

基于CMIP5的中国西北地区暖湿化演变研究

杜懿, 王大刚, 祝金鑫

(中山大学地理科学与规划学院, 广东广州510275)

摘要: 为了解中国西北地区历史与未来时期的气候演变趋势,以CMFD再分析数据集及CMIP5全球气候模式输出数据为基础,从时空维度详细分析了西北地区历史气候的演变特征并对区域未来气候发展进行了预估。结果表明:1979-2018年西北地区的气温、降水量以及近地面空气比湿均呈现出明显的增加趋势,且未来极有可能继续增加;此外,降水量在年内的分配过程越趋均匀化,且降水结构在2001年左右发生了较大突变。整体来看,西北地区的历史气候演变显示出高度的暖湿化倾向。未来情景下,西北地区的气候将继续朝暖湿化方向发展,同时降水量的年内分配不均匀性也将进一步减小,且在RCP8.5排放情景下表现的更为突出。本研究可为西北地区气候变化的影响评估提供参考,同时也为水利、农业、气象和生态等部门的决策提供科学依据。

关键词: 气候演变; 暖湿化; 全球气候模式; 降水集中度; 基尼系数; 西北地区

中图分类号: P467

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)05-0061-09

Study on warming and humidification evolution in northwest China based on CMIP5

DU Yi, WANG Dagang, ZHU Jinxin

(School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: To understand the historical and future climate evolution trends in northwest China, the evaluation and projection of climate in northwest China were analyzed spatiotemporally based on CMFD (China meteorological forcing dataset) and the outputs of the CMIP5 global climate models. The results reveal that there was a significant increase in air temperature, precipitation and the near surface air humidity in northwest China during the period of 1979 to 2018, and they are most likely to keep increasing in the future. In addition, the precipitation process was more evenly distributed within the year, and its structure had gone through a significant abrupt change around 2001. Overall, the historical climate evolution in northwest China showed a strong tendency of warming and humidification. In the future scenario, the climate in northwest China will continue to develop towards warming and humidification, and the inhomogeneous distribution of precipitation within the year will keep narrowing down, especially in the RCP8.5 emission scenario. The study can provide a guideline for the assessment of the climate change in northwest China, and it also provides a scientific basis for the decision-making of water conservancy, agriculture, meteorology, ecology and other related administration departments.

Key words: climate change; warming and humidification; global climate model; precipitation concentration degree; Gini coefficient; northwest China

1 研究背景

自18世纪工业革命以来,随着化石能源的大规模使用,温室气体的排放量与日俱增,现已造成全世

界范围内的气候变暖^[1]。政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次评估报告显示,1880-2012年全球平均地表温度升高了0.85℃,且未来仍将继续上升,

收稿日期:2021-05-31; 修回日期:2021-07-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51779278)

作者简介:杜懿(1994-),男,安徽定远人,博士研究生,研究方向为水文气象学。

通讯作者:王大刚(1975-),男,河北张家口人,博士,教授,博士生导师,研究方向为全球气候变化及陆面过程模拟。

预计到21世纪末(2081-2100年),全球平均地表温度将比1986-2005年增加 $0.3 \sim 4.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [2]。气候变化会对自然生态系统和人类社会经济发展产生重大影响,而通过预估气候状况能够有效降低未来可能面临的风险和挑战 [3]。区域气候对于全球变暖大背景的响应一直以来都是学术界的研究热点,西北干旱区作为我国气候变化的敏感区域,对其历史气候演变进行揭示和未来气候发展进行预估均有着重要的现实意义。

全球气候模式(global climate model, GCM)是现阶段进行气候模拟和气候变化预估的主要手段,尤其是在未来气候变化预估上, GCM更是起到了主导作用 [4]。CMIP5 (coupled model inter-comparison project phase 5) 模式自发布以来,在中国区域的适用性研究成果丰硕,且多数研究表明 CMIP5 模式对于气候平均态的模拟效果较好 [5-10]; 另一部分研究则指出, CMIP5 模式对于气温的模拟能力要优于降水,但通过多模式集合处理能够有效提高模式模拟结果的可靠性与稳定性 [11-15]。

近年来,有关学者注意到西北地区的气候呈现出较为显著的变湿趋势,且主要表现为降水量的增加,但对于区域未来气候的发展预估却少有研究 [16-18]。此外,以往研究所关注的气象因子主要集中在降水上,而对于近地面气温和空气比湿等要素的分析则有所欠缺,很难从整体上把握西北地区的气候演变特征。

鉴于此,为准确了解我国西北地区在过去和未来时期内的气候演变情况,本文先对研究区过去40年内的气候变化特征进行分析总结,再基于 CMIP5 全球气候模式输出数据来预估未来不同排放情景下研究区的气温、降水量和近地面空气比湿等气象因子的时空演变特征,进而全面揭示西北地区未来气候的发展趋势。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

西北地区地域辽阔,自西向东分别包括新疆维吾尔自治区、青海省、甘肃省、宁夏回族自治区和陕西省,总面积约为 $308 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全国陆地面积的 31.7%, 地理范围介于 $73^{\circ}40' \sim 111^{\circ}15' \text{ E}$, $31^{\circ}36' \sim 48^{\circ}10' \text{ N}$ 。由于地处亚欧大陆腹地,除秦岭以南地区外大部分地区降水稀少,全年降水量多在 500 mm 以下,属大陆性干旱半干旱气候和高寒气候。由于降水稀少、气候干旱、沙漠广布等原因,西北地区的

多年平均地表水量约为 $2200 \times 10^8 \text{ m}^3$, 仅占全国总径流量的 8% 左右。图1为西北地区的地理高程空间分布情况。

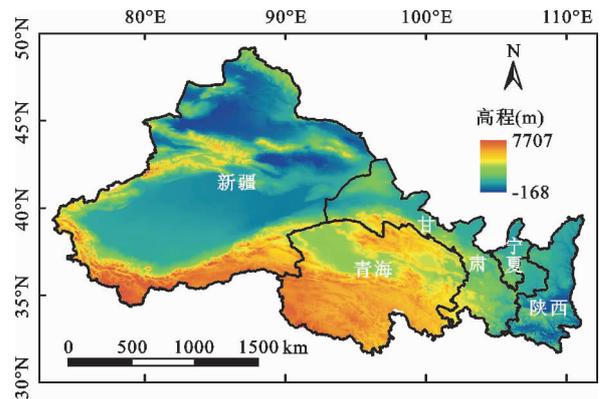


图1 西北地区地理高程空间分布示意图

2.2 数据来源与处理

2.2.1 历史气候数据 本文使用国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/>) 提供的中国区域地面气象要素驱动数据集 [19] (China meteorological forcing dataset, CMFD) 来分析西北地区历史时期内(1979-2018年)的气候演变特征。该数据集包括近地面气温、近地面气压、近地面空气比湿、近地面全风速、地面降水率、地面向下短波辐射和地面向下长波辐射等要素,最高时间分辨率为 3 h, 水平空间分辨率为 0.1° , 精度优于国际上现有的再分析数据集 [20]。

