西北地区气候湿化趋势的新特征

张强^{1,2}, 朱飙³, 杨金虎^{4*}, 马鹏里⁴, 刘晓云¹, 卢国阳⁴, 王有恒⁴, 于海鹏⁵, 刘卫平⁴, 王大为⁴

1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730020;

2. 甘肃省气象局, 兰州 730020;

3. 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000;

4. 兰州区域气候中心, 兰州 730020;

5. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 中国科学院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 兰州 730000

* 联系人, E-mail: yjh740701@sina.com

2020-10-28 收稿, 2021-03-30 修回, 2021-03-31 接受, 2021-04-01 网络版发表

国家自然科学基金(41630426, 41975016, 42075043)、中国气象局气候变化专项(CCSF201913, CCSF202010)和甘肃省基础研究创新群体项目(20JR5RA121)资助

摘要 21世纪初有研究提出西北气候暖湿化,但由于当时变湿时段短、变幅小,对此观点有不少存疑,并且对暖湿化的趋势发展、持续时间及影响程度等问题缺乏明确结论.本研究通过构建变湿综合指数,利用多元数据,系统分析了西北暖湿化的时空特征.研究表明,在百年尺度上,西北西部和东部温度均经历了20世纪40年代和60年代至今的两个增暖期,且当前的暖期更强;西部与东部的降水在很多时期呈跷跷板变化,但21世纪开始西部与东部同时进入增湿期.1961年以来西北西部基本为一致变湿趋势,1987年以来更为显著;而东部在1961~1997年呈干化趋势,1997年也转为湿化趋势.西部的温度、降水和干燥度变化一致性较好,大多时段以冷干和暖湿为主;而东部变化的一致性较差,21世纪之前很少出现暖湿时段,直至21世纪暖湿配置才较为频繁.西北地区温度呈现空间一致的增加特征,且变暖程度逐渐增强;降水则呈西增东减的空间变化,但西增东减的分界线近3个气候态时段以来持续东扩.西北地区降水、干燥度和变湿综合指数均表现为非线性增强,变湿的增强、东扩特征显著,21世纪以来尤为突出.不过,当前气候暖湿化并没有改变基本的气候形态,但如果未来气候趋势持续当前的增强特征,对基本气候形态的改变并非没有可能.气候变湿的增强、东扩特征可能是21世纪以来西风环流和东亚夏季风环流协同增强作用的结果.

关键词 西北地区, 暖湿化趋势, 变湿综合指数, 增强与东扩

西北地区地处欧亚大陆腹地,远离海洋,加之青藏高原大地形作用,使其成为全球最主要的干旱半干旱区之一,在全球气候环境系统中占据着极为重要的地位^[1,2].同时,该地区也是“一带一路”建设的主要区域和黄河流域上游汇流区,其气候变化的影响不仅事关“一带一路”建设的生态安全、水资源安全以及自然灾害风险等问题,而且直接关乎黄河流域生态保护和高质量

发展大计.因此,长期以来西北地区气候变化一直是国内外科学界和我国政府高度关注的重点科学问题^[3~5].

而且,由于西北地区气候干燥、水资源短缺及植被稀少,它既是全球典型的生态环境脆弱区,又是全球气候变化响应敏感区.其生态环境、水资源及社会经济发展不仅受区域气候变化影响十分明显,而且区域

引用格式: 张强, 朱飙, 杨金虎, 等. 西北地区气候湿化趋势的新特征. 科学通报, 2021, 66: 3757~3771

Zhang Q, Zhu B, Yang J H, et al. New characteristics about the climate humidification trend in Northwest China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 3757~3771, doi: [10.1360/TB-2020-1396](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1396)

气候对全球气候变暖的响应也非常显著. 尤其是降水的变化程度, 自人类历史以来就决定着该地区的社会兴衰和人类文明进程. 有研究表明^[6], 西北地区自19世纪末的小冰期结束以来一直呈波动性暖干化趋势, 至20世纪80年代天山和祁连山的气温已分别上升了1.3和1.0°C, 降水分别减少了50~65和70~85 mm. 即使在1951~1989年间, 西北地区降水仍然呈减少趋势^[7]. 所以, 20世纪众多研究一直认为西北地区当代气候总体呈暖干化趋势^[8~10], 这也被同期的冰川快速消退、植被和绿洲明显退化、湿地不断消失以及湖泊面积显著减小等自然环境的变化所印证^[11].

然而, 21世纪初有学者发现^[12], 自20世纪80年代中后期以来西北地区径流量持续增加, 湖泊水位显著上升, 植被覆盖明显改善, 洪水灾害不断加重. 由此, 施雅风等人^[13,14]推断, 西北地区气候可能正在发生从暖干向暖湿转型, 而且西部地区已经开始转型. 随后, 有研究发现自20世纪80年代中后期开始西北地区西部降水存在一定程度的增加, 但东部降水仍在继续减少^[15,16]. 也就是说, 西北西部气候转为暖湿化, 而东部仍然为暖干化. 施雅风等人^[13,14]提出的气候转型观点曾一度引起了社会各界的高度关注.

不过, 由于当时观测数据表现出的降水增加时段较短, 增幅较小, 很难直接判定为一种气候转型趋势^[16,17]. 并且, 从温度升高引起的蒸散增加与降水增加的水分平衡看, 似乎只在部分地方才出现变湿迹象, 不少地方仍在变干^[17]. 所以, 一直以来学术界对西北气候是否出现了暖湿转型缺乏足够共识^[18], 而且对于这种暖湿化趋势持续时间及其影响范围和强度均缺乏科学判断^[17]. 关于西北地区气候暖湿化的影响, 认识上也比较模糊, 更多局限在表面现象的定性讨论. 特别是, 对西北地区暖湿转型的成因和机制认识还十分有限. 有研究认为是气候变暖造成水循环加快所造成^[14], 这虽然从简单推理上有一定合理性, 但缺乏足够有说服力的科学证据. 更何况, 国际上从陆-气相互作用角度普遍认为, 在气候变暖背景下全球干旱的区域会更干, 湿润的区域会更湿^[19]. 而且, 历史数据也显示, 过去100年全球干旱区越来越干^[20,21], 干旱面积持续扩张^[22~24], 干旱地区的重大干旱事件日趋频繁^[25]. 为何唯独我国西北干旱区会出现与全球其他干旱区相反的趋势呢?

事实上, 有研究认为气候变暖引起的温度升高与降水的关系远比我们想象的复杂. 其中, Rehfeld和

Laepple^[26]认为温度与降水在不同时间尺度上具有不同的响应关系, 在年际和年代尺度上是暖干匹配, 而在更长时间尺度上可能是暖湿匹配. Ljungqvist等人^[27]还认为温度与降水的匹配关系与地域有关, 在同一时期有些区域是暖干匹配, 而另外一些区域可能是暖湿匹配. 我国西北地区由于横跨东亚夏季风北边缘线, 天气气候同时受东亚夏季风、西风带和高原系统影响, 其降水影响机制会更加复杂^[28], 并不是用简单的温湿匹配关系就能够概括的, 许多问题需要更深入的科学探讨.

鉴于此, 本研究试图针对先前研究提出的西北气候暖湿化转型观点, 利用更长和更全面的资料, 系统分析西北地区暖湿化的时空演变特征, 了解西北气候暖湿化趋势的强度和范围变化. 研究这种暖湿化趋势的时空尺度特征, 探讨西北气候暖湿化的主要成因以及对极端天气、生态环境和水资源的影响程度. 进而为区域发展相关规划的制订提供决策参考.

