
- [18] 杨晓丹,翟盘茂. 我国西北地区降水强度、频率和总量变化[J]. 科技导报,2005,23(6):24-26. [Yang Xiaodan, Zhai Pan-

- mao. Changes in precipitation intensity, frequency and total in Northwest China[J]. Science & Technology Review, 2005, 23(6): 24 - 26.]
- [19] 范丽红, 何清, 崔彦军, 等. 近 40 a 石河子地区气候暖湿化特征分析[J]. 干旱气象, 2006, 24(1): 14 - 21. [Fan Lihong, He Qing, Cui Yanjun, et al. Analysis on the climate change towards warming-wetting trend in Shihezi region in recent 40 years[J]. Journal of Arid Meteorology, 2006, 24(1): 14 - 21.]
- [20] 傅小斌, 王芳, 王浩, 等. 柴达木盆地气温降水的长序列变化及与水资源关系[J]. 资源科学, 2011, 33(3): 408 - 415. [Fu Xiaocheng, Wang Fang, Wang Hao, et al. Analysis of long-term changes in temperature and precipitation and their relationships with water resources in the Qaidam Basin in China[J]. Resources Science, 2011, 33(3): 408 - 415.]
- [21] 刘芸芸, 张雪芹, 孙杨. 全球变暖背景下西北干旱区雨季的降水时空变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(2): 97 - 103. [Liu Yunyun, Zhang Xueqin, Sun Yang. Spatiotemporal variations of rainy season precipitation in Northwest China arid region under global warming[J]. Advances in Climate Change Research, 2011, 7(2): 97 - 103.]
- [22] 林云萍, 赵春生. 中国地区不同强度降水的变化趋势[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2009, 45(6): 995 - 1 002. [Lin Yunping, Zhao Chunsheng. Trends of precipitation of different intensity in China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2009, 45(6): 995 - 1 002.]
- [23] Wu F T, Fu C B. Change of precipitation intensity spectra at different spatial scales under warming conditions[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(12): 1 385 - 1 394.
- [24] 陈少勇, 任燕, 乔立, 等. 中国西北地区大雨以上降水日数的时空分布特征[J]. 资源科学, 2011, 33(5): 958 - 965. [Chen Shaoyong, Ren Yan, Qiao Li, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of days with heavy rainfall over Northwestern China[J]. Resources Science, 2011, 33(5): 958 - 965.]
- [25] 陈冬冬, 戴永久. 近五十年我国西北地区降水强度变化特征[J]. 大气科学, 2009, 33(5): 923 - 935. [Chen Dongdong, Dai Yongjiu. Characteristics of Northwest China rainfall intensity in recent 50 years[J]. 2009, 33(5): 923 - 935.]
- [26] 李林, 李凤霞, 郭安红, 等. 近 43 年来“三江源”地区气候变化趋势及其突变研究[J]. 自然资源学报, 2006, 21(1): 79 - 85. [Li Lin, Li Fengxia, Guo Anhong, et al. Study on the climate change trend and its catastrophe over Sanjiangyuan region in recent 43 years[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(1): 79 - 85.]
- [27] 常国刚, 李凤霞, 李林. 气候变化对青海生态与环境的影响及对策[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(4): 172 - 175. [Chang Guogang, Li Fengxia, Li Lin. Impact of climate change on ecology and environment in Qinghai province and its countermeasures[J]. Advances in Climate Change Research, 2005, 1(4): 172 - 175.]
