

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2022.03.10

# 毛乌素沙地气候变暖停滞现象及其气温和降水特征

李佳<sup>1</sup>, 郭岚<sup>1</sup>, 杨梅焕<sup>1</sup>, 赵刚<sup>2</sup>, 王涛<sup>1</sup>

(1. 西安科技大学测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西国图信息技术有限公司, 陕西 西安 710034)

**摘要:** 1998–2012年气候变暖停滞(hiatus)是全球气候变暖过程中的特殊现象,该现象表现为气温增速变缓、不变或出现下降趋势。毛乌素沙地生态环境脆弱,对气候变化较为敏感,研究该区域气候变暖停滞现象及其气温和降水变化特征,对于科学调整区域植被生态环境保护政策具有重要参考价值。基于1970–2019年毛乌素沙地气温和降水地面观测数据,利用线性趋势法、Mann–Kendall突变检验法等对气候变暖停滞现象及其气温和降水变化特征进行了分析。结果表明:1970–2019年,毛乌素沙地年际和季节平均气温、降水量均呈显著增加趋势( $P < 0.05$ ),表现出“暖湿化”特征;1998–2012年,毛乌素沙地年平均气温变化速率为 $-0.70\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ( $P < 0.05$ ),存在明显的hiatus现象。Hiatus现象发生期间,各季节平均气温均呈下降趋势,其中春季和冬季降温速率最高,年降水量仍呈增加趋势,其中夏季和秋季增加速率最高;hiatus现象结束后(2012–2019),毛乌素沙地年际和季节平均气温变化速率达到1970–2019年的2~3倍;年降水量呈减少趋势,其中秋季减少速率最高,春季增加速率最高。Hiatus现象发生期间和结束后的年际和季节平均气温、降水量变化呈明显相反的变化过程。研究认为毛乌素沙地1998–2012年存在明显的hiatus现象,表现为年平均气温显著下降、年降水量增加的特征。Hiatus现象发生期间和结束后的气温、降水反向变化需引起重视,可能会对毛乌素沙地植被生态环境变化造成一定影响。

**关键词:** 气候变暖停滞; 气温; 降水; 变化趋势; 毛乌素沙地

中图分类号: P42

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)03-0072-09

## Climate warming hiatus and characteristics of air temperature and precipitation in Mu Us Sandy Land

LI Jia<sup>1</sup>, GUO Lan<sup>1</sup>, YANG Meihuan<sup>1</sup>, ZHAO Gang<sup>2</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>

(1. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi Guotu Information Technology Co., Ltd., Xi'an 710034, China)

**Abstract:** As a special phenomenon in the process of global warming, climate warming hiatus is characterized by slow, stagnated or decreased growth of air temperature. The ecology of the Mu Us Sandy Land is fragile and sensitive to climate change, the research on the hiatus and the characteristics of air temperature and precipitation has important referential value for the appropriate adjustment of regional vegetation ecology protection policies in this area. Based on the ground observation data of air temperature and precipitation in the Mu Us Sandy Land during 1970–2019, we adopted the linear trend method and the Mann–Kendall test method to analyze the hiatus and the characteristics of air temperature and precipitation in this area. The results showed the inter-annual and seasonal average air temperature and precipitation increased significantly ( $P < 0.05$ ), presenting the characteristics of “warm and humid” in the Mu Us Sandy Land during 1970–2019. From 1998 to 2012, the annual average air temperature change rate was  $-0.70\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  ( $P < 0.05$ ), hiatus was readily recognized. During the occurrence of hiatus, the average air temperature in each season showed a downward trend, with the highest decreasing rate in spring and winter; whereas the annual precipitation still showed an increasing trend, with the highest increasing rate in summer and autumn. After the hiatus (2012–2019), the change rates of the inter-annual and

收稿日期:2021-09-04; 修回日期:2022-01-29

基金项目:国家自然科学基金项目(41807063、41977059);江西省交通运输厅科技项目(2020H0011)

作者简介:李佳(1996–),女,陕西延安人,硕士研究生,主要从事地理信息研究。

通讯作者:郭岚(1965–),女,甘肃天水人,副教授,主要从事测绘与地理信息研究。

seasonal average air temperature reached 2 – 3 times of those of 1970 – 2019, and the annual precipitation showed a decreasing trend, with the highest decreasing rate in autumn and the highest increasing rate in spring. The inter-annual and seasonal air temperature and precipitation changes during and after the hiatus showed obvious opposite change processes. It is concluded that there was an obvious hiatus in the Mu Us Sandy Land during 1998 – 2012, which was characterized by a significant decrease in annual average air temperature and an increase in annual precipitation. Attention should be paid to the reverse changes of air temperature and precipitation during and after the occurrence of the hiatus, which may have a certain impact on the vegetation ecology change in the Mu Us Sandy Land.

**Key words:** climate warming hiatus; air temperature; precipitation; change trend; Mu Us Sandy Land

## 1 研究背景

全球气候变暖及其引发的全球和区域极端气候事件(极端降水和极端干旱事件)频发等,给人类社会造成了极大的生命和财产损失,受到广泛重视<sup>[1-2]</sup>。气候变化过程较为复杂,存在明显周期性特征。全球气候变暖过程中气温变化的波动性也受到较多关注,其中1998 – 2012年全球平均气温变化速率仅为0.05 °C/10a(HadCRUT 4数据集),远低于1970 – 1998年的变化速率0.18 °C/10a,部分学者将气温增速放缓、部分区域气温增速不变或下降的1998 – 2012年称为气候变暖停滞时期(hiatus)<sup>[3-5]</sup>,并开展了气候变暖停滞时期的湖泊响应、气候变化特征等方面的研究<sup>[6-8]</sup>。尽管气候变暖停滞并未改变全球气候变暖进程及其所引起的全球极端气候事件的发生<sup>[9]</sup>,但气候变暖停滞作为全球气候变暖过程中的特殊现象,对其发生期间和发生前后的气温、降水变化特征、驱动因素、生态响应等,以及其可能导致的潜在气候灾害进行科学研究与判断,有助于合理调整我国生态环境及公共管理政策,以适应未来气候变化。