2.2.2 未来气候数据 CMIP5 是于 2008 年启动的新一代全球气候系统模式,该模式由于采用了更合理的参数化方案、通量处理方案和耦合器技术,使得模式的模拟、预估能力得到了较大程度的提高,为预估未来气候变化提供了重要的数值模拟资料 [21]。CMIP5 根据辐射强迫变化设定了不同的典型浓度路径 (representative concentration pathways, RCPs), 其中以中等浓度路径 RCP4.5 和高等浓度路径 RCP8.5 最具代表性 [22]。

本文使用 RCP4.5 和 RCP8.5 两种排放情景下的 24 个 CMIP5 气候模式的输出数据来分析西北地区未来时期(2021-2100年)的气候变化状况,涉及到的气象因子主要有气温、降水量和近地面空气比湿,各气候模式的基本信息如表 1 所示,数据来源于 <https://esgf-node.llnl.gov/projects/esgf-llnl/>。由于各模式的水平空间分辨率不尽相同,使用双线性插值法将全部模式的输出统一插值到 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 的格点上 [23-24]。

表 1 CMIP5 全球气候模式基本信息

编号	CMIP5 模式	所属国家	所属机构	水平分辨率
1	ACCESS1 - 0	澳大利亚	CSIRO - BOM	$1.875^{\circ} \times 1.25^{\circ}$
2	ACCESS1 - 3	澳大利亚	CSIRO - BOM	$1.875^{\circ} \times 1.25^{\circ}$
3	CNRM - CM5	法国	CNRM - CERFACS	$1.4^{\circ} \times 1.4^{\circ}$
4	CSIRO - Mk3 - 6 - 0	澳大利亚	CSIRO - QCCCE	$1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$
5	FIO - ESM	中国	FIO	$2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$
6	FGOALS - s2	中国	LASG - IAP	$2.8^{\circ} \times 1.67^{\circ}$
7	GISS - E2 - H	美国	NASA GISS	$2.5^{\circ} \times 2.0^{\circ}$
8	GISS - E2 - H - CC	美国	NASA GISS	$2.5^{\circ} \times 2.0^{\circ}$
9	GISS - E2 - R	美国	NASA GISS	$2.5^{\circ} \times 2.0^{\circ}$
10	GISS - E2 - R - CC	美国	NASA GISS	$2.5^{\circ} \times 2.0^{\circ}$
11	HadCM3	英国	MOHC	$3.75^{\circ} \times 2.46^{\circ}$
12	HadGEM2 - AO	韩国	NIMR - KMA	$1.875^{\circ} \times 1.24^{\circ}$
13	INMCM4	俄罗斯	INM	$2.0^{\circ} \times 1.5^{\circ}$
14	IPSL - CM5A - LR	法国	IPSL	$3.75^{\circ} \times 1.875^{\circ}$
15	IPSL - CM5A - MR	法国	IPSL	$2.5^{\circ} \times 1.25^{\circ}$
16	IPSL - CM5B - LR	法国	IPSL	$3.75^{\circ} \times 1.875^{\circ}$
17	MIROC5	日本	MIROC	$1.4^{\circ} \times 1.4^{\circ}$
18	MIROC - ESM	日本	MIROC	$2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$
19	MIROC - ESM - CHEM	日本	MIROC	$2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$
20	MPI - ESM - LR	德国	MPI - M	$1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$
21	MPI - ESM - MR	德国	MPI - M	$1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$
22	MRI - CGCM3	日本	MRI	$1.125^{\circ} \times 1.125^{\circ}$
23	NorESM1 - M	挪威	NCC	$2.5^{\circ} \times 1.875^{\circ}$
24	NorESM1 - ME	挪威	NCC	$2.5^{\circ} \times 1.875^{\circ}$

以往研究表明, FIO - ESM、MIROC5、MPI - ESM - LR 和 MPI - ESM - MR 等模式对西北地区的气温模拟能力较好; 而 CNRM - CM5、IPSL - CM5A - LR、MIROC5 和 MRI - CGCM3 等模式对西北地区的降水模拟能力较好^[25-28]。目前尚未见到有关 CMIP5 模式对于西北地区近地面空气比湿模拟能力的评估研究, 故本文以 CMFD 数据集为基准值, 以泰勒图为综合评价指标, 对 ACCESS1 - 0、ACCESS1 - 3、CSIRO - Mk3 - 6 - 0、FGOALS - s2、GISS - E2 - H、GISS - E2 - H - CC、GISS - E2 - R、GISS - E2 - R - CC、HadCM3、HadGEM2 - AO、INMCM4、IPSL - CM5A - LR、IPSL - CM5A - MR、IPSL - CM5B - LR、MIROC5、MIROC - ESM、MIROC - ESM - CHEM、MRI - CGCM3、NorESM1 - M、NorESM1 - ME 等模式在历史期内(1979 - 2005 年)的模拟效果进行评价, 并从中优选出对西北地区近地面空气比湿模拟效果

较好的全球气候模式。

2.3 研究方法

泰勒图^[29] (Taylor diagram) 能够直观且全面地评估多个 CMIP5 气候模式在西北地区对近地面空气比湿的模拟能力。其基本原理是利用三角转换关系将模拟场与观测场的相关系数、均方根误差以及标准差置于同一张极坐标图中, 当模式点与观测点之间的欧式距离越近时, 即表明该模式的模拟能力越强^[30]。为提高 CMIP5 气候模式模拟结果的稳定性与可靠性, 采用多模式集合平均方法 (multi-model ensemble mean, MEM) 来降低不同气候模式对西北地区各气象因子模拟的系统偏差, 其中等权集合平均是目前使用最为广泛的集合平均方法之一。在评价气象因子时间序列的趋势显著性时, 综合采用 Spearman 秩次相关检验法和 Mann - Kendall 非参数检验法^[31]; 在检测气象因子时间序列的突变点时,

综合采用滑动 t 检验、有序聚类分析、Lee - Heghinian 检验和 Pettitt 检验^[32];在判断气象因子时间序列的趋势持续性时,使用 Hurst 指数^[33]来进行描述;在表征气象因子时间序列的年内分配不均匀性时,采用降水集中度^[34]和基尼系数^[35]两个量化指标来进行分析。

