

# 我国西北地区干湿变化特征及其未来预估

李学武<sup>1,2</sup> 张京朋<sup>3</sup> 赵天保<sup>4</sup> 李福原<sup>3</sup> 赵廷宁<sup>2</sup>

1 国家林业和草原局林草调查规划院, 北京 100714

2 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

3 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100

4 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029

**摘要** 气候变暖背景下我国西北地区的气候变化在近几十年呈现出暖湿化特征。本文基于降水、土壤湿度、径流量和干旱指数等多种气象要素, 进一步系统分析研究了近 60 年我国西北地区的干湿特征演变规律, 并利用最新的第六次国际耦合模式比较计划 (CMIP6) 多模式模拟结果对该区域未来干湿变化特征进行了预估。结果显示: 近 60 年来我国西北地区的降水量、土壤湿度和径流量均呈现出由东南向西北递减的空间分布格局; 冷季的降水量和径流量明显低于暖季, 但土壤湿度和干旱指数在冷暖季节差异不显著。西北地区年降水量、土壤湿度和干旱指数均呈现显著增加的趋势, 增幅分别为 5.07 mm/10a、3.89 mm/10a 和 0.26 /10a, 特别是 2000 年后增加的趋势更显著, 且变湿幅度最大主要出现在西北西部; 而径流量在 2000 年之前呈现明显下降的趋势, 而 2000 年后显著增加。在未来气候变化情境下, 21 世纪中期 (2031~2060 年) 和后期 (2071~2100 年) 西北地区呈现出湿润化的趋势, 并且 21 世纪后期的湿润化程度更显著, 高等排放情景 (SSP5-8.5) 比中等排放情景 (SSP2-4.5) 下湿润化更明显。本研究可为我国西北地区气候变化的影响评估提供参考依据。

**关键词** 西北地区 干湿特征 CMIP6 模式 未来预估

**doi:**10.3878/j.issn.1006-9585.2023.22000

---

收稿日期 2022-08-21; 收修定稿 2023-09-01

**作者简介** 李学武, 男, 1988 年出生, 博士, 主要从事荒漠化及治理研究, E-mail: Lixuewu@bjfu.edu.cn

**通讯作者** 张京朋, 男, 1991 年出生, 副教授, 硕士生导师, 主要从事气候变化研究, E-mail: zhangjp@nwafu.edu.cn

**资助项目** 国家自然科学基金项目“自然变率和人类活动影响中亚极端降水长期变化的归因与预估研究(41975115)”和“基于 CMIP6 多模式检测人类活动对我国干旱半干旱区极端降水的影响(42205032)”, 陕西省自然科学基金基础研究计划项目“我国干旱半干旱区极端降水变化对区域增暖的响应 (2021JQ-166)”

**Funded by** National Natural Science Foundation of China (Grant 41975115, 42205032), Natural Science Foundation of Shaanxi Province (Grant 2021JQ-166)

# Dry and wet variation characteristics in Northwest China and Its Future Prediction

LI Xuewu<sup>1,2</sup>, ZHANG Jingpeng<sup>3</sup>, ZHAO Tianbao<sup>4</sup>, LI Fuyuan<sup>3</sup>, and ZHAO Tingning<sup>2</sup>

1. *Forestry and Grassland Inventory and Planning Institute, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714*

2. *College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083*

3. *College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100*

4. *CAS Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia (REC-TEA), Institute of Atmospheric Physics (IAP), Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 100029*

**Abstract** Under the background of climate warming, the climate change in Northwest China has become warmer and wetter in recent decades. Based on various meteorological elements such as precipitation, soil moisture, runoff and drought index, this paper further systematically analyzes and studies the evolution of dry and wet characteristics in Northwest China in the past 60 years, and forecasts the future changes in dry and wet characteristics by using the latest multi-model simulation results of the phase 6 of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6). The results show that the precipitation, soil moisture and runoff in Northwest China in recent 60 years showed a spatial distribution pattern of decreasing from southeast to northwest. The precipitation and runoff in the cold season are significantly lower than that in the warm season, but the differences of soil moisture and drought index in cold and warm seasons are not significant. The annual precipitation, soil moisture and drought index in Northwest China showed significant increasing trends, with the increasing rates of 5.07 mm/10a, 3.89 mm/10a and 0.26 /10a respectively, and especially after 2000, the increasing trends are more obvious. The largest humidification range mainly occurred in the west of Northwest China. The humidification range in the warm season was higher than that in the cold season. However, the runoff showed an obvious downward trend before 2000 and increased significantly after 2000. Under the future climate change scenario, the northwest region shows a trend of humidification in the middle of the 21st century (2031~2060) and the later period (2071~2100), and the humidification degree in the later period of the 21st century is more significant. The humidification under the high emission scenario (SSP5-8.5) is more obvious than that under the medium emission scenario

1 (SSP2-4.5). This study can provide a reference for the impact assessment of climate change in  
2 Northwest China.

3 **Keywords** Northwest China, Dry and wet characteristics, CMIP6 model, Future projection

## 4 1 引言

5 我国西北地区深居亚欧大陆腹地，远离海洋，地形地貌复杂，同时受到青藏高原大  
6 地形的阻挡，水汽难以抵达，使得该区域降水稀少，生态环境脆弱，是气候和生态系统  
7 的过渡地带，对气候变化极其敏感（张强和刘卫民, 2000），是近百年来增温最显著的  
8 区域之一（Huang et al., 2017）。其气候变化不仅持续影响着该地区的生态环境、水资  
9 源安全及自然灾害风险，还直接关乎国家西部大开发、黄河流域生态保护和高质量发展  
10 大计。因此，长期以来西北地区的气候变化一直是国内外科学界关注的焦点问题。

11 降水是制约我国西北地区社会发展的重要气候因素。众多研究表明，自 19 世  
12 纪末以来西北地区一直呈现出波动性的暖干化趋势（王宗太, 1991; 翟盘茂等, 1999; 谢  
13 金南和周嘉陵, 2001; 王绍武和董光荣, 2002），即使在上世纪 50 年代至 80 年代该区域  
14 的降水仍然呈减少趋势（陈隆勋等, 1991），直接或间接造成西北地区冰川加速消融、  
15 植被和绿洲持续退化、湿地和湖泊面积显著减小甚至消失（秦大河等, 2002）。然而，  
16 21 世纪初有研究发现，西北地区气候可能正在发生从暖干向暖湿转型（施雅风等, 2002,  
17 2003），并且西北西部目前已经转为暖湿化（宋连春和张存杰, 2003; 张存杰等, 2003），  
18 这可能是由于大气环流异常导致的（Li et al., 2016a）。对西北地区降水的未来预估显示，  
19 在 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下，西北西部降水呈增加趋势，尤其青藏高原和天山山脉降  
20 水增幅最大，而西北东部降水呈下降趋势（Wang and Chen, 2014; 冯蜀青等, 2019）。但  
21 也有研究指出，西北东部的降水具有较大的不确定性，需要进一步的研究（李明等,  
22 2021）。

23 土壤湿度反映了地表水文过程，是衡量干湿变化的重要指标。不少学者的研究表明，  
24 我国西北西部土壤湿度呈现增加的趋势，而西北东部则是减少的（马柱国和符淙斌, 2006;  
25 李明星等, 2011），并且降水对土壤湿度的影响为正，而温度对土壤湿度的影响为负，  
26 降水对土壤湿度的正效应大于温度对土壤湿度的负效应（Wang et al., 2018）。但也有研  
27 究表明，20 世纪 80 年代以来西北西部土壤湿度呈现减小趋势（王磊等, 2008; 张蕾等,  
28 2016），而这种趋势未来将会更加明显（刘珂和姜大膀, 2015）。造成这种结果差异的

1 原因可能是在于西北地区土壤湿度观测站点稀少，与基于遥感数据和模型反演的土壤湿  
2 度数据的研究结果存在较大的偏差。

3 径流是西北地区水资源的重要组成部分，占到了水资源总量的 85%以上（陈亚宁等，  
4 2014），是该地区气候变化的晴雨表。研究表明，1960 年以来，西北地区西部河川径流  
5 增加，特别是在疏勒河、黑河和阿克苏河等流域的地表径流量增加明显（Li et al., 2016b;  
6 He et al., 2019），而西北东部径流逐渐减少（Qin et al., 2016）。与历史时期不同，西北  
7 地区径流未来将会呈上升趋势，大部分地区的径流量增幅将超过 10%（Wang et al., 2012;  
8 Guo and Shen, 2016），尤其是黄河流域上游地区，在高排放情境下，径流增加的区域超  
9 过了 70%（Zhang et al., 2017）。

10 干旱指数也常被用来研究区域气候干湿变化。目前，标准化降水指数、标准化降水  
11 蒸散指数和帕尔默干旱强度指数已被广泛应用于干旱的监测研究。大量研究表明，近 50  
12 年西北地区东部趋向干旱化，而西北西部呈湿润化趋势（Huang et al., 2017; Wang et al.,  
13 2017; Yang et al., 2017; 胡子瑛等, 2018），其中冬季湿润化趋势更加显著（胡子瑛等，  
14 2018）；并且西北地区这种干湿变化主要是受到大西洋涛动、北大西洋涛动和太平洋年  
15 代记振荡等大尺度环流因子的影响（Wang et al., 2017; 李明等, 2021）。然而，由于不  
16 同干旱指标考虑的因素不同，结果也存在一定的差异。Wei and Wang (2013) 基于三种  
17 干旱指数研究了西北地区的干湿变化，发现基于标准化降水指数的结果与前人研究一  
18 致，而基于标准化降水蒸散指数和自校准帕尔默干旱强度指数的结果显示西北西部地区  
19 向更干的趋势发展，同时指出蒸发的增加抵消了降水的增加，区域趋向暖干化。此外，  
20 基于 CMIP6 多模式自校准帕尔默干旱强度指数的预估结果显示，西北地区在 21 世纪呈  
21 现出逐渐变湿的趋势（Chen et al., 2023），但变湿幅度的不确定性较大。