气候变暖停滞现象是否存在、是否具有全球同步性以及极端气候事件对其的响应状况是国内外学者关注的问题。Wang等<sup>[10]</sup>研究证实1998 – 2012年 $\delta^{18}\text{O}$ 略有下降,表明了全球气候变暖停滞现象的存在。但Huang等<sup>[11]</sup>研究认为全球平均气温计算时若考虑北极情况,则不存在气候停滞现象。Trenberth<sup>[12]</sup>研究认为冬季北半球尤其是欧亚大陆气候变暖停滞现象尤为明显。这些研究结果表明 hiatus 现象确实存在,但不具有全球同步性。国内学者对我国气候变暖停滞现象也开展了国家和区域层面相关研究工作。如杜勤勤等<sup>[13]</sup>研究认为我国平均气温存在明显的变暖中断,尤其是我国东部和西北地区。李哲等<sup>[14]</sup>通过进一步研究表明,我国西北地区1998 – 2012年年平均气温增速(-0.20 °C/10a)较全球同期(0.05 °C/10a)下降了0.25 °C/10a,气候

变暖停滞现象明显,冬季平均气温增速减缓可能是气候变暖停滞的主因。区域层面上, Ma等<sup>[15]</sup>研究认为内蒙古也存在同全球气候变化过程中类似的 hiatus 现象。我国大部分地区1998 – 2012年存在 hiatus 现象<sup>[13-16]</sup>,但青藏高原地区该现象不明显<sup>[17]</sup>。在气候变暖停滞导致的极端气候事件方面, Wang等<sup>[18]</sup>研究认为气候变暖停滞导致我国干旱发生概率提高了2倍; Chen等<sup>[19]</sup>研究表明气候变暖停滞导致长江 – 淮河流域极端低温频率增大; Oiu等<sup>[20]</sup>研究认为气候变暖停滞导致长江流域降水量低于正常水平。上述研究表明我国存在 hiatus 现象并且该现象具有明显的区域差异。

毛乌素沙地属于农林牧交错区域,气候变化对其生态环境影响较大。受全球气候变暖影响,20世纪60年代以来毛乌素沙地气候整体呈变暖趋势,植被生态状况逐步改善<sup>[21-23]</sup>。已有研究主要开展了长时间序列的气候变化研究,缺少毛乌素沙地气候变暖停滞现象的针对性研究。本研究利用1970 – 2019年毛乌素沙地地面气象站点观测数据,开展1998 – 2012年 hiatus 现象研究,并对比不同时期其气温、降水变化特征,以期为该地区应对气候变化产生的水资源、植被生态环境变化提供科学参考。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 研究区概况

毛乌素沙地位于36°48'N ~ 40°12'N、106°10'E ~ 110°55'E之间,属于鄂尔多斯高原与黄土高原过渡带,涉及3省(自治区)12县(区、市、旗),主要位于陕西省榆林市北部、内蒙古自治区鄂尔多斯高原东南部和宁夏回族自治区东北部。沙地行政总面积约为 $9.20 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,海拔介于255 ~ 2 000 m之间,整体南北高,东西低(图1)。年平均气温为6.7 ~ 9.7 °C,气候由西北向东南呈干旱 – 半干旱 – 半湿润的过渡。年降水量为210 ~ 475 mm,主要集中在7 – 9月,呈东南向西北递减特征。植被类型主要由西北向东南表

现为半荒漠草原-草原-森林草原的过渡。土地类型错综复杂,农林牧交错分布,矿产资源、地下水资源丰富,是我国重要的能源化工基地之一。

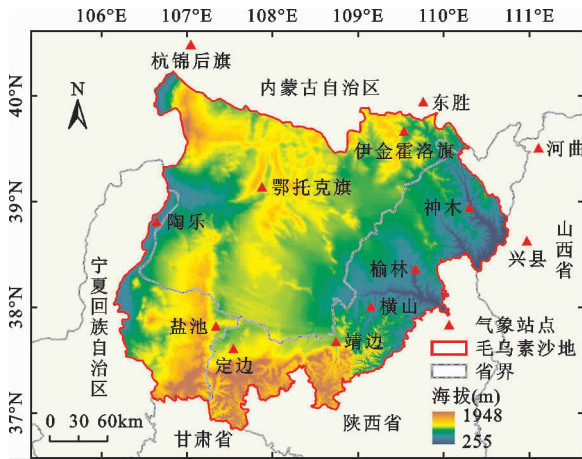


图1 毛乌素沙地概况及气象站点分布

2.2 数据来源

本文采用的气象数据收集自中国气象数据网 (http://data.cma.cn),包括毛乌素沙地及其周边13个气象站点1970-2019年逐日平均气温和逐日降水量数据。对于缺失的气温和降水数据,采用1970-2019年该站点同日多年平均值进行插补。日降水量为微量值时,用其实际值进行替换。季节划分采用3-5月为春季,6-8月为夏季,9-11月为秋季、12-次年2月为冬季的方式。

2.3 研究方法

2.3.1 线性趋势法 线性趋势法是用于分析气温、降水等时间序列数据的常用方法之一,具体计算方法参见文献[24]。线性趋势包括线性变化速率的计算和显著性检验。

本文利用线性趋势方法对1970-2019年、1970-1998年、1998-2012年、2012-2019年4个不同时间阶段毛乌素沙地年际和季节平均气温、降水量变化趋势特征进行对比分析,明确毛乌素沙地是否存在hiatus现象及其表现出的气温、降水变化特征。

2.3.2 Mann-Kendall 突变检验 Mann-Kendall (M-K)法是一种人为影响少、定量化程度高的非参数统计检验方法,具体计算方法参见文献[25]。本文采用此方法对1970-2019年毛乌素沙地年际和季节平均气温、降水量进行突变检验,并结合年际和季节平均气温、降水量的距平值变化曲线,综合分析判断变化过程的突变年份及突变前后的平均气温和降水量的变化特征。