- [28] 汪青春, 秦宇生, 张占峰, 等. 青海高原近 40 a 降水变化特征及其对生态环境的影响[J]. 中国沙漠, 2007, 27(1): 153 - 158. [Wang Qingchun, Qin Ningsheng, Zhang Zhanfeng, et al. Precipitation change and its impact on eco-environment of Qinghai Plateau for the last 40 years[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(1): 153 - 158.]
- [29] 任国玉. 气候变化与青藏高原工程设计[J]. 中国工程科学, 2012, 14(9): 89 - 95. [Ren Guoyu. Climate change and the engineering projects of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Engineering Sciences, 2012, 14(9): 89 - 95.]
- [30] 张强, 张存杰, 白虎志, 等. 西北地区气候变化新动态及对干旱环境的影响[J]. 干旱气象, 2010, 28(1): 1 - 7. [Zhang Qiang, Zhang Cunjie, Bai Huzhi, et al. New development of climate change in Northwest China and its impact on arid environment[J]. Journal of Arid Meteorology, 2010, 28(1): 1 - 7.]
- [31] 王劲松. 近 100 年来中东亚干旱区对全球变暖的区域气候响应研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006: 77. [Wang Jinsong. Study on Regional Climate Response to Global Warming in the Arid Central-East Asia over the Past 100 Years[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006: 77.]
- [32] 王润, Ernst Giese, 高前兆. 近期博斯腾湖水位变化及其原因分析[J]. 冰川冻土, 2003, 25(1): 60 - 64. [Wang Run, Ernst Giese, Gao Qianzhao. The recent change of water level in the Bosten Lake and analysis of its causes[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(1): 60 - 64.]
- [33] 孙占东, 王润. 气候背景下冰川在博斯腾湖水量平衡中的作用[J]. 湖泊科学, 2006, 18(5): 484 - 489. [Sun Zhandong, Wang Run. Effect of glaciers change to water balance of Lake Bosten under climatic backgrounds[J]. Journal of Lake Sciences, 2006, 18(5): 484 - 489.]
- [34] 马丽娟, 赵景峰, 张宏俊, 等. 气候变化背景下冰川积雪融水对博斯腾湖水位变化的影响[J]. 干旱区地理, 2010, 33(2): 210 - 216. [Ma Lijuan, Zhao Jingfeng, Zhang Hongjun, et al. Impact of glacier and snow melting on Bosten Lake under climate change[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(2): 210 - 216.]
- [35] 李林, 时兴合, 申红艳, 等. 1960 - 2009 年青海湖水位波动的气候成因探讨及其未来趋势预测[J]. 自然资源学报, 2011, 26(9): 1 566 - 1 574. [Li Lin, Shi Xinghe, Shen Hongyan, et al. Cause of water level fluctuation in Qinghai Lake from 1960 to 2009 and its future trend forecasting[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(9): 1 566 - 1 574.]
- [36] 王秀荣, 徐祥德, 苗秋菊. 西北地区夏季降水与大气水汽含量状况区域性特征[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(1): 35 - 42. [Wang Xiurong, Xu Xiangde, Miao Qiuju. Regional characteristics of summer precipitation and water vapor amount in Northwest China[J]. Climatic and Environmental Research, 2003, 8(1): 35 - 42.]
- [37] 魏娜, 巩远发, 孙娴, 等. 西北地区近 50 a 降水变化及水汽输送特征[J]. 中国沙漠, 2010, 30(6): 1 450 - 1 457. [Wei Na, Gong Yuanfa, Sun Xian, et al. Variation of precipitation and water vapor transport over the Northwest China from 1959 to 2005[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(6): 1 450 - 1 457.]
- [38] 张庆云, 吕俊梅, 杨莲梅. 夏季中国降水型的年代际变化与大气内部动力过程及外强迫因子关系[J]. 大气科学, 2007, 31(6): 1 290 - 1 300. [Zhang Qingyun, Lv Junmei, Yang Lianmei. The interdecadal variation of precipitation pattern over china during