22 综上所述，尽管目前仍存在争议，但大量的研究认为近半个世纪我国西北地区呈现  
23 气候暖湿化趋势，而随着全球持续增暖，目前西北地区这种暖湿化趋势是否加剧？未来  
24 又如何变化？目前仍备受关注。鉴于此，本研究试图基于以上四个重要的干湿变量（降  
25 水量、土壤湿度、径流量和干旱指数），针对先前研究提出的西北气候暖湿化转型的观  
26 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；并利用最新  
27 发布的 CMIP6 多模式对未来干湿变化进行预估分析，进而为西北地区应对气候变化提  
28 供参考依据。

## 29 2 资料和方法

## 2.1 研究区域

我国西北地区地域辽阔，位于 73.3°E~111.5°E，31.5°N~48.5°N，包括新疆维吾尔自治区、宁夏回族自治区、青海省、甘肃省和陕西省（图 1），面积约为 310.87 万平方公里，占中国陆地面积的 32.38%。除陕西南部为温带季风气候之外，其他地区全年降水较少，气候干旱，形成典型的大陆性干旱半干旱气候。本研究为了更详细的了解西北地区的干湿变化特征，依据常见的西北区域分区的方法，以 100°E 为界（Huang et al., 2017），将西北地区划分为西北西部和西北东部。

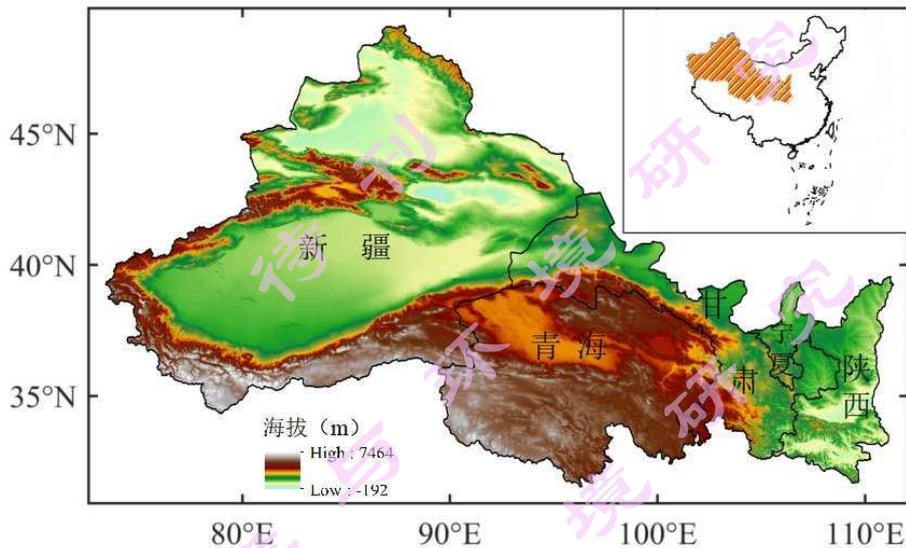


图 1 研究区位置及海拔示意图

Fig. 1 Location and elevation of the study area

## 2.2 数据资料

为了更加全面系统地了解西北地区的干湿变化特征，本文选取了降水量、土壤湿度、径流量和干旱指数四个干湿变量进行研究。所采用的降水资料来源于国家气象信息中心研发的中国地面降水 0.5°×0.5°格点数据集（V2.0）（<http://data.cma.cn/>），该数据集基于全国 2472 个国家级台站逐月降水资料，采用薄盘样条法，引入数字高程资料，经过降水量开平方预处理、三次样条插值而来。土壤湿度资料为美国国家海洋和大气管理局（NOAA）气候预测中心（CPC）提供的全球 0.5°×0.5°月平均陆地表面水文格点化数据（Yun et al., 2004; <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpcsoil.html>），时间范围为 1948 年 1 月至今，该数据集已广泛应用于中国区域的相关研究（如：樊风等，2015）。所采用的径流数据融合了全球径流观测资料和一套通过机器学习创建的全球多强迫再分析径流数据（Ghiggi et al., 2019, 2021），目前已广泛应用于水文学研究（如：Zhao et al.,

2021), 资料下载地址: [https://figshare.com/articles/dataset/G-RUN\\_ENSEMBLE/1279407](https://figshare.com/articles/dataset/G-RUN_ENSEMBLE/1279407)  
 5。干旱指数选用的是自校准帕尔默干旱指数 (scPDSI), 与帕尔默干旱指数 (PDSI)  
 相比, scPDSI 具有更好的空间可比较性 (Dai, 2011), 该数据的空间分辨率为  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ,  
 时间范围为 1901 年 1 月至今。

本文利用最新发布的第六次国际耦合模式比较计划 (CMIP6) 多模式输出结果对  
 未来干湿特征进行预估研究。相较于 CMIP5 模式, CMIP6 模式具有更精细的空间分辨  
 率、更先进的云微物理过程参数化方案以及更复杂的地球系统过程 (Eyring et al., 2019)。  
 在未来情景方面, CMIP6 模式采用社会经济情景和气候情景相结合的新框架。虽然  
 CMIP6 中新排放情景下的辐射强迫 (SSPs) 与 CMIP5 的典型浓度路径 (RCPs) 相似,  
 但 CO<sub>2</sub> 和非 CO<sub>2</sub> 的排放路径和混合排放路径不同, 新的 SSPs 情景模式从 2015 年开始  
 预测, 而 RCPs 起始时间为 2006 年。考虑模式资料的可利用性和完整性, 本文主要选取  
 了 25 个 CMIP6 模式的中等辐射强迫情景 (SSP2-4.5) 和高等辐射强迫情景 (SSP5-8.5)  
 两种排放情景下的未来预估试验 (Riahi et al., 2017)。有关模式试验的基本信息请参考  
 表 1, 详细信息可参考: <https://esgf-node.llnl.gov/>。

表 1 CMIP6 多模式资料的基本信息  
 Table 1 Basic information of CMIP6 models

模式	研究机构/国家	分辨率
ACCESS-CM2	Australian Research Council Centre/Australia	192×144
ACCESS-ESM1-5	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation/Australia	192×144
AWI-CM-1-1-MR	Helmholtz Centre for Polar and Marine Research/Germany	192×96
BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center/China	320×160
CanESM5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis/Canada	128×64
CESM2	National Center for Atmospheric Research/USA	288×192
CESM2-WACCM	National Center for Atmospheric Research/USA	144×96
CMCC-CM2-SR5	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici/Italy	288×192
EC-Earth3	EC-Earth consortium/Europe	512×256
EC-Earth3-Veg	EC-Earth consortium/Europe	512×256
FGOALS-f3-L	Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences/China	288×180
FGOALS-g3	Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of	180×80

Sciences/China

GFDL-CM4	National Oceanic and Atmospheric Administration/USA	288×180
GFDL-ESM4	National Oceanic and Atmospheric Administration/USA	288×180
INM-CM4-8	Institute for Numerical Mathematics/Russia	180×120
INM-CM5-0	Institute for Numerical Mathematics/Russia	180×120
IPSL-CM6A-LR	Institut Pierre Simon Laplace/France	144×143
KACE-1-0-G	National Institute of Meteorological Sciences/South Korea	192×144
MIROC6	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology/Japan	256×128
MPI-ESM1-2-HR	Max Planck Institute for Meteorology/Germany	384×192
MPI-ESM1-2-LR	Max Planck Institute for Meteorology/Germany	192×96
MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute/Japan	320×160
NorESM2-LM	NorESM Climate modeling Consortium/Norway	144×96
NorESM2-MM	NorESM Climate modeling Consortium/Norway	288×192
UKESM1-0-LL	Met Office Hadley Centre/UK	192×144