3 结果与分析

3.1 气温年际和季节变化特征

1970-2019年不同时段毛乌素沙地年际和季节平均气温线性变化速率见表1,年际和季节平均气温距平值变化如图2所示。

表1 1970-2019年不同时段毛乌素沙地年际和季节平均气温线性变化速率

时间尺度	平均气温线性变化速率 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$			
	1970-2019年	1970-1998年	1998-2012年	2012-2019年
全年	0.42**	0.39*	-0.70*	1.03
春季	0.54**	0.36	-0.69	0.91
夏季	0.25**	0.09	-0.24	0.85
秋季	0.36**	0.41*	-0.59	1.18
冬季	0.50**	0.77*	-1.35	1.01

注:“\*”表示通过0.05显著性检验;“\*\*”表示通过0.01显著性检验。

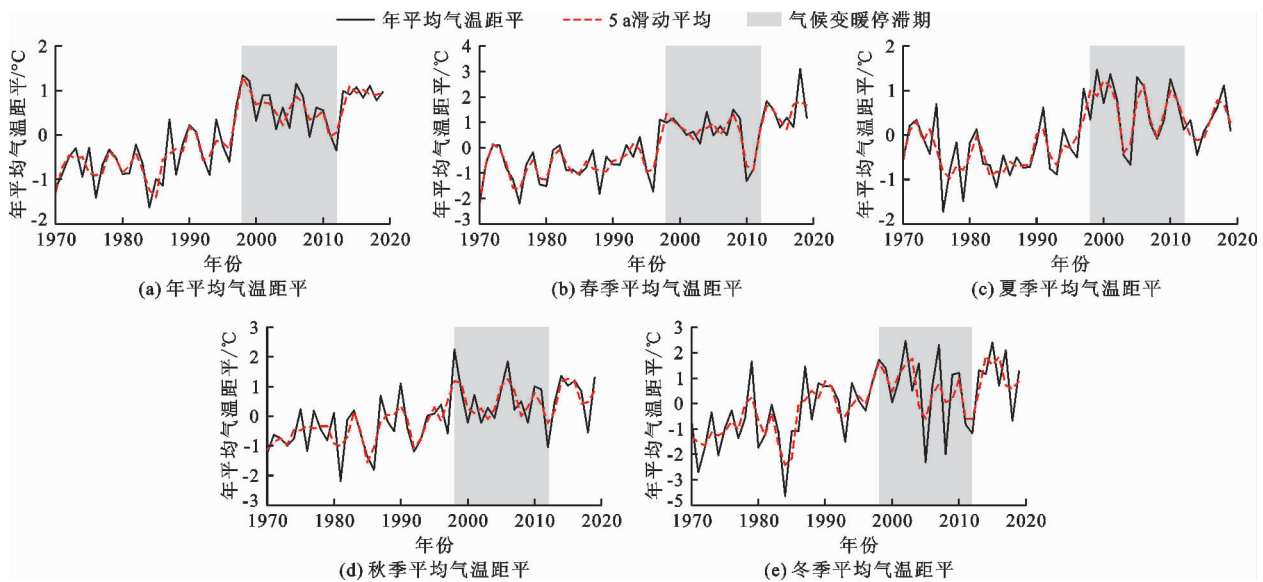


图2 1970-2019年毛乌素沙地年际和季节平均气温距平值变化

对表 1 和图 2 综合分析如下:

(1)气温年际变化特征方面,1970 - 2019 年毛乌素沙地年平均气温总体呈显著线性增加趋势,增加速率为  $0.42\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  ( $P < 0.01$ ),约为我国年平均气温增加速率( $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ )的 2 倍,是全球年平均气温增加速率( $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ )的 3.5 倍<sup>[2]</sup>。分阶段来看,1970 - 1998 年毛乌素沙地年平均气温呈不显著线性增加过程,增加速率为  $0.39\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ;1998 - 2012 年呈显著线性减少过程,减少速率为  $-0.70\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  ( $P < 0.05$ ),低于 HadCRUT4 数据集给出的 1998 - 2012 年全球平均气温增加速率( $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ )<sup>[5]</sup>,这一结果表明 1998 - 2012 年毛乌素沙地存在明显的 Hiatus 现象。2012 年以后毛乌素沙地年平均气温呈不显著线性增加过程,增加速率达到  $1.03\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。世界气象组织在报告中指出<sup>[26]</sup>,2015 年以后全球拥有了有记录以来最热的 5 年,全球变暖没有停止。尽管全球气候变暖大趋势不会因为短时期气温下降或增加速率停滞而改变,但毛乌素沙地气候变暖停滞过程中的降温作用和结束后的大幅升温过程可能对植被生态产生影响,需重点关注。

(2)气温季节变化特征方面,1970 - 2019 年毛乌素沙地各季节平均气温均呈显著线性增加趋势,春季和冬季平均气温增加速率高于 1970 - 2019 年,分别为  $0.54\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  ( $P < 0.01$ )和  $0.50\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  ( $P < 0.01$ );秋季和夏季平均气温增加速率低于 1970 - 2019 年,分别为  $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  ( $P < 0.01$ )和  $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  ( $P < 0.01$ )。分阶段来看,气候变暖停滞发生前的 1970 - 1998 年,毛乌素沙地各季节平均气温均呈线性增加过程,其中冬季和秋季平均气温增加速率最高,分别达到  $0.77\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  ( $P < 0.05$ )和  $0.41\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  ( $P < 0.05$ ),春季平均气温增加速率也较高,但未通过 0.05 显著性水平检验。气候变暖停滞发生的 1998 - 2012 年,毛乌素沙地各季节平均气温均呈线性减少过程,其中冬季平均气温减少速率最高,达到  $-1.35\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,春季和秋季次之,分别为  $-0.69$ 和  $-0.59\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。气候变暖停滞结束后的 2012 - 2019 年,毛乌素沙地各季节平均气温均呈线性增加过程,各季节增加速率均高于 1970 - 1998 年,其中秋季和冬季的增加速率分别达到  $1.18$ 和  $1.01\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,春季和夏季也分别达到  $0.91$ 和  $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

对 13 个气象站点年际和季节平均气温变化速率进行统计,结果见图 3。图 3 表明,1970 - 2019、1970 - 1998 和 2012 - 2019 年各站点年际和季节平均气温变化速率均为正值,表现为平均气温的增加

