

内蒙古气温突变及其影响因子间的响应关系

周莹, 马龙, 梁珑腾

(内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘 要:气温突变与其影响因子间的响应关系可为气候变化的机制研究提供参考。采用中心聚类、M-K 检验等方法, 以内蒙古及其周边地区 70 个气象站点 1951—2016 年平均气温、最低气温、最高气温及全球尺度下大空间年序列数据等为基础, 定性及定量揭示气温突变时空变异性及其影响因子间的响应关系。结果表明: 全区中 3 类气温在 1981—1993 年发生升温突变, 不同分区下的 3 类气温与各影响因子间的响应关系有所不同, 如最低气温与 PDO, SR、风速相关性最好, 平均气温与 PDO, MEI, SR、风速相关性次之, 最高气温与 PDO, MEI, SR、风速相关性最差。空间上, 西部区 3 类气温与 AGG(含 CO_2), SR, MEI 相关性最好, 中部区 3 类气温与相对湿度相关性次之, 东部区 3 类气温与 SR 相关性最差。20 世纪 80 年代至 90 年代, 随全区 AGG(含 CO_2), AMO, MEI 值, 大气压, 正位相 PDO 持续上升, SR, 风速和相对湿度快速下降, 全区气温陆续发生突变, 如当 AGG 持续上升 $2\sim 9$ a 且倾向率达到 $0.234\sim 0.285$ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot 10 \text{ a})$, 太阳总辐射快速下降 $[-19.54 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot 10 \text{ a})]$, 风速持续减小 $3\sim 28$ a 且倾向率达到 $-0.53\sim -0.24$ $\text{m}/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})$ 时, 平均气温发生突变, 气温突变是多种影响因子共同作用的结果。研究丰富了该方面研究成果, 对气候变化研究及防灾减灾等有一定借鉴意义。

关键词:气温; 突变; 影响因子; 响应关系

中图分类号: P4601

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)03-0184-10

Response of Temperature Mutation in Inner Mongolia to Its Influencing Factors

ZHOU Ying¹, MA Long¹, LIANG Longteng¹

(1.College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: The response relationship between the abrupt temperature change and its influencing factors can provide reference for the study of the mechanism of climate change. In this paper, the clustering center and M-K inspection method were used to qualitatively and quantitatively reveal the space-time variability of temperature mutations and the response relationship between impact factors based on large space series data of average temperature, average minimum temperature, mean maximum temperature obtained from 70 weather stations in Inner Mongolia and its surrounding areas from 1951 to 2016 and global scales. The results show that: the mutation of three kinds of temperature occurred in the period 1981—1993, of the response relations between three kinds of temperature under the different partitions and the influence factors were different, the average minimum temperature had the best correlation with the PDO, SR and wind speed, average temperature had the good correlation with PDO, MEI, SR, and the average maximum temperature had the weak correlation with PDO, MEI, SR and wind speed; spatially, the correlation between AGG (including CO_2), SR and MEI was the best in the western region, followed by the correlation between AGG(including CO_2), SR and MEI in the central region, and the correlation between the temperature and SR in the eastern region was the worst; in the 1980s to 1990s, along with continuous rise of all the points in the AGG (CO_2), AMO, MEI value, atmospheric pressure, positive phase PDO, and SR wind speed and relative humidity, mutation of temperature of each district occurred, when AGG continued to rise for $2\sim 9$ years and tendency rate

收稿日期: 2020-07-21

修回日期: 2020-08-12

资助项目: 国家重点研发计划(2017YFC0404305, 2018YFC0406401); 国家自然科学基金(51869016, 51669016); 内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划

第一作者: 周莹(1995—), 女, 内蒙古乌兰察布人, 硕士研究生, 研究方向为水文及水资源、气候变化、环境演变及三者响应关系。E-mail: 1352348024@qq.com

通信作者: 马龙(1978—), 男(回族), 内蒙古呼和浩特人, 教授, 博士, 研究方向为水文学及水资源、气候变化、环境演变及三者响应关系研究。E-mail: malong4444333@163.com

reached to $0.234 \sim 0.285 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{decade})$, solar total radiation fell fast [$-19.54 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{decade})$], wind speed reduced for $3 \sim 28$ years and tendency rate reached to $0.53 \sim 0.24 \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{decade})$. There had been a sudden change in average temperature. The abrupt temperature change was the result of many influencing factors. This study enriches the research results in this field and has certain reference significance for climate change research and disaster prevention and reduction.

Keywords: temperature; abrupt temperature; impact factor; response relationship

气温突变对生态环境等产生了深远影响,其与影响因子间的响应关系目前尚不明确,定性特别是定量揭示气温突变与其影响因子间的响应关系可为突变机制的揭示提供参考。

气候突变为短时间内气候从某种稳定状态转换为另一种状态^[1],表现为气候变化的不连续性,在时间尺度上具有广泛性^[2],一系列自然证据对此已有充分证明,如冰芯^[3]记录揭示了冰期阶段内具有全球意义的气候突变事件,通过孢粉化石记录^[4]则可以看出全新世纪的气候发生过两次重大突变;由气候突变引起的长期干旱可能导致了玛雅^[5]和美索不达米亚文明^[6]的衰落,以及萨赫勒—撒哈拉生态系统严重破坏且植被消失变为荒漠^[7]。IPCC 第五次评估报告指出,近一个世纪以来,全球范围平均气温快速上升^[8]。20 世纪全球气温呈暖—冷—暖变化,极端天气事件频发,加剧了水资源分布的不均^[2,9-11]。在 1970s 出现快速上升现象^[12]。北半球气候在 1960s 发生极为明显的突变^[13-14]。

气候突变兼具空间尺度上的广泛性,北美^[15]、中亚^[16]、加拿大^[17-18]以及中国的北方地区^[19]、青藏高原^[20-21]、黄土高原^[10]、华北平原等^[22]全球各地在近几十年均发生气候突变。研究表明,气候变化($10^4 \sim 10^5 \text{ a}$)受地球轨道偏心、倾角等变化影响,但对于如此迅速且强烈气候变化的解释仍缺乏关键证据^[23]。气温突变与(或可能与 CO_2 辐射强迫^[8]、深海热量(PDO, AMO)^[24-25]、太阳总辐射^[26]、太阳活动^[27]、风速^[28]、相对湿度等^[29]的变化存在响应关系。总的来看,气温突变与多种影响因子间具有单一、融合或叠加的响应关系,十分复杂,如赵宗慈等^[30]认为气温变暖响应与太阳活动、火山活动和温室效应等综合因素有关,但迄今为止还没有完全揭示这种关系。

目前研究多为气温突变成果,变暖停滞有少量研究^[31]。其使用站点较少,多为短数据系列,且大多数只揭示平均气温的突变规律,忽略了平均最低气温和平均最高气温的区别,不足以覆盖普遍特征的气温突变^[32]。且所选影响因素单一,响应关系不明确。在此基础上,定性定量地揭示了气温突变及其影响因素之间的响应关系。