## 1 2.3 分析方法

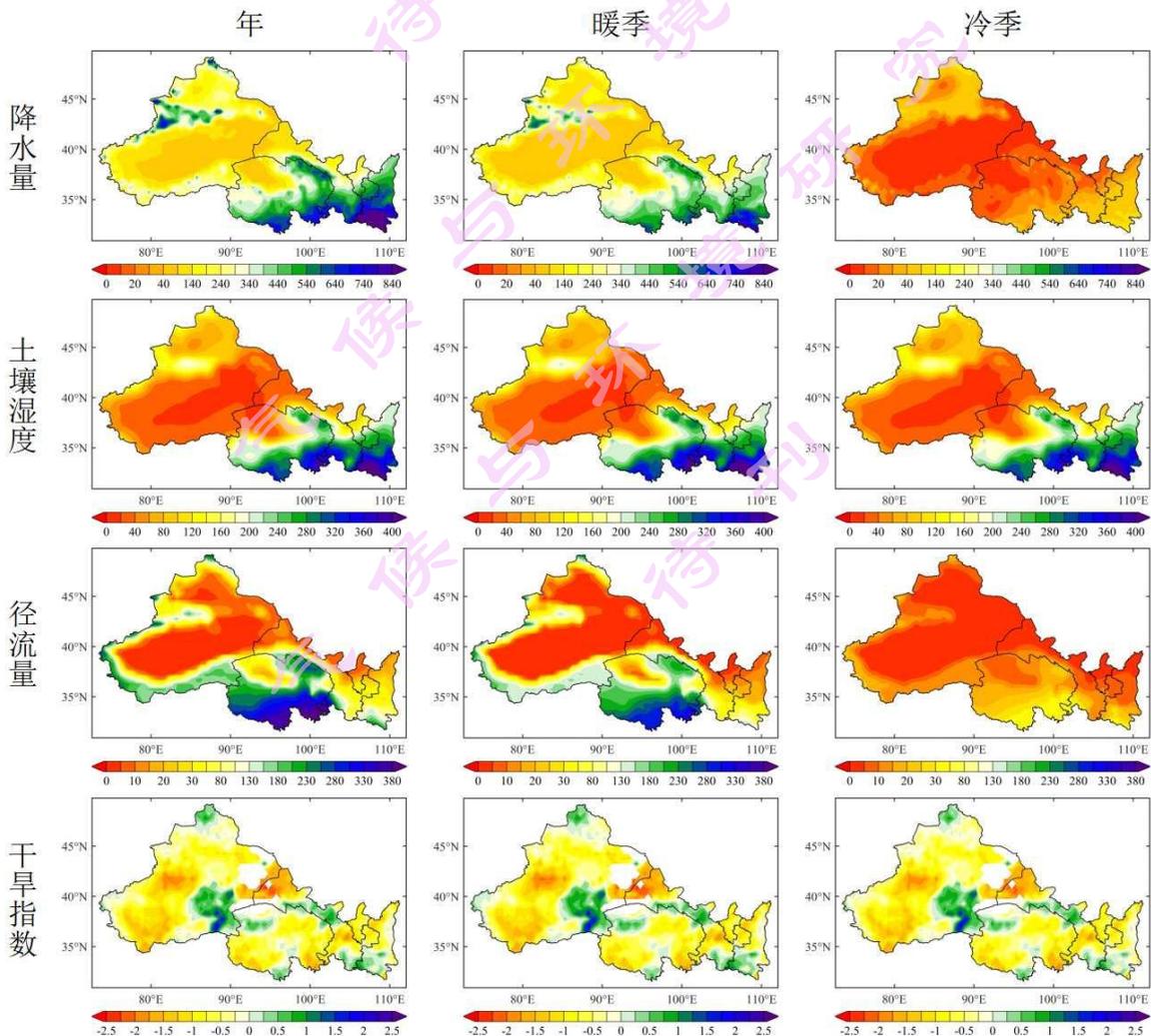
2 本文选取 1961~2020 年作为历史时段进行分析，分别比较了全年、冷季（11 月至次  
3 年 3 月）和暖季（5 月至 9 月）四个干湿变量的时空演变特征。为了匹配观测数据和气  
4 候模式资料的空间分辨率，使用双线性插值法将 CMIP6 多模式输出结果统一插值到  
5  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  的网格上。研究中所用的距平值是相对于历史基准时期（1961~1990 年）计算  
6 而来的，未来预估主要关注 21 世纪中期（2031~2060 年）和末期（2071~2100 年）两个  
7 不同时段。干湿变量的线性趋势通过“稳健拟合方法”确定，该方法考虑了异常值和端  
8 点值的影响（Street et al., 1988）。

## 9 3 结果分析

### 10 3.1 历史气候平均态

11 本文首先考察了近 60 年我国西北地区四个干湿变量的气候平均态（图 2）。年降水  
12 量呈现出由东南向西北递减的空间分布，其中陕西南部受到季风的影响，降水量达到了  
13 800 mm 以上，而远离海洋的新疆塔克拉玛干沙漠地区的降水量则不足 100 mm；冷暖季  
14 节降水量的空间分布类似，但冷季降水量明显低于暖季，说明年降水量主要来源于暖季。

1 由于降水量直接影响着土壤湿度的多少，因此二者的空间分布格局相似，土壤湿度在  
 2 陕西南部达到 400 mm 以上，而在新疆南部部分地区则小于 40 mm；但与降水量不同的是，  
 3 土壤湿度冷暖季节的分布并无显著差异，这可能是由于冬季西北地区气温普遍较低，  
 4 土壤含水量蒸发较小导致的。类似的，径流量同样与降水量密切相关，二者的空间分布  
 5 也较为一致；而随着全球增暖加剧，大量的高山冰川融化，导致青藏高原、昆仑山和祁  
 6 连山等地区的年均地表径流量超过了 200 mm；由于冷季降水量少、冰川冻结，导致径  
 7 流量明显低于暖季，西北地区全境径流量在 30 mm 以下。干旱指数的空间分布与前面  
 8 三个变量并不一致，我国西北大部分地区呈现出干旱的情况，其中新疆塔克拉玛干沙漠  
 9 和甘肃西部等部分地区的干旱程度 ( $scPDSI < -1.5$ ) 高于其他地区，新疆东南部、祁连  
 10 山东北部和陕西南部等少数地区则较为湿润 ( $scPDSI > 1$ )；并且冷暖季节干旱指数差异  
 11 不大，说明其基本不受冷暖季节变化的影响。

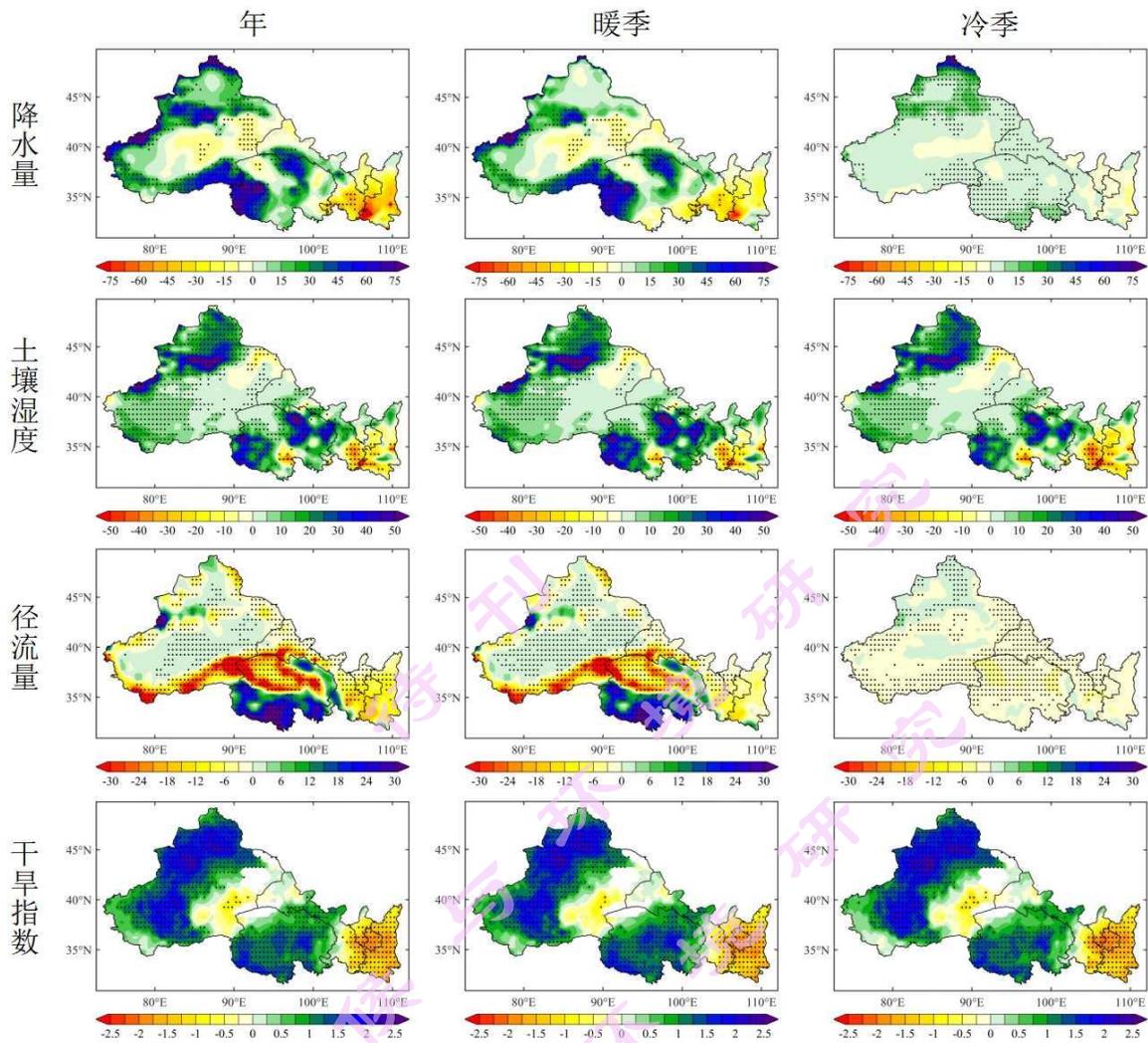


12  
 13 图 2 1961~2020 年我国西北地区降水量 (mm)、土壤湿度 (mm)、径流量 (mm) 和干旱指数 (无量  
 14 纲) 的气候态分布 (从左到右: 年、暖季和冷季)