- summer and its relationship with the atmospheric internal dynamic processes and extra-forcing factors[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2007, 31(6): 1 290 - 1 300.]
- [39] 张强, 黄荣辉, 王胜. 浅论西北干旱区陆面过程和大气边界层对区域天气气候的特殊作用[J]. 干旱气象, 2011, 29(2): 133 - 136. [Zhang Qiang, Huang Ronghui, Wang Sheng. Discussion about special function of land surface process and atmospheric boundary on regional climate in arid area of Northwest China[J]. Journal of Arid Meteorology, 2011, 29(2): 133 - 136.]
- [40] 赵文智, 吉喜斌, 刘鹤. 蒸散发观测研究进展及绿洲蒸散研究展望[J]. 干旱区研究, 2011, 28(3): 463 - 470. [Zhao Wenzhi, Ji Xibin, Liu Hu. Progresses in evapotranspiration research and prospect in desert oasis evapotranspiration research[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(3): 463 - 470.]
- [41] 赵宗慈, 丁一汇, 高学杰, 等. 中国西北地区气候变化及未来趋势展望[M]. 北京: 气象出版社, 2001: 210. [Zhao Zongci, Ding Yihui, Gao Xuejie, et al. Climate Change of Northwest China and the Future Trends[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2001: 210.]
- [42] 赵宗慈, 丁一汇, 徐影, 等. 人类活动对 20 世纪中国西北地区气候变化影响检测和 21 世纪预测[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(1): 26 - 34. [Zhao Zongci, Ding Yihui, Xu Ying, et al. Detection and prediction of climate change for the 20th and 21st century due to human activity in Northwest China[J]. Climatic and Environmental Research, 2003, 8(1): 26 - 34.]
- [43] 丁一汇. 中国西部环境变化的预测: 第 2 卷[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 231. [Ding Yihui. Environmental Change Predictions in the West of China; Vol. 2[M]. Beijing: Science Press, 2002, 231.]
- [44] 高学杰, 赵宗慈, 丁一汇, 等. 区域气候模式对温室效应引起的中国西北地区气候变化的数值模拟[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 157 - 164. [Gao Xuejie, Zhao Zongci, Ding Yihui, et al. Climate change due to greenhouse effects in Northwest China as simulated by a regional climate model[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 157 - 164.]
- [45] 高学杰, 赵宗慈, 丁一汇, 等. 温室效应引起的中国区域气候变化的数值模拟 II. 中国区域气候的可能变化[J]. 气象学报, 2003, 61(1): 29 - 38. [Gao Xuejie, Zhao Zongci, Ding Yihui, et al. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model part II. Climate change[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 61(1): 29 - 38.]
- [46] 徐影, 丁一汇, 赵宗慈. 人类活动引起的我国西北地区 21 世纪温度和降水变化情景分析[J]. 冰川冻土, 2003, 25(3): 327 - 330. [Xu Ying, Ding Yihui, Zhao Zongci. Scenario of temperature and precipitation changes in Northwest China due to human activity in the 21st century[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(3): 327 - 330.]
- [47] 姜大膀, 王会军, 郎咸梅. 全球变暖背景下东亚气候变化的最新情景预测[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4): 590 - 596. [Jiang Dabang, Wang Huijun, Lang Xianhai. East Asian climate change trend under global warming background[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(4): 590 - 596.]
- [48] 姜大膀, 苏明峰, 魏荣庆, 等. 新疆气候的干湿变化及其趋势预估[J]. 大气科学, 2009, 33(1): 90 - 98. [Jiang Dabang, Su Mingfeng, Wei Rongqing, et al. Variation and projection of drought and wet conditions in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 33(1): 90 - 98.]
- [49] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 996.
- [50] 孙秀宝, 任国玉, 任芝花, 等. 风场变形误差对冬季降雪测量及其趋势估算的影响[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(2): 178 - 186. [Sun Xiubao, Ren Guoyu, Ren Zhihua, et al. Effects of wind-induced errors on winter snowfall and its trends[J]. Climatic and Environmental Research, 2013, 18(2): 178 - 186.]
- [51] von Storch H, Zwiers F W. Statistical Analysis in Climate Research[M]. New York: Cambridge University Press, 2003: 504.
- [52] 于淑秋, 林学椿, 徐祥德. 我国西北地区近 50 年降水和温度的变化[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(1): 9 - 18. [Yu Shuqiu, Lin Xuechun, Xu Xiangde. The climatic change in Northwest China in recent 50 years[J]. Climatic and Environmental Research, 2003, 8(1): 9 - 18.]
- [53] 虞海燕, 刘树华, 赵娜, 等. 1951 - 2009 年中国不同区域气温和降水量变化特征[J]. 气象与环境学报, 2011, 27(4): 1 - 10. [Yu Haiyan, Liu Shuhua, Zhao Na, et al. Characteristics of air temperature and precipitation in different regions of China from 1951 to 2009[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2011, 27(4): 1 - 10.]
- [54] 袁玉江, 李江风, 胡汝骥, 等. 用树木年轮重建天山中部近 350 a 来的降水量[J]. 冰川冻土, 2001, 23(1): 34 - 40. [Yuan Yujang, Li Jiangfeng, Hu Ruji, et al. Reconstruction of precipitation in the recent 350 a from tree-rings in the middle Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(1): 34 - 40.]
- [55] 袁玉江, 李江风, 高国栋. 天山小渠子过去 193 年降水的重建与分析[J]. 中国沙漠, 2005, 25(增刊): 8 - 11. [Yuan Yujiang, Li Jiangfeng, Gao Guodong. Reconstruction and analysis of precipitation for Xiaoquzi in the Tianshan Mountains[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(Suppl.): 8 - 11.]
- [56] 陈峰, 袁玉江, 魏文寿, 等. 天山北坡呼图壁河流域近 313 年降水的重建与分析[J]. 干旱区研究, 2009, 26(1): 130 - 135. [Chen Feng, Yuan Yujiang, Wei Wenshou, et al. Reconstruction and analysis of precipitation in the Hutubi River Basin on the Northern slope of the Tianshan Mountains during the last 313 years[J]. Arid Zone Research, 2009, 26(1): 130 - 135.]
- [57] 陈峰, 袁玉江, 魏文寿. 特克斯河流域近 236 a 降水变化及其趋势预测[J]. 山地学报, 2010, 28(5): 545 - 551. [Chen Feng, Yuan Yujiang, Wei Wenshou. Variation and prediction trend of precipitation series for the Tekes River Basin during the last 236 years[J]. Journal of Mountain Science, 2010, 28(5): 545 - 551.]
- [58] 尹红, 袁玉江, 刘洪滨, 等. 1543 - 2001 年北疆区域年降水量变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2009, 31(4): 605 - 612. [Yin Hong, Yuan Yujiang, Liu Hongbin, et al. Characteristics of the an-