1 研究区域及资料和方法

1.1 研究区域

本研究区域为我国西北地区全域(图1), 该地区地处欧亚大陆腹地和青藏高原东北部, 主要由干旱区、半干旱区以及青藏高原的边缘高寒地带所构成. 夏季风北边缘线自西南向东北从该地区穿插而过, 很自然将该区域分割为西部和东部两个气候区, 西部是西风带影响区, 东部是季风影响区, 南北一定程度受高原季风影响. 总体而言, 西部基本为干旱气候区, 而东部基本为半干旱气候区, 南部基本为高寒地区. 不过, 如图1所示, 我国夏季风北边缘线年际摆动比较明显, 夏季风强年向西北推进, 夏季风弱年向东南撤退. 所以, 西北地区西部和东部的区分并不是绝对的, 其分界线具有一定弹性, 随着夏季风强弱变化气候环境和生态植被

图1 研究区示意图
Figure 1 The sketch map of research area

的空间分布也会随之调整^[29]。一般情况,用多年平均的夏季风北边缘线来划分西北地区东、西部。

本研究所用资料包括西北地区常规气象观测数据、百年序列温度和降水格点数据、未来情景预估数据以及西北地区相关生态和水文数据等。

其中,西北地区常规气象观测数据来自国家气象信息中心,包括1961~2018年122个气象台站逐日平均气温、最高气温、最低气温、降水量、风速、相对湿度和日照时数等常规气象要素资料。温度与降水资料已经过质量控制和均一化订正处理^[30],并已在大量研究中被广泛使用^[31]。

百年序列格点数据来自英国东安哥拉大学气候研究中心(Climatic Research Unit, CRU)最新数据集^[32-34]。该资料在气象台站观测数据基础上,扩充了新的数据源,并在人工和半自动质量控制之后,通过相关性衰减范围内的插值获得了整个陆地表面降水、温度等主要气象变量。这套数据集除了在极低、海洋或高原等地区外,偏差比较小^[35]。本研究选取1901~2018年 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 高分辨率月平均资料,并将该资料双线性插值到了122个气象观测站点。闻新宇等人^[36]曾用1951~2000年全国160个气象台站观测资料与CRU温度和降水资料进行对比分析,发现CRU资料总体来说在我国具有很好的可靠性。本工作通过对研究区域观测时间较长的4个代表站(图1)观测资料与CRU同期资料对比检验发现(图S1),CRU资料与观测资料虽然绝对数值存在一定的偏差,但二者具有很好的相关性,对西北气候变化趋势的定性分析有较好可信度。此外考虑到该资料在1901~1920年缺测较多,因此本研究分析起始时间为1921年。

未来气候情景预估数据采用中等排放情景(SSP2-RCP4.5)下CMIP6 13个气候模式逐月的多模式集合数据^[37],时段为2015~2099年,并将集合模式的格点数据插值到了122个气象台站上(<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>)。同时,为了提高CMIP6多模式集合数据在西北地区的适用性,图S2对2015~2018年逐月的CMIP6多模式集合数据分别与西北地区西部和东部的观测数据进行了相关性对比分析,发现两者具有很好的相关性。但CMIP6多模式集合温度略小于观测值,而降水则明显大于观测值。为了使观测数据与未来预估保持连续性,用2015~2018年逐月的CMIP6多模式集合数据与观测数据之间的线性拟合公式分别对2019~2099年西北地区西部和东部的逐月CMIP6多模

式集合温度和降水数据进行了偏差订正:

$$T_w = 0.97 \times t_{wy} + 1.19, \quad (1)$$

$$T_E = 0.93 \times t_{ey} + 2.17, \quad (2)$$

$$P_w = 0.69 \times p_{wy} - 4.94, \quad (3)$$

$$P_E = 0.68 \times p_{ey} - 6.32, \quad (4)$$

其中, T_w 、 T_E 、 P_w 、 P_E 分别为CMIP6多模式集合温度和降水在西北地区西部和东部的订正值,单位分别为 $^{\circ}\text{C}$ 和 mm ; t_{wy} 、 t_{ey} 、 p_{wy} 、 p_{ey} 分别为西北地区西部和东部CMIP6多模式集合温度和降水的原始值,单位分别为 $^{\circ}\text{C}$ 和 mm 。

西北地区相关湖泊水文资料来源于USGS(United States Geological Survey, <http://glovis.usgs.gov>),生态植被数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/DOI>)和GIMMS(Global Inventory Modeling and Mapping Studies)发布的第三代全球覆盖NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)产品数据集(NDVI 3g),径流数据来自当地水文部门。

1.2 研究方法

1.2.1 变湿指数

以往更多时候仅以区域平均降水的增加或减少简单、笼统地表述变湿趋势,有时也用降水距平的变化来表示变湿程度,但西北地区降水空间差异很大,简单用降水增幅或距平的变化来衡量变湿程度显然不太恰当。若要定量、客观地表述变湿特征,首先必须科学准确地表征变湿程度,为了能够统一度量不同降水气候背景下的变湿程度,这里定义了以下变湿强度指数:

$$WII = 1 / n \left[\sum_{i=1}^n (PAD_{ij} / PAV_i) \right], \quad (5)$$

其中, WII 是变湿强度指数, PAD_{ij} 和 PAV_i 分别是指定时段 j 内站点的降水增加量和多年平均降水量,单位为 mm , i 是时间序列, n 为总站点数。 WII 越大,说明特定时段变湿强度越大。

除了变湿的强度外,发生变湿的范围也是衡量变湿程度的重要指标,为此我们也定义了以下变湿面积指数:

$$WAI = WA_j / SA, \quad (6)$$

其中, WAI 为变湿面积指数, WA_j 和 SA 分别为指定时段 j 内变湿区域面积和研究区域总面积。 WAI 越大,说明特

定时段变湿范围越大。

当然, 变湿强度指数(WII)和 WAI 都只是从不同角度表征了变湿的程度。为了能够更有效地表征综合变湿程度, 这里结合两变湿指数定义了以下变湿综合指数:

$$WSI = WAI \times WII, \quad (7)$$

其中, WSI 是变湿综合指数, WSI 越大, 说明区域内特定时段变湿程度越明显, 反之亦然。

1.2.2 干燥度指数

干燥度指数是在考虑温度对蒸散影响的基础上来表征气候干湿程度, 本研究采用马柱国和符淙斌^[38]定义的干燥度指数(式(8)), 它已在气候变化研究中被广泛应用^[39]:

$$AI = P/PET, \quad (8)$$

其中, AI 是干燥度指数, 为无量纲数; P 和 PET 分别是年平均降水量和年潜在蒸发量, 单位均为mm。 PET 采用了已被广为认可的Penman-Monteith模型^[40]计算所得。利用该干燥度指数将气候干湿程度划分为极端干旱区($AI < 0.03$)、干旱区($0.03 \leq AI < 0.2$)、半干旱区($0.2 \leq AI < 0.5$)、半湿润区($0.5 \leq AI < 1$)、湿润区($AI \geq 1$)5种类型^[41]。