为使研究具有较高的普遍性和代表性,选取内蒙古地区为研究区^[31]。20 世纪 50 年代以来,内蒙古地区气温普遍上升,对全球变暖响应敏感^[33],不同地区的气温变化格局不同^[34],自东向西气候类型由湿润—半湿润向干旱—半干旱逐渐过渡,气候差异性显著^[35],在 1977—1996 年期间内蒙古各地区气温全面发生突变^[36-37],之后发生变暖停滞^[31]。气候变化具有代表性和多元典型性^[33-38]。该地区研究多以突变前后特征分析为主,但仍缺乏与影响因子间响应关系的研究。本文采用分布于内蒙古及周边(漠河、塔河、齐齐哈尔、哈尔滨、酒泉、白城、张掖、武威、通榆、马鬃山、河曲、大同、右玉、围场、朝阳、乾安、长春、阜新、中卫、榆林、承德、张家口、四平、沈阳、银川、嫩江等)的气象站点 3 类气温(1951—2016 年)等实测数据,以及全球 CO_2 辐射强迫等大空间尺度数据,定性、定量揭示气温突变与其影响因子间的响应关系,为全球气候变化研究提供参考。

1 研究区概况、数据与方法

1.1 研究区概况与数据来源

内蒙古自治区坐落于中国北部边陲(图 1)^[31],主要包括季风气候、温带大陆性气候等多种气候类型^[31,38]。

本次收集了自建站以来共计 70 个气象站点的数据(图 1),其中全球 CO_2 radiative forcing (CO_2) 和 Annual Greenhouse Gas radiative forcing (AGG) 数据来自美国 NOAA Earth System Research Laboratory (Global Monitoring Division),时间序列为 1979—2016 年;Pacific Decadal Oscillation (PDO)、Atlantic multidecadal Oscillation (AMO)、Multivariate ENSO Index (MEI),时间序列均为 1951—2018 年;大气压(AP)、风速(WS)、相对湿度(RH)为 1951—2016 年 70 个气象站点的年(月)数据,与气温数据使用的气象站点相对应;太阳总辐射(SR)年数据亦源于中国气象数据网,共 59 个气象站点,覆盖整个研究区,时间序列为 1959—2016 年;PDO、风速等时间序列为 1951—2016 年与气温数据使用的气象站点相对应;太阳总辐射年(月)数据共 59 个气象站点,覆盖整个研究区,时间序列为 1959—2016 年^[31]。

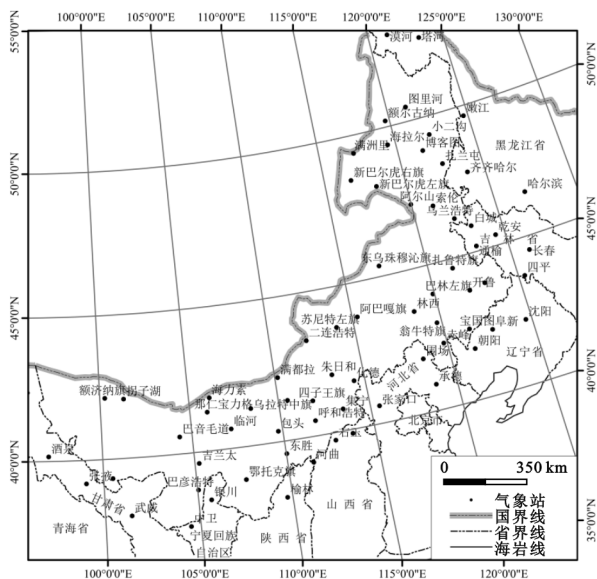


图 1 研究范围及气象站站点位置

1.2 数据处理及使用方法

(1) 气候因子时间序列统一方面, AGG 与全球 CO_2 辐射强迫的时间序列统一为 1979—2016 年; 其他数据均统一为 1951—2016 年。

(2) 气候影响因子分类方面, 将目前认可度较高的 AGG(含 CO_2)、PDO、AMO、MEI、SR 归为明确影响因子^[13,39-44], 即第 1 类影响因子; 将可能受气温影响并产生反作用的影响因子, 视为第 2 类影响因子^[45], 包括 WS、AP、RH。

(3) 采用中心聚类法对研究区气温分区进行分区^[46]。

(4) 采用距离平方反比法对分区气温及其影响因子进行区域年面值序列的求取^[47]。

(5) 气温突变检验方面, 采用 Mann-Kendall 非参数统计法^[31]。

(6) 气温变化剧烈程度方面, 使用变异系数^[48]。

(7) 采用气候倾向率法对气温及其影响因子变化的时间序列进行趋势分析^[49]。

2 结果与分析

2.1 气温突变变化特征分析

采用 Mann-Kendall 非参数统计法对全区 3 类气温进行突变年份分析, 为叙述方便, 将各分区 3 类气温 1951 年—突变年、突变年—2016 年分别用 T_1 、 T_2 表示, 3 类气温的年平均值分别用: 平均气温、最高气温、最低气温等简称表示(图 2)。

整体上, 全区 3 类气温突变时间普遍集中于 1980s, 其中中部区最高气温突变最晚(1993 年)。同一分区, 3 类气温的突变时间较为接近, 最低气温整体突变最早, 平均气温次之, 最高气温最晚; 同类气

温, 除中部区最低气温(1982 年)外, 中部区突变最晚(1982—1993 年), 西部区次之(1984—1989 年), 东部区最早(1981—1984 年)。变异系数指离散程度大小, T_1 时段, 除东部区最低气温外, 全区最低气温整体升温最快, 变化程度最剧烈; 平均气温升温速率次之, 变化剧烈程度较弱; 最高气温升温速率最慢, 变化剧烈程度最弱; 空间上, 平均气温、最低气温升温速率均由西向东依次减小, 最高气温与之规律相反, 平均气温、最高气温变化剧烈程度自东向西依次减弱, 最低气温则自西向东依次减弱。 T_2 时段, 除东部区最低气温外, 其他区最低气温升温速率最快, 平均气温次之, 最高气温最慢, 相应地, 3 类气温变化剧烈程度最低气温 > 平均气温 > 最高气温; 空间上, 平均气温升温速率按东、西、中部依次减小, 最高气温升温速率自东向西依次减小, 平均气温、最高气温变化剧烈程度自东向西依次减弱, 最低气温则由中部向西、东部区减小/减弱。

2.2 气温突变对第 1 类影响因子变化的响应

全区 3 类气温与 AGG(含 CO_2)、PDO 和 AMO、太阳总辐射(SR)、MEI 等(1951 年—各分区 3 类气温突变年)的相关系数空间分布情况见表 1, 图 3 为代表性分区气温与 AGG(含 CO_2)、PDO、AMO、SR、MEI 的累积距平年际序列变化情况, 限于篇幅, 以能代表普遍规律且相关性较好($p < 0.05$)的分区示例给出。