- nual precipitation variation in North Xinjiang Region, China in 1543–2001 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31 (4): 605–612.]
- [59] Zhang Y, Tian Q, Gou X, et al. Annual precipitation reconstruction since AD 775 based on tree rings from the Qilian Mountains, Northwestern China [J]. *International Journal of Climatology*, 2011, 31: 371–381.]
- [60] 邵雪梅, 刘洪滨, 黄磊, 等. 青海柴达木东北部近千年来降水变化及其特征分析 [C] // 中国气象学会. 新世纪气象科技创新与大气科学发展. 北京: 中国气象学会, 2003: 3. [Shao Xuemei, Liu Hongbin, Huang Lei, et al. The precipitation change and its characteristics analysis in northeast part of Qaidam in Qinghai in recent thousand years [C] // Chinese Meteorological Society. *Meteorological Science, Technology Innovation and Atmospheric Science Development in the New Century*. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2003: 3.]
- [61] 邵雪梅, 黄磊, 刘洪滨, 等. 树轮记录的青海德令哈地区千年降水变化 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34 (2): 145–153. [Shao Xuemei, Huang Lei, Liu Hongbin, et al. 1 000-yr precipitation variations reconstructed from tree-ring data in Delingha area of Qinghai province [J]. *Science China (Ser: D): Earth Science*, 2004, 34 (2): 145–153.]
- [62] 邵雪梅, 梁尔源, 黄磊, 等. 柴达木盆地东北部过去 1 437 a 的降水变化重建 [J]. *气候变化研究进展*, 2006, 2 (3): 122–126. [Shao Xuemei, Liang Eryuan, Huang Lei, et al. A reconstructed precipitation series over the past millennium in the Northeastern Qaidam Basin [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2 (3): 122–126.]
- [63] 刘禹, 史江峰, Shishov V. 以树轮晚材宽度重建公元 1726 年以来贺兰山北部 5–7 月降水量 [J]. *科学通报*, 2004, 49 (3): 266–269. [Liu Yu, Shi Jiangfeng, Shishov V. Reconstruction of may-july precipitation since 1726 by late wood width of tree-ring in Northern Helan Mountains [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49 (3): 266–269.]
- [64] 刘禹, 安芷生, 马海州, 等. 青海都兰地区公元 850 年以来树轮记录的降水变化及其与北半球气温的联系 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36 (5): 461–471. [Liu Yu, An Zhisheng, Ma Haizhou, et al. Change in precipitation recorded by tree-ring since 850 AD in Qinghai Dulan and its correlation with temperature in the Northern Hemisphere [J]. *Science China (Ser: D): Earth Science*, 2006, 36 (5): 461–471.]
- [65] Shao X, Huang L, Liu H, et al. Reconstruction of precipitation variation from tree rings in recent 1 000 years in Delingha, Qinghai [J]. *Science China Earth Sciences Ser D*, 2005, 48: 939–949.]
- [66] 勾晓华, 邓洋, 陈发虎, 等. 黄河上游过去 1 234 年流量的树轮重建与变化特征分析 [J]. *科学通报*, 2010, 55 (33): 3 236–3 243. [Gou Xiaohua, Deng Yang, Chen Fahu, et al. Tree ring based stream flow reconstruction for the upper yellow river over the past 1 234 years [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55 (33): 3 236–3 243.]
- [67] Liu Y, Cai Q, Shi J, et al. Seasonal precipitation in the South-central Helan Mountain region, China, reconstructed from tree-ring width for the past 224 years [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35: 2 403–2 412.]