1.2.3 东亚夏季风指数和西风指数

目前, 有许多表示东亚夏季风活动的指数^[42], 本研究采用Wang和Fan^[43]建立的东亚夏季风指数:

$$MI = U_{850}(5^\circ \sim 15^\circ \text{N}, 90^\circ \sim 130^\circ \text{E}) - U_{850}(22.5^\circ \sim 32.5^\circ \text{N}, 110^\circ \sim 140^\circ \text{E}), \quad (9)$$

这里 MI 是东亚夏季风指数, U 是850 hPa平均纬向风, 单位为m/s。目前许多研究都用这个指数^[28]。

西风指数又称罗斯贝指数, 对其也有许多表征方式^[44,45], 本研究采用李万莉等人^[46]给出的区域西风指数:

$$WI = \frac{1}{17} \left[\sum_{\lambda=1}^{17} H(\lambda, 35^\circ \text{N}) - \sum_{\lambda=1}^{17} H(\lambda, 50^\circ \text{N}) \right], \quad (10)$$

式中, WI 为区域西风指数, H 为沿 35° 和 50°N 纬向平均的500 hPa高度场, 单位为gpm; λ 为沿纬圈取定的经度数, 间距为 2.5° 。

鉴于西北地区降水受东亚夏季风环流和西风环流的协同影响, 这里定义了以下环流综合指数:

$$I_{\text{cmw}} = MI + WI, \quad (11)$$

式中, I_{cmw} 为环流综合指数, MI 和 WI 分别为标准化东亚夏季风指数和西风指数。

2 结果分析

2.1 气候变化趋势特征及其温湿配置关系

要客观认识气候变化特征, 必须从较长时间变化过程来洞察其规律性。目前西北地区虽然有一些数百年甚至千年时间长度的树木年轮和冰芯等代用资料, 但它们对整个区域的空间代表性及年际和年代际时间尺度变化的分辨率还存在较大差距^[47]。目前, 时间序列超过100年的CRU高分辨格点资料是认识西北地区百年尺度气候变化特征相对可信的资料。

从图S3给出的近百年来西北西部温度、降水与东部温度、降水逐9年滑动平均变化特征看出, 百年以来西北西部和东部温度在不同时间尺度上的变化大体比较一致, 均经历了20世纪40年代及60年代持续至今的两个暖期, 似乎在全球气候变暖的大趋势中叠加了两个年代际尺度的自然变暖期, 只是最近一个变暖期由于时间较长、增幅较大而掩盖了温度的自然震荡。此外, 就两个暖期而言, 西部较东部前一个暖期更短、更弱, 后一个暖期更长、更强。

百年以来西北西部与东部的降水量变化似乎并不同步, 很多时候呈现跷跷板变化特征, 西部在20世纪20~80年代前期一直处于干期, 近30年来一直处于湿期; 而东部干、湿交替循环, 且在20世纪20~80年代前期湿期较干期更长, 近30年来的干期较湿期更长。不过在西部, 当前的湿期仍处于正在推进的过程中。近年来, 东部也进入湿期。西部当前湿期的年代尺度平均降水量似乎已经超过了百年以来的所有湿期, 而东部当前湿期的年代尺度平均降水量还明显低于百年以来的多数湿期, 这说明西北西部与东部干湿特征的差异性非常明显。不过相比其他时期, 西部与东部跷跷板变化特征所不同的是, 21世纪初以来西部与东部都正在变湿。

实际上, 我国在20世纪50~60年代已建立起技术上全面、可靠、完善的地面气象观测系统。所以下面用目前普遍认为在时空分辨率上更为可靠的近60年实测数据^[31], 来更准确详细地了解最近一个显著暖期和湿期气候变化的定量特征及其温湿配置关系。

从图2给出的1961~2018年西北西部和东部温度与降水量的逐年变化可以看出, 1961年以来西部与东部温度基本为一致的变化特征, 线性增温倾向率分别为

0.331和0.319°C/10 a, 西部略大于东部, 且均在20世纪80和90年代增温较快, 而从2005年开始增温似乎有所趋缓, 与全球变暖特征基本相似^[48]。

从降水变化来看, 西北西部1961年以来基本一直呈增加趋势。不过, 在1986年之前增加较缓慢, 变化率为2 mm/10 a; 而从1987年开始增加显著, 变化率为10 mm/10 a, 但近30多年来累计仅增加了约35 mm降水。西北东部在1997年前一直呈现减少趋势, 线性倾向率为-19 mm/10 a; 但从1997年以来开始转为增加趋势, 其线性倾向率为57 mm/10 a, 近20年来累计已增加约100 mm降水。尤其值得注意的是, 无论西部还是东部, 近20年来降水都呈现非线性加速增加特征, 气候变湿趋势在显著增强。

考虑了温度和降水协同作用的干燥度指数与降水基本保持了一致的变化特征(图2(e), (f)), 这也充分反映了近60年来的干湿变化及近20年来的非线性加速变湿特征。

从长时间尺度讲, 温度与降水的自然变化一般会表现出一定的配置关系, 即暖期一般对应湿期。但在年际等较短时间尺度上温度与降水的配置关系比较复杂, 尤其在人类活动促动的变暖背景下与温度自然变化的机制也不相同。从图3给出的1961~2018年西北西部和东部逐年温度距平与降水距平的配置关系可以看出, 西北西部与东部的温度与降水配置关系差别较大。在西部, 年际之间多以暖湿和冷干配置为主, 而冷湿和暖干配置相对较少, 温度与降水变化保持了较好的一致性。而在东部, 冷湿和暖干配置最多, 暖湿配置最少, 温度与降水变化的一致性较差, 只是从21世纪开始才出现暖湿配置。总体上, 温度与降水变化的配置关系在21世纪之前的40年, 西部与东部基本呈相反的关系, 而从21世纪开始温度与降水的配置关系基本趋同。

具体而言, 西北西部20世纪60和70年代基本为冷干配置, 20世纪80年代冷干与冷湿配置相当, 20世纪90年代开始出现暖湿配置, 21世纪初暖干和暖湿相当, 21世纪10年代基本为暖湿配置; 而东部20世纪60和80年代主要为冷干和冷湿配置, 20世纪70年代基本为冷湿配置, 20世纪90年代以暖干配置为主, 21世纪初开始出现暖湿配置, 而21世纪10年代基本暖湿配置。无论西部还是东部温度与降水年际变化配置关系的年代际差异比较明显, 不过从21世纪初开始都转为暖湿配置。

我们推测, 西北西部与东部温度和降水配置关系的差异可能是温度与降水相互影响的主导作用不同所

致。西部由于降水相对偏少, 降水对温度的影响比较有限; 而温度波动比较明显, 它不仅可通过大气热力过程影响大气饱和水汽压和大尺度环流, 而且还可通过陆面过程影响局地水分循环, 从而对降水产生较明显影响, 使得温度与降水变化保持了较好的一致性。而东部降水相对偏多, 降水不仅可以通过陆面过程的蒸发对温度起到冷却作用, 而且还可以通过增加的云量对太阳辐射遮挡作用来降低温度, 从而对温度产生较明显作用, 使得温度与降水变化很多时候呈现相反的变化关系。不过, 也许是持续的增温, 使得21世纪初开始情况变得更为复杂, 温度的先导作用更为突出, 西部和东部均体现为以温度影响降水的模态^[49]。