过程,其中尤以 2012 - 2019 年平均气温增加速率最高;1998 - 2012 年各站点年际和季节平均气温变化速率均为负值,表现为平均气温的减少过程,即该时段出现气候变暖停滞现象。

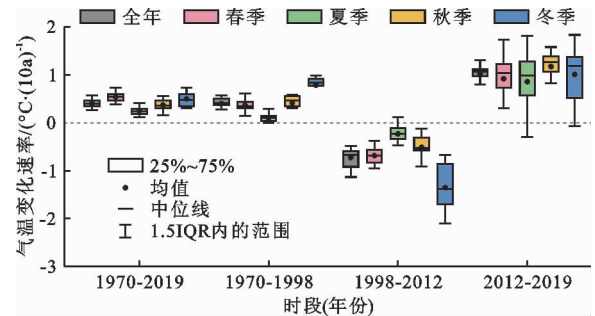


图 3 1970 - 2019 年不同时段毛乌素沙地年际和季节平均气温线性变化速率

### 3.2 降水量年际和季节变化特征

1970 - 2019 年不同时段毛乌素沙地年际和季节降水量线性变化速率见表 2,年际和季节降水量距平值变化如图 4 所示。

表 2 1970 - 2019 年不同时段毛乌素沙地年际和季节降水量线性变化速率 mm/10a

时间尺度	1970 - 2019 年	1970 - 1998 年	1998 - 2012 年	2012 - 2019 年
全年	17.42*	18.72	47.61	-2.71
春季	4.29*	11.25	-9.40	26.00
夏季	4.02*	12.26	23.96	0.28
秋季	6.98*	-6.72	29.33*	-32.03
冬季	1.82**	2.93*	0.17	6.57

注:“\*”表示通过 0.05 显著性检验,“\*\*”表示通过 0.01 显著性检验。

对表 2 和图 4 综合分析如下:

(1)降水年际变化特征方面,1970 - 2019 年毛乌素沙地年降水量总体呈显著线性增加趋势,增加速率为  $17.42\text{ mm}/10\text{a}$  ( $P < 0.05$ )。分阶段来看,1970 - 1998 年和 1998 - 2012 年年降水量呈不显著增加过程,增加速率分别为  $18.72$ 和  $47.61\text{ mm}/10\text{a}$ ,2012 - 2019 年年降水量呈减少过程,减少速率为  $2.71\text{ mm}/10\text{a}$ 。结合气温年际变化特征,总体上 1970 - 2019 年毛乌素沙地呈现暖湿化趋势,但在气候变暖停滞发生的 1998 - 2012 年,随着气温的大幅下降,降水呈现大幅增加态势。同时在气候变暖停滞结束后,毛乌素沙地年降水量呈现出下降趋势。这些迹象表明,hiatus 现象可能已经对区域乃至全球气候变化产生了重要影响,还需对其内在机

理加强研究。

(2)降水季节变化特征方面,1970-2019年毛乌素沙地各季节降水量均呈显著线性增加趋势( $P < 0.05$ ),增加速率表现为秋季(6.98 mm/10a) > 春季(4.29 mm/10a) > 夏季(4.02 mm/10a) > 冬季(1.82 mm/10a)。分阶段来看,气候变暖停滞发生前的1970-1998年,毛乌素沙地除秋季降水量呈减少过程外,夏季、春季和冬季降水量均呈增加过程,以夏季和春季降水量增加速率最高。气候变暖停滞发生的1998-2012年,毛乌素沙地春季降水量呈下降过程,秋季、夏季和冬季降水量呈增加过程,以秋季和夏季降水量增加速率最高,其中秋季降水量增加速率达到29.33 mm/10a( $P < 0.05$ )。气候变暖

停滞结束后的2012-2019年,毛乌素沙地降水量以秋季和春季变化过程相反为特征,其中秋季降水量减少速率最高,达到32.03 mm/10a,春季降水量增加速率最高,达到26.00 mm/10a。

对13个气象站点年际和季节降水量变化速率进行统计,结果见图5。图5表明,1970-2019年各站点年际和季节降水量变化速率均为正值,即降水量呈增加过程。1970-1998年秋季、1998-2012年春季和2012-2019年秋季降水量变化速率为负值,呈减少过程。2012-2019年各站点年际和夏季降水量变化速率差异较大,年际总体表现为减少过程,夏季总体表现为增加过程,但有部分站点表现特征与此相反。