工业革命以来, 人类活动不断排放 CO_2 等温室气体, 大气 CO_2 辐射强迫增加是造成全球变暖的主要原因^[23]。由表 1 可知, 全区最低气温与 AGG、 CO_2 相关性(0.782, 0.714)最好, 最高气温与 AGG 相关性(0.671, 0.630)次之, 平均气温与 AGG 相关性(0.623, 0.685)相对较差; 空间上, 除全区最低气温与二者和最高气温与 CO_2 相关性外, 其他类型气温与二者相关性均由西东、中部依次减弱。由图 3 可知, 1979 年以来 AGG[0.234~0.391 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot 10 \text{ a})$]、 CO_2 辐射强迫[0.258~0.308 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot 10 \text{ a})$]呈上升趋势, 气温变化与之具有趋势同向性, 并在 AGG(含 CO_2)持续上升 3~14 a 后, 全区 3 类气温发生突变。

太平洋年代际振荡(PDO)是北太平洋地区气候变化的一个主要模态, 对于中国的气候变化起重要作用^[24]。由表 1 可知, 全区最低气温与 PDO 的相关性最好(0.301), 平均气温(0.276)次之, 最高气温(0.123)最差, 除全区最高气温与 PDO 相关性外, 中部其他类型气温与 PDO 相关性最好, 西部次之, 东部最差。由图 3 看出, 1951—2016 年 PDO 发生了 3 次明显的正负位相交替, 全区 3 类气温也相应发生了明显的升降趋势转折变化, 1951—1959 年 PDO 由负位相转变为正位相时, 3 类气温呈上升趋势, 1959—

1969 年 PDO 整体处于负位相,气温呈持续下降趋势,1969—2008 年 PDO 由负位相转为正位相且持续上升 6~18 a($0.482/10\text{ a}$),3 类气温呈持续上升趋势并普遍于该阶段发生突变。

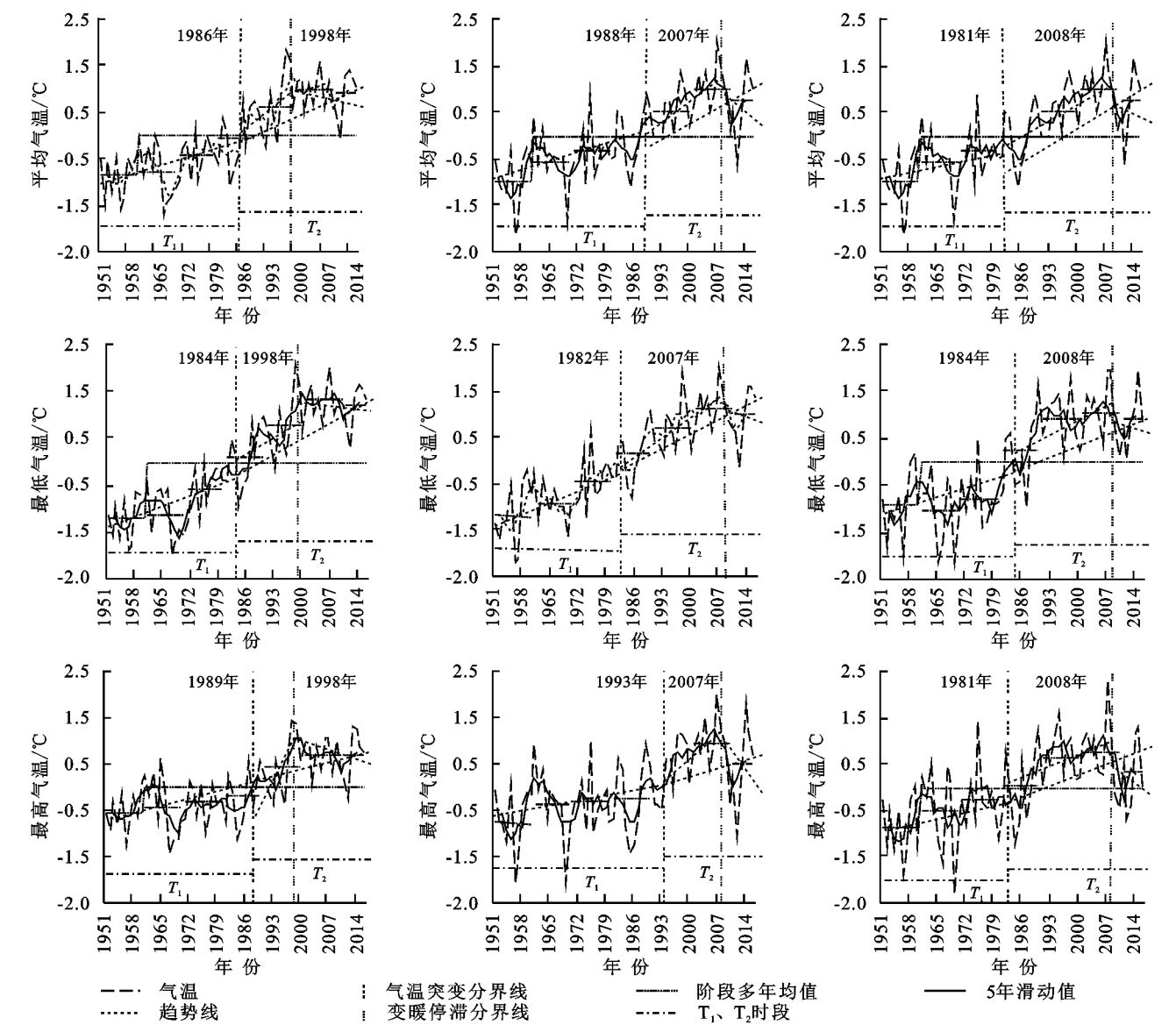


图2 全区3类气温突变年际变化、停滞年份和距平时间序列

AMO 指发生在北大西洋区域空间上具有海盆尺度,时间上具有多年尺度的海表温度准周期性暖冷异常变化,在欧亚大陆的表面气温及全球其他区域气候演变中发挥了重要作用^[25]。由表 1 可知,除中部 3 类气温外,其他分区最高气温与 AMO 相关性最好(0.354),平均气温(0.324)次之,最低气温(0.278)最差;除最低气温与 AMO 的相关性外,最低气温、最高气温均与 AMO 的相关性均由自西向东部依次减弱。由图 3 可知,全区气温与 AMO 逐年变化具有相似性,AMO 分别在 1963 年与 1995 年发生了两次明显的正负位相交替,在 1951—1974 年呈下降趋势($-0.24/10\text{ a}$),1974—1998 年 AMO 处于负位相且持续上升($0.143/10\text{ a}$)7~19 a 时,3 类气温发生突变。

太阳辐射(SR)是指太阳以电磁波的形式向外传

递能量,太阳向宇宙空间发射的电磁波和粒子流。由表 1 可知,全区 3 类气温与 SR 均呈负相关关系,全区最低气温与 SR 的相关性(-0.453)>平均气温(-0.308)>最高气温(-0.225);空间上,除全区平均气温与 SR 的相关性由西向东依次减弱,最高气温、最低气温与 SR 的相关性均由西部向东、中部依次减弱。由图 3 来看,1959—1989 年太阳总辐射呈快速下降趋势 [$-19.54\text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{ a})$],气温与其具有趋势反向性,在此阶段 3 类气温普遍发生突变;1989—1994 年太阳总辐射急剧上升 [$7.50\text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{ a})$],气温随之快速下降。