3 结果分析与讨论

3.1 历史时期西北地区气候变化特征

通过分析 1979 - 2018 年西北地区的气温、降水量和近地面空气比湿来综合反映研究区历史时期内的气候演变特征。若气温升高,则说明气候在逐渐变暖;若降水量和空气比湿增加,则说明气候变得愈

加湿润。

3.1.1 时间尺度气候变化 1979 - 2018 年西北地区逐年平均气温、降水量和近地面空气比湿的变化过程见图 2,该 3 个气象因子序列趋势显著性检验结果见表 2。

由图 2 和表 2 可知,1979 - 2018 年西北地区多年平均气温为 3.75 °C,多年平均降水量为 239.56 mm,多年平均近地面空气比湿约为 3.8×10^{-3} 。该时段内西北地区的年均气温、降水量和近地面空气比湿均呈现出波动上升趋势,且在 0.05 显著性水平检验下,增加趋势均十分显著,其中,气温增速约为 0.42 °C/10a,降水量增速约为 23 mm/10a。总体来看,过去近 40 年内西北地区气候存在较强的暖湿化倾向。

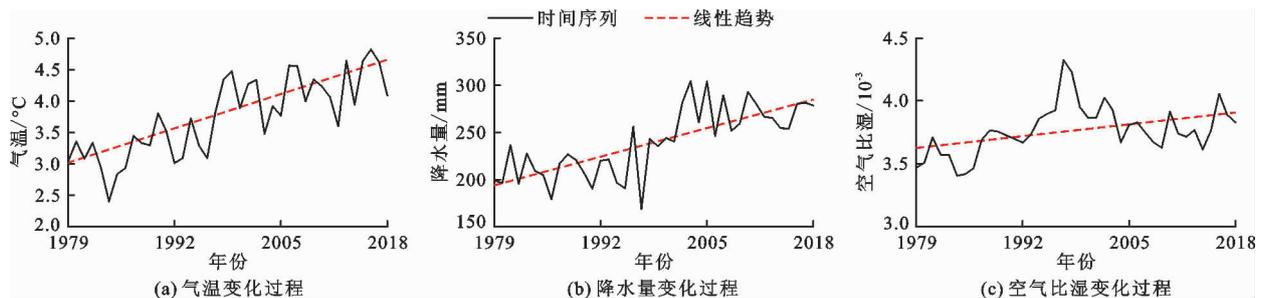


图 2 1979 - 2018 年西北地区逐年平均气温、降水量和近地面空气比湿的变化过程

表 2 1979 - 2018 年西北地区气象因子序列趋势显著性检验

气象因子	Spearman 秩次相关检验			Mann - Kendall 非参数检验		
	T	$t_{\alpha/2}$	检验结果	Z	$U_{\alpha/2}$	检验结果
气温	8.24	2.02	显著上升	5.34	1.96	显著上升
降水	7.26	2.02	显著上升	4.83	1.96	显著上升
空气比湿	3.22	2.02	显著上升	2.83	1.96	显著上升

经计算,西北地区 1979 - 2018 年的年均气温、降水量和近地面空气比湿 3 个气象因子时间序列的 Hurst 指数分别为 0.94、0.95 和 0.94,远大于 0.5 且接近于 1,说明未来西北地区的气温、降水量和近地面空气比湿极有可能将继续增加。

图 3 为 1979 - 2018 年西北地区年降水量时间序列的突变检测。通过突变检验发现,2001 年为最大可能突变年份,以 2001 年为界,1979 - 2001 年的多年平均降水量为 214.3 mm,2002 - 2018 年的多年平均降水量为 273.7 mm,增幅高达 28%。为了解历史时期西北地区降水在年内分配过程中的变化情况,图 4 给出了逐年降水集中度与基尼系数的变化过程。由图 4 可以看出,无论是降水集中度(图 4(a))还是基尼系数(图 4(b))均呈现出明显的减小

趋势,说明西北地区的降水在 1979 - 2018 年的年内分配过程快速趋向均匀。

3.1.2 空间尺度气候变化 图 5 为 1979 - 2018 年西北地区多年平均气温、降水量和近地面空气比湿的空间分布情况。由图 5 可以看出,气温的空间分布与研究区内的地貌特征具有较高的相关性,其中,沙漠区为气温高值区,山区为气温低值区;降水量的空间分布具有一定的条带规律,总体表现为从低值中心向四周逐渐增加,且越靠近东南方向,降水越丰沛;除东南区域空气比湿较高外,其余绝大多数区域的空气比湿均低于 6.0×10^{-3} 。