事实上从图2也可以发现, 在人类活动促动的变暖背景下, 西部地区温度的主导作用使得降水长期趋势变化特征明显, 而东部地区降水的主导作用使得温度变化也表现出较西部相对明显的年代际振荡^[50], 当然东部地区降水的显著年代际振荡可能与东亚夏季风、太平洋年代际振荡(PDO)、大西洋年代际振荡(AMO)等多个大尺度大气和海洋的模态有关^[28,51,52]。

2.2 当前气候暖湿化趋势的动态特征

在总体趋势下, 区域气候变化必然会存在一定的空间差异性, 西北地区也是如此。为了发现近60年来西北西部和东部温度和降水变化的空间差异性, 图S4给出了1961~2018年西北西部与东部不同站点温度和降水线性倾向率的正态分布曲线。可以看出, 西部和东部温度线性倾向率的正态分布特征基本一致, 全部分布在正值范围内, 即区域都呈一致增温, 增温率主要集中在0.32°C/10 a附近, 东部略小于西部。

不过西部与东部的降水线性倾向率正态分布特征差异明显, 西部降水线性倾向率在绝大多数范围为正值即增湿区域, 增湿率主要集中在8.2 mm/10 a附近, 仅有5.6%的区域为负值即变干区域。而东部降水线性倾向率在大部分范围(72.7%)为负值即变干区域, 变干率主要集中在-4.3 mm/10 a附近。

值得注意的是, 虽然西部的变干区域非常少, 但东部仍然有将近30%为变湿区域。这说明西北西部与东部干湿呈跷跷板变化^[28]的气候格局是相对的, 变湿区域会跨越传统夏季风北边缘线向东扩展, 也许这是在气候变化背景下不断演化的动态过程。

为了进一步认识西北地区冷、暖与干、湿范围的动态变化过程, 需要从西北地区整体视野来分析温度

图 2 1961~2018年西北西部和东部温度(a, b)、降水(c, d)和干燥度指数(e, f)年际变化曲线. 线条为趋势拟合线

Figure 2 The inter-annual change of temperature (a, b), precipitation (c, d) and aridity index (e, f) from 1961 to 2018 in western and eastern Northwest China respectively. The line represents trend fitting

图 3 1961~2018年西北西部(a)和东部(b)逐年温度距平与降水距平配置关系

Figure 3 Configuration relationship between annual temperature anomaly and precipitation anomaly in western (a) and eastern (b) of Northwest China from 1961 to 2018

和降水线性倾向率空间分布的阶段演化特征. 由于气候态一般是按照30年平均值来衡量. 为此, 图4给出了西北地区1961~1990、1971~2000、1981~2010和1991~2018年4个气候态时段温度线性倾向率的空间分布. 很显然, 除了极少部分站点温度线性倾向率为负值即降温外, 4个气候态时段几乎整个区域温度线性倾向率均为正值, 即呈一致的增温特征. 4个时段温度线性倾向率为负值的范围分别为12.3%、2.5%、1.6%、4.1%, 倾向率在 $0\sim 0.5^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的范围分别为86.1%、

83.5%、38.6%、66.4%; 倾向率大于 0.5°C 的范围分别为1.6%、14.0%、59.8%、29.5%. 可见, 4个时段温度线性倾向率均主要分布在 $0\sim 0.5^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$.

从图S5给出的西北地区逐气候态时段温度线性倾向率概率的正态分布可以看出, 4个时段温度线性倾向率基本在正值范围, 并且分别依次集中在0.16、0.34、0.53、 $0.39^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$. 无论从概率曲线分布范围还是从集中分布的峰值大小来看, 除了1991~2018年时段的增暖强度弱于1981~2010年时段外, 1961~1990、

图4 西北地区1961~1990(a)、1971~2000(b)、1981~2010(c)和1991~2018年(d)4个气候态时段温度线性倾向率的空间分布. 单位: $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$
 Figure 4 Spatial distribution of linear tendency rate of temperature in Northwest China during 1961–1990 (a), 1971–2000 (b), 1981–2010 (c) and 1991–2018 (d). Unit: $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$

1971~2000和1981~2010年3个气候态时段的增暖程度都表现为逐时段增强特点. 而最近一个气候态时段较1981~2010年增温幅度偏弱, 这可能是对全球变暖减缓的响应, 当然仍然强于其他时段. 因此, 总体来看, 1961年以来西北地区变暖趋势呈增强特征.

然而, 降水的情况远没有温度那么简单. 从图5给出的西北地区1961~1990、1971~2000、1981~2010和1991~2018年4个气候态时段降水线性倾向率的空间分布可以看出, 虽然空间差异比较明显, 但也表现出了一定的规律性. 前3个时段基本上西部降水线性倾向率以正值为主即以变湿为主, 而东部以负值为主即以变干为主. 但正值与负值的分布范围是动态变化的. 从图5(e)给出的西增东减分界线演化可以看出, 与1961~1990年时段的东西增东减分界线相比, 1971~2000年时段的分界线明显西撤, 但之后的1981~2010和1991~2018年两个时段分界持续东扩, 且1991~2018年已经东扩至西北全境, 即整个西北地区基本转为一致的变湿趋势. 因此, 近3个气候态时段西北地区变湿范围呈逐时段东扩特征, 最近一个时段表现得尤为突出. 通过图S6四个不同时段降水线性倾向率概率正态分布曲线对比, 对此会有更清楚的认识.

为了定量表征西北地区变湿程度的演变特点, 图6

给出了观测及未来逐气候态时段WAI、WII以及WSI变化特征. 可见, WAI、WII及WSI过去4个气候态时段的变化均呈“V”形特征, 即从1961~1990年到1971~2000年变湿面积显著减小, 变湿强度显著减弱, 整体显著变干; 而从1971~2000年到1981~2010年再到1991~2018年, 变湿面积依次增大, 变湿强度和整体变湿特征均依次增强.

总体来看, 近3个气候态时段以来西北地区变湿增强、东扩征兆明显, 特别是从1981~2010年到1991~2018年变湿面积增大及变湿强度和整体变湿特征增强的程度均明显加剧, 变湿的增强、东扩征兆更为显著.

尽管当前西北地区气候暖湿化趋势明显, 且变湿增强、东扩征兆显著, 但从图S7中给出的变湿开始前气候态时段(1971~2000年)与当前气候态时段(1991~2018年)干燥度指数空间分布对比来看, 虽然1991~2018年的干燥度等值线与1971~2000年的有所变化, 但变化的范围非常有限. 从干燥度指数划分气候区的标准来看, 1991~2018年时段较1971~2000年时段干旱区范围有所缩小, 半湿润区范围有所扩大, 但变化范围均很小, 还远远没有达到改变气候格局的程度.