MEI 基于热带太平洋上的海平面气压、地面纬向风、地面经向风、海表温度、海面气温和总云量 6 个要素综合地监测、诊断和判别厄尔尼诺(ENSO)事

件的发生^[31]。由表 1 可知,除中部 3 类气温外,西、东部平均气温与 MEI 相关性(0.345,0.201)>最高气温(0.305,0.198)>最低气温(0.246,0.123);空间上,西部 3 类气温与 MEI 的相关性均最好,除平均气温外,其他类型气温均中部与 MEI 的相关性次之,东部最差。从图 3 上看,MEI 整体呈上升趋势,全区 3 类气温与其变化趋势一致,且逐年变化以年际振荡同向性为主,但其间存在年际震荡反向性阶段(持续 2~5 a)。在 1976—1997 年 MEI 呈持续快速上升(0.541/10 a)趋势,平均气温、最低气温、最高气温于该时段陆续发生突变。

表 1 全区 3 类气温与第 1 类影响因子相关性的空间分布				
参数	地区	平均气温	最低气温	最高气温
AGG	西部区	0.623*	0.782*	0.671*
	中部区	0.402*	0.645*	0.523*
	东部区	0.443*	0.583*	0.557*
CO ₂	西部区	0.685*	0.714*	0.630*
	中部区	0.421*	0.633*	0.483*
	东部区	0.453*	0.588*	0.509*
PDO	西部区	0.224	0.275	0.101
	中部区	0.276	0.301	0.112
	东部区	0.202	0.250	0.123
AMO	西部区	0.324	0.278	0.354*
	中部区	0.289	0.301	0.278
	东部区	0.167	0.015	0.204
SR	西部区	-0.308	-0.453	-0.225
	中部区	-0.202	-0.252	-0.104
	东部区	-0.15	-0.255	-0.117
MEI	西部区	0.345*	0.246	0.305
	中部区	0.195	0.155	0.216
	东部区	0.201	0.123	0.198

注: * 表示通过 99% 的显著性检验

综上,AGG(含 CO₂)呈线性上升,气温变化与其具有趋势同向性,气温突变与 AMO 持续上升的时间具有一致性,且对 PDO 处于正位相且持续上升响应之间存在滞后现象,与太阳总辐射快速下降、MEI 快上升趋势时间一致;与 MEI 存在年际振荡同向性/反向性周期交替变化。

2.3 气温突变对第 2 类影响因子变化的响应

图 4 为气温与第 2 类影响因子标准化时间序列变化示意图,详细方法见参考文献[31]。影响因子可能发生突变更早,且在气温突变后仍在一定阶段内保持这种趋势。全区 3 类气温与第 2 类影响因子的相关性空间分布见表 2,气温及其影响因子累积距平的年际变化见图 5,限于篇幅,以能代表普遍规律且相关性较好并通过 99% 显著性检验的分区示例给出。

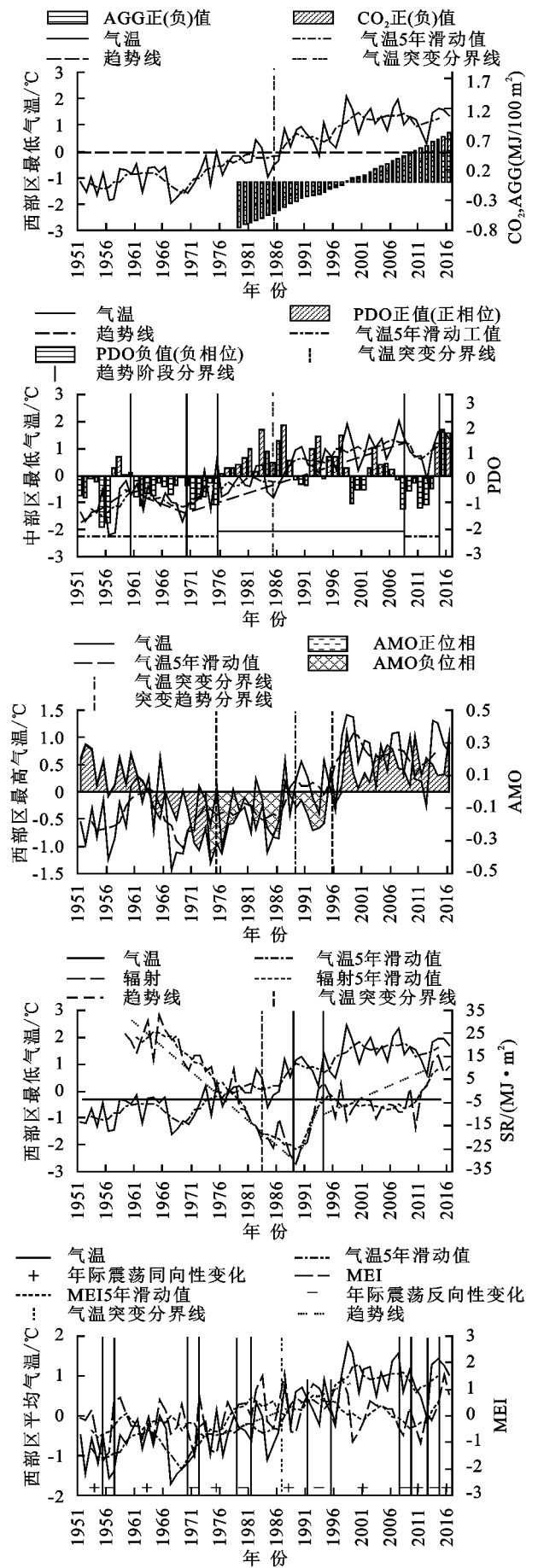


图 3 典型地区气温年际变化及其影响因子的累积距平

由图4及图5可以看出,全区3类气温与风速存在5~20 a左右的年际振荡同向性/反向性交替周期性的变化。由表2可知,平均气温、最低气温、最高气温突变前与全区风速均呈极显著负相关关系,平均气温、最高气温与风速的相关性由东向西依次变好,

最低气温则由中部分别向东、西方向变差,最低气温与风速相关性整体 $(-0.685) >$ 平均气温 $(-0.625) >$ 最高气温 (-0.505) 。总得来说,气温上升与风速减小存在密切关系,风速在1951—1960年左右(1959—1977年)普遍呈持续上升趋势 $[0.01 \sim 1.16 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})]$,其后至1986年左右(1981—1993年)为下降趋势(1981—1993年为全区各类气温突变时间范围,风速在此之后至2008年左右仍呈下降趋势,以下类似表述思路同此。由图4可知当风速持续下降3~28 a, 11~25 a, 6~21 a, 倾向率达到 $-0.53 \sim -0.24 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})$, $-0.25 \sim -0.24 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})$, $-0.39 \sim -0.30 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})$ 时,平均气温、最低气温、最高气温分别发生突变。