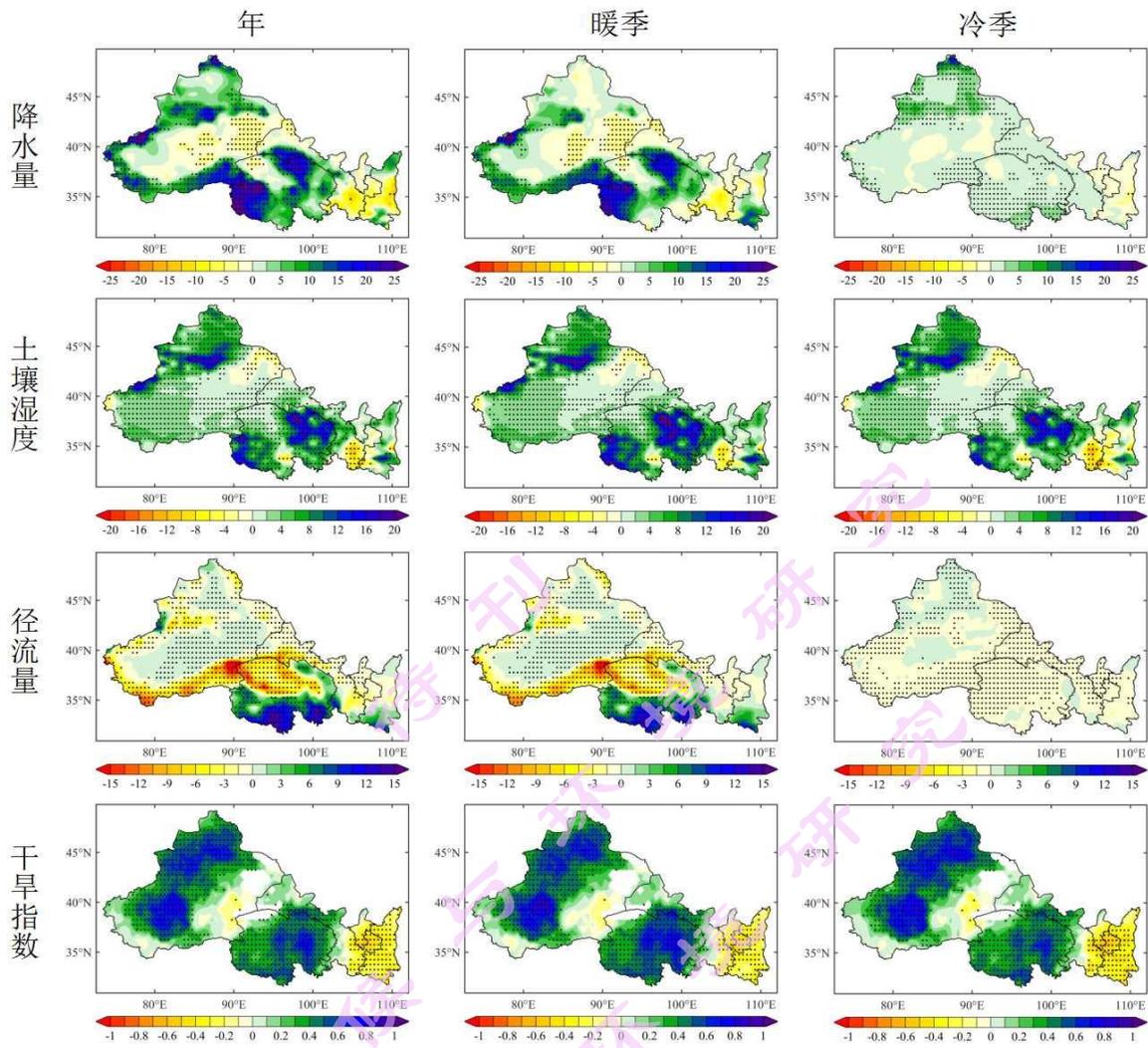
1 Fig. 2 Climatic distribution of precipitation (mm), soil moisture (mm), runoff (mm) and drought index  
2 (dimensionless) in Northwest China from 1961 to 2020 (from left to right: year, warm season and cold season)

### 3 3.2 时空演变规律

4 图 3 显示的是四个干湿变量 1991~2020 年相较于 1961~1990 年的变化。降水量在西  
5 北西部呈现明显增加的变化，特别是在新疆北部、青海西部和北部等地区增加显著，增  
6 幅超过了 60 mm；而在西北东部大部分地区则是减少的，尤其是陕西西南部减少了 70  
7 mm 左右；并且暖季降雨量的变化明显大于冷季。土壤湿度在我国西北大部分地区是增  
8 加的，尤其是在新疆北部、青海西南部和东北部等西北西部地区增加尤为明显 (>  
9 40mm)，而在甘肃东南部、陕西南部等地区则是减小的 (> 30mm)；与气候平均态相  
10 似，土壤湿度的变化在冷暖季节的分布并无显著差异。径流量除了在青海南部地区显著  
11 增加之外，在其他大部分地区则是减少的，特别是在青海北部和昆仑山地区减少明显 (>  
12 30mm)；暖季的变化量对年均变化量贡献较大，冷季的变化较小。对于干旱指数而言，  
13 西北东部地区呈现减少的变化，其中在陕西和甘肃东部等地区显著减小，西北西部大部  
14 分地区则是增加的，特别在新疆西部和青海等地增加值超过了 2；与气候平均态相似，  
15 干旱指数的变化在冷暖季节的分布并无显著差异。1961~2020 年四个干湿变量线性趋势  
16 的空间分布特征（图 4）与图 3 较为类似（不再赘述）。



1  
 2 图3 我国西北地区降水量 (mm)、土壤湿度 (mm)、径流量 (mm) 和干旱指数 (无量纲) 1991~2020  
 3 年相对 1961~1990 年的变化 (从左到右: 年、暖季和冷季), 阴影区域表示统计结果通过了 95% 的显著  
 4 性检验  
 5 Fig. 3 The changes of precipitation (mm), soil moisture (mm), runoff (mm) and drought index (dimensionless) in  
 6 Northwest China from 1991 to 2020 compared with 1961~1990 (from left to right: year, warm season and cold  
 7 season), and the shaded area indicates that the statistical results have passed the 95% significance test.



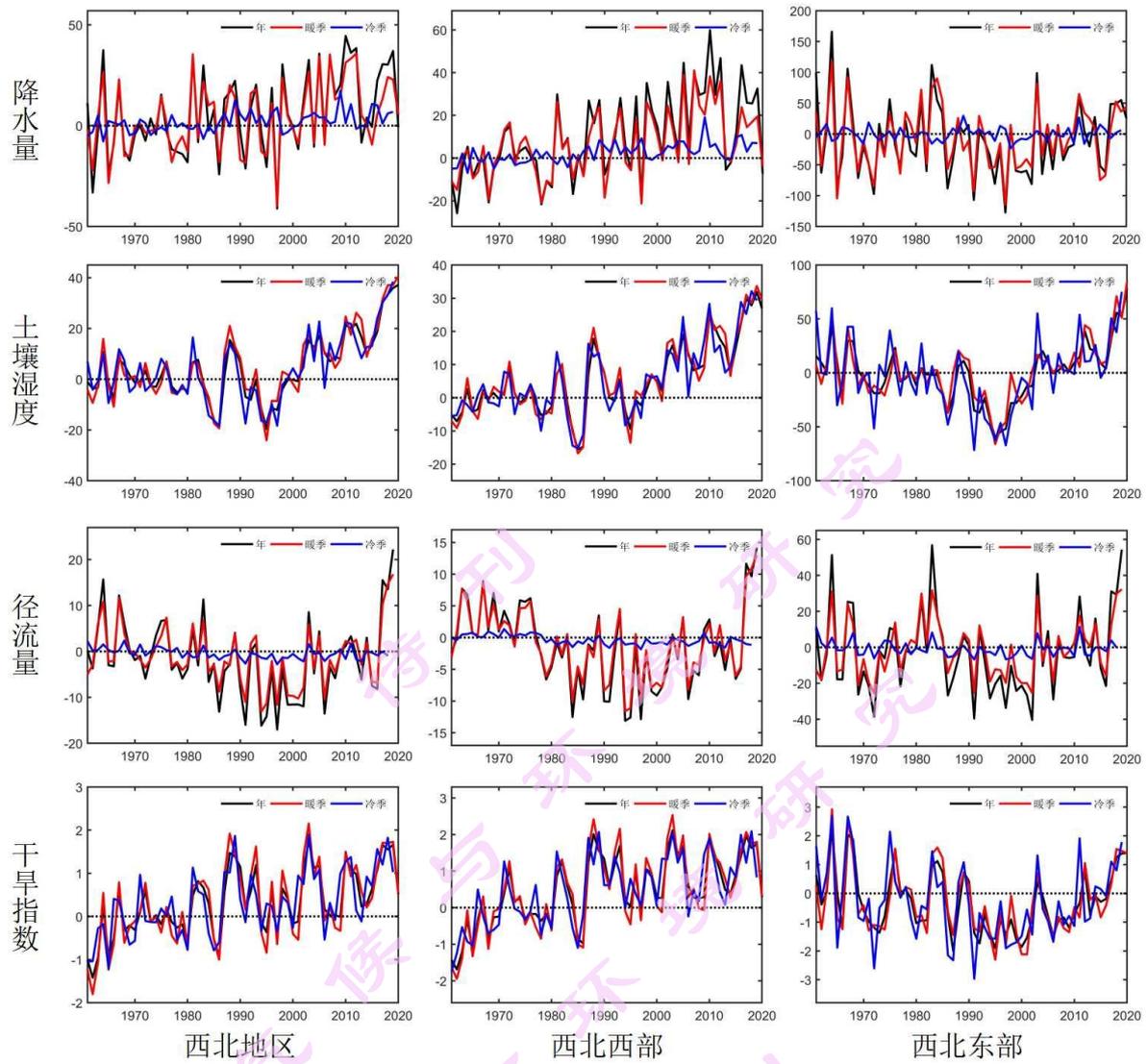
1

2 图4 1961~2020年我国西北地区降水量 (mm/10a)、土壤湿度 (mm/10a)、径流量 (mm/10a) 和干旱  
3 指数 (/10a) 的线性趋势 (从左到右: 年、暖季和冷季), 阴影区域表示统计结果通过了 95% 的显著性检  
4 验

5 Fig. 4 The linear trend of precipitation (mm/10a), soil moisture (mm/10a), runoff (mm/10a) and drought index  
6 (/10a) in Northwest China from 1991 to 2020 (from left to right: year, warm season and cold season). The shaded  
7 area indicates that the statistical results have passed the 95% significance test

8 为了进一步考察干湿特征的长期演变, 我们又分析了四个干湿变量在整个西北地区  
9 和东西部分区的时间变化 (图5) 以及长期趋势的统计结果 (图6)。整体来看, 西北  
10 地区年降水量呈现波动上升的趋势 (5.07 mm/10a), 特别是 2000 年后上升趋势更加显  
11 著, 并且增加值主要来源于西北西部, 该区域的降水量在 1961~2020 年呈现显著增加  
12 的变化 (6.39 mm/10a), 这可能是由于大气环流异常导致的 (Li et al., 2016a); 而西北  
13 东部的降水量在 1961~2000 年呈现减小的趋势, 而在 2000 年后明显增加, 整体的增幅  
14 较小 (0.76 mm/10a), 并且没有通过 95% 的显著性检验; 从冷暖季节来看, 暖季降水  
15 量的变化幅度明显大于冷季。西北地区和西北西部的土壤湿度在 1961~2000 年变化并不