图5 西北地区1961~1990(a)、1971~2000(b)、1981~2010(c)和1991~2018年(d), 4个气候态时段降水线性倾向率的空间分布以及西增东减分界线(e)(mm/10 a)

Figure 5 Spatial distribution of precipitation linear tendency rate during 1961–1990 (a), 1971–2000 (b), 1981–2010 (c), and 1991–2018 (d), and the dividing line of West increase and East decrease in different periods (e) in Northwest China (mm/10 a)

2.3 未来30年气候湿化趋势

虽然西北地区当前的湿化趋势未能改变气候格局,但我们还需从长远考虑,尽可能预判未来变化趋势及对气候格局的影响程度。

图6还可以表明,如果仅仅考虑降水,西北地区未来变湿面积将继续扩大,未来30年整个区域一致呈变湿趋势^[53],变湿强度继续增强,整体继续呈变湿趋势。但同1981~2010年到1991~2018年时段的变湿程度相比,1991~2018年到2021~2050年逐气候态时段的变湿趋势明显放缓,即未来30年变湿增强的速率有所减缓。

如果考虑降水与温度协同作用,西北地区未来30年是否会继续变湿?图7给出西北西部和东部CMIP6中等排放情景下,干燥度指数集合模式预估、按照当前

趋势的线性外推及非线性外推3种情形下,未来30年干燥度指数变化趋势。从集合模式的预估来看,西北西部未来30年继续呈变湿趋势,但变湿程度较过去30年明显放缓,而且比降水增加的放缓程度更为明显,而西北东部未来30年干燥度指数几乎没有变化趋势。也就是说,虽然未来30年西北地区降水继续增多,但温度的显著增加导致变湿趋势放缓甚至停滞。因此,如果未来温度持续升高将对干湿的影响可能比较显著,值得引起我们重视。

不过模式预估结果的不确定性较大,通过当前趋势的线性外推和非线性外推分析未来气候趋势也非常必要。这种方式虽然简单,但有时更能够反映真实情况。如果按照当前变湿趋势线性外推,预计到2050年左右西北西部的干燥度指数接近0.35,整体可能会从干旱气候区过渡为半干旱气候区,而东部的干燥度指数超

图6 过去60年观测和未来30年多模式集合预估的逐气候时段西北地区变湿指数变化特征
Figure 6 Variation characteristics of wettable index in Northwest China during different climatic periods observed in the past 60 years and estimation by multi-model ensemble over the next 30 years

过0.7, 整体将从半干旱区过渡为半湿润区. 而如果按照当前变湿趋势非线性外推, 变湿的速度会更快. 可见, 无论线性还是非线性外推的结论都与多模式预估的结论差异很大. 所以, 这种认识仅供我们参考, 可以作到防患于未然.

3 讨论

3.1 21世纪气候湿化趋势增强东扩的影响

西北地区湿化的影响比较广泛, 会涉及极端天气事件、水资源、生态环境以及农业等许多方面. 对这些影响不能忽视, 尤其对21世纪以来变湿增强、东扩的影响更加值得我们重视. 虽然目前所获得的资料还无法深入分析其定量影响, 但图S8给出的21世纪以来西北地区标准化径流量、湖泊面积、植被覆盖度、日照时数与暴雨次数的变化特征能够定性表明, 21世

纪以来, 在气候湿化趋势增强、东扩背景下, 西北西部几条典型内陆河的径流量基本都呈波动式上升^[54], 受人类活动影响的叶尔羌河上升最明显; 湖泊面积都持续扩大, 受人类活动影响较小的哈拉湖扩大趋势更为明显; 植被覆盖度显著增加, 只是近10 a波动较大; 日照时数显著减少, 暴雨次数有所增加, 但波动性均很大. 可见, 在当前西北地区暖湿化趋势, 尤其是在21世纪以来变湿增强、东扩背景下, 水资源和生态植被正在向好的方面变化, 而农业光照资源条件和极端天气事件却正在向差的方面变化. 其产生的影响似乎利弊并存, 但总体上利大于弊. 虽然这里所分析的只是一些表象特征之间的联系, 但当极端天气事件、水资源、生态环境以及农业气候资源等许多表象特征都表现为如此一致时, 就不应该只是表象问题了, 也值得引起我们高度重视. 当然西北西部径流量和湖泊面积的增加除了与自然降水的增加有关外, 冰川和积雪融化也是很重要的原因, 而黄土高原植被的增加同样除了自然降水的增加外, 退耕还林还草也是不容忽视的原因. 由于资料所限, 这里并无法定量给出变湿对径流量、湖泊面积以及植被覆盖度增加的贡献率.

3.2 21世纪气候湿化趋势增强、东扩的原因

关于西北地区气候湿化的原因可以从不同角度去探讨, 但是目前也没有非常明确又令人信服的科学结论. 有一条值得特别关注的线索是: 众所周知, 西北地区气候同时受东亚夏季风和西风环流的影响, 它们为西北地区提供了基本的水汽来源^[55], 所以关于当前的气候暖湿化趋势, 尤其是变湿的增强、东扩征兆, 需同时关注西风环流和东亚夏季风环流的动向. 图S9给出的1961年以来西风指数与西部降水和东亚夏季风指数与东部降水变化特征表明, 西风环流在20世纪60年代

图7 过去60年和未来30年西北西部(a)和东部(b)干燥度指数变化趋势
Figure 7 The trend of aridity index in western (a) and eastern (b) of Northwest China in the past 60 years and the next 30 years

显著增强, 70年代初期到80年代中期显著减弱, 80年代中期以来持续增强. 而东亚夏季风环流在20世纪60年代前期减弱, 60年代后期到80年代中期增强, 80年代中期到90年代后期显著减弱, 90年代末期以来持续增强. 西风环流与西北西部降水变化大体一致, 而东亚夏季风环流则与西北东部降水变化大体一致. 这说明西北西部降水更多受西风环流输送的水汽控制, 而东部则更多受东亚夏季风环流输送的水汽控制.

尤其值得注意的是, 西风环流与东亚夏季风环流在20世纪大多数时候表现为此升彼降的跷跷板关系, 但大致从21世纪开始它们表现为很一致的增强趋势. 这与21世纪以来西北地区气候变湿趋势的增强、东扩特征非常吻合.

不过, 西风环流和东亚夏季风环流对西北地区气候的影响并没有明确的分界线, 东亚夏季风有时可以侵入西北西部较深的区域, 而西风环流更是往往可以伸入到西北东部的大部分范围, 并且二者的影响具有一定的耦合性和协同性. 所以本研究建立了一个考虑了东亚夏季风环流和西风环流协同作用的环流综合指数, 来分析西北地区气候湿化的环流作用. 从图8给出的西北地区东亚夏季风、西风环流以及环流综合指数与变湿综合指数逐气候态时段变化特征对比可以看出, 西北地区变湿综合指数与西风环流指数及环流综合指数的变化具有较好的一致性, 均呈“U”形变化特征, 尤其从21世纪开始, 这种一致性更加突出. 虽然变湿综合指数与东亚夏季风指数相关性较差, 但从1971~2000年到1981~2010年变湿略有增强可能与相应时段东亚季

风略有增强不无关系. 可见, 西北地区20世纪后期发生的从干向湿的转型变化, 特别是21世纪以来变湿趋势的增强、东扩特征很可能是西风环流与东亚夏季风共同增强下协同作用的结果, 不过西风环流的作用可能更为显著.

4 结论

由于西北地区气候湿化趋势具有明显的动态性和空间差异性, 且湿化特征体现在范围和强度等多个维度, 单独用降水增加幅度或降水距平很难客观描述. 本研究构建的变湿综合指数综合考虑了变湿强度和范围, 能够更科学地定量表征气候湿化程度和特征.

在百年尺度上, 西北地区温度基本一致经历了20世纪40年代及60年代至今的两个增暖期, 当前的暖期更强; 西部与东部的降水在很多时期具有跷跷板变化特征, 但从21世纪开始西部与东部却同时进入增湿期. 不过, 西部当前降水量已经远远超过了百年以来的任何时期, 明显超出了近百年的自然波动; 而东部当前的降水量仍然弱于20世纪50~60年代中的湿润期.