由图4及图5可知,全区平均气温、最低气温、最高气温与相对湿度整体具有年际振荡反向性关系。由表2可知,全区3类气温与相对湿度均呈极显著负相关关系,除东部外,其他分区均最高气温与相对湿度相关性最好,平均气温次之,最低气温最差;最高气温与相对湿度相关性中、东、西部依次减弱,其他气温与其相关性则均为东部 $(-0.334 \sim -0.350) >$ 中部 $(-0.424 \sim -0.485) >$ 西部 $(-0.457 \sim -0.550)$ 。整体上看,气温上升与相对湿度减小关系密切,且二者趋势峰(谷)值整体对应关系较好;相对湿度在1951—1966年左右(1964—1988年)普遍呈下降趋势 $(-0.34 \sim -0.56\%/10 \text{ a})$,西部平均气温、西部最低气温与之相反;其后至1986年左右(1981—1993年),全区相对湿度普遍呈下降趋势 $(-0.18 \sim -0.11\%/10 \text{ a})$,中部平均气温、西部最高气温与之相反。由图4可知当相对湿度持续下降16~22 a, 16~20 a, 11~29 a, 倾向率达到 $-0.12 \sim -0.11\%/10 \text{ a}$, $-0.14 \sim -0.11\%/10 \text{ a}$, $-0.13 \sim -0.12\%/10 \text{ a}$ 时,3类气温发生突变。

由图4及图5可知,气温与大气压存在年际振荡同向性/反向性交替周期变化(3~20 a)。除最高气温外,其他气温与大气压相关性自西向东依次增强;西部最高气温与大气压相关性最好 (-0.328) ,平均气温次之 (-0.255) ,最低气温 (-0.225) 最差;中部平均气温与大气压相关性最好 (0.375) ,最低气温次之 (0.313) ,最高气温较差 (0.205) ;东部最低气温与大气压相关性最好 (0.603) ,平均气温次之 (0.550) ,最高气温较差 (0.534) 。整体上看,除西部最高气温外,西、中部大气压在1951—1968年左右(1965—

1978年)普遍呈持续上升趋势 $(0.12 \sim 0.24 \text{ hPa}/10 \text{ a})$,东部在1951—1966年普遍呈下降趋势 $(-0.35 \sim -0.42 \text{ hPa}/10 \text{ a})$;其后至1986年左右(1981—1993年)大气压持续增加。由图4可知当大气压持续增加17~24 a, 17~20 a, 17~25 a, 倾向率达到 $0.10 \sim 0.17 \text{ hPa}/10 \text{ a}$, $0.11 \sim 0.42 \text{ hPa}/10 \text{ a}$, $0.11 \sim 0.42 \text{ hPa}/10 \text{ a}$ 时,3类气温发生突变。

整体上看,1980s~1990s,随AGG(含 CO_2)持续增大、AMO持续上升、PDO处于正位相阶段且呈上升趋势、太阳总辐射快速下降、MEI快速上升、全区风速和相对湿度持续下降、大气压持续上升,全区气温发生突变,突变是各影响因子共同作用的结果。

3 讨论

全区3类气温在1981—1993年全面发生突变^[38],整体由东向西突变依次变晚。气温突变现象在全球尺度上均有发生,如法国在1987—1988年春季增温显著^[49],中亚^[15]和东北亚^[50]地区分别突变于1980s和1990s中期以后,这与本文研究结果一致。

总体来看,同一分区平均气温、最低气温、最高气温突变年份较为接近,全区平均气温、最低气温、最高气温与其对应的风速、大气压、相对湿度以及全球尺度下的MEI普遍存在年际振荡同向性与年际振荡反向性周期交替现象;1980s—1990s,随全区AGG(含 CO_2)、正位相PDO, AMO, MEI、大气压持续上升, SR、风速和相对湿度快速下降,全区气温发生突变,表明不同时段影响因子可能会削弱或强化突变的效果,且影响因子并不唯一、响应关系并不单一。

已有研究表明,影响气温突变的因子多样,存在错综复杂的响应关系,其中主要存在两类响应关系,一是趋势同向性,如1980s—1990s,温室气体可吸收长波辐射使得大气因吸收到的能量增多而变暖^[51];当PDO位于年代际正位相时对最高、平均和最低气温变暖影响较大,冬季尤为显著^[52];东亚地区厄尔尼诺导致的热带印度洋变暖^[53],进而导致气温变暖;AMO正位相对应的中国冬季气温整体偏高^[54],并使气温持续上升发生突变;西部区3类气温与气压整体呈负相关是由于西部大气压增高,西风显著减弱使得东亚季风携带水汽更容易向西北输送,带来降温效果,而中、东部区3类气温与气压整体呈正相关是由于东亚季风水汽向东输送湿润暖空气,使得北太平洋的冷空气减少,东亚北部到西北太平洋地区有异常暖平流,使研究区中、东部区增温^[55-56],气压降低,气旋性环流异常加强,与春季盛行西风叠加,造成风速的增加,使得气温降低^[57]。