1 显著,而在 2000 年后显著增加,整个时间段上呈现出显著增加的趋势(3.89 mm/10a 和  
2 4.29 mm/10a),而西北东部的土壤湿度在 2000 年之前呈现明显下降的趋势,而在 2000  
3 年后增加明显,整体的增幅较小(2.54 mm/10a),并且没有通过显著性检验;冷暖季节  
4 土壤湿度的变化较为一致,但暖季的增幅稍大于冷季。有关土壤湿度的发现与李明星等  
5 (2006)的研究结论基本一致,但也有研究表明,20 世纪 80 年代以来西北西部土壤湿  
6 度呈现减小趋势(王磊等,2008;张蕾等,2016),而这种趋势未来将会更加明显(刘珂  
7 和姜大膀,2015)。造成这种结果差异的原因可能是在于西北地区土壤湿度观测站点稀  
8 少,与基于遥感数据和模型反演的土壤湿度数据的研究结果存在较大的偏差。与以上二  
9 者不同的是,西北地区年径流量整体上呈现减少的趋势,减少幅度为-0.91 mm/10a(未  
10 通过 95%的显著性检验),并且这种减少趋势主要集中在西北西部地区(-1.08 mm/10a,  
11 通过了 95%的显著性检验),径流量减少的主要原因是全球变暖导致冰川面积逐年减少  
12 (徐宗学等,2007),另外,由于人类活动导致的下垫面发生改变也有可能破坏原有的  
13 蓄水条件(李明等,2021);相反,在西北东部则呈现出增加的趋势(0.71 mm/10a,未  
14 通过 95%的显著性检验);从不同时段来看,西北地区年径流量在 2000 年之前呈现明  
15 显下降的趋势,而 2000 年后显著增加;与降水量类似,径流量在暖季的变化趋势明显  
16 大于冷季。对于干旱指数而言,在西北地区和西北西部均呈现出一致显著增加的趋势(增  
17 幅分别为 0.26 /10a 和 0.35 /10a),而在西北东部在 2000 年之前显著减小,在 2000 年之  
18 后呈现增加的趋势;与土壤湿度类似,冷暖季节干旱指数的变化并无显著差异。西北地  
19 区干旱指数的变化主要是受到大西洋涛动、北大西洋涛动和太平洋年代记振荡等大尺度  
20 环流因子的影响(Wang et al., 2017;李明等,2021)。该结论再次表明了西北地区的气  
21 候正在从暖干向暖湿转型(施雅风等,2002,2003)。



1

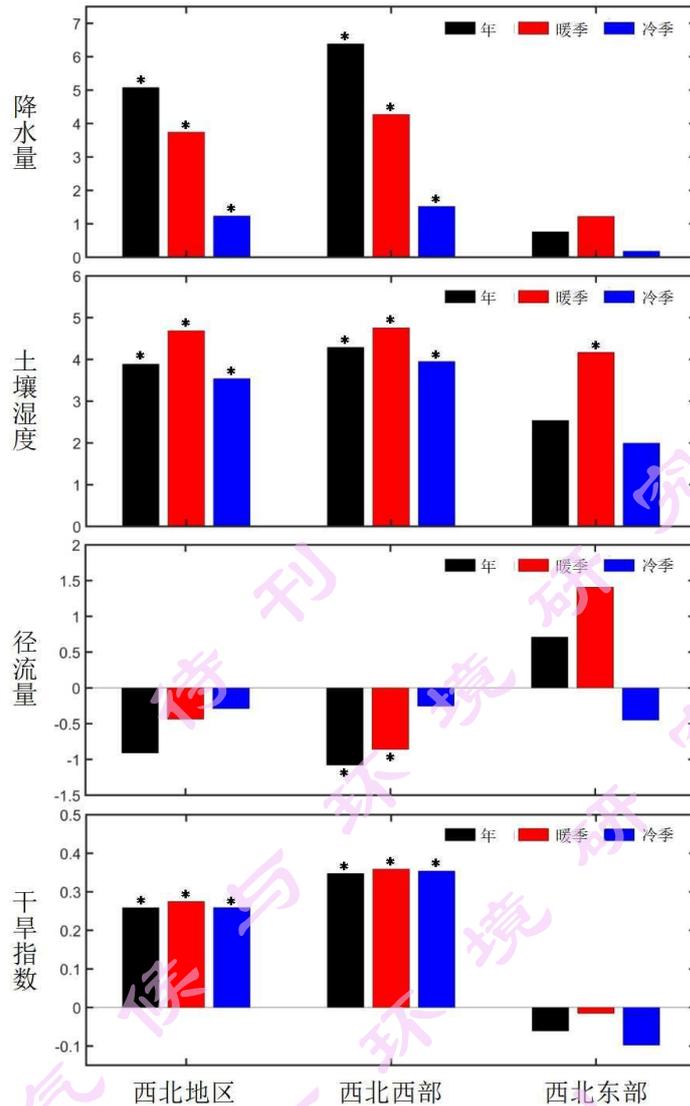
2 图5 1961~2020年我国西北地区降水量(mm)、土壤湿度(mm)、径流量(mm)和干旱指数(无量纲)

3 的距平时间序列(从左到右:西北地区、西北西部和西北东部)

4 Fig. 5 Time series of precipitation (mm), soil moisture (mm), runoff (mm) and drought index (dimensionless)

5 anomalies in Northwest China from 1961 to 2020 (from left to right: the whole of Northwest China, western of

6 Northwest China and eastern of Northwest China)



1

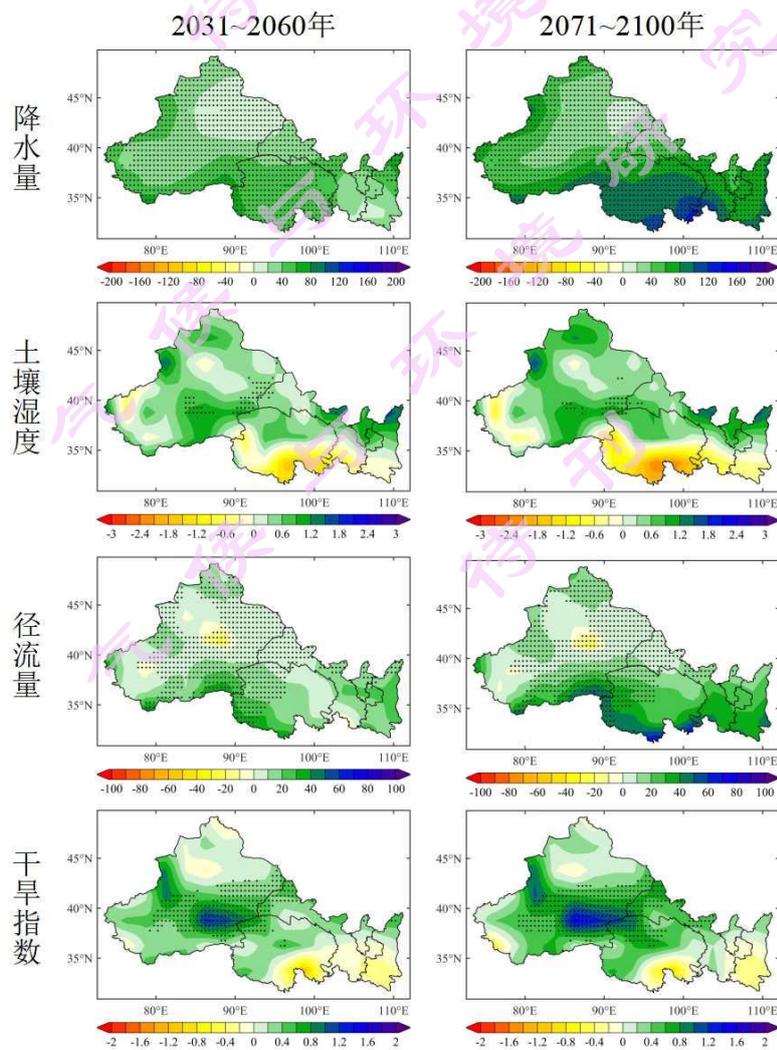
2 图6 1961~2020年我国西北地区降水量 (mm/10a)、土壤湿度 (mm/10a)、径流量 (mm/10a) 和干旱  
3 指数 (/10a) 的长期趋势统计, 标\*的表示统计结果通过了 95% 的显著性检验

4 Fig. 6 The long-term trend statistics of precipitation (mm/10a), soil moisture (mm/10a), runoff (mm/10a) and  
5 drought index (/10a) in Northwest China from 1961 to 2020. The denoted with \* indicates that the statistical  
6 results have passed the 95% significance test.