图 6 为 1979 - 2018 年西北地区多年平均气温、降水量和近地面空气比湿变化率的空间分布情况。由图 6 可以看出,绝大部分区域均表现为气温上升,

只有西南区域局部存在气温下降的变化;大部分区域均表现为降水增加,仅在北部和东南角小范围区

域表现为降水减少;近地面空气比湿方面,绝大部分区域也都表现为空气比湿增加。

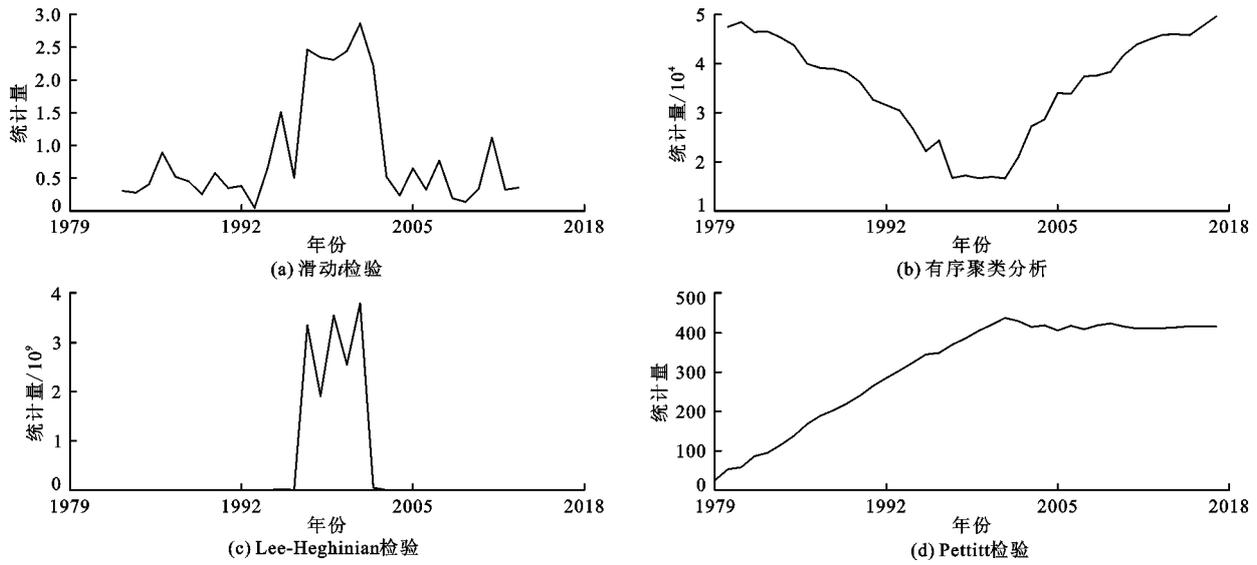


图 3 1979 - 2018 年西北地区年降水量时间序列的突变检测

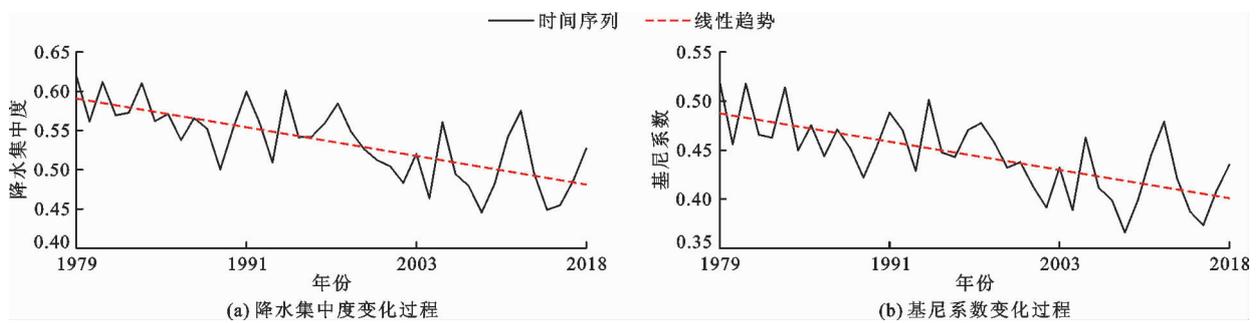


图 4 1979 - 2018 年西北地区降水集中度和基尼系数的变化过程

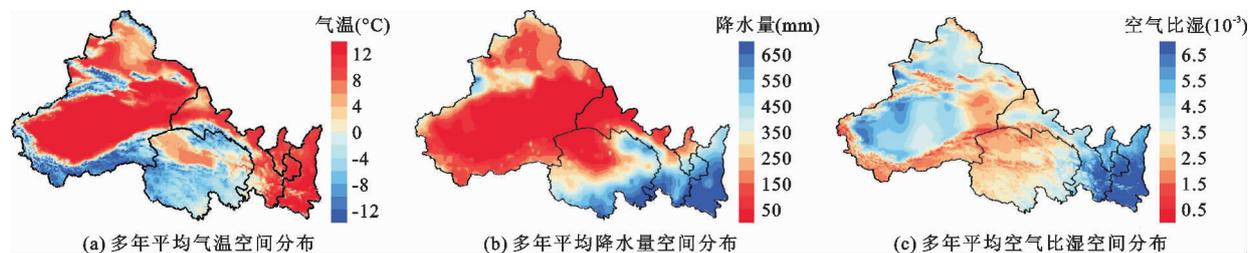


图 5 1979 - 2018 年西北地区多年平均气温、降水量和近地面空气比湿空间分布

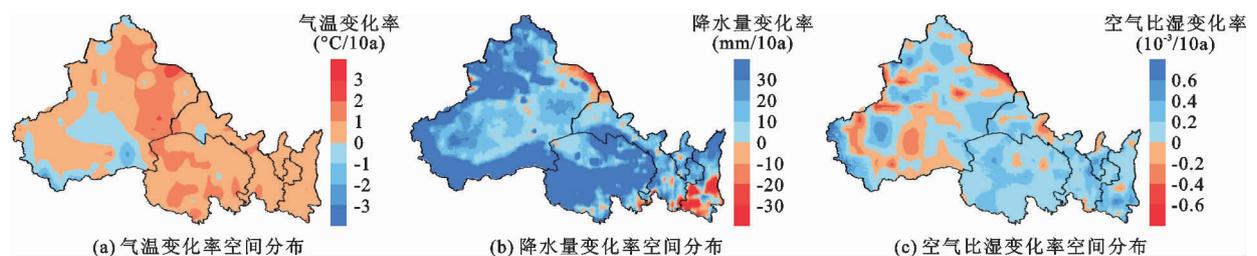


图 6 1979 - 2018 年西北地区多年平均气温、降水量和近地面空气比湿变化率空间分布

3.2 未来时期西北地区气候变化特征
考虑到 CMFD 数据集的时间长度为 1979 -

2018 年,而 CMIP5 气候模式输出数据的时间长度为 1850 - 2005 年,为进行模式的评价工作,将二者的

时间长度统一到 1979 - 2005 年,共包含有 27 个年份,时间分辨率均为月尺度。

由于 CMFD 数据集和 CMIP5 气候模式输出数据的空间分辨率不一致,需要先将 CMFD 和气候模式输出的近地面空气比湿数据重采样到相同的 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 网格上,然后再将数据的网格范围裁剪到研究区域,并获得各格点 CMFD 和气候模式的近地面空气比湿序列。至此,便可绘制泰勒图以进行模式的选取,泰勒图结果如图 7 所示。由图 7 可见,第 22 号(MRI - CGCM3)、第 16 号(IPSL - CM5B - LR)、第 24 号(NorESM1 - ME)和第 12 号(HadGEM2 - AO)模式的位置距离 CMFD 相对最近,表明这些模式对于西北地区近地面空气比湿的模拟效果较好。

综上所述,本文采用 FIO - ESM、MIROC5、MPI - ESM - LR 和 MPI - ESM - MR 等模式的等权集合平均来分析研究区的气温变化特征;采用 CNRM - CM5、IPSL - CM5A - LR、MIROC5 和 MRI - CGCM3 等模式的等权集合平均来研究降水量变化特征;采用 MRI - CGCM3、IPSL - CM5B - LR、NorESM1 - ME 和 HadGEM2 - AO 等模式的等权集合平均来分析近地面空气比湿的变化特征。

3.2.1 时间尺度气候变化 基于 CMIP5 集合平均气候模式对 2021 - 2100 年不同情景下西北地区的年均气温、降水量和近地面空气比湿的变化过程进行分析,结果见图 8,不同情景下该 3 个气象因子序列趋势显著性检验结果见表 3。