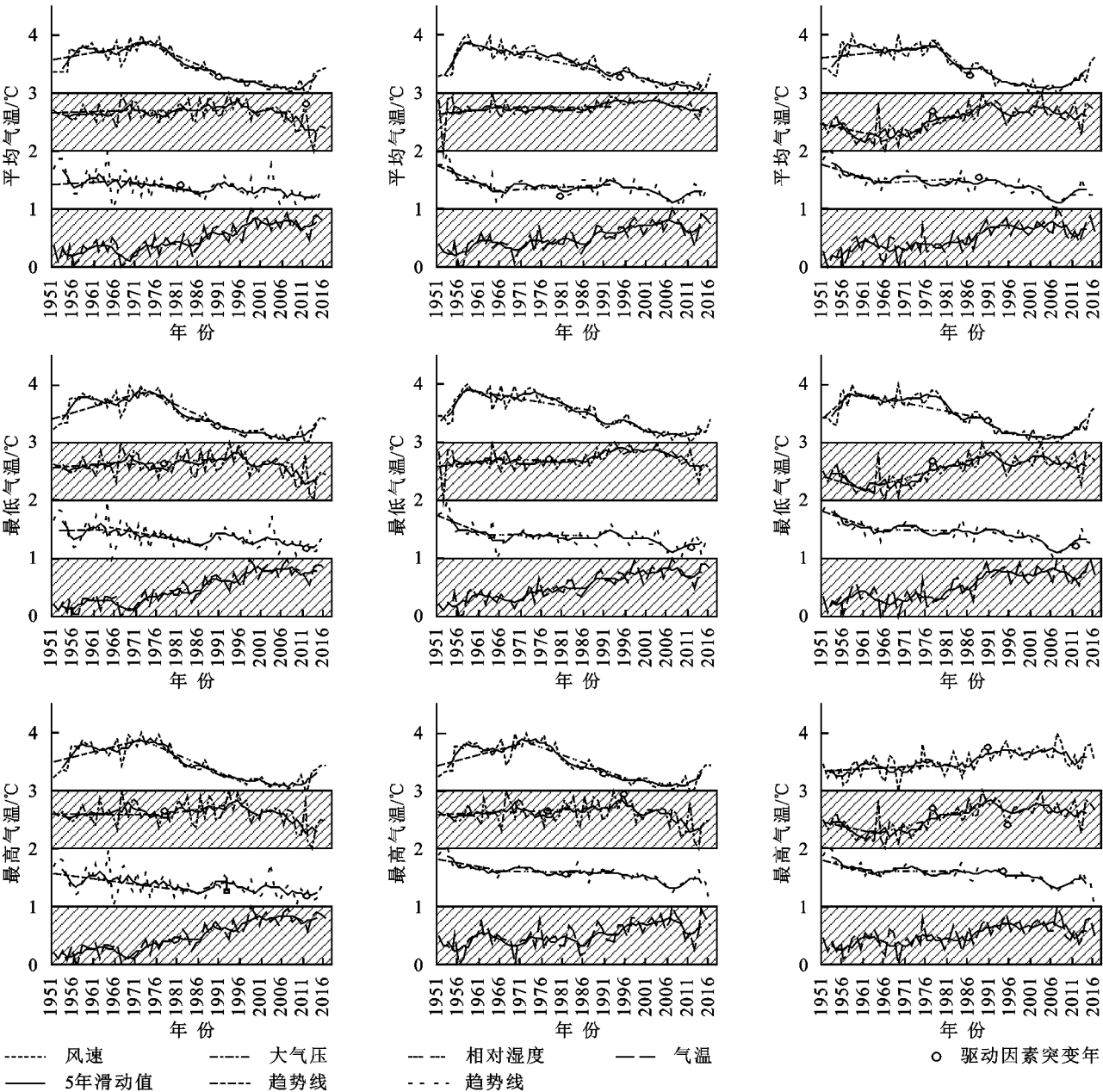


图 4 气温与第 2 类影响因子标准化时间序列变化

表 2 全区 3 类气温与第 3 类影响因子相关性的空间分布

指标	地区	平均气温	最低气温	最高气温
风速	西部区	-0.625 *	-0.650 *	-0.505 *
	中部区	-0.600 *	-0.685 *	-0.485 *
	东部区	-0.550 *	-0.675 *	-0.431 *
相对湿度	西部区	-0.350 *	-0.334 *	-0.423 *
	中部区	-0.485 *	-0.424 *	-0.510 *
	东部区	-0.550 *	-0.457 *	-0.487 *
大气压	西部区	-0.255	-0.225	-0.328 *
	中部区	0.375	0.313	0.205
	东部区	0.550	0.603	0.534

注：* 表示通过 99% 的显著性检验。

二是趋势反向性，如 1970s 研究表明在内蒙古东部发生气温突变时，该地区总云量不断上升但仍处于

负位相，而云量使得太阳总辐射对气温作用削弱，对气温下降作用减弱，而其他影响因子对气温影响作用更为显著，使得气温上升^[58]；北极涛动^[59]、ENSO^[60]等通过影响大气环流的变化及下垫面物理状况的改变，比如地表粗糙度、感热、潜热等的变化，会改变下垫面的动力及热力特征等均引起风速变化^[57]；不同的下垫面有不同的增湿作用^[61]；气溶胶浓度的降低，使得气温发生显著上升^[62]；1980 年后，中国地区对流层臭氧整体呈现缓慢的下降趋势，导致对流层和近地面层温度不断增加^[63]。在已有研究的基础上，更综合考虑多方面因素，定性更定量的揭示气温突变与其多种影响因子间的响应关系，对全国乃至全球气候变化及其引起的灾害研究有一定借鉴作用。

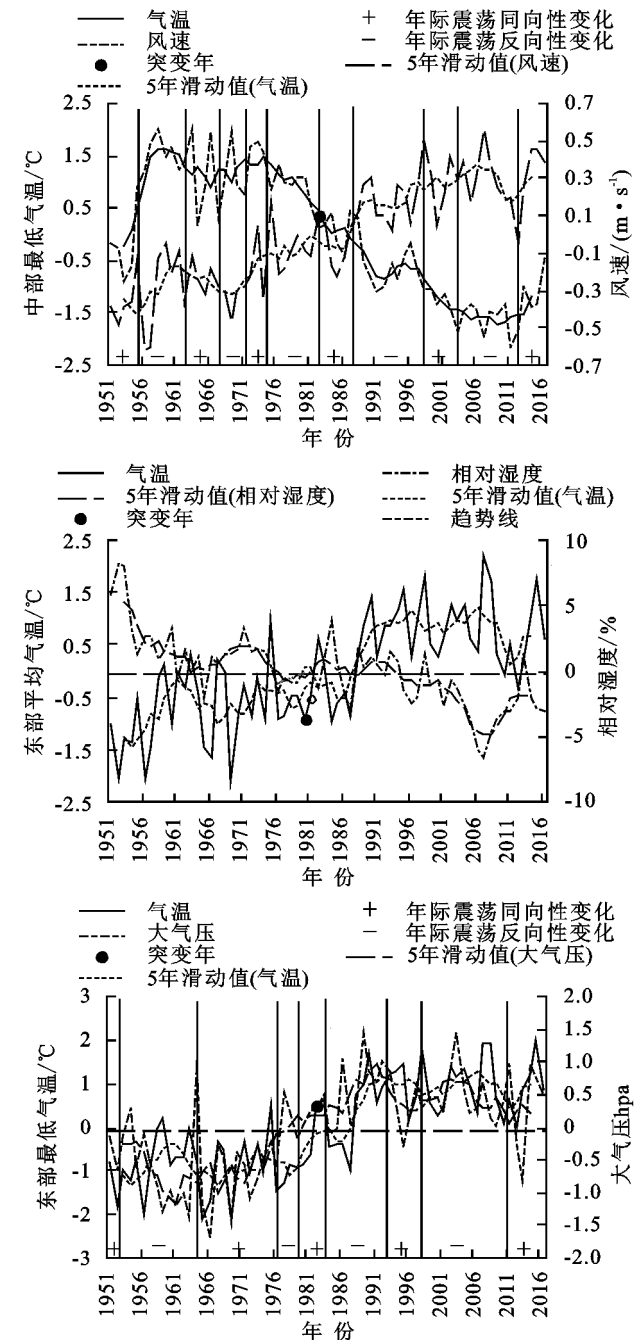


图5 典型地区气温年际变化及其影响因子的累积距平

由于数据序列长度较短,在揭示气温突变响应及其影响因子的变化规律仍存在局限性和不足。年序列可能降低甚至掩盖对季节(月)气温突变的敏感性,本文仅对年序列进行分析,可能会对研究结论产生一定的影响。同时,考虑到影响因素不是很全面且采用方法单一,也会对研究结论产生影响,后续将结合更多的影响因素和长序列数据,从年、季、月尺度出发,进行下一步的研究。