- [68] Fang K, Gou X, Chen F, et al. Drought variations in the Eastern part of Northwest China over the past two centuries: Evidence from tree rings [J]. *Climate Research*, 2009, 38: 129–135.]
- [69] Fang K, Gao X, Chen F, et al. Large-scale precipitation variability over Northwest China inferred from tree rings [J]. *Journal of Climate*, 2011, 24: 3 457–3 468.]
- [70] 黄磊, 邵雪梅, 刘洪滨, 等. 树轮记录的青海柴达木盆地过去 2 800 年来的极端干旱事件 [J]. *气候与环境研究*, 2010, 15 (4): 379–387. [Huang Lei, Shao Xuemei, Liu Hongbin, et al. A 2 800-year tree-ring record of severe sustained extreme drought events in the Qaidam Basin, Qinghai [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2010, 15 (4): 379–387.]
- [71] 魏文寿, 袁玉江, 喻树龙, 等. 中国天山山区 235 a 气候变化及降水趋势预测 [J]. *中国沙漠*, 2008, 28 (5): 803–808. [Wei Wenshou, Yuan Yujiang, Yu Shulong, et al. Climate change in recent 235 years and trend prediction in the Tianshan Mountainous area [J]. *Journal of Desert Research*, 2008, 28 (5): 803–808.]
- [72] 张录, 袁玉江, 魏文寿, 等. 1671–2006 年伊犁尼勒克地区 7–8 月降水序列的重建与分析 [J]. *冰川冻土*, 2010, 32 (5): 914–920. [Zhang Lu, Yuan Yujiang, Wei Wenshou, et al. Reconstruction and analysis of the 336-a July-August precipitation series in Nilka county, Xinjiang [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32 (5): 914–920.]
- [73] 崔宇, 袁玉江, 金海龙, 等. 乌鲁木齐河源 467 年春季降水重建与分析 [J]. *干旱区地理*, 2007, 30 (4): 496–500. [Cui Yu, Yuan Yujiang, Jin Hailong, et al. Reconstruction and analysis of 467-year spring precipitation series in the Urumqi river head [J]. *Arid Land Geography*, 2007, 30 (4): 496–500.]
- [74] 张同文, 王丽丽, 袁玉江, 等. 利用树轮宽度资料重建天山中段南坡巴仑台地区过去 645 年来的降水变化 [J]. *地理科学*, 2011, 31 (2): 251–256. [Zhang Tongwen, Wang Lili, Yuan Yujiang, et al. A 645-year precipitation reconstruction in Baluntai region on Southern slope of Mid-Tianshan Mountains based on tree-ring width [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31 (2): 251–256.]
- [75] 陈峰, 袁玉江, 魏文寿, 等. 树轮记录的甘肃山丹近 224 年降水变化 [J]. *地理与地理信息科学*, 2010, 26 (5): 82–86. [Chen Feng, Yuan Yujiang, Wei Wenshou, et al. Reconstruction of annual precipitation in Shandan based on tree-ring since 1783 A. D. [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2010, 26 (5): 82–86.]
- [76] 陈峰, 袁玉江, 魏文寿, 等. 树轮记录的伊犁地区近 354 年帕尔默干旱指数变化 [J]. *高原气象*, 2011, 30 (2): 355–362. [Chen Feng, Yuan Yujiang, Wei Wenshou, et al. Variations of long-term palmer drought index in recent 354 years in Yili based on tree-ring record [J]. *Plateau Meteorology*, 2011, 30 (2): 355–362.]
- [77] 陈峰, 袁玉江, 魏文寿, 等. 树轮记录的贺兰山北部 5–7 月 PDSI 变化 [J]. *气候变化进展*, 2010, 6 (5): 344–348. [Chen Feng, Yuan Yujiang, Wei Wenshou, et al. Long-term drought severity variations recorded in tree rings in the Northern Helan Mountains [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2010, 6