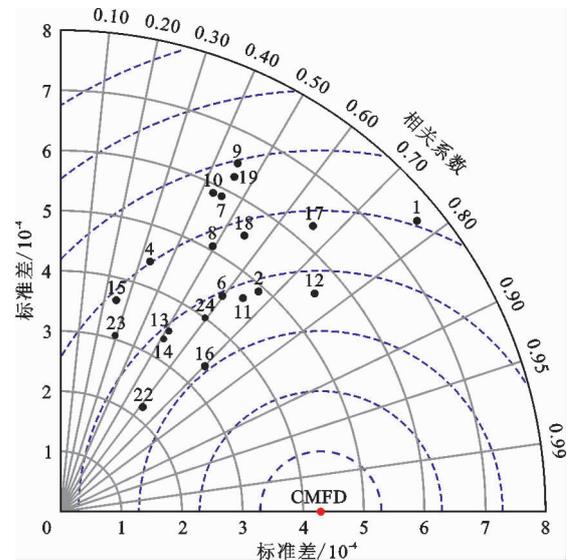


图 7 各个全球气候模式对西北地区近地面空气比湿模拟的泰勒图结果

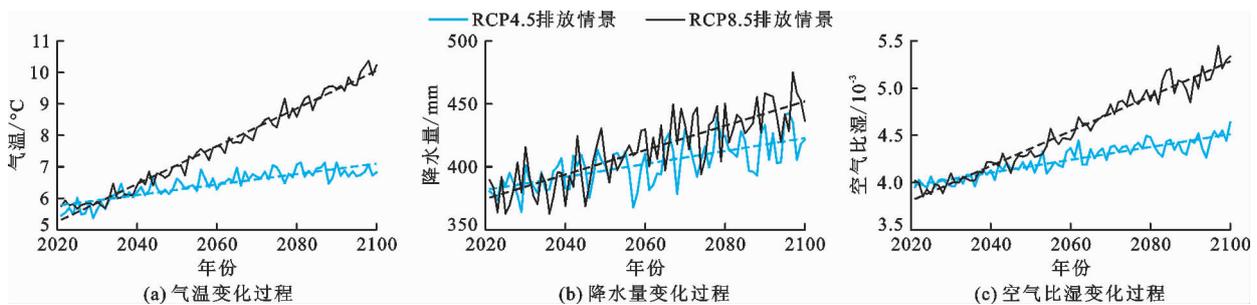


图 8 2021 - 2100 年不同情景下西北地区年均气温、降水量和近地面空气比湿的变化过程

表 3 2021 - 2100 年不同情景下西北地区气象因子序列趋势显著性检验

气象因子(情景)	Spearman 秩次相关检验			Mann - Kendall 非参数检验		
	T	$t_{\alpha/2}$	检验结果	Z	$U_{\alpha/2}$	检验结果
气温(RCP4.5)	14.97	1.99	显著上升	9.01	1.96	显著上升
降水(RCP4.5)	7.68	1.99	显著上升	6.16	1.96	显著上升
空气比湿(RCP4.5)	18.63	1.99	显著上升	9.72	1.96	显著上升
气温(RCP8.5)	61.37	1.99	显著上升	12.07	1.96	显著上升
降水(RCP8.5)	13.21	1.99	显著上升	8.30	1.96	显著上升
空气比湿(RCP8.5)	46.09	1.99	显著上升	11.70	1.96	显著上升

由图 8 和表 3 可看出,在 RCP4.5 和 RCP8.5 两种排放情景下,未来 2021 - 2100 年西北地区的气温、降水量和近地面空气比湿均表现为显著增长趋势,且

RCP8.5 排放情景下的增幅要远高于 RCP4.5 情景。

表 4 列出了不同时期西北地区各气象因子的多年平均变化率。由表 4 可见,相较于历史时期,在

RCP4.5 排放情景下,气温、降水量和近地面空气比湿的增速均存在不同程度的减缓;而在 RCP8.5 排放情景下,除降水量增速变缓外,气温和近地面空气比湿的增速则有较大程度的提高。

图 9 为 2021 - 2100 年西北地区降水集中度与基尼系数的变化过程,反映了未来降水年内分配过程的变化情况。由图 9 可以看出,两种排放情景下,西北地区在未来时期内的降水集中度和基尼系数均呈现出减小趋势,且 RCP8.5 排放情景下的减小趋势更为显著,表明未来西北地区的年内降水分配过程将进一步趋向均匀。

3.2.2 空间尺度气候变化 为了更好地揭示未来不同时期西北地区各气象因子的空间变化特征,本

文将未来研究期划分为 3 个时段,即 2021 - 2050 年为未来近期时段、2051 - 2080 年为未来中期时段、2081 - 2100 年为未来远期时段。图 10 ~ 12 分别为未来不同时段在不同排放情景下西北地区多年平均气温、降水量和近地面空气比湿的空间分布。

由图 10 ~ 12 可以看出,在 RCP4.5 排放情景下,未来不同时段内气温和降水量的空间分布较为稳定,而近地面空气比湿的空间分布则有微弱变化,主要表现为新疆南部略有增大;在 RCP8.5 排放情景下,未来不同时段内降水量依旧保持着较为稳定的空间分布,而气温则表现为整体升高的态势,近地面空气比湿则表现为以新疆南部塔里木盆地为中心的高值区覆盖范围扩张性增大。

表 4 不同时期西北地区各气象因子的多年平均变化率

年份(情景)	气温/ $(^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1})$	降水量/ $(\text{mm} \cdot (10\text{a})^{-1})$	空气比湿/ $10^{-3} (10\text{a})^{-1}$
1979 - 2018	0.42	23.36	0.070
2021 - 2100(RCP4.5)	0.17	5.15	0.068
2021 - 2100(RCP8.5)	0.60	9.68	0.180