4 结论

(1) 全区3类气温在1981—1993年全面发生突变,同一分区3类气温突变年份较为接近,由西向东

气温突变依次变早。

(2) 总得来说,最低气温与AGG(含 CO_2),PDO,SR,风速相关性最好,平均气温与PDO,MEI,SR,风速次之。空间上,西部区3类气温与AGG(含 CO_2),SR,MEI相关性最好。

(3) AGG(含 CO_2)在1980s—1990s持续上升、PDO处于正位相阶段且呈上升趋势、AMO持续上升、SR快速下降、MEI快速上升、各分区风速和相对湿度持续下降、大气压持续上升,各分区气温发生突变。如当AGG(含 CO_2)持续上升 $2\sim 9\text{ a}$ 且倾向率达到 $0.234\sim 0.285\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{ a})$,太阳总辐射快速下降($-19.54\text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{ a})$),风速持续减小 $3\sim 28\text{ a}$ 且倾向率达到 $-0.53\sim -0.24\text{ m}/(\text{s} \cdot 10\text{ a})$ 时,平均气温发生突变。各分区3类气温突变的发生是这些影响因子共同作用的结果。

参考文献:

- [1] 符淙斌,王强.气候突变的定义与检测方法[J].大气科学,1992,16(4):482-493.
- [2] 赵艳,刘耀亮,郭正堂,等.全新世气候渐变导致中亚地区植被突变[J].中国科学:地球科学,2017,47(8):927-938.
- [3] Nakagawa T, Kitagawa H, Yasuda Y, et al. Asynchronous climate changes in the North Atlantic and Japan during the last term ination[J]. Science, 2003,299(5607):688-691.
- [4] Stieglitz J L. Hemispheric asynchrony of abrupt climatic exchange[J]. Science, 2004,304(5679):1919-1920.
- [5] Alley R B, Marotzke J, Nordhaus W D, et al. Abrupt climate change[J]. Ence, 2003,299(5615):2005-2010.
- [6] Hodell, David, A, et al. Possible role of climate in the collapse of Classic Maya civilization (cover story) [J]. Nature, 1995,375(6530):391-394.
- [7] Weiss H, Courty M A, Wetterstrom W, et al. The genesis and collapse of third millennium north Mesopotamian civilization[J]. Science, 1993,261(5124):995-1004.
- [8] 秦大河, Thomas Stocker. IPCC第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J].气候变化研究进展,2014,10(1):1-6.
- [9] Stieglitz J L. Hemispheric asynchrony of abrupt climatic change[J]. Science, 2004,304(5679):1919-1920.
- [10] 王玉洁,周波涛,任玉玉,等.全球气候变化对我国气候安全影响的思考[J].应用气象学报,2016,27(6):750-758.
- [11] Sun W, Mu X, Song X, et al. Changes in extreme temperature and precipitation events in the Loess Plateau(China) during 1960—2013 under global warming [J]. Atmospheric Research, 2016,168(22):33-48.
- [12] Thompson D W J, Wallace J M., Kennedy J J, et al. An abrupt drop in Northern Hemisphere sea surface temperature around 1970 [J]. Nature, 2010, 467(7314):444-447.
- [13] Nakagawa T, Kitagawa H, Yasuda Y, et al. Asynchronous climate changes in the North Atlantic and Ja-

- pan during the last termination[J]. *Science*, 2003, 299(5607): 688-691.
- [14] Yang X, Vecchi G A, Delworth T L, et al. Extreme North America Winter Storm Season of 2013/14: Roles of radiative forcing and the global warming hiatus[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, 96(12): 25-28.
- [15] Laboratory G F D. Geophysical Fluid Dynamics Laboratory-A link between the hiatus in global warming and North American drought [J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(9): 3834-3845.
- [16] Hu Z Y, Li Q X, Chen X, et al. Climate changes in temperature and precipitation extremes in an alpine grassland of Central Asia[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 126: 519-531.
- [17] Ding Q, Wallace J M, Battisti D S, et al. Tropical forcing of the recent rapid Arctic warming in north-eastern Canada and Greenland[J]. *Nature*, 2014, 509(7499): 209-212.
- [18] Gavin D G, Henderson A C G, Westover K S, et al. Abrupt Holocene climate change and potential response to solar forcing in western Canada[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30(9/10): 1243-1255.
- [19] 梁珑腾, 马龙, 刘廷玺, 等. 1951—1255 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.
- [20] Duan A, Xiao Z. Does the climate warming hiatus exist over the Tibetan Plateau[R]. *Scientific Reports*, 2015.
- [21] You Q, Min J, Kang S. Rapid warming in the Tibetan Plateau from observations and CMIP5 models in recent decades[J]. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(6): 2660-2670.
- [22] Lin, Jingxing, Chen, et al. Three abrupt climatic events since the Late Pleistocene in the North China Plain[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2013, 2(4): 422-434.
- [23] Zachos, J. Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present[J]. *Science*, 2001, 292(5517): 686-693.
- [24] 孙建奇, 王会军. 北极涛动与太平洋年代际振荡的关系[J]. *科学通报*, 2005, 50(15): 1648-1653.
- [25] 朱益民, 杨修群. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系[J]. *气象学报*, 2003, 61(6): 641-654.
- [26] 齐月, 房世波, 周文佐. 近 50 年来中国地面太阳辐射变化及其空间分布[J]. *生态学报*, 2014, 34(24): 7444-7453.
- [27] 阿多, 熊凯, 赵文吉, 等. 1960—2013 年华北平原气候变化时空特征及其对太阳活动和大气环境变化的响应[J]. *地理科学*, 2016, 36(10): 1555-1564.
- [28] Jiang Y, Luo Y, Zhao Z, et al. Changes in wind speed over China during 1956—2004[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 99(3/4): 421-430.
- [29] Li, Feili, Jo, et al. Climate signals in the mid-to high-latitude north atlantic from altimeter observations[J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(13): 4905-4925.
- [30] 赵宗慈, 王绍武, 徐影, 等. 近百年我国地表气温趋势变化的可能原因[J]. *气候与环境研究*, 2005, 10(4): 808-817.
- [31] 孙柏林, 马龙, 冯起, 等. 内蒙古气温变暖停滞对其影响因子变化的响应[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(5): 2131-2142.
- [32] 陈效迷, 彭嘉栋, 李慧敏. 内蒙古地区气温变化的季节和区域差异[J]. *地理研究*, 2009, 28(1): 27-35.
- [33] 王素仙, 张永领, 郭灵辉, 等. 1981—2010 年内蒙古气温变化特征及未来趋势预估[J]. *气象与环境科学*, 2017, 40(4): 114-120.
- [34] 翟俊, 邵全琴, 刘纪远. 内蒙古高原土地利用/覆被变化对气温变化的影响分析[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(6): 967-978.
- [35] 陈效迷, 彭嘉栋, 李慧敏. 内蒙古地区气温变化的季节和区域差异[J]. *地理研究*, 2009, 28(1): 27-35.
- [36] 梁珑腾, 马龙, 刘廷玺, 等. 1951—2014 年中国北方地区气温突变与变暖停滞的时空变异性[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(5): 1601-1615.
- [37] 黄星, 马龙, 刘廷玺, 等. 近 60 年黄河流域典型区域气温突变与变暖停滞研究[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(11): 3253-3262.
- [38] 李虹雨, 马龙, 刘廷玺, 等. 1951—2014 年内蒙古地区气温、降水变化及其关系[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(5): 1098-1112.
- [39] Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica [J]. *Nature*, 1999, 399(6735): 429-436.
- [40] Steinman B A, Mann M E, Miller S K. Atlantic and Pacific multidecadal oscillations and Northern Hemisphere temperatures [J]. *Science*, 2015, 347(6225): 988-991.
- [41] 李双林, 王彦明, 郜永祺, 等. 北大西洋年代际振荡 (AMO) 气候影响的研究评述[J]. *大气科学学报*, 2009, 32(3): 458-465.
- [42] Pasini A, Triacca U, Attanasio A. Evidence for the role of the Atlantic multidecadal oscillation and the ocean heat uptake in hiatus prediction[J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2017, 129(3/4): 873-880.
- [43] Wu X, Mao J. Interdecadal variability of early summer monsoon rainfall over South China in association with the Pacific Decadal Oscillation[J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(2): 706-721.
- [44] Li Q, Yang S, Xu W, et al. China experiencing the recent warming hiatus [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(3): 889-898.
- [45] 董真, 黄世鸿. 相对湿度对大气气溶胶可见辐射吸收的影响[J]. *气象科学*, 2000, 20(4): 487-493.
- [46] 么枕生. 用于数值分类的聚类分析[J]. *海洋湖沼通报*, 1994(2): 1-12.