- (5):344-348.]
- [78] 张瑞波,魏文寿,袁玉江. 1396-2005年天山南坡阿克苏河流域降水序列重建与分析[J]. 冰川冻土,2009,31(1):27-33. [Zhang Ruibo, Wei Wenshou, Yuan Yujiang. A precipitation series of A. D. 1396-2005 in the Aksu river basin on the Southern slopes of the Tianshan Mountains: Reconstruction and analysis[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(1): 27-33.]
- [79] 梁尔源,邵雪梅,黄磊,等. 中国中西部地区树木年轮对20世纪20年代干旱灾害的指示[J]. 自然科学进展,2004,14(4):469-474. [Liang Eryuan, Shao Xuemei, Huang Lei, et al. Tree-ring indicator of drought disaster of Western region in the 1920s [J]. Advances in Natural Science, 2004, 14(4): 469-474.]
- [80] 董安祥,柳媛普,李晓苹,等. 黄河流域1922-1932年特大旱灾的特点及其影响[J]. 干旱气象,2009,28(3):270-278. [Dong Anxiang, Liu Yuanpu, Li Xiaoping, et al. Characteristics and influence of the extreme drought event lasting eleven years (1922-1932) in the Yellow River Valley[J]. Journal of Arid Meteorology, 2009, 28(3): 270-278.]
- [81] 丁一汇. 天气动力学中的诊断分析方法[M]. 北京:科学出版社,1989:174-199. [Ding Yihui. The Diagnosis and Analysis Method of Weather Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 1989: 174-199.]
- [82] Simmons A, Uppala S, Dee D, et al. ERA-Interim: New reanalysis products from 1989 onwards [J]. ECMWF Newsletter, 2006, 110: 26-35.
- [83] Sterl A. On the (In)homogeneity of reanalysis products [J]. Journal of Climate, 2004, 17: 3 866-3 873.
- [84] Bengtsson L, Hagemann S, Hodges K I. Can climate trends be calculated from reanalysis data? [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109: D11111.
- [85] Willett K M, Williams Jr C N, Dunn R J H, et al. HadISDH: An updateable land surface specific humidity product for climate monitoring [J]. Climate of the Past, 2013, 9: 657-677.
- [86] 蔡英,钱正安,宋敏红. 华北和西北区干湿年间水汽及东亚夏季风的对比分析[J]. 高原气象,2003,22(1):14-23. [Cai Ying, Qian Zhengang, Song Minhong. Contrast analyses on water vapor and EASM between dry and wet Years of Northwest and North China [J]. Plateau Meteorology, 2003, 22(1): 14-23.]
- [87] 俞亚勋,王劲松,李青燕. 西北地区空中水汽时空分布及变化趋势分析[J]. 冰川冻土,2003,25(2):149-156. [Yu Yaxun, Wang Jinsong, Li Qingyan. Spatial and temporal distribution of water vapor and its variation trend in atmosphere over Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 149-156.]
- [88] 任宏利,张培群,李维京,等. 中国西北东部地区春季降水及其水汽输送特征[J]. 气象学报,2004,62(3):365-374. [Ren Hongli, Zhang Peiqun, Li Weijing, et al. Characteristics of precipitation and water vapor transport during springtime in the Eastern Northwest China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2004, 62(3): 365-374.]
- [89] 黄荣辉,陈际龙. 我国东、西部夏季水汽输送特征及其差异[J]. 大气科学,2010,34(6):1 035-1 045. [Huang Ronghui, Chen Jilong. Characteristics of the summertime water vapor transports over the Eastern part of China and those over the Western part of China and their difference [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010, 34(6): 1 035-1 045.]
- [90] 黄玉霞. 西北地区大气水汽输送特征及气候转型研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2005. [Huang Yuxia. The Research on Atmosphere Vapor Transportation and Changing of Climate in Northwest China [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Sciences & Technology, 2005.]
- [91] 李霞,任宜勇,汤浩,等. 中天山及其北麓的降水变化及其原因分析[J]. 冰川冻土,2005,27(3):381-388. [Li Xia, Ren Yiyong, Tang Hao, et al. Precipitation over the middle Tianshan Mountains and their Northern slopes: Variations and their cause [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(3): 381-388.]
- [92] 王宝鉴,黄玉霞,陶健红,等. 西北地区大气水汽的区域分布特征及其变化[J]. 冰川冻土,2006,28(1):15-21. [Wang Baojian, Huang Yuxia, Tao Jianhong, et al. Regional features and variations of water vapor in Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(1): 15-21.]
- [93] 戴新刚,李维京,马柱国. 近十几年新疆水汽源地变化特征[J]. 自然科学进展,2006,16(12):1 651-1 656. [Dai Xingang, Li Weijing, Ma Zhuguo. Water vapour source variation of recent years in Xinjiang [J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(12): 1 651-1 656.]
- [94] 史玉光,孙照渤. 新疆水汽输送的气候特征及其变化[J]. 高原气象,2008,27(2):310-319. [Shi Yuguang, Sun Zhaobo. Climate characteristics of water vapor transportation and its variation over Xinjiang [J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(2): 310-319.]
- [95] Xie B, Zhang Q, Ying Y. Trends in precipitable water and relative humidity in China: 1979-2005 [J]. Journal of Applied Meteorology Climatology, 2011, 50: 1 985-1 994.
- [96] Zhao T, Dai A, Wang J. Trends in tropospheric humidity from 1970-2008 over China from a homogenized radiosonde dataset [J]. Journal of Climate, 2012, 25: 4 549-4 567.
- [97] 郭艳君,丁一汇. 1958-2005年中国高空大气比湿变化[J]. 大气科学,2014,38(1):1-12. [Guo Yanjun, Ding Yihui. China's upper atmosphere specific humidity change in 1958-2005 [J]. Atmospheric Sciences, 2014, 38(1): 1-12.]
- [98] Song Y, Liu Y, Ding Y. A study of surface humidity changes in China during the recent 50 years [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 26(5): 541-553.
- [99] Hegerl G, Zwiers F, Stott P, et al. Detectability of anthropogenic changes in annual temperature and precipitation extremes [J]. Journal of Climate, 2004, 17(19): 3 683-3 700.
- [100] Hegerl G C. Good Practice Guidance Paper on Detection and Attribution Related to Anthropogenic Climate Change. IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern [M]. Bern: Switzerland, 2010.
- [101] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