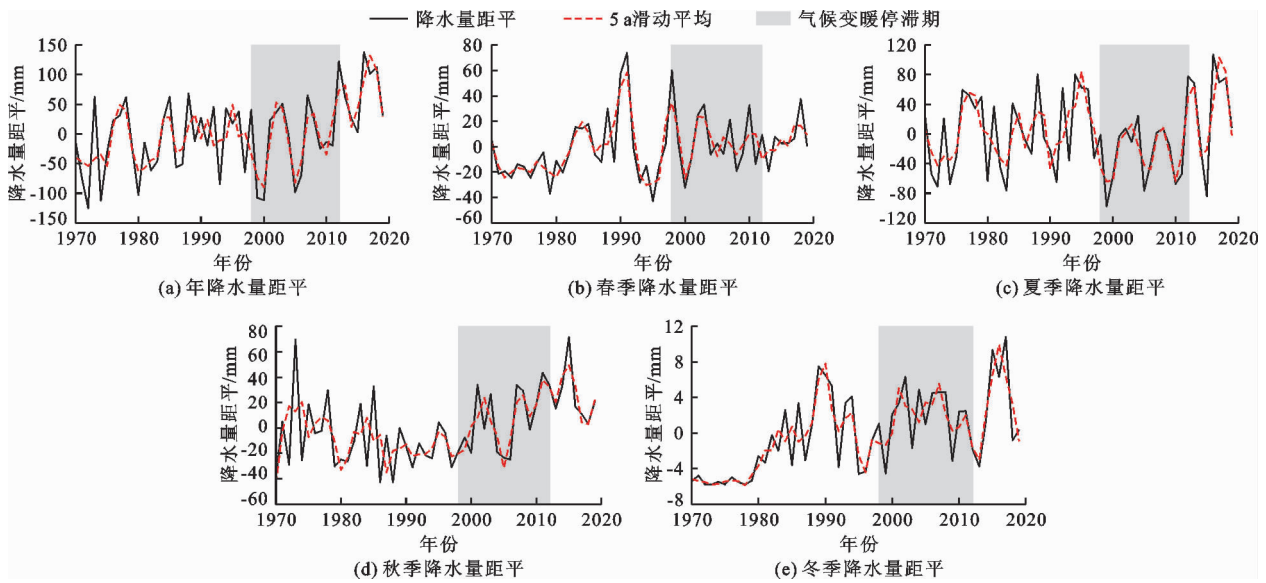


图4 1970-2019年毛乌素沙地年际和季节降水量距平值变化

### 3.3 气温与降水量突变分析

3.3.1 气温突变分析 基于1970-2019年年际和季节平均气温数据,进行M-K突变检验,分析毛乌素沙地年际和季节平均气温突变特征,如图6所示。

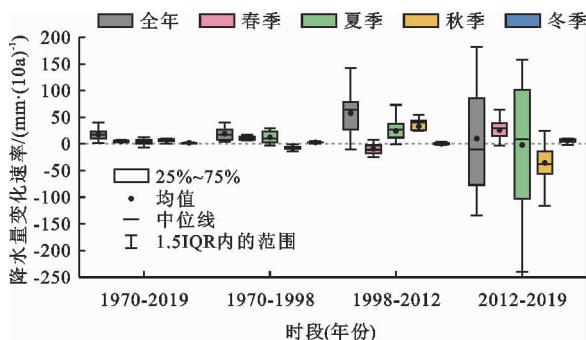


图5 1970-2019年不同时段毛乌素沙地年际和季节降水量线性变化速率

由图6可以看出:(1)年际上,UF曲线与UB曲线在1996年出现交点,且交点在显著性水平( $\alpha = 0.05$ )以内,表明毛乌素沙地年平均气温于1996年发生增加突变,UF曲线在1998年以后超过0.05显著性水平,增加趋势明显(图6(a))。结合年际平均气温距平变化(图2(a)),毛乌素沙地年平均气温在1996年发生增加突变后,于1998年开始波动,1998-2012年表现为降温过程,2012年年平均气温出现最低值,之后快速回温。(2)季节上,毛乌素沙地夏季、秋季和冬季UF曲线与UB曲线存在交点,且均在临界线( $\alpha = 0.05$ )以内,表明1970-2019年毛乌素沙地夏季、秋季和冬季平均气温存在增加突变(图6(b)~6(e))。结合季节平均气温距平变化(图2(b)~2(e)),毛乌素沙地夏季平均气温于1998年发生增加突变,1998-2012年未表现为增加

过程,2012 年之后呈增加过程。秋季平均气温于 1998 年发生增加突变后开始波动,呈下降过程,2012 年出现极低值后快速增加。冬季平均气温于 1994 年发生增加突变后,1998 年开始高位震荡,并在 2012 年出现极低值,之后快速增加。春季平均气温 1970 - 2019 年未发生突变,1998 - 2012 年平均气温呈稳定状态,2012 年前后出现极低值,之后呈增

加过程。

气温的年际和季节突变分析表明,1998 - 2012 年毛乌素沙地气候变暖停滞并未影响 1970 - 2019 年的总体气候变暖趋势。

3.3.2 降水量突变分析 基于 1970 - 2019 年年际和季节降水量数据,进行 M - K 突变检验,分析毛乌素沙地年际和季节降水量突变特征,如图 7 所示。