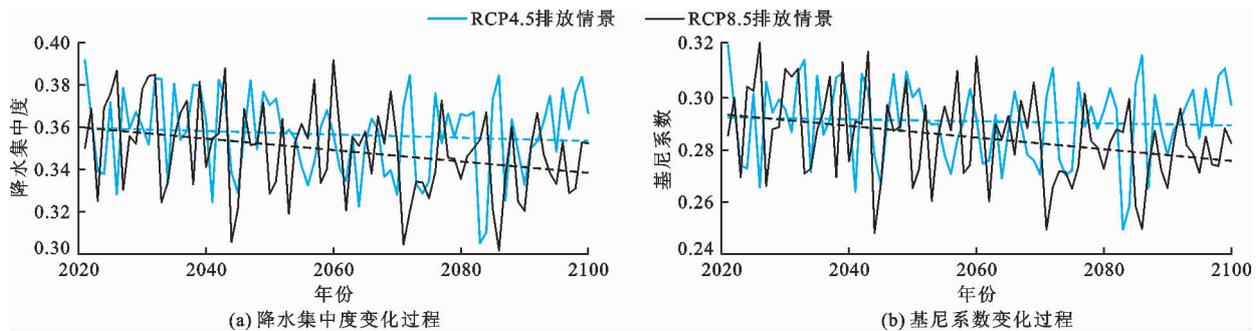


图 9 2021 - 2100 年西北地区降水集中度和基尼系数的变化过程

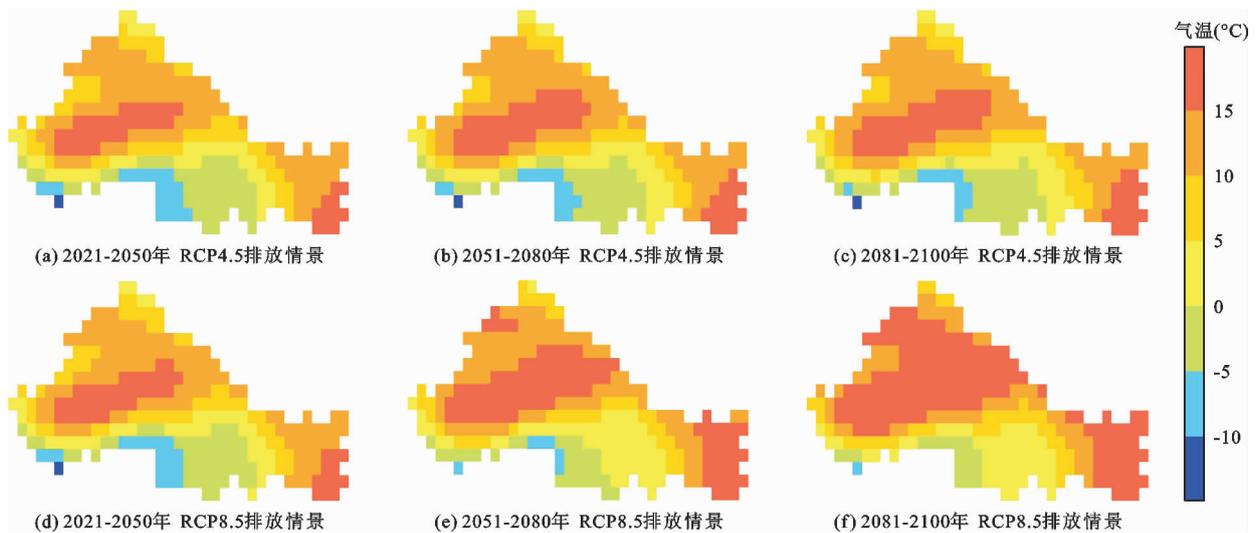


图 10 不同排放情景下未来不同时段西北地区多年平均气温空间分布

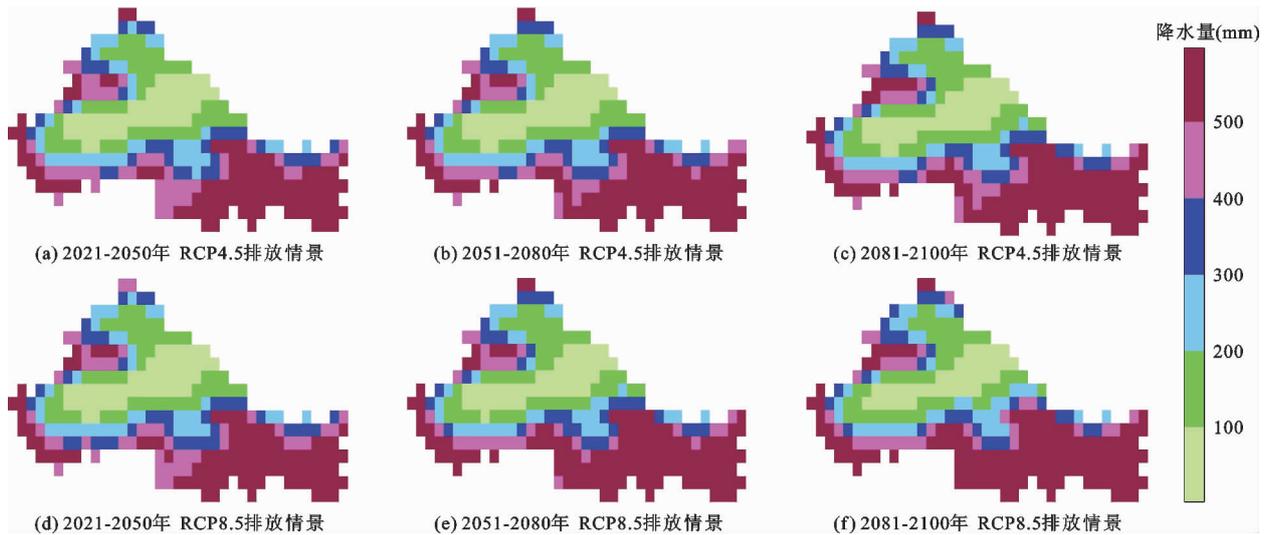


图 11 不同排放情景下未来不同时段西北地区多年平均年降水量空间分布

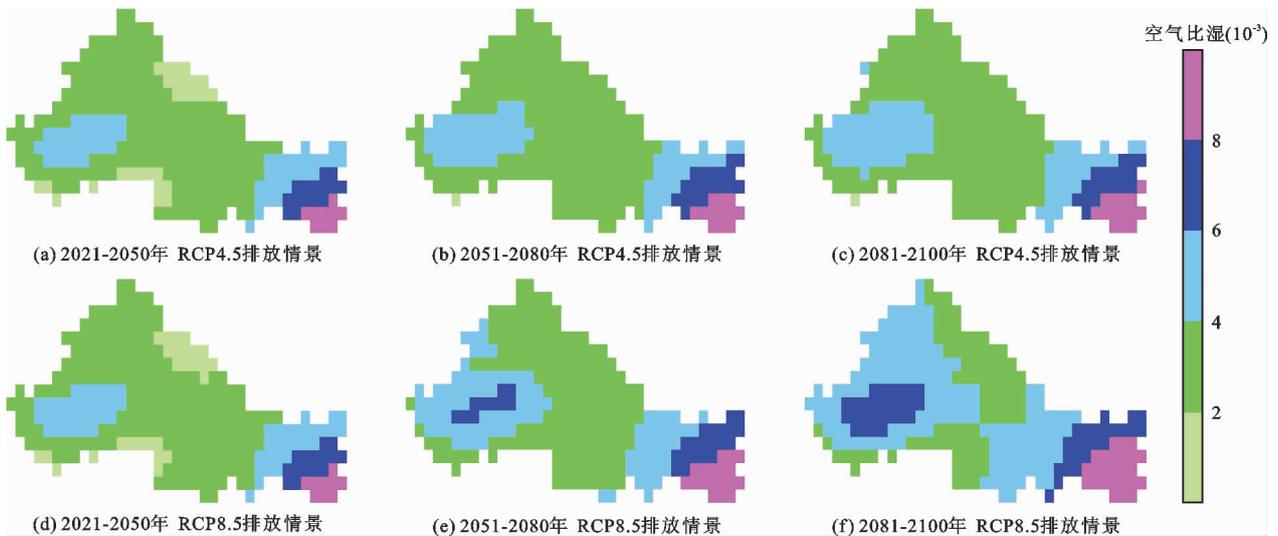


图 12 不同排放情景下未来不同时段西北地区多年平均近地面空气比湿空间分布

综上所述,近 40 年来西北地区的气温、降水量和近地面空气比湿均呈现出较为显著的增加趋势,表明西北地区的历史气候存在明显的暖湿化演变倾向。根据 CMIP5 全球气候模式的模拟结果,未来时期内(2021-2100 年),两种不同排放情景下,西北地区气候的暖湿化发展趋势仍将持续,但在 RCP4.5 排放情景下,暖湿化发展速度会放缓,而在 RCP8.5 排放情景下,暖湿化趋势会进一步加强。Zhang 等^[36]的最新研究成果也表明,过去 60 年间西北干旱区的气温和降水量均呈现一致增加趋势,且干燥度明显持续减小,气候朝暖湿化方向发展是确定无疑的,这与本文的研究结果一致。西北地区气候的暖湿化演变,可以有效增加区域水资源量,一方面是因为降水量的增多,另一方面则是由于气温升高会加速冰川积雪融化,这对于西北地区的社会经济发

展以及生态环境改善有着重要意义。造成西北地区历史气候发生暖湿化的原因可能是因为全球气温升高,陆面蒸散发加强,导致水循环加快,降水增多;此外,近 30 年来西风带环流明显加强,而西北地区的水汽主要是靠西风带环流系统从洋面输送而来,水汽输送能力的增加会大大促进区域气候的湿润化。

4 结 论

基于 CMFD 数据集及 CMIP5 气候模式输出数据对西北地区历史(1979-2018 年)和未来(2021-2100 年)时期内的气候变化特征进行了分析研究,得出以下主要结论:

(1) 1979-2018 年西北地区的年均气温、降水量和近地面空气比湿均显著增加,表明区域历史气候存在暖湿化演变特征;未来时期,在 RCP4.5 排放

情景下,区域的暖湿化趋势将有所放缓,而在RCP8.5排放情景下,暖湿化趋势将进一步增强。

(2)1979-2018年西北地区的降水结构在2001年左右发生了明显突变,且降水在年内的分配呈均匀化趋势;未来时期,西北地区的降水年内分配不均匀性将持续减小,以RCP8.5排放情景更为显著。

(3)在RCP4.5排放情景下,西北地区未来气温、降水量和近地面空气比湿的空间分布特征大体上保持稳定;而在RCP8.5排放情景下,西北地区未来气温和近地面空气比湿的空间分布格局发生了较大的变化,主要表现为高值区覆盖范围的不断扩大。

参考文献:

- [1] 云翔,程嘉艺,李庆祥. CMIP5 气候模式对亚洲升温幅度的模拟与预估[J]. 气象,2020,46(2):145-157.
- [2] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [3] 胡婷,孙颖,张学斌. 全球 1.5 和 2℃ 温升时的气温和降水变化预估[J]. 科学通报,2017,62(26):3098-3111.
- [4] 成爱芳,冯起,张健恺,等. 未来气候情景下气候变化响应过程研究综述[J]. 地理科学,2015,35(1):84-90.
- [5] 周秀华,肖子牛. 基于 CMIP5 资料的云南及周边地区未来 50 年气候预估[J]. 气候与环境研究,2014,19(5):601-613.
- [6] 张武龙,张井勇,范广洲. CMIP5 模式对我国西南地区干湿季降水的模拟和预估[J]. 大气科学,2015,39(3):559-570.
- [7] 陶纯苇,姜超,孙建新. CMIP5 多模式集合对东北三省未来气候变化的预估研究[J]. 地球物理学报,2016,59(10):3580-3591.
- [8] 王涛,王乙舒,崔妍,等. 气候模式对东北三省降水模拟能力评估及预估[J]. 气象与环境学报,2016,32(5):52-60.
- [9] 赵亮,刘健,靳春寒. CMIP5 多模式集合对江苏省气候变化模拟评估及情景预估[J]. 气象科学,2019,39(6):739-746.
- [10] 肖登攀,赵彦茜,柏会子,等. CMIP5 全球气候模式对华北平原气候的模拟和预估[J]. 地理与地理信息科学,2020,36(2):75-82.