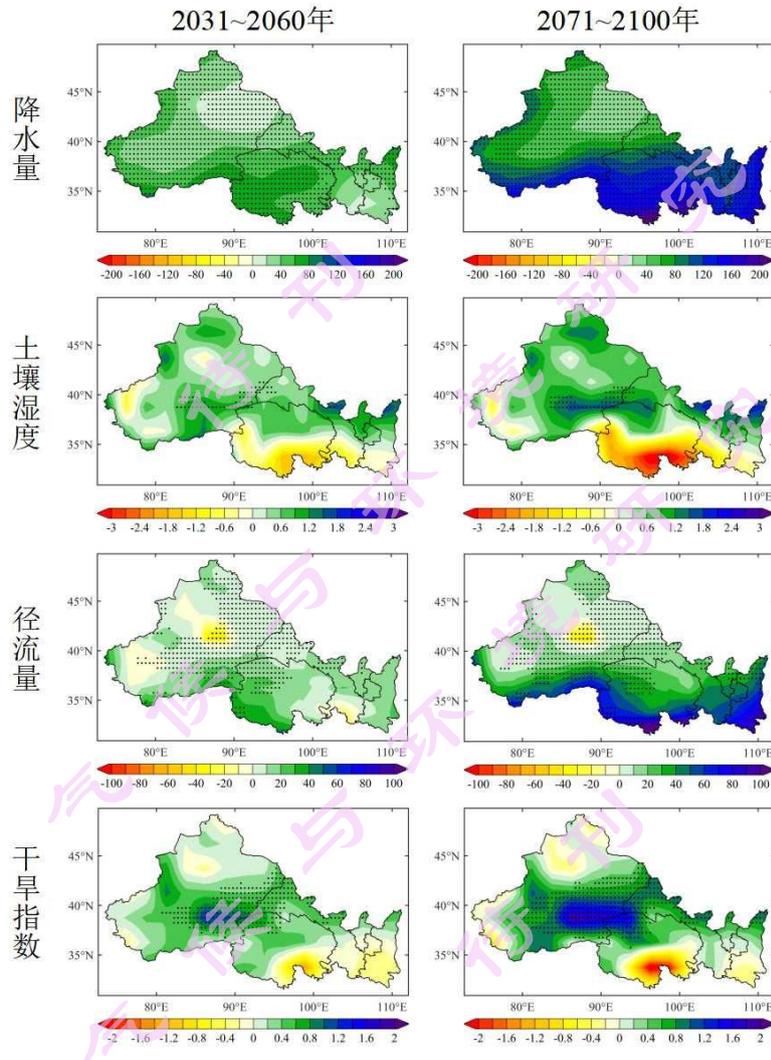
### 7 3.3 未来情景预估

8 图7和图8分别给出了中等辐射强迫情景 (SSP2-4.5) 和高等辐射强迫情景  
9 (SSP5-8.5) 下, CMIP6 多模式模拟预估的四个干湿变量在 21 世纪中期 (2031~2060  
10 年) 和后期 (2071~2100 年) 相较于历史基准时期 (1961~1990 年) 的变化。可见, 在  
11 SSP2-4.5 情境下, 21 世纪中期和后期西北地区降水一致呈现出增加的变化, 其中增加的  
12 幅度基本呈现出由东南向西北递减的分布格局, 并且相较于 21 世纪中期, 后期的增幅  
13 更明显; 在 SSP5-8.5 情境下, 未来降水变化的空间分布与 SSP2-4.5 情景基本类似, 但

1 降水变化强度明显增大，特别是在 21 世纪后期降水在青海南部等地的增幅达到了 200  
 2 mm。土壤湿度在青海南部、甘肃南部和陕西南部等地区呈现出减少的变化，其他地区  
 3 则是增加的，尤其是在陕西北部等地区增加显著，并且在 SSP5-8.5 情境下这种增加的幅  
 4 度更明显。除了新疆中部少数地区之外，径流量在西北大部分地区是增加的，西北南部  
 5 和东部增幅更明显；和降水量相似，21 世纪后期径流量的增幅相较 21 世纪中期更显著，  
 6 SSP5-8.5 情境下的增幅相较 SSP2-4.5 更显著。对于干旱指数而言，除了青海东南部、陕西  
 7 南部和甘肃东南部等少数地区之外，在其他大部分地区是增加的，尤其是在新疆南部的  
 8 增幅显著；并且 21 世纪后期的增幅相较 21 世纪中期更显著，SSP5-8.5 情境下的增幅相  
 9 较 SSP2-4.5 更显著。需要强调的是，土壤湿度和干旱指数在西北地区南部减少的原因可  
 10 能是由于气温升高对土壤湿度的负效应大于降水增加对土壤湿度的正效应，这与刘珂和  
 11 姜大膀（2015）的研究结果一致。



1 图 7 在 SSP2-4.5 情境下 CMIP6 多模式集合模拟预估的西北地区降水量 (mm)、土壤湿度 (mm)、径  
 2 流量 (mm) 和干旱指数 (无量纲) 在 21 世纪中期 (2031~2060 年, 左侧) 和后期 (2071~2100 年, 右侧)  
 3 相对历史基准时期 (1961~1990 年) 的变化, 阴影区域表示至少 80% 的模式显示为正 (或者为负)  
 4 Fig. 7 The precipitation (mm), soil moisture (mm), runoff (mm) and drought index (dimensionless) predicted by  
 5 CMIP6 models under the SSP2-4.5 in Northwest China in the middle (2031~2060, left) and later (2071~2100,  
 6 right) of the 21st century relative to the historical reference period (1961~1990). Shaded areas indicate that at  
 7 least 80% of the models are displayed as positive (or negative).



8

图 8 同图 7, 但为 SSP5-8.5 情境

9

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for SSP5-8.5.

10 从区域平均结果来看 (表 2 和图 9), CMIP6 多模式预估的降水在整个西北地区 and  
 11 东西部两个分区均呈现一致增加的趋势, 尤其是在西北东部增加的幅度更明显, SSP5-8.5  
 12 情境下的增幅 (19.55mm/dec) 相较 SSP2-4.5 (11.98mm/dec) 更显著。虽然土壤湿度的  
 13 预估结果相较于历史时期是增加的, 但增加量并不是特别显著, 变化幅度在 -0.45~0.29  
 14 之间。这可能是由于气温升高对土壤湿度的负效应与由降水增加对土壤湿度的正效应

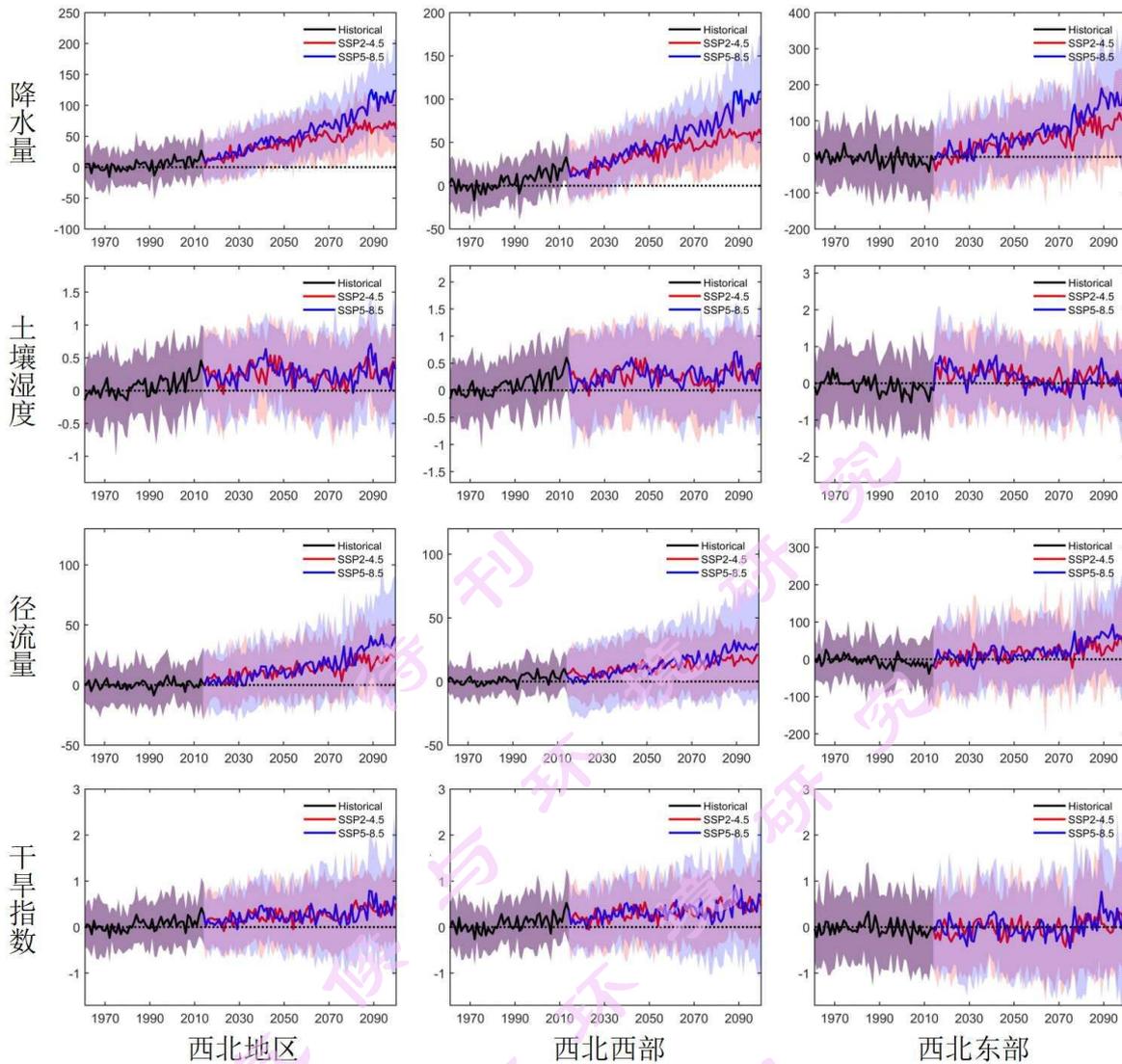
1 相抵消导致的。径流量和干旱指数与降水类似，在两种排放情境下均呈现一致增加的趋势  
 2 势，SSP5-8.5 情境下的增幅相较 SSP2-4.5 更显著；径流量在西北东部增加的幅度更明显，  
 3 而干旱指数在西北西部的增幅更大。因此，我们看出未来我国西北地区将会持续出现湿  
 4 润化的趋势，并且更高排放情境下的湿润化趋势更加明显。需要指出的是，不同的 SSP  
 5 情景下，降水变化在 21 世纪后期有较大区别，但是其他变量却不是很明显，这可能是  
 6 由于外强迫（如人类活动引起的温室气体和气溶胶）对气温长期变化趋势以及变率的影  
 7 响要远大于降水，而降水的变化特别是区域尺度上的降水主要还是受气候系统内部自然  
 8 变率的调控。土壤湿度、径流以及干旱指数等干旱指标的长期变化主要受降水和蒸发的  
 9 共同作用。外强迫引起的增温作用使得降水增加，但也使得大气蒸发需求增加，这将会  
 10 使土壤中多余的水分蒸发到大气中，从而使土壤湿度、径流以及干旱指数不呈现明显增  
 11 加趋势。另外，相较于历史时期，未来时期多模式预估结果的不确定性（图中阴影区）  
 12 明显变大，其中高排放情景下的不确定性普遍大于中低排放情景，其背后的物理机制和  
 13 成因尚待进一步深入分析研究。

