

# 一种新的气候变化敏感区的定义方法与预估

李依婵, 李 育, 朱耿睿

(兰州大学资源环境学院干旱区水循环与水资源研究中心, 兰州 730000)

**摘要:** 气候变化敏感区的研究是气候变化研究的一个重要方向, 前人对气候变化敏感区的定义大多基于单一的指标, 而对综合性指标研究较少。基于柯本气候分类法所划分出的中国气候类型分布及其变化频次, 提出一种新的气候变化敏感区定义方法, 并使用该方法划分中国的气候变化敏感区, 气候类型变化频繁的区域被认为是敏感区。选取CESM模型中等碳排放(RCP 4.5)下的模拟数据计算2006-2013年、21世纪40年代和90年代气候类型的变化, 以此预估未来30~80年间气候变化敏感带的变化。结果显示: 依据本文提出的方法划分的气候变化敏感区, 与降水变化敏感区有较好拟合; 中国气候变化最敏感的区域分布在黑河腾冲线附近、秦岭淮河一线、青藏高原西部和天山以北部分地区, 气候最为稳定的区域分布在青藏高原中东部、昆仑山、祁连山以北、天山以南、贺兰山以西的大片区域和大兴安岭附近; 未来30~80年间, 西部(贺兰山、横断山以西)地区气候变化敏感区基本不变, 而东部地区的气候变化敏感区则逐渐向北偏移。

**关键词:** 气候类型; 气候变化; 敏感区; 柯本气候分类法; 预估

DOI: 10.11821/dlxb201807008

## 1 引言

随着全球经济的快速发展, 以气候变暖为特征的全球性环境问题已越来越受到科学界、社会公众和各国政府的普遍关注<sup>[1-4]</sup>。而在全球变暖的大背景下, 不同区域对全球气候变化的响应并不相同<sup>[5-6]</sup>, 变化最剧烈和最稳定的区域都不能代表整体的气候变化趋势, 而一般性变化的区域, 也不能代表变化最剧烈和最稳定的区域。因此, 在气候变化研究中, 需要区分不同区域对全球气候变化的响应情况, 或者说不同区域对全球气候变化的敏感性, 并划分气候变化敏感区和非敏感区。

气候变化敏感性和气候变化敏感区作为现代地理学与气候学研究中的重要概念, 之前已有大量研究<sup>[7-9]</sup>。这些研究通过不同的数学方法, 对气温、降水等不同气候指标变化程度进行了计算和比较, 并分析气候变化敏感性与气候变化敏感区。然而在这些研究当中, 大部分研究指标性质单一<sup>[7, 10-11]</sup>, 综合性指标研究较少<sup>[8, 11]</sup>。Giorgi<sup>[12]</sup>基于区域平均降水变化、平均地表气温变化以及降水和温度年际变率的变化定义了区域气候变化指数(Regional Climate Change Index, RCCI), 并据此指数在全球范围内划分出若干个气候变

收稿日期: 2017-07-10; 修订日期: 2018-03-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571178); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20100102); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(lzujbky-2018-k15) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41571178; Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, No.XDA20100102; Fundamental Research Funds for the Central Universities, No.lzujbky-2018-k15]

作者简介: 李依婵(1995-), 女, 广东梅州人, 硕士生, 研究方向为气候变化。E-mail: liych2017@lzu.edu.cn

通讯作者: 李育(1981-), 男, 甘肃兰州人, 博士, 教授, 中国地理学会会员(S110010213M), 研究方向为气候变化。

E-mail: liyu@lzu.edu.cn

化热点, 这些热点亦被定义为气候变化敏感区域。吴浩等<sup>[8]</sup>、Baettig 等<sup>[11]</sup>、Diffenbaugh 等<sup>[13-14]</sup>、Xu 等<sup>[15]</sup>、梁玉莲等<sup>[16]</sup>和程志刚等<sup>[17]</sup>使用了综合指数来研究气候变化敏感性, 但是他们的指数是一些单一因素简单相加的结果。同时, 无论是对区域植被的适应性还是对人类生活的影响, 同等的年降水量变化, 对不同的区域来说, 影响显然不同<sup>[18-19]</sup>。降水量基数、特定阈值、一年中的降水分配, 都能使同等年降水量变化产生不同影响。而温度的变化也有类似的问题。而作为研究区域气候变化的重要方式, 气候类型比单一气候要素携带信息更丰富; 对气候类型变化的研究可以补充单一气候要素的研究, 进一步研究气候变化对生态系统的影响。柯本气候分类法具有气候指标严格、界限明确, 分类系统简明, 能反映世界自然植被的分布状况等优点, 在全球范围内广泛使用<sup>[20-22]</sup>。

因此, 本文选取柯本气候分类法定义一种基于气候型的气候变化敏感度计算新方法, 以某一区域柯本气候型变化频率作为气候变化敏感度指标, 使用该方法划分中国气候变化敏感区, 并使用 Community Earth System Model (CESM) 系统模拟的未来气温、降水数据, 计算未来中国柯本气候型, 以此预估未来气候变化敏感区分布。同时使用气候类型面积变化这一地理学指标来探讨中国 1961-2010 年年际和年代际气候变化特征, 收集数据并计算 1961-2010 年 850 hPa 风矢量数据、500 hPa 位势高度数据, 分析 850 hPa 风速和 500 hPa 位势高度对柯本气候类型变化产生的影响。本文为气候变化敏感度的研究, 以及为区域对气候变化的响应度的研究提供了新的视角, 有利于在应对气候变化方面做出及时有效的具有区域性和针对性的对策。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 数据来源