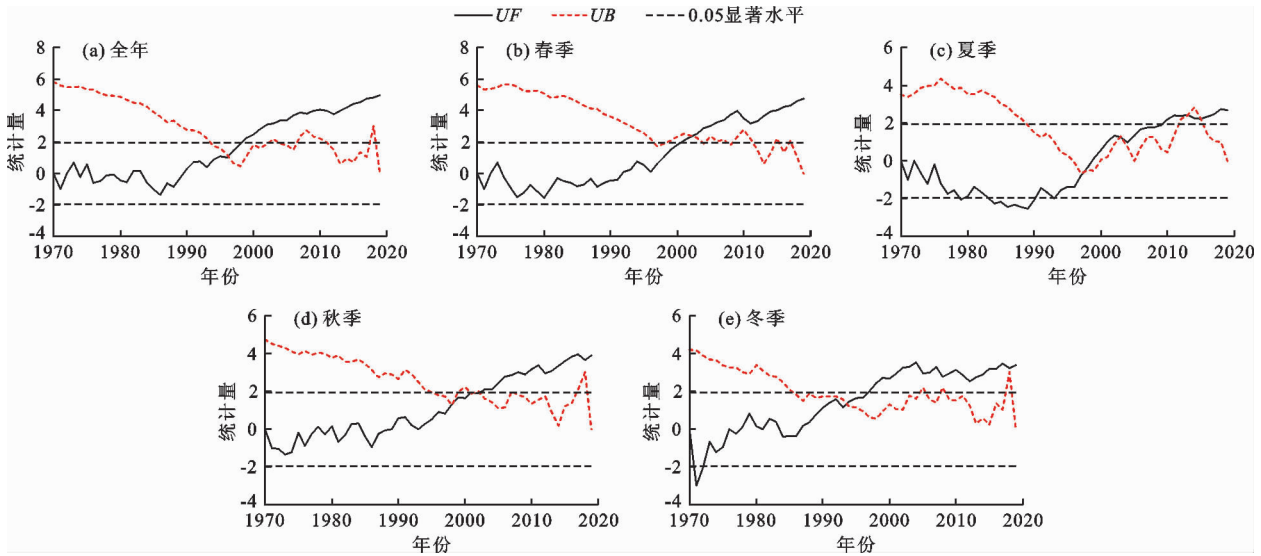


图 6 1970 - 2019 年毛乌素沙地年际和季节平均气温突变分析

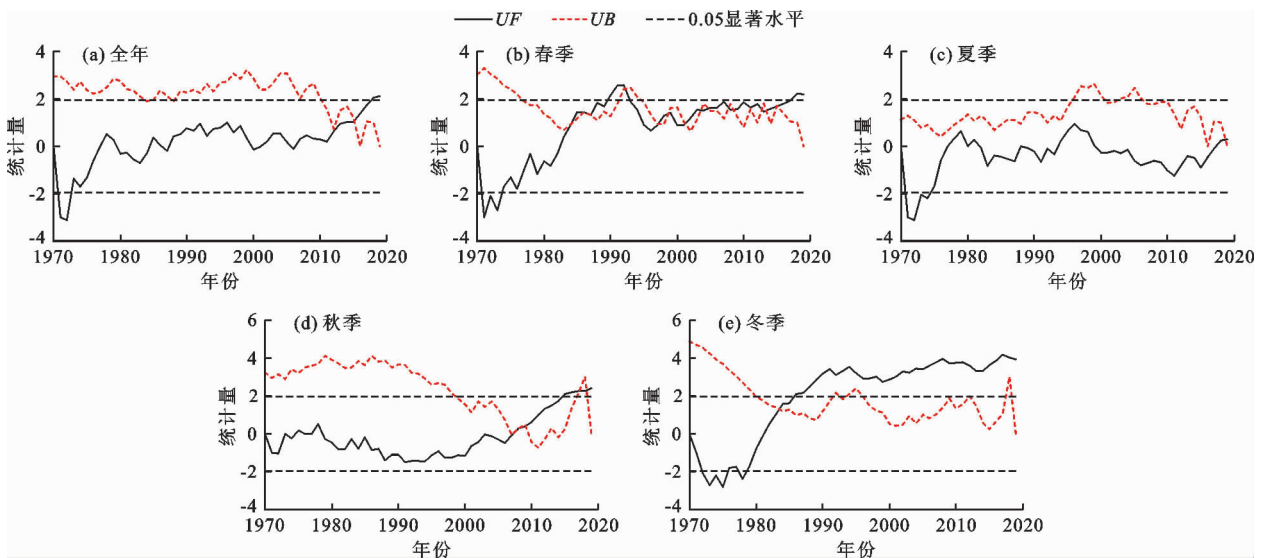


图 7 1970 - 2019 年毛乌素沙地年际和季节降水量突变分析

由图 7 可以看出:(1)年际上,UF 曲线与 UB 曲线在 2015 年出现交点,且交点在显著性水平( $\alpha = 0.05$ ) 以内,即毛乌素沙地年降水量于 2015 年发生增加突变,UF 曲线在 2017 年以后超过 0.05 显著性水平,呈明显增加过程(图 7(a))。结合年降水量距平变化(图 4(a)),毛乌素沙地年降水量在 1998 - 2012 年处于高位波动增加状态,2000 年出现极低

值,2012 年之后呈减少过程。(2)季节上,毛乌素沙地秋季和冬季 UF 曲线与 UB 曲线在显著性水平界线以内均存在交点,表明 1970 - 2019 年毛乌素沙地秋季和冬季降水量均存在突变(图 7(b) ~ 7(e))。结合季节降水量距平变化(图 4(b) ~ 4(e)),秋季降水量 1998 - 2012 年处于波动增加状态,于 2009 年发生增加突变,2012 年以后,呈波动减少过程。

冬季降水量在1983年发生增加突变,之后整体呈波动增加趋势,1998-2012年处于波动减少过程,之后呈波动增加过程。春季降水量在1983年发生增加突变之后,存在高位震荡现象,后期突变特征不明显。夏季降水量未发生突变,1998-2012年呈稳定增加过程,2012年以后,呈减少过程。

## 4 讨论

本研究通过对1970-2019年毛乌素沙地气温及降水量变化趋势与突变特征的分析,认为该地区1970-2019年气候变化存在暖湿化过程(气温升高、降水增加),并且1998-2012年存在明显气候变暖停滞现象(气温下降)。毛乌素沙地气候变化的暖湿化过程及气候变暖停滞现象在已有文献中已得到验证<sup>[14]</sup>。但在气候变暖停滞时期的水热匹配,气候变暖停滞现象发生期间与结束后的水热变化方面尚需讨论。

(1) 气候变暖停滞时期的水热匹配问题。1998-2012年的气候变暖停滞时期,毛乌素沙地年平均气温下降而年降水量增加。年降水量增加很有可能是导致年平均气温下降的重要驱动因素,原因有二,一是地球表面热量的分布主要与纬度位置有关,其他因素不变的情况下,太阳辐射强度变化是地表获取热量变化的主因;二是考虑其他因素的情况下,天气变化尤其是阴雨天数量的增加,会显著增加平流层大气对太阳辐射的反射率,减少到达地表的太阳辐射量,引起近地表大气降温过程。降水天气的增多主要与全球及区域大气环流有关。已有研究在气候变暖停滞现象形成机制方面存在两种认识,一种认为太阳辐射强度减弱和平流层水汽减少及气溶胶增加导致气候变暖停滞<sup>[27-29]</sup>,该认识与前述观点基本一致,即太阳辐射强度减弱、大气反射率增加导致气候变暖停滞。但水汽减少作为气候变暖停滞产生的原因,明显与毛乌素沙地实际情况不符,体现了毛乌素沙地的区域独特性。另一种认为气候系统内部变化导致气候变暖停滞<sup>[30-33]</sup>,如厄尔尼诺(El Niño)、南方涛动(El Niño southern oscillation, EN-SO)、北大西洋涛动(north Atlantic oscillation, NAO)、北极涛动(Arctic oscillation, AO)等减弱引起气候变暖停滞<sup>[34-37]</sup>。这种观点强调气候系统内部异常,其实际强调的是全球热量再分配的过程,如全球性大洋环流循环过程等。后续可进一步开展毛乌素沙地水热匹配问题的研究,验证气候变暖停滞是否受到降水增多引起的大气反射率增强影响。