14 表 2 四个干湿变量 2021-2100 年的趋势统计

15 Table 2 Trend statistics of four dry and wet variables from 2021 to 2100

		降水量 (mm/dec)	土壤湿度 (mm/dec)	径流量 (mm/dec)	干旱指数 (/dec)
西北地区	SSP2-4.5	6.86 (0.86-16.31)	0.01 (-0.15-0.16)	2.20 (-0.38-8.83)	0.04 (-0.03-0.22)
	SSP5-8.5	12.49 (1.47-25.66)	0.01 (-0.17-0.25)	3.99 (-0.86-10.96)	0.03 (-0.28-0.19)
西北西部	SSP2-4.5	5.46 (1.19-11.73)	0.01 (-0.14-0.23)	1.66 (-0.51-6.24)	0.04 (-0.03-0.22)
	SSP5-8.5	10.70 (0.57-21.92)	0.01 (-0.19-0.29)	3.17 (-1.01-9.43)	0.03 (-0.35-0.20)
西北东部	SSP2-4.5	11.98 (-0.09-32.33)	0.02 (-0.20-0.13)	4.25 (-1.61-18.73)	0.02 (-0.07-0.17)
	SSP5-8.5	19.55 (-1.54-44.44)	-0.05 (-0.45-0.12)	6.97 (-1.30-17.27)	0.02 (-0.15-0.21)

16 注：括号里面的为多模式的趋势范围



1  
 2 图9 CMIP6多模式模拟预估的降水量(mm)、土壤湿度(mm)、径流量(mm)和干旱指数(无量纲)  
 3 距平时间序列(从左至右:西北地区、西北西部和西北东部),阴影区表示多模式的标准差  
 4 Fig. 9 The time series of precipitation (mm), soil moisture (mm), runoff (mm) and drought index (dimensionless)  
 5 anomalies predicted by CMIP6 models (from left to right: the whole of Northwest China, western of Northwest  
 6 China and eastern of Northwest China), and the shaded area indicates the standard deviation of the multi-models.

#### 7 4 结论与讨论

8 本文针对先前研究提出的西北气候暖湿化转型的观点,基于四个重要的干湿变量  
 9 (降水量、土壤湿度、径流量和干旱指数),系统分析了我国西北地区干湿演变规律,  
 10 并利用最新发布的CMIP6多模式对未来干湿变化进行预估分析。所得结论如下:

11 (1) 气候平均态: 降水量和径流量均呈现出由东南向西北递减的空间分布,冷暖  
 12 季节降雨量的空间分布类似,但冷季降水量和径流量明显低于暖季。土壤湿度和前二者  
 13 的空间分布格局相似,但土壤湿度冷暖季节的分布并无显著差异。干旱指数的空间分布

1 与前面三个变量并不一致，西北大部分地区呈现出干旱的情况，并且冷暖季节干旱指数  
2 差异不大。

3 (2) 空间演变：近 30 年（1991~2020 年）相较于 1961~1990 年，降水量在西北西  
4 部显著增加，而在西北东部大部分地区则是减少的，并且暖季降水量的变化明显大于冷  
5 季。而土壤湿度在我国西北大部分地区是增加的，土壤湿度的变化在冷暖季节的分布并  
6 无显著差异。径流量除了在青海南部地区显著增加之外，在其他大部分地区则是减少的；  
7 其中暖季的变化量对年均变化量贡献较大。对于干旱指数而言，西北东部地区呈现减少  
8 的变化，西北西部大部分地区则是增加的；并且干旱指数的变化在冷暖季节的分布并无  
9 显著差异。

10 (3) 时间演变：西北地区年降水量、土壤湿度和干旱指数均呈现显著增加的趋势  
11 （增幅分别为 5.07 mm/10a、3.89 mm/10a 和 0.26 /10a），特别是 2000 年后增加的趋势  
12 更显著，并且增加值主要来源于西北西部，降水量和土壤湿度在西北东部也呈现增加的  
13 趋势，但变化趋势并不显著，而干旱指数在西北东部则是呈现微弱减小的趋势（-0.06  
14 /10a）；而径流量呈现减少的趋势（-0.91 mm/10a），并且这种减少趋势主要集中在西  
15 北西部地区，而西北东部则呈现出增加的趋势。西北地区年径流量在 2000 年之前呈现  
16 明显下降的趋势，而 2000 年后显著增加。从冷暖季节来看，降水量和径流量在暖季的  
17 变化明显大于冷季，而土壤湿度和干旱指数在暖季的变化幅度与冷季相当。

18 (4) 未来预估：在 SSP2-4.5 情境下，未来西北地区降水呈现增加的变化；土壤湿  
19 度在青海南部、甘肃南部和陕西南部等地区呈现出减少的变化，其他地区则是增加的；  
20 除了新疆中部少数地区外，径流量在西北大部分地区也是增加的；对于干旱指数而言，除  
21 了青海南部、陕西南部和甘肃东南部等少数地区之外，在其他大部分地区亦是增加的；  
22 并且 21 世纪后期四个干湿变量的增幅相较 21 世纪中期更显著，SSP5-8.5 情境下的增幅  
23 相较 SSP2-4.5 更显著。从区域平均来看，CMIP6 多模式预估的降水在整个西北地区和  
24 东西部两个分区均呈现增加的趋势，尤其是在西北东部增加更明显，SSP5-8.5 情境下的  
25 增幅更大。相较于降水，土壤湿度的变化并不是特别明显。径流量和干旱指数与降水类  
26 似，在两种排放情境下均呈现一致增加的趋势，SSP5-8.5 情境下的增幅相较 SSP2-4.5  
27 更显著；径流量在西北东部的增幅更大，而干旱指数在西北西部的增幅更大。

28 需要说明的是，虽然 CMIP6 模式相较 CMIP5 模式具有更精细的空间分辨率、更先  
29 进的云微物理过程参数化方案以及更复杂的地球系统过程（Eyring et al., 2019），但是  
30 CMIP6 多模式未来预估的结果不确定性依然很大，其背后的物理机制和成因尚待进一步

- 1 深入分析研究。并且大多数 CMIP6 模式的空间分辨率仍然太粗，不能很好的刻画西北
- 2 地区复杂地形对干湿特征的影响。因此，未来需要进一步借助高分辨率的动力降尺度结
- 3 果或者对气候模式进行系统订正校准来深入开展西北地区干湿特征的预估研究。

气候与环境研究  
待刊  
气候与环境研究  
待刊

## 1 参考文献 (References)

- 2 陈隆勋, 邵永宁, 张清芬, 等. 1991. 近 40 年我国气候变化初步分析[J]. 应用气象学报, 2: 164-174.  
3 Chen Longxun, Shao Yongning, Zhang Qinfen, et al. 1991. Preliminary analysis of climatic change  
4 during the last 39 years in China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 2:  
5 164-174
- 6 Chen Q X, Zhao T B, Hua L J, et al. 2023. Future drought changes in China projected by the CMIP6  
7 models: Contributions from key factors. *J. Meteor. Res.*, 37(4), 1–15. doi: 10.1007/s13351-023-2169-8
- 8 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 2014. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. 地理学报,  
9 69(9): 1295-1304. Chen Yaning, Li Zhi, Fan Yuting, et al. 2014. Research progress on the impact of  
10 climate change on water resources in the arid region of Northwest China [J]. *Acta Geographica Sinica*  
11 (in Chinese), 69(9): 1295-1304
- 12 Dai A G. 2011. Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during  
13 1900-2008[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116: D12115. doi: 10.1029/2010JD  
14 015541
- 15 Eyring V, Cox P M, Flato G M. 2019. Taking climate model evaluation to the next level[J]. *Nature Climate*  
16 *Change*, 9(2): 102–110. doi: 10.1038/s41558-018-0355-y
- 17 樊风, 段玮, 杨家康. 2015. 云南土壤湿度长期变化的初步研究[J]. 应用气象学报, 26(4): 409-421. Fan  
18 Feng, Duan Wei, Yang Jiakang. 2015. Preliminary results on long-term soil moisture variation in  
19 Yunnan [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 26(4): 409-421. doi:  
20 10.11898/1001-7313.20150403
- 21 冯蜀青, 王海娥, 柳艳香, 等. 2019. 西北地区未来 10a 气候变化趋势模拟预测研究[J]. 干旱气象,  
22 37(4): 557-564. Feng Shuqing, Wang Haie, Liu Yanxiang, et al. 2019. Simulation and prediction of  
23 climate change trend in the next 10 years over Northwest China [J]. *Journal of Arid Meteorology (in*  
24 *Chinese)*, 37(4): 557-564. doi: 10.11755/j.issn.1006-7639(2019)-04-0557
- 25 Ghiggi G, Humphrey V, Seneviratne S I, Gudmundsson L. 2021. G-RUN ENSEMBLE: A multi-forcing  
26 observation-based global runoff reanalysis[J]. *Water Resources Research*, 57(5), e2020WR028787.  
27 <https://doi.org/10.1029/2020WR028787>
- 28 Ghiggi G, Humphrey V, Seneviratne S I, Gudmundsson L. 2019. GRUN: an observation-based global  
29 gridded runoff dataset from 1902 to 2014[J]. *Earth System Science Data*, 11(4), 1655–1674.  
30 <https://doi.org/10.5194/essd-11-1655-2019>
- 31 Guo Y, Shen Y. 2016. Agricultural water supply/demand changes under projected future climate change in  
32 the arid region of northwestern China[J]. *Journal of Hydrology*, 540: 257–273. doi: 10.1016/j.jhydrol.  
33 2016.06.033
- 34 He Y, Jiang X, Wang N, et al. 2019. Changes in mountainous runoff in three inland river basins in the arid  
35 Hexi Corridor, China, and its influencing factors[J]. *Sustainable Cities and Society*, 50: 101703. doi:  
36 10.1016/j.scs.2019.101703
- 37 胡子瑛, 周俊菊, 张利利, 等. 2018. 中国北方气候干湿变化及干旱演变特征[J]. 生态学报, 38(6):  
38 1908-1919. Hu Ziyang, Zhou Junju, Zhang Lili, et al. 2018. Climate dry-wet change and drought  
39 evolution characteristics of different dry-wet areas in northern China [J]. *Acta Ecologica Sinica (in*  
40 *Chinese)*, 38(6):1908-1919. doi: 10.5846 /stxb201702260315
- 41 Huang J, Yu H, Dai A, Wei Y, Kang L. 2017. Drylands face potential threat under 2°C global warming  
42 target[J]. *Nature Climate Change*, 7, 417–422
- 43 Huang Q, Zhang Q, Singh V P, et al. 2017. Variations of dryness/wetness across China: Changing  
44 properties, drought risks, and causes[J]. *Global and Planetary Change*, 152: 1–12. doi: 10.1016/j.glop  
45 lacha.2017.05.010