而且, 根据1961年以来可靠的观测资料, 西北西部与东部的变暖趋势大致相当, 其线性增温率均主要分布在 $0.32^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 左右. 降水变化则比较复杂, 西北西部基本一致为变湿趋势, 但1987年以来湿化趋势更为显著. 而东部在1961~1997年期间一直呈现干化趋势, 但从1997年也开始转为湿化趋势. 尤其值得注意的是, 大致从21世纪开始, 无论是降水还是干燥度指数, 西北西部与东部气候均同时表现为湿化趋势, 而且这种湿化趋势表现为显著的非线性增强特征.

并且, 可能由于西北西部与东部温度与降水影响作用的主导过程不同, 西部的温度与降水变化保持了较好的一致性, 而东部的温度与降水一致性较差, 由此导致西北西部和东部冷暖与干湿配置关系存在明显差异. 西部温度与降水变化大多时段呈冷干与暖湿配置, 但东部温度与降水变化呈冷湿和暖干配置的时段要明显多于冷干和暖湿配置的时段. 在21世纪之前, 东部很少出现暖湿配置时段, 但21世纪初以来, 东部和西部均较多呈现暖湿配置.

通过对比4个气候态时段暖湿化空间分布特征来看, 整个西北地区温度呈现空间上一致增加特征, 且变暖程度逐渐增强; 降水则总体呈现西增东减的变化趋势, 但西增东减的分界线近3个气候态时段以来持续东扩, 目前变湿范围已扩至西北地区全境. 西北地区无论

图8 东亚夏季风、西风环流以及环流综合指数与变湿综合指数的逐气候态时段变化特征对比

Figure 8 The comparison of variation characteristics of East Asian summer monsoon, westerly circulation, circulation composite index and comprehensive wetttable index different climatological background states

降水、干燥度指数还是变湿综合指数均表现为非线性增强特征。西北地区当前正处在变湿面积逐渐增大、变湿强度逐渐增强的态势,变湿呈现出显著增强、东扩征兆,而且这种信号自21世纪以来尤为突出。

尽管当前的变湿趋势比较显著,但还远远没有改变西北地区的基本气候形态。如果仅仅考虑降水影响,中等排放情景下多模式集合预估发现,未来30年西北地区继续呈变湿趋势,不过变湿增强的速率有所减缓。如果综合考虑降水与温度协同作用,按照当前变湿趋势线性外推,预计到2050年左右,西北西部可能整体会从干旱气候区过渡为半干旱气候区,而东部可能整体会从半干旱气候区过渡为半湿润气候区。而如果按照当前变湿趋势的非线性外推,变湿速度会更加迅速,西北地区的气候格局可能会发生改变。不过,如果根据中等排放情景下多模式集合预估,预计未来30年气候变湿趋势明显放缓甚至停滞,温度快速增加导致潜在蒸发的增速大于降水的增速,因此,如果未来温度持续升高将对干湿的影响可能比较显著。当然,这些基于不同假定的预估结果均有很大不确定性,只可供未来应对气候变化过程作或保守或乐观打算时参考。

在这种气候变湿趋势的增强、东扩背景下,21世纪以来极端天气事件、水资源、生态环境以及农业气候资源等产生了显著变化。其中,水资源和生态植被正

在向好的方面变化,而农业光资源条件和极端天气事件却正在向差的方面变化,造成的影响似乎利弊并存,但总体上利大于弊。虽然这只是一些表象特征之间的联系,但当许多表象特征都表现为如此一致的趋势时,就不应该只是表象问题了。

影响西北地区降水变化的因素比较多,但值得关注的线索是:西风环流变化与西北西部降水变化大体一致,而东亚夏季风环流变化则与西北东部降水变化大体一致。尤其是西风环流和东亚夏季风环流大致从21世纪开始均表现为增强趋势,这与21世纪以来西北地区气候变湿趋势的增强、东扩特征非常一致。可见,西北地区气候变湿趋势尤其是21世纪以来变湿的增强、东扩很大程度上与西风环流与东亚夏季风环流的协同作用有关。

当然,鉴于研究资料和研究方法的限制,本研究对西北地区气候变湿的影响只是从地表径流量、湖泊面积、植被覆盖度、日照时数与暴雨次数的变化趋势来推断,并没有深入分析气候湿化与它们之间的定量关系。对其成因也没有从多角度系统分析不同因素和不同尺度的作用,而只是初步讨论了气候湿化与西风环流和东亚夏季风环流之间的某些联系。对这些方面还有待今后通过更完善的资料 and 更先进的方法进行深入全面研究。

参考文献

- 1 Zhang Q, Hu Y Q, Cao X Y, et al. On some problems of arid climate system of Northwest China (in Chinese). *J Desert Res*, 2000, 20: 357–361 [张强, 胡隐樵, 曹晓彦, 等. 论西北干旱气候的若干问题. *中国沙漠*, 2000, 20: 357–361]
- 2 Ding Y H, Wang S R. Introduction to Climate and Ecological Environment in Northwest China (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2001. 77–154 [丁一汇, 王守荣. 中国西北地区气候与生态环境概论. 北京: 气象出版社, 2001. 77–154]
- 3 Ye D Z, Huang R H. Causes and predictions of droughts and floods in the Yellow River valley and the Yangtze River valley of China (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 1991, 5: 24–29 [叶笃正, 黄荣辉. 我国长江黄河两流域旱涝规律成因与预测研究的进展. *地球科学进展*, 1991, 5: 24–29]
- 4 Xu G C. Climate Change in Arid and Semi-arid Regions of China (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1997. 19–65 [徐国昌. 中国干旱半干旱区气候变化. 北京: 气象出版社, 1997. 19–65]
- 5 Fu C B, An Z S. Study of aridification in Northern China—A global change issue facing directly the demand of Nation (in Chinese). *Front Earth Sci*, 2002, 9: 271–275 [符淙斌, 安芷生. 我国北方干旱化研究——面向国家需求的全球变化问题. *地学前缘*, 2002, 9: 271–275]
- 6 Wang Z T. The glacier and environment in the middle sector of Tianshan and the eastern sector of Qilianshan since the Little Ice Age (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 1991, 46: 160–168 [王宗太. 天山中段及祁连山东段小冰期以来冰川及环境. *地理学报*, 1991, 46: 160–168]
- 7 Chen L X, Shao Y N, Zhang Q F. Preliminary analysis of climatic change during the last 39 year in China (in Chinese). *J Appl Meteorol Sci*, 1991, 2: 164–174 [陈隆勋, 邵永宁, 张清芬. 近40年我国气候变化初步分析. *应用气象学报*, 1991, 2: 164–174]
- 8 Wang S W, Dong G R. Environmental Characteristics and Evolution in Western China, Assessment of Environmental Evolution in Western China (Volume 1) (in Chinese). Beijing: Science Press, 2002. 49–61 [王绍武, 董光荣. 中国西部环境特征及其演变, 中国西部环境演变评估(第1卷). 北京: 科学出版社, 2002. 49–61]
- 9 Zhai P M, Ren F M. Detection of trends in China's precipitation extremes (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 1999, 57: 208–216 [翟盘茂, 任福民. 中国降水极值变化趋势检测. *气象学报*, 1999, 57: 208–216]