(2) 气候变暖停滞期间与结束后的水热变化问题。本研究结果反映出气候变暖停滞的1998-2012年和结束之后的2012-2019年毛乌素沙地气温、降水存在极端相反的情况,即气候变暖停滞期间气温下降而降水增加形成的冷湿过程,结束之后呈现的气温快速回升而降水迅速减少的暖干过程。气温和降水短时期内由冷湿向暖干的变化过程,其驱动因素可能与前述一致。但气温和降水快速转变可能会对较为敏感和脆弱的毛乌素沙地植被生态系统产生重要影响<sup>[38]</sup>,并且按照Bozkurt等<sup>[39]</sup>和Xu等<sup>[40]</sup>的研究结论,气候变暖停滞现象可能具有周期性。1998年我国长江流域发生强降水引发洪涝灾害,全球气候变暖进入停滞时期。2021年河南中北部强降水过程是否也预示全球气候会进入下一个变暖停滞时期?尽管气候变暖停滞不会改变气候变暖过程,但其产生的极端天气事件需要开展深入研究。

## 5 结论

(1) 毛乌素沙地1970-2019年年平均气温呈显著线性增加过程,增加速率为 $0.42\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ( $P < 0.01$ ),其中春季和冬季贡献最大,增加速率分别达到 $0.54\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ( $P < 0.01$ )和 $0.50\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ( $P < 0.01$ )。1998-2012年毛乌素沙地存在明显的气候变暖停滞现象,年平均气温呈下降趋势,变化速率为 $-0.70\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ( $P < 0.05$ ),其中冬季贡献最大,变化速率达到 $-1.35\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。气候变暖停滞现象结束后,毛乌素沙地年际和季节平均气温呈现大幅增加过程,远高于气候变暖停滞之前。

(2) 毛乌素沙地1970-2019年年降水量呈显著线性增加过程,增加速率为 $17.42\text{ mm}/10\text{a}$ ( $P < 0.05$ ),其中秋季贡献最大,增加速率为 $6.98\text{ mm}/10\text{a}$ ( $P < 0.05$ ),其次为春季和夏季。1998-2012年气候变暖停滞时期,毛乌素沙地年降水量仍呈增加过程,增加速率达到 $47.61\text{ mm}/10\text{a}$ ,其中秋季和夏季贡献最大。气候变暖停滞现象结束后,毛乌素沙地年降水量呈下降过程,其中秋季和春季降水量变化最为突出。

(3) 毛乌素沙地1970-2019年年平均气温和年降水量分别于1996年和2015年发生增加突变。其中,夏季和秋季平均气温于1998年发生增加突变,冬季平均气温于1994年发生增加突变。冬季和秋季降水量分别于1983年和2009年发生增加突变。

(4) 毛乌素沙地1970-2019年总体呈暖湿化过程,1998-2012年存在的气候变暖停滞过程并未

改变气候变暖趋势,进一步验证了全球气候变暖停滞现象的发生及其区域差异特性。关于毛乌素沙地气候变暖停滞问题,还需在降水变化与气温变化的水热匹配关系等气候变暖停滞的发生机理方面及气候变暖停滞对植被生态影响方面开展研究工作。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG Chao, LI Shuanglin, LUO Feifei, et al. The global warming hiatus has faded away: An analysis of 2014 – 2016 global surface air temperatures [J]. *International Journal of Climatology*, 2019, 39(12): 4853 – 4867.
- [2] HUANG Xing, MA Long, LIU Tianxing, et al. Spatial variability in years of abrupt seasonal temperature changes and warming (cooling) hiatuses in China from 1951 – 2018 and the variation trends before and after these years [J]. *Atmosphere*, 2020, 11(1): 82.
- [3] KERR R A. What happened to global warming? Scientists say just wait a bit [J]. *Science*, 2009, 326(5949): 28 – 29.
- [4] KARL T R, ARGUEZ A, HUANG Boyin, et al. Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus [J]. *Science*, 2015, 348(6242): 1469 – 1472.
- [5] MEDHAUG I, TOLPE M B S, FISCHER E M, et al. Reconciling controversies about the ‘global warming hiatus’ [J]. *Nature*, 2017, 545(7652): 41 – 47.
- [6] WINSLOW L A, LEACH T H, ROSE K C. Global lake response to the recent warming hiatus [J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(5): 054005.
- [7] WANG Xufeng, XIAO Jingfeng, LI Xiao, et al. No trends in spring and autumn phenology during the global warming hiatus [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 2389. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10235-8>.
- [8] WEI Meng, SHU Qi, SONG Zhenya, et al. Could CMIP6 climate models reproduce the early-2000s global warming slowdown? [J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, 64(6): 853 – 865.
- [9] XIE Shangping. Oceanography: Leading the hiatus research surge [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(4): 345 – 346.
- [10] WANG Rui, LIU Zhongfang. Stable isotope evidence for recent global warming hiatus [J]. *Journal of Earth Science*, 2020, 31(8): 419 – 424.
- [11] HUANG Jianbin, ZHANG Xiangdong, ZHANG Qiyi, et al. Recently amplified arctic warming has contributed to a continual global warming trend [J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(12): 875 – 879.
- [12] TRENBERTH K E. Has there been a hiatus? [J]. *Science*, 2015, 349(6249): 691 – 692.
- [13] 杜勤勤,张明军,王圣杰,等. 中国气温变化对全球变暖停滞的响应 [J]. *地理学报*, 2018, 73(9): 1748 – 1764.
- [14] 李哲,丁永建,陈艾姣,等. 1960 – 2019年西北地区气候变化中的 Hiatus 现象及特征 [J]. *地理学报*, 2020, 75(9): 1845 – 1859.
- [15] MA Long, LI Hongyu, LIU Tingxi, et al. Abrupt temperature change and a warming hiatus from 1951 to 2014 in Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2019, 11(2): 192 – 207.
- [16] HUANG Xing, MA Long, LIU Tingxi, et al. Spatial and temporal variability of the abrupt interannual temperature change and warming hiatus in China, 1951 – 2016 [J]. *Meteorological Applications*, 2020, 27(3): e1911.
- [17] AN Wenling, HOU Shugui, HU Yongyun, et al. Delayed warming hiatus over the Tibetan Plateau [J]. *Earth and Space Science*, 2017, 4(3): 128 – 137.
- [18] WANG Linying, YUAN Xing, XIE Zhenghui, et al. Increasing flash droughts over China during the recent global warming hiatus [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 435 – 438.
- [19] CHEN Yang, ZHAI Panmao. Persisting and strong warming hiatus over eastern China during the past two decades [J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(10): 104010.
- [20] QIU Shuang, ZHOU Wen. Variation in summer rainfall over the Yangtze River region during warming and hiatus periods [J]. *Atmosphere*, 2019, 10(4): 173.
- [21] 刘宇峰,杜忠潮,原志华,等. 近 60a 毛乌素沙地东缘主要气候要素的多时间尺度变化特征 [J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(9): 121 – 127.
- [22] 李如意,赵景波. 毛乌素沙地 1960 – 2013 年极端气温变化 [J]. *中国沙漠*, 2016, 36(2): 483 – 490.
- [23] 曹艳萍,庞营军,贾晓红. 2001 – 2016 年毛乌素沙地植被的生长状况 [J]. *水土保持通报*, 2019, 39(2): 29 – 37.
- [24] 刘贤赵,张安定,李嘉竹. *地理学数学方法* [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [25] HIRSCH R M, SLACK J R. A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence [J]. *Water Resources Research*, 1984, 20(6): 727 – 732.
- [26] World Meteorological Organization. WMO statement on the state of the global climate in 2018 [M]. Geneva: World Meteorological Organization, 2019.
- [27] XIE Shangping, KOSAKA Y. What caused the global surface warming hiatus of 1998 – 2013? [J]. *Current Climate Change Reports*, 2017, 3(2): 128 – 140.
- [28] ZHANG Lei. The roles of external forcing and natural variability in global warming hiatuses [J]. *Climate Dynamics*, 2016, 47(9 – 10): 3157 – 3169.
- [29] SMITH D M, BOOTH B, DUNSTONE N J, et al. Role of volcanic and anthropogenic aerosols in the recent global surface warming slowdown [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 20(6): 936 – 940.