- [11] XU Ying, XU Chonghai. Preliminary assessment of simulations of climate changes over China by CMIP5 multi-models[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2012, 5(6): 489-494.
- [12] XU Chonghai, XU Ying. The projection of temperature and precipitation over China under RCP scenarios using a CMIP5 multi-model ensemble[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2012, 5(6): 527-533.
- [13] CHEN L, FRAUENFELD O W. Surface air temperature changes over the twentieth and twenty-first centuries in China simulated by 20 CMIP5 models[J]. Journal of Climate, 2014, 27(11): 3920-3937.
- [14] 周文翀,韩振宇. CMIP5 全球气候模式对中国黄河流域气候模拟能力的评估[J]. 气象与环境学报,2018,34(6):42-55.
- [15] 伍清,蒋兴文,谢洁,等. 基于 CMIP5 资料的西南地区 2020-2050 年气温多模式集合预估[J]. 干旱气象,2018,36(6):971-978.
- [16] 任国玉,袁玉江,柳艳菊,等. 我国西北干燥区降水变化规律[J]. 干旱区研究,2016,33(1):1-19.
- [17] 商沙沙,廉丽妹,马婷,等. 近 54 a 中国西北地区气温和降水的时空变化特征[J]. 干旱区研究,2018,35(1):68-76.
- [18] 廉陆鹂,刘滨辉. 近 58 a 我国西北地区干期与湿期变化特征[J]. 干旱区地理,2019,42(6):1301-1309.
- [19] 阳坤,何杰. 中国区域地面气象要素驱动数据集(1979-2018) [DB]. 国家青藏高原科学数据中心,2019.
- [20] HE Jie, YANG Kun, TANG Wenjun, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China[J]. Scientific Data, 2020-07-25. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0369-y>.
- [21] TAYLOR K E, STOUFFER R J, MEEHL G A. An overview of CMIP5 and the experiment design[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(4): 485-498.
- [22] MOSS R H, EDMONDS J A, HIBBARD K A, et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment[J]. Nature, 2010, 463(7282): 747-756.
- [23] 李佳瑞,牛自耕,冯岚,等. CMIP5 模式对长江和黄河流域极端气温指标的模拟与预估[J]. 地球科学,2020,45(6):1887-1904.
- [24] 于灏,周筠珺,李倩,等. 基于 CMIP5 模式对四川盆地湿季降水与极端降水的研究[J]. 高原气象,2020,39(1):68-79.
- [25] 吴昊旻,黄安宁,何清,等. 10 个 CMIP5 模式预估中亚地区未来 50a 降水时空变化特征[J]. 干旱区地理,2013,36(4):669-679.
- [26] 陈晓晨. CMIP5 全球气候模式对中国降水模拟能力的评估[D]. 北京:中国气象科学研究院,2014.
- [27] 苏琪骅. 基于 CMIP5 模式在中国地区温度与降水的模拟评估及集合预报方法研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2017.
- [28] 李晓菲,徐长春,李路,等. CMIP5 模式对西北干旱区典型流域气温模拟能力评估:以开都-孔雀河为例[J]. 资源科学,2019,41(6):1141-1153.