- 1 Li B, Chen Y, Chen Z, et al. 2016a. Why does precipitation in northwest China show a significant  
2 increasing trend from 1960 to 2010[J]. *Atmospheric Research*, 167: 275–284. doi: 10.1016/j.atmosre  
3 s.2015.08.017
- 4 Li B, Chen Y, Xiong H. 2016b. Quantitatively evaluating the effects of climate factors on runoff change for  
5 Aksu River in northwestern China [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 123 (1–2): 97–105. doi:  
6 10.1007/s00704-014-1341-6
- 7 李明, 孙洪泉, 苏志诚. 2021. 中国西北气候干湿变化研究进展[J]. *地理研究*, 40(4): 1180–1194. Li  
8 Ming, Sun Hongquan, Su Zhicheng. 2021. Research progress in dry/wet climate variation in  
9 Northwest China [J]. *Geographical Research (in Chinese)*, 40(4): 1180–1194. doi:  
10 10.11821/dlyj020200328
- 11 李明星, 马柱国, 牛国跃. 2011. 中国区域土壤湿度变化的时空特征模拟研究[J]. *科学通报*, 56(16):  
12 1288–1300. Li Mingxing, Ma Zhuguo, Niu Guoyue. 2011. Modeling spatial and temporal variations in  
13 soil moisture in China [J]. *Chinese Sci Bull (in Chinese)*, 56(16): 1288–1300. doi: 10.1007/  
14 s11434-011-4493-0
- 15 刘珂, 姜大膀. 2015. RCP4.5 情景下中国未来干湿变化预估[J]. *大气科学*, 39(3): 489–502. Liu Ke,  
16 Jiang Dabang. 2015. Projected changes in the dry/wet climate of China under the RCP4.5 scenario [J].  
17 *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 39 (3): 489–502.  
18 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1406.14119
- 19 马柱国, 符淙斌. 2006. 1951–2004 年中国北方干旱化的基本事实[J]. *科学通报*, 51(20): 2429–2439. Ma  
20 Zhuguo, Fu Congbin. 2006. Basic facts of drought in northern China from 1951 to 2004 [J]. *Chinese  
21 Sci Bull (in Chinese)*, 51(20): 2429–2439
- 22 秦大河, 丁一汇, 王绍武, 等. 2002. 中国西部生态环境变化与对策建议[J]. *地球科学进展*, 17:  
23 314–319. Qin Dahe, Ding Yihui, Wang Shaowu, et al. 2002. Ecological and environmental change in  
24 west China and its response strategy [J]. *Advance in Earth Sciences (in Chinese)*, 17: 314–319
- 25 Qin J, Liu Y, Chang Y, et al. 2016. Regional runoff variation and its response to climate change and human  
26 activities in Northwest China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 75(20): 1–14. doi: 10.1007/s1266  
27 5-016-6187-z
- 28 Riahi K, van Vuuren D P, Kriegler E, et al. 2017. The shared socioeconomic pathways and their energy,  
29 land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview[J]. *Global Environment Change*, 42:  
30 153–168. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009
- 31 Street, J.O., Carroll, R.J., Ruppert, D. 1988. A note on computing robust regression estimates via iteratively  
32 reweighted least squares[J]. *Am. Stat.* 42, 152–154
- 33 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 2002. 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  
34 土*, 24: 219–226. Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. 2002. Preliminary study on signal, impact and  
35 foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China [J]. *Journal of  
36 Glaciology and Geocryology (in Chinese)*, 24: 219–226.
- 37 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 2003. 中国西北部气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. *第四  
38 纪研究*, 23: 152–164. Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. 2003. Discussion on the  
39 present climate change from warm-day to warm-wet in Northwest China [J]. *Quaternary Sciences (in  
40 Chinese)*, 23: 152–164
- 41 宋连春, 张存杰. 2003. 20 世纪西北地区降水量变化特征[J]. *冰川冻土*, 25: 143–148. Song Lianchun,  
42 Zhang Cunjie. 2003. Changing features of precipitation over Northwest China during the 20<sup>th</sup> century  
43 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese)*, 25: 143–148
- 44 Wang L, Chen W. 2014. A CMIP5 multimodel projection of future temperature, precipitation, and  
45 climatological drought in China[J]. *International Journal of Climatology*, 34(6): 2059–2078. doi:  
46 0.1002/joc.3822

- 1 王磊, 文军, 韦志刚, 等. 2008. 中国西北区西部土壤湿度及其气候响应[J]. 高原气象, 27(6):  
2 1257–1266. Wang Lei, Wen Jun, Wei Zhigang, et al. 2008. Soil moisture over the west of Northwest  
3 China and its response to climate [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27(6): 1257–1266
- 4 王绍武, 董光荣. 2002. 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)[C]. 北京: 科学  
5 出版社, 49–61
- 6 Wang Y, Yang J, Chen Y, et al. 2018. The spatiotemporal response of soil moisture to precipitation and  
7 temperature changes in an arid region, China[J]. Remote Sensing, 10(3): 468. doi: 10.3390/rs1003046  
8 8
- 9 Wang Z, Ficklin D L, Zhang Y, et al. 2012. Impact of climate change on streamflow in the arid Shiyang  
10 River Basin of northwest China[J]. Hydrological Processes, 26(18): 2733–2744. doi: 10.1002/hyp.  
11 8378
- 12 Wang Z, Li J, Lai C, et al. 2017. Does drought in China show a significant decreasing trend from 1961 to  
13 2009[J]. Science of the Total Environment, 579: 314–324. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.098
- 14 王宗太. 1991. 天山中段及祁连山东段小冰期以来冰川及环境[J]. 地理学报, 46: 160–168. Wang  
15 Zongtai. 1991. The glacier and environment in the middle sector of Tianshan and the eastern sector of  
16 Qilianshan since the little ice age [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 46: 160–168
- 17 Wei K, Wang L. 2013. Reexamination of the aridity conditions in arid northwestern China for the last  
18 decade[J]. Journal of Climate, 26(23): 9594–9602. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00605.1
- 19 谢金南, 周嘉陵. 2001. 西北地区中、东部降水趋势的初步研究[J]. 高原气象, 20: 362–367. Xie Jinnan,  
20 Zhou Jialing. 2001. A preliminary study on trends and interannual variation of precipitation in  
21 central and western portions of Northwest region of China [J], Plateau Meteorology (in Chinese), 20:  
22 362–367
- 23 Yang P, Xia J, Zhang Y, et al. 2017. Drought assessment in Northwest China during 1960–2013 using the  
24 Standardized Precipitation Index[J]. Climate Research, 72(1): 73–82. doi: 10.3354/cr01451
- 25 Yun Fan, and Huug van den Dool. 2004. Climate Prediction Center global monthly soil moisture data set at  
26 0.5 degree resolution for 1948 to present[J]. J. of Geophysical Research, 109, D10102. doi:10.1029  
27 /2003JD004345
- 28 翟盘茂, 任福民, 张强. 1999. 中国降水极值变化趋势检测[J]. 气象学报, 57: 208–216. Zhai Panmao,  
29 Ren Fumin, Zhang Qiang. 1999. Detection of trends in China's precipitation extremes [J]. Acta  
30 Meteorological Sinica (in Chinese), 57: 208–216
- 31 张存杰, 高学杰, 赵红岩. 2003. 全球气候变暖对西北地区秋季降水的影响[J]. 冰川冻土, 25: 157–168.  
32 Zhang Cunjie, Gao Xuejie, Zhao Hongyan. 2003. Impact of global warming on Autumn precipitation  
33 in Northwest China [J], Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 25: 157–168
- 34 张蕾, 吕厚荃, 王良宇, 等. 2016. 中国土壤湿度的时空变化特征[J]. 地理学报, 71(9): 1494–1508.  
35 Zhang Lei, Lv Houquan, Wang Liangyu, et al. 2016. Spatial-temporal characteristics of soil moisture  
36 in China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 71(9): 1494–1508
- 37 Zhang Q, Liu J, Singh V P, et al. 2017. Hydrological responses to climatic changes in the Yellow River  
38 basin, China: Climatic elasticity and streamflow prediction[J]. Journal of Hydrology, 554: 635–645.  
39 doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.09.040
- 40 Zhao FB, Ma S, Wu YP. 2021. Changes in Dry-Season Water Availability and Attributions in the Yellow  
41 River Basin, China [J]. Frontiers in Environmental Science, 9, 762137
- 42 张强, 胡隐樵, 曹晓彦, 等. 2000. 论西北干旱气候的若干问题[J]. 中国沙漠, 20(4), 357–362. Zhang  
43 Qiang, Hu Yinqiao, Cao Xiaoyan, et al. 2000. On some problems of arid climate system of Northwest  
44 China [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 20(4), 357–362