- bridge University Press, 2013.
- [102] Zhang X, Zwiers F W, Hegerl G C, et al. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends [J]. *Nature*, 2007, 448: 461 - 466.
- [103] Li J, Gou X, Cook E R, et al. Tree-ring based drought reconstruction for the central Tianshan area in Northwest China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L07715.
- [104] 黄磊, 邵雪梅. 青海德令哈地区近 400 年来的降水量变化与太阳活动 [J]. *第四纪研究*, 2005, 25 (2): 184 - 192. [Huang Lei, Shao Xuemei. Precipitation variation in Delingha, Qinghai and solar activity over the last 400 years [J]. *Quaternary Sciences*, 2005, 25 (2): 184 - 192.]
- [105] Sheppard P R, Tarasov P E, Graumlich L J, et al. Annual precipitation since 515 BC reconstructed from living and fossil juniper growth of Northeastern Qinghai province, China [J]. *Climate Dynamics*, 2004, 23: 869 - 881.
- [106] Graybill D A, Idso S B. Detecting the aerial fertilization effect of atmospheric CO₂ enrichment in tree-ring chronologies [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7 (1): 81 - 95.
- [107] Briffa K R, Schweingruber F H, Jones P D, et al. Trees tell of past climates: But are they speaking less clearly today? [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 1998, 353: 65 - 73.
- [108] 王绍武, 董光荣. 中国西部环境特征及其演变 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 49 - 61. [Wang Shaowu, Dong Guangrong. *Environment Characteristics and Evolution in the West of China* [M]. Beijing: Science Press, 2002: 49 - 61.]
- [109] Trenberth K E. Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change [J]. *Climatic Change*, 1999, 42: 327 - 339.
- [110] Trenberth K E, Dai A, Rasmussen R M, et al. The changing character of precipitation [J]. *National Center for Atmospheric Research*, 2003, 84: 1 205 - 1 217.
- [111] Dai A. Recent climatology, variability, and trends in global surface humidity [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19: 3 589 - 3 606.
- [112] Feng L, Zhou T J, Wu B, et al. Projection of future precipitation change over China with a high-resolution global atmospheric model [J]. *Advances in Atmospheric Science*, 2011, 28 (2): 464 - 476.
- [113] 许吟隆, 薛峰, 林一华. 不同温室气体排放情景下中国 21 世纪地面气温和降水变化的模拟分析 [J]. *气候与环境研究*, 2003, 8 (2): 209 - 217. [Xu Yinlong, Xue Feng, Lin Yihua. Changes of surface air temperature and precipitation in China during the 21st century simulated by HadCM2 under different greenhouse gas emission scenarios [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2003, 8 (2): 209 - 217.]
- [114] 胡汝骥, 马虹, 樊自立, 等. 新疆水资源对气候变化的响应 [J]. *自然资源学报*, 2002, 17 (1): 22 - 27. [Hu Ruji, Ma Hong, Fan Zili, et al. Response of water resources to climate change in Xinjiang [J]. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17 (1): 22 - 27.]
- [115] Li Z Q, Li H L, Chen Y N. Mechanisms and simulation of accelerated shrinkage of continental glaciers: A case study of Urumqi Glacier No. 1 in Eastern Tianshan, Central Asia [J]. *Journal of Earth Science*, 2011, 22 (4): 423 - 430.
- [116] Xu B, Cao J, Hansen J, Yao T, et al. Black soot and the survival of Tibetan Glaciers [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106: 22 114 - 22 118.
- [117] Ming J, Xiao C, Cachier H, et al. Black carbon (BC) in the snow of Glaciers in West China and its potential effects on albedos [J]. *Atmospheric Research*, 2009, 92 (1): 114 - 123.
- [118] Wang X, Doherty S, Huang J. Black carbon and other light-absorbing impurities in snow across Northern China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, 118: 1 471 - 1 492.
- [119] 张国飞, 李忠勤, 王文彬, 等. 乌鲁木齐河源 1 号冰川 2009 年出现物质正平衡 [J]. *干旱区地理*, 2013, 36 (2): 263 - 268. [Zhang Guofei, Li Zhongqin, Wang Wenbin, et al. A positive mass balance appeared at Urumqi Glacier No. 1 in 2009 [J]. *Arid Land Geography*, 2013, 36 (2): 263 - 268.]
- [120] 杨青, 何清. 塔里木河流域下游的气候变化与生态环境 [J]. *新疆气象*, 2000, 23 (3): 11 - 14. [Yang Qing, He Qing. Relationship between climate change and ecological environment in the lower reaches of the Tarim River Basin [J]. *Xinjiang Meteorology*, 2000, 23 (3): 11 - 14.]
- [121] 杨青, 何清. 西天山山区气候变化与灌区绿洲气候效应 [J]. *冰川冻土*, 2003, 25 (3): 336 - 341. [Yang Qing, He Qing. Climate change in the Western Tianshan Mountainous and climate effect of oasis [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25 (3): 336 - 341.]
- [122] 任国玉, 郭军. 中国水面蒸发量的变化 [J]. *自然资源学报*, 2006, 21 (1): 31 - 44. [Ren Guoyu, Guo Jun. Change in pan evaporation and the influential factors over China: 1956 - 2000 [J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21 (1): 31 - 44.]
- [123] 高歌, 陈德亮, 任国玉, 等. 1956 - 2000 年中国潜在蒸散量变化趋势 [J]. *地理研究*, 2006, 25 (3): 378 - 387. [Gao Ge, Chen Deliang, Ren Guoyu, et al. Trend of potential evapotranspiration over China during 1956 - 2000 [J]. *Geographical Research*, 2006, 25 (3): 378 - 387.]
- [124] 姚俊强, 杨青, 赵玲. 全球变暖背景下天山地区近地面水汽变化研究 [J]. *干旱区研究*, 2012, 29 (2): 320 - 327. [Yao Junqiang, Yang Qing, Zhao Ling. Research on change of surface water vapor in the Tianshan Mountains under global warming [J]. *Arid Zong Research*, 2012, 29 (2): 320 - 327.]
- [125] 文莉娟, 吕世华, 孟宪红, 等. 夏季绿洲气候效应的观测和数值模拟 [J]. *气候与环境研究*, 2008, 13 (3): 300 - 308. [Wen Lijuan, Lv Shihua, Meng Xianhong, et al. Observation and numerical simulation of microclimate of oasis in summer [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2008, 13 (3): 300 - 308.]
- [126] 任国玉, 封国林, 严中伟. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望 [J]. *气候与环境研究*, 2010, 15 (4): 337 - 353. [Ren Guoyu, Feng Guolin, Yan Zhongwei. Progresses in observational studies of climate extremes and changes in mainland China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2010, 15 (4): 337 - 353.]
- [127] 张同文, 袁玉江, 魏文寿, 等. 阿勒泰西部过去近 600 年夏季气候变化及未来 10 年趋势预估 [J]. *干旱区资源与环境*, 2011,