- 10 Xie J N, Zhou J L. A preliminary study on trends and interannual variation of precipitation in Central and Eastern Portions of Northwest Region of China (in Chinese). *Plateau Meteorol*, 2001, 20: 362–367 [谢金南, 周嘉陵. 西北地区中、东部降水趋势的初步研究. *高原气象*, 2001, 20: 362–367]
- 11 Qing D H, Ding Y H, Wang S W, et al. Ecological and environmental change in West China and its response strategy (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2003, 17: 314–319 [秦大河, 丁一汇, 王绍武, 等. 中国西部生态环境变化与对策建议. *地球科学进展*, 2003, 17: 314–319]
- 12 Ding Y J, Ye B S, Liu S Y. Impact of climate change on the alpine streamflow during the past 40 a in the middle part of the Qilian mountains, Northwestern China (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2000, 22: 193–198 [丁永建, 叶佰生, 刘时银. 祁连山中部地区40 a来气候变化及其对径流的影响. *冰川冻土*, 2000, 22: 193–198]
- 13 Shi Y F, Shen Y P, Hu R J. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2002, 24: 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: 219–226]
- 14 Shi Y F, Shen Y P, Li D L, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China (in Chinese). *Quat Sci*, 2003, 23: 152–164 [施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北部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: 152–164]
- 15 Zhang C J, Gao X J. Impact of global warming on autumn precipitation in Northwest China (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2003, 25: 157–168 [张存杰, 高学杰. 全球气候变暖对西北地区秋季降水的影响. *冰川冻土*, 2003, 25: 157–168]
- 16 Song L C, Zhang C J. Changing features of precipitation over Northwest China during the 20th century (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2003, 25: 143–148 [宋连春, 张存杰. 20世纪西北地区降水量变化特征. *冰川冻土*, 2003, 25: 143–148]
- 17 Zhang Q, Zhang C J, Bai H Z. New development of climate change in Northwest China and its impact on arid environment (in Chinese). *Arid Meteorol*, 2010, 28: 1–7 [张强, 张存杰, 白虎志. 西北地区气候变化新动态及对干旱环境的影响. *干旱气象*, 2010, 28: 1–7]
- 18 Zhang C J, Li D L, Wang X P. Study on precipitation variability in last 100 years and trend prediction in Northeast Asia in future 10–15 years (in Chinese). *Plateau Meteorol*, 2004, 23: 919–929 [张存杰, 李栋梁, 王小平. 东北亚近100年降水变化及未来10~15年预测研究. *高原气象*, 2004, 23: 919–929]
- 19 Polson D, Hegerl G C. Strengthening contrast between precipitation in tropical wet and dry regions. *Geophys Res Lett*, 2017, 44: 365–373
- 20 Nicholson S E, Tucker C J, Ba M B. Desertification, drought, and surface vegetation: An example from the West African Sahel. *Bull Amer Meteorol Soc*, 1998, 79: 815–829
- 21 Nicholson S E. Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries. *Clim Res*, 2001, 17: 123–144
- 22 Dai A G, Lamb P J, Trenberth K E, et al. The recent Sahel drought is real. *Int Climatol*, 2004, 30: 464–474
- 23 Huang J, Ji M, Xie Y, et al. Global semi-arid climate change over last 60 years. *Clim Dyn*, 2016, 46: 1131–1150
- 24 Huang J, Yu H, Dai A, et al. Drylands face potential threat under 2°C global warming target. *Nat Clim Chang*, 2017, 7: 417–422
- 25 Narisma G T, Foley J A, Licker R, et al. Abrupt changes in rainfall during the twentieth century. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: 710–714
- 26 Rehfeld K, Laepple T. Warmer and wetter or warmer and dryer? Observed versus simulated covariability of Holocene temperature and rainfall in Asia. *Earth Planet Sci Lett*, 2016, 436: 1–9
- 27 Ljungqvist F C, Seim A, Krusic P J, et al. European warm-season temperature and hydroclimate since 850 CE. *Environ Res Lett*, 2019, 14: 084015
- 28 Zhang Q, Lin J J, Liu W C, et al. Study on the seesaw change phenomenon and formation mechanism of the precipitation in the east and west of Northwest China during the flood season (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2019, 62: 2083–2098 [张强, 林婧婧, 刘维成, 等. 西北地区东部与西部汛期降水跷跷板变化现象及其形成机制研究. *中国科学: 地球科学*, 2019, 62: 2083–2098]
- 29 Zhang Q, Yue P, Zhang L. Land-atmosphere interaction over the summer monsoon transition zone in China: A review and prospects (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 2019, 77: 758–773 [张强, 岳平, 张良. 夏季风过渡区的陆-气相互作用: 述评与展望. *气象学报*, 2019, 77: 758–773]
- 30 Li Q X, Dong W J, Li W, et al. Assessment of the uncertainties in temperature change in China during the last century (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2010, 55: 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: 1544–1554]
- 31 Yang S, Li Q X. Improvement in homogeneity analysis method and updata of China precipitation data (in Chinese). *Clim Change Res*, 2014, 10: 276–281 [杨溯, 李庆祥. 中国降水量序列均一性分析方法及数据集更新完善. *气候变化研究进展*, 2014, 10: 276–281]
- 32 Hulme M. An intercomparison of model and observed global precipitation climatologies. *Geophys Res Lett*, 1991, 18: 1715–1718
- 33 Hulme M. A 1951–80 global land precipitation climatology for the evaluation of general circulation models. *Clim Dyn*, 1992, 7: 57–72
- 34 Mitchell T D, Jones P D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int J Climatol*, 2005, 25: 693–712
- 35 Harris I, Jones P D, Osborn T J, et al. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—The CRU TS3.10 Dataset. *Int J Climatol*, 2014, 34: 623–642
- 36 Wen X Y, Wang S W, Zhu J H, et al. An overview of China climate change over the 20th century using UKUEA/CRU high resolution grid data (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2006, 30: 894–904 [闻新宇, 王绍武, 朱锦红, 等. 英国CRU高分辨率格点资料揭示的20世纪中国气候变化. *大气科学*, 2006, 30: 894–904]