- [30] TURNER J, LU Hua, WHITE I, et al. Absence of 21st century warming on Antarctic Peninsula consistent with natural variability[J]. *Nature*, 2016, 535(7612): 411–415.
- [31] KOSAKA Y, XIE Shangping. The tropical Pacific as a key pacemaker of the variable rates of global warming [J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(9): 669–673.
- [32] DAI Aiguo, FYFE J C, XIE Shangping, et al. Decadal modulation of global surface temperature by internal climate variability[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(6): 555–559.
- [33] STEINMAN B A, FRANKCOMBE L M, MANN M E, et al. Response to comment on “Atlantic and pacific multidecadal oscillations and northern hemisphere temperatures” [J]. *Science*, 2015, 350(6266): 1326–1326.
- [34] YAO Shuailei, LUO Jingjia, HUANG Guang, et al. Distinct global warming rates tied to multiple ocean surface temperature changes[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(7): 486–491.
- [35] ZHANG Lei, HAN Weiqing, SIENZ F. Unraveling causes for the changing behavior of the tropical Indian Ocean in the past few decades [J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(6): 2377–2388.
- [36] 梁珑腾, 马龙, 刘廷玺, 等. 1951–2014年中国北方地区季节气温突变与变暖停滞年份的时空变异性[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(12): 2149–2166.
- [37] 方欣, 刘小楝, 岳大鹏. 毛乌素沙地1960–2018年气候变化特征及影响因子分析[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(2): 163–169.
- [38] GAO Feng, WU Tongwei, ZHANG Jie, et al. Shortened duration of global warming slowdowns with elevated greenhouse gas emissions [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2021, 35(2): 225–237.
- [39] BOZKURT D, RONDANELLI R, MARIN J C, et al. Recent near-surface temperature trends in the Antarctic Peninsula from observed, reanalysis and regional climate model data[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2020, 37(5): 59–75.
- [40] XU Chen, HOU Meiting, YAN Xiaodong, et al. Temporal variability of seasonal warming rates in China[J]. *International Journal of Climatology*, 2021, 41(S1): E1597–E1607.

(上接第71页)

- [10] 张瑶兰, 史毅超, 许继良. 基于博弈论-云模型的金华市用水效率综合评价[J]. *中国农村水利水电*, 2021(3): 53–57+62.
- [11] 罗凯, 唐德善, 唐彦. 基于熵权-正态云模型的农业用水效率评价[J]. *中国农村水利水电*, 2020(10): 159–163.
- [12] 蔡怡馨, 王静, 刘鹏玲, 等. 利用组合模型评价云南省水资源利用效率[J]. *人民黄河*, 2015, 37(5): 58–61.
- [13] 李浩鑫, 邵东国, 尹希, 等. 基于主成分分析和Copula函数的灌溉用水效率评价方法[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 96–102.
- [14] 胡林凯. 基于WCA-MEPP模型的云南省水资源利用效率动态评价[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(4): 75–81+87.
- [15] 王圣云, 翟晨阳, 顾筱和. 长江中游城市群空间联系网络结构及其动态演化[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(3): 353–364.
- [16] 陈立恒, 龚健, 王雄, 等. 长江中游地区生态系统服务平衡与城镇化的空间关系[J]. *生态学报*, 2021, 41(14): 5546–5556.
- [17] 管新建, 秦海东, 孟钰. 基于CRITIC-TOPSIS-灰色关联度的淮河流域水资源利用效率评估[J]. *节水灌溉*, 2018(11): 73–76+80.
- [18] 杨丽英, 许新宜, 贾香香. 水资源效率评价指标体系探讨[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2009, 45(Z1): 642–646.
- [19] 朱兆珍, 梁中. 我国省域水资源利用效率评价研究[J]. *河海大学学报(哲学社会科学版)*, 2015, 17(3): 72–78+92.
- [20] 孙国营, 陕振沛, 孙新杰, 等. 基于TOPSIS-灰色关联方法的水资源配置评价模型研究[J]. *节水灌溉*, 2019(7): 68–71+76.