25(7):84–90. [Zhang Tongwen, Yuan Yujiang, Wei Wenshou, et al. The summer climatic variations in the Western Aletai region, Xinjiang during the last 600 years and the trend prediction for the next 10 years [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environ-*

ment, 2011, 25(7):84–90.]

[128]任国玉. 气候变化与中国水资源[M]. 北京:气象出版社, 2007:314. [Ren Guoyu. *Climate Change and Water Resources of China*[M]. Beijing:China Meteorological Press, 2007:314.]

Changes in Precipitation over Northwest China

REN Guo-yu¹, YUAN Yu-jiang², LIU Yan-ju¹, REN Yu-yu¹, WANG Tao^{1,3}, REN Xiao-yu¹

(1. *Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, CMA, Beijing 100081, China;*

2. *Institute of Desert Meteorology, CMA, Urumqi 830002, Xinjiang, China;*

3. *Department of Atmospheric Science, School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)*

Abstract: This paper synthesizes and updates the analyses on precipitation change in Northwest China previously reported by Chinese researchers, and discusses about the possible causes for the observed trends in precipitation. Annual precipitation in the region has been found to increase over the past half a century, with the increase in western part of the region more significant. The last decade witnesses a further rise in annual precipitation compared to 1990s. Analyses using tree-ring data from a few sites show that the increase of precipitation since the beginning of 1980s might have been unprecedented in terms of the last 2 centuries; however, more reconstructions using tree-ring data from across the region indicate that the present precipitation might not have been so abnormal for the past centuries because larger than present precipitation ever appeared in a few of decades in history. Considering the observed and proxy data in combination, it is not unlikely that the evident increase in annual or seasonal precipitation over the last decades might have been the consequence of natural climate variability on decadal to multi-decadal time scales. Updated analysis of the net moisture budget and precipitable water using NCEP and ERA reanalysis data shows that no significant increase in moisture transport into the region across the western, southern and northern boundaries, and the significant increase in net moisture flux are mainly due to the large decline of moisture transport out of the region across the eastern boundary, during the time period 1979–2012. This implies that the observed increase in precipitation in the region might not have been explained as a response to global warming, in spite of the fact that almost all climate models driven by the increased CO₂ concentration in atmosphere for both past and future have produced the upward precipitation trends consistent with observations, indicating that the probability that the increased precipitation in the region is a response to anthropogenic global warming is larger as compared to the other regions of the country including North China. On the other hand, evidences are accumulating that the expanded irrigation areas in Oasis and cities in Northwest China have caused the increase in actual evaporation, resulting in the increase in atmospheric moisture and precipitation observed at the meteorological stations. Accelerated melting of the mountainous glacial due to regional climate warming and the black carbon deposition on ice and snow surface, and the resulting rise of lake water levels might have provided extra moisture into local atmosphere. The paper also makes a first-order projection of precipitation in 2–3 decades to come. It is estimated that annual and summer precipitation in Oasis and cities of Northwest China will be likely to increase assuming the enhanced human activities and urbanization. This will not rule out the possibility that natural climate variability on multi-decadal scales will dominate the precipitation trends for the coming 2–3 decades, and will make the locally anthropogenic increase of precipitation less evident for certain places and time periods.

Key words: climate change; precipitation; tree-ring; moisture flux; human activity; natural variability; projection; arid region; Northwest China