- 37 O'Neill B C, Tebaldi C, van Vuuren D P, et al. The Scenario 20 Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci Model Dev*, 2016, 9: 3461–3482
- 38 Ma Z G, Fu C B. Trend of surface humid index in the arid area of Northern China (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 2001, 59: 741–746 [马柱国, 符淙斌. 中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析. *气象学报*, 2001, 59: 741–746]
- 39 Ma Z G, Fu C B, Yang Q, et al. Drying trend in Northern China and its shift during 1951–2016 (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2018, 42: 951–961 [马柱国, 符淙斌, 杨庆, 等. 关于我国北方干旱化及其转折性变化. *大气科学*, 2018, 42: 951–961]
- 40 Paredes P, Fontes J C, Azevedo E B, et al. Daily reference crop evapotranspiration in the humid environments of Azores islands using reduced data sets: Accuracy of FAO-PM temperature and Hargreaves-Samani methods. *Theor Appl Climatol*, 2018, 134: 595–611
- 41 Zhang H L, Zhang Q, Yue P. Aridity over a semiarid zone in northern China and responses to the East Asian summer monsoon. *J Geophys Res Atmos*, 2016, 121: 13901–13918
- 42 Yim S Y, Wang B, Liu J, et al. A comparison of regional monsoon variability using monsoon indices. *Clim Dyn*, 2014, 43: 1423–1437
- 43 Wang B, Fan Z. Choice of South Asian summer monsoon indices. *Bull Amer Meteorol Soc*, 1999, 80: 629–638
- 44 Vicente-Serrano S M, Garcia-Herrera R, Barriopedro D, et al. The westerly index as complementary indicator of the North Atlantic oscillation in explaining drought variability across Europe. *Clim Dyn*, 2016, 47: 845–863
- 45 Yan H S, Hu J, Fan K, et al. The analysis of relationship between the variation of westerly index in summer and precipitation during the flood period over China in the last 50 year (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2007, 31: 717–726 [严华生, 胡娟, 范可, 等. 50年来夏季西风指数变化与中国夏季降水的关系. *大气科学*, 2007, 31: 717–726]
- 46 Li W L, Wang K L, Fu S M, et al. The interrelationship between regional westerly index and the water vapor budget in Northwest China (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2008, 30: 28–34 [李万莉, 王可丽, 傅慎明, 等. 区域西风指数对西北地区水汽输送及收支的指示性. *冰川冻土*, 2008, 30: 28–34]
- 47 Seftigen K, Goosse H, Klein F, et al. Hydroclimate variability in Scandinavia over the last millennium—Insights from a climate model—Proxy data comparison. *Clim Past*, 2017, 13: 18311850
- 48 Su J Z, Wen M, Ding Y H, et al. Hiatus of global warming: A review (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2016, 40: 1143–1153 [苏京志, 温敏, 丁一汇, 等. 全球变暖趋缓研究进展. *大气科学*, 2016, 40: 1143–1153]
- 49 Ren Y L, Yue P, Zhang Q, et al. Influence of land surface aridification on regional monsoon precipitation in East Asian summer monsoon transition zone. *Theor Appl Climatol*, 2021, 144: 93–102
- 50 Lian L Y. Changes in precipitation characteristics in China and its response to climate warming (in Chinese). Master Thesis. Harbin: Northeast Forestry University, 2019 [廉陆鹂. 中国降水特征变化及其对气候变暖的响应. 硕士学位论文. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019]
- 51 Ma P L, Yang J H, Lu G Y, et al. The transitional change of climate in the eastern of northwest China (in Chinese). *Plateau Meteorol*, 2020, 39: 840–850 [马鹏里, 杨金虎, 卢国阳, 等. 西北地区东部气候的转折性变化. *高原气象*, 2020, 39: 840–850]
- 52 Wang Y M, Li S L, Luo D H. Seasonal response of Asian monsoonal climate to the Atlantic multidecadal oscillation. *J Geophys Res*, 2009, 114: D02112
- 53 Zhang D F, Gao X J. Climate change of the 21st century over China from the ensemble of RegCM4 simulations (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 2516–2526 [张冬峰, 高学杰. 中国21世纪气候变化的RegCM4多模拟集合预估. *科学通报*, 2020, 65: 2516–2526]
- 54 Tang Q H, Lan C, Su F G, et al. Streamflow change on the Qinghai-Tibet Plateau and its impacts (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 2807–2821 [汤秋鸿, 兰措, 苏凤阁, 等. 青藏高原河川径流变化及其影响研究进展. *科学通报*, 2019, 64: 2807–2821]
- 55 Wang K L, Jiang H, Zhao H Y. Atmospheric water vapor transport from westerly and monsoon over the Northwest China (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2005, 16: 432–438 [王可丽, 江灏, 赵红岩. 西风带与季风对中国西北地区的水汽输送. *水科学进展*, 2005, 16: 432–438]

补充材料

图S1 西北地区代表站观测资料与CRU资料对比

图S2 西北西部和东部CMIP6多模式集合值温度、降水与观测值的相关性散点图

图S3 1921~2018年西北西部和东部温度与降水逐9年滑动平均变化

图S4 1961~2018年西北西部与东部不同站点温度和降水线性倾向率的正态分布曲线

图S5 西北地区逐气候态时段温度线性倾向率概率的正态分布

图S6 西北地区不同时段降水线性倾向率概率正态分布

图S7 西北地区变湿开始前的气候态时段与当前气候态时段干燥指数空间分布对比

图S8 21世纪以来西北地区标准化径流量、湖泊面积、植被覆盖度、日照时数与暴雨次数的变化特征

图S9 1961年以来西风环流指数与西部降水和东亚夏季风指数与东部降水变化特征

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “西北地区气候湿化趋势的新特征”

New characteristics about the climate humidification trend in Northwest China

Qiang Zhang^{1,2}, Biao Zhu³, Jinhu Yang^{4*}, Pengli Ma⁴, Xiaoyun Liu¹, Guoyang Lu⁴, Youheng Wang⁴, Haipeng Yu⁵, Weiping Liu⁴ & Dawei Wang⁴

¹ Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Open Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster, Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China;

² Gansu Meteorological Bureau, Lanzhou 730020, China;

³ College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

⁴ Lanzhou Regional Climate Center, Lanzhou 730020, China;

⁵ Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

* Corresponding author, E-mail: yjh740701@sina.com

At the beginning of 21st century, a study suggested that Northwest China's climate is becoming warmer and more humid. However, there were doubts about this conclusion because the humidification changes on a small scale only last for a short period, and also suspicions about the development, duration, and impact of the warming-wetting trend in this region. This paper sets out several factors, such as the area, intensity of humidification, and comprehensiveness of the wetness index, to characterize the wetting degree. Furthermore, by using measured climate data, CRU data, climate scenario predictions, and ecological and hydrological data, we systematically analyze temporal and spatial evolution of the warming-wetting trend in Northwest China.

Studies have shown that Northwest China has experienced two warming periods during the last century, i.e., the 1940s, and the period from the 1960s to the present (the current warming period). The latter is more substantial. The precipitation in the west and east part of Northwest China has a seesaw change process in many periods. However, humidification has simultaneously occurred in both regions since the beginning of this century.

The current precipitation in the west part of Northwest China has far exceeded any period over the past 100 a. In contrast, the east part's recent rainfall is still currently lower than that of the 1950s and 1960s. Since 1961, Northwest China's west region has experienced consistent humidification, which has been more pronounced since 1987. Simultaneously, the east part was drying from 1961 to 1997, and has become humid since 1997. The temperature, precipitation, and aridity index changes in the west part show the same patterns. In most periods, the west part was either cold-dry or warm-wet. In comparison, such consistency of the temperature, precipitation, and aridity changes does not exist in the east region. Before this century, warm-wet climates rarely occurred in the east region, having become more frequent. This is probably due to the different dominant temperatures and precipitation processes in the west and east regions.

From a spatial point of view, the temperature increases in the whole of Northwest China, and the precipitation increases in the west region and decreases in the east region. The area with increasing rainfall has become larger during the past three climatic periods, and currently covers the whole of Northwest China. The precipitation, aridity index, and comprehensive humidity index in Northwest China have a non-linear increasing trend. The expanding humidity trend has been significant since the beginning of this century.

The current warming and humidification have not changed the basic climate pattern in Northwest China. However, if the current trend continues, they would change the climate pattern in the future. Such climate change may result from the simultaneous enhancement of the westerly circulation and the East Asian summer monsoon circulations in this century.

The climate warming and humidification in Northwest China significantly impacted extreme weather events, water resources, ecological environment, and agriculture during this century. This research will provide a basis for decision-making on issues such as implementing the Western development strategy in the new era, the ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin, environmental construction planning, and water resources management policies in Northwest China.

Northwest China, warming-wetting trend, comprehensive wettable index, intensification and eastward expansion

doi: [10.1360/TB-2020-1396](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1396)