(下转第 77 页)

- bust vegetation parameterization for green roofs in the EPA stormwater management model (SWMM) [J]. *Hydrology*, 2021, 8(1): 8010012.
- [9] ROSA D J, CLAUSEN J C, DIETZ M E. Calibration and verification of SWMM for low impact development [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2015, 51(3): 746 – 757.
- [10] ESLAMI S M R. GIS application for assessment of low-impact development effects on stormwater runoff [D]. Kuala Lumpur: University Teknologi Malaysia, 2010.
- [11] BAEK S S, CHOI D H, JUNG J W, et al. Optimizing low impact development (LID) for stormwater runoff treatment in urban area, Korea: Experimental and modeling approach [J]. *Water Research*, 2015, 86: 122 – 131.
- [12] 吴亚男,熊家晴,任心欣,等. 深圳鹅颈水流域 SWMM 模型参数敏感性分析及率定研究 [J]. *给水排水*, 2015, 51(11): 126 – 131.
- [13] 郭凤,陈建刚,杨军,等. SWMM 模拟植草沟功能的参数敏感性分析 [J]. *中国给水排水*, 2016, 32(9): 131 – 134 + 139.
- [14] 肖友淦. 基于 SWMM 的年径流总量控制率计算探讨 [J]. *给水排水*, 2019, 55(7): 64 – 69.
- [15] 靳俊伟,黄丽萍,程巍. 重庆市海绵城市年径流总量控制指标解读 [J]. *中国给水排水*, 2016, 32(6): 15 – 18.
- [16] 史悦,彭宇欣,丁艳萍,等. 基于容积法的地下空间暴雨内涝风险模型及应用 [J]. *中国给水排水*, 2019, 35(23): 127 – 133.
- [17] 牛樱. 西安市小寨区域海绵城市建设项目技术总结 [J]. *给水排水*, 2020, 56(S1): 613 – 618.
- [18] 李沐寒,尹海伟,孔繁花,等. 南京市鼓楼区 LID 空间配置与雨洪调控效益研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(3): 30 – 38.
- [19] ZENG Zhiqiang, YUAN Xiaohui, LIANG Ji, et al. Designing and implementing an SWMM-based web service framework to provide decision support for real-time urban stormwater management [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2021, 135: 104887.
- [20] 侯精明,李东来,王小军,等. 建筑小区尺度下 LID 措施前期条件对径流调控效果影响模拟 [J]. *水科学进展*, 2019, 30(1): 45 – 55.
- [21] 徐慧珺. 基于 SWMM 模型的南京典型区雨洪模拟研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2017.
- [22] 陈莎,陈晓宏. 城市雨水径流污染及 LID 控制效果模拟 [J]. *水资源保护*, 2018, 34(5): 13 – 19.
- [23] 蔡庆拟,陈志和,陈星,等. 低影响开发措施的城市雨洪控制效果模拟 [J]. *水资源保护*, 2017, 33(2): 31 – 36.
- [24] 熊向隰,那金,潘晓峰,等. 基于 SWMM 模型的海绵城市措施效果模拟研究——以深圳市光明新区为例 [J]. *给水排水*, 2018, 54(4): 129 – 133.
- [25] 朱甜甜,于增知,于晗,等. 基于不同土地利用类型下的初期雨水径流污染特征分析与 LID 措施研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(3): 8 – 14.
- [26] 金丽娜,张雅斌,赵荣,等. 西安市极端强降水时空分布特征 [J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(25): 197 – 201 + 204.
- [27] 毕旭,程龙,姚东升,等. 西安城区暴雨雨型分析 [J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(35): 295 – 297 + 325.

(上接第 69 页)

- [29] TAYLOR K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, 106(7): 183 – 192.
- [30] 张娇艳,李扬,吴战平,等. 贵州省未来气候变化(2018 – 2050 年)预估分析 [J]. *气象科技*, 2018, 46(6): 1165 – 1171.
- [31] 胡慧杰,崔凯,曹茜,等. 黄河近百年径流演变特征分析 [J]. *人民黄河*, 2019, 41(9): 14 – 19.
- [32] 杜懿. 水文时间序列的特性分析及预测研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- [33] 栾金凯,刘登峰,冯九梁,等. 1961 – 2015 年山东省降水量时空变化特征分析 [J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(S1): 47 – 54.
- [34] 董满宇,王磊鑫,李洁敏,等. 1960 – 2017 年滦河流域降水集中度与集中期时空变化特征 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(4): 468 – 475.
- [35] 齐泓玮,尚松浩,李江. 中国水资源空间不均匀性定量评价 [J]. *水力发电学报*, 2020, 39(6): 28 – 38.
- [36] ZHANG Qiang, YANG Jinhu, WANG Wei, et al. Climatic warming and humidification in the arid region of northwest China: Multi-scale characteristics and impacts on ecological vegetation [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2021, 35(1): 113 – 127.