[47] Jones P D, Hulme M. Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: Methods and illustrations[J]. International Journal of Climatology, 1996,16(4):361-377.

[48] 马立平.统计数据标准化—无量纲化方法—现代统计分析方法的学与用(三)[J].北京统计,2000(3):34-35.

[49] Brulebois E, Thierry C, Richard Y, et al. Hydrological response to an abrupt shift in surface air temperature over France in 1987/88[J]. Journal of Hydrology, 2015,531:892-901.

[50] Dong B W, Rowan T S, Chen W, et al. Abrupt summer warming and changes in temperature extremes over northeast asia since the mid-1990s: Drivers and physical processes[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2016,33(9):1005-1023.

[51] Chen Y, Li B, Li Z, et al. Quantitatively evaluating the effects of CO2 emission on temperature rise[J]. Quaternary International, 2014,336(26):171-175.

[52] 徐忆菲,彭丽霞,李季,等.1951—2013 年我国冬季气温年代际变化与 PDO 的关系[J].气象科技,2017,45(4):669-677.

[53] 赵迦琪,李兴华,胡亚男,等.内蒙古典型草原区太阳能资源变化特征及其与气候变化的关系[J].内蒙古科技与经济,2020(13):60-65.

[54] 李双林,井元元,罗菲菲.工业革命前中国气温与大西洋年代际振荡(AMO)的可能联系[J].中国科学:地球科学,2015,45(6):864-878.

[55] 加孜拉·索力提肯,江静.西北太平洋热带气旋对东亚大气环流的影响[J].气象科学,2020,40(3):285-293.

[56] 黄建平,陈文,温之平,等.新中国成立 70 年以来的中国大气科学研究:气候与气候变化篇[J].中国科学:地球科学,2019,49(10):1607-1640.

[57] 胡毅鸿,龚道溢,毛睿,等.北方农牧交错带春季风速年际变化的影响因子分析[J].高原气象,2020,39(3):651-661.

[58] Hu K, Huang G, Wu R. A Strengthened influence of enso on august high temperature extremes over the southern Yangtze river valley since the late 1980s[J]. Journal of Climate, 2013,26(7):2205-2221.

[59] You, Q, Kang S, et al. Decreasing wind speed and weakening latitudinal surface pressure gradients in the Tibetan Plateau[J]. Climate Research, 2010,42(1):57-64.

[60] St George S, Wolfe S A. El Niño stills winter winds across the southern Canadian Prairies[J]. Georl, 2009,36(23):L23806.

[61] 吴菲,朱春阳,李树华.北京市 6 种下垫面不同季节温湿度变化特征[J].西北林学院学报,2013,28(1):207-213.

[62] 王卫国,樊雯璇,吴润,等.全球对流层顶气压场和温度场的时空演变结构特征[J].云南大学学报:自然科学版,2006,28(2):127-135.

[63] 陈希.中国地区臭氧长期变化趋势及与温度变化的关系[D].北京:中国地质大学(北京),2016.



(上接第 183 页)

[17] 薛嵩嵩,高凡,何兵,等.近 30 年乌伦古河流域土地利用与生态系统服务价值变化研究[J].水土保持通报,2019,39(6):223-229.

[18] 李辉丹,叶长盛,华吉庆.南昌市土地利用变化对生态系统服务价值影响[J].水土保持研究,2020,27(3):277-285.

[19] 丁丽莲,王奇,陈欣,等.近 30 年淀山湖地区生态系统服务价值对土地利用变化的响应[J].生态学报,2019,39(8):2973-2985.

[20] 夏淑芳,陈美球,刘馨,等.基于地理国情信息的赣州市土地生态系统服务价值核算[J].农业机械学报,2019,50(6):184-193.

[21] 闫正龙,高凡,何兵.3S 技术在我国生态环境动态演变研究中的应用进展[J].地理信息世界,2019,26(2):43-48.

[22] 曾永年,靳文凭,何丽丽,等.青海高原东部农业区土地利用遥感分类制图[J].农业工程学报,2012,28(16):225-231.

[23] 熊征,谈兵,宋成舜,等.城市土地利用综合效益耦合分析:以武汉市为例[J].水土保持研究,2015,22(2):278-283.

[24] 王棚宇,王秀兰.基于功效系数法的城市土地利用效益评价:以武汉市为例[J].西北农林科技大学学报:社会科学版,2008,8(1):79-83.

[25] 方创琳,蔺雪芹.武汉城市群空间扩展的生态状况诊断[J].长江流域资源与环境,2010,19(10):1211-1218.

[26] 卢媛媛,邬红娟,吕晋,等.武汉市浅水湖泊生态系统健康评价[J].环境科学与技术,2006,29(9):66-68.

[27] 张杨,刘艳芳,顾渐萍,等.武汉市土地利用覆被变化与生态环境效应研究[J].地理科学,2011,31(10):1280-1285.

[28] 黄隆杨,刘胜华,李健.城市生态用地时空动态及其相关驱动力:以武汉市为例[J].长江流域资源与环境,2019,28(5):1059-1069.

[29] 渠丽萍,张丽琴,胡伟艳.城市土地集约利用变化影响因素研究:以武汉市为例[J].资源科学,2010,32(5):970-975.

[30] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997,387(6630):253-260.

[31] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J].自然资源学报,2008,23(5):911-919.