元数据为中国气象局国家气象信息中心资料服务室 (<http://cdc.nmic.cn/home.do>) 下载的 1961-2010 年中国地面降水月值  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  格点数据集、中国地面气温月值  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  格点数据集 (空间覆盖范围不包括台湾省和南海诸岛), 以及 CESM 模型中等碳排放 (RCP 4.5) 下的 2041-2050 年和 2091-2100 年两个时间段模拟数据 (<http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.0/>) 和美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 的美国国家环境预报中心 (NCEP) 的逐月再分析资料中的多层月平均风矢量数据、多层月平均风位势高度数据。

### 2.2 方法

基于气候类型变化的气候变化敏感区定义方法具体为: 根据每年 (或每 10 年) 的降水、气温月值数据, 计算各区域 (格点) 气候类型, 比较每个区域 (格点) 后一年与前一年 (或后 10 年与前 10 年) 的气候类型, 若相同, 则记该区域 (格点) 气候型不变 1 次, 若不同, 则记气候型变化 1 次, 变化次数共计为  $m$  次, 不变次数共计为  $n$  次, 则定义  $k = m/(m+n)$  为该区域气候变化敏感度, 则  $k$  为区间  $[0, 1]$  范围内的值。若  $k < 0.25$ , 则记该区域属气候稳定区; 若  $0.25 \leq k < 0.5$ , 则记该区域属气候较稳定区; 若  $0.5 \leq k < 0.75$ , 则记该区域属气候变化较敏感区; 若  $k \geq 0.75$ , 则记该区域属气候变化敏感区。

柯本气候分类具体划分方法<sup>[11]</sup>如表 1 所示, 根据 1961-2010 年的温度和降水数据计算每年与每 10 年的气候型分布, 分别统计基于年际柯本气候分类变化的气候变化敏感区划分和基于年代际柯本气候分类变化的气候变化敏感区划分 (图 1)。

CESM 作为一个免费的地球系统模式由美国国家大气中心于 2010 年发布, 是目前最先进、使用最广泛的地球系统模式之一<sup>[23-24]</sup>, CESM 可以通过世界上最先进的计算机模拟地球的过去、现在和未来的气候情况<sup>[25]</sup>。因此, 选取 CESM 模型中等碳排放 (RCP 4.5)<sup>[26]</sup>

表1 柯本气候符号及定义标准

Tab. 1 Description of Köppen climate symbols and defining criteria

气候带	气候型	气候副型	特征
A 热带			$T_{\text{cold}} \geq 18\text{ }^{\circ}\text{C}$
	Af 热带雨林气候		$P_{\text{dry}} \geq 60\text{ mm}$
	Aw 热带疏林草原气候		$P_{\text{dry}} \leq 60\text{ mm}$ & $P_{\text{dry}} \leq (100 - \text{MAP}/25)\text{ mm}$
	Am 热带季风气候		$P_{\text{dry}} \leq 60\text{ mm}$ & $P_{\text{dry}} \geq (100 - \text{MAP}/25)\text{ mm}$
B 干带			$\text{MAP} < 10P_{\text{th}}$
	Bs 草原气候		$\text{MAP} \geq 5P_{\text{th}}$
	Bw 沙漠气候		$\text{MAP} < 5P_{\text{th}}$
		H	$\text{MAT} \geq 18\text{ }^{\circ}\text{C}$
		K	$\text{MAT} < 18\text{ }^{\circ}\text{C}$
C 温暖带			$T_{\text{hot}} > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ & $0\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{\text{cold}} < 18\text{ }^{\circ}\text{C}$
	Cs 夏干温暖气候		$P_{\text{sdry}} < 40\text{ mm}$ & $P_{\text{sdry}} < P_{\text{wwet}}/3$
	Cw 冬干温暖气候		$P_{\text{wdry}} < P_{\text{swet}}/10$
	Cf 常湿温暖气候		既非 Cw 也非 Cs
		a	$T_{\text{hot}} \geq 22\text{ }^{\circ}\text{C}$
		b	$T_{\text{hot}} < 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ & $\text{count}(T_{\text{mon}} > 10\text{ }^{\circ}\text{C}) \geq 4$
		c	$T_{\text{cold}} \geq -38\text{ }^{\circ}\text{C}$ & $\text{count}(T_{\text{mon}} > 10\text{ }^{\circ}\text{C}) < 4$
			$T_{\text{hot}} > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ & $T_{\text{cold}} \leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$
D 冷温带	Df 常湿冷温气候		$P_{\text{wdry}} \geq P_{\text{swet}}/10$
	Dw 冬干冷温气候		$P_{\text{wdry}} < P_{\text{swet}}/10$
		a	$T_{\text{hot}} \geq 22\text{ }^{\circ}\text{C}$
		b	$T_{\text{hot}} < 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ & $\text{count}(T_{\text{mon}} > 10\text{ }^{\circ}\text{C}) \geq 4$
		c	$T_{\text{cold}} \geq -38\text{ }^{\circ}\text{C}$ & $\text{count}(T_{\text{mon}} > 10\text{ }^{\circ}\text{C}) < 4$
		d	$T_{\text{cold}} < -38\text{ }^{\circ}\text{C}$
			$T_{\text{hot}} < 10\text{ }^{\circ}\text{C}$
			$T_{\text{hot}} \geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$
E 极地带	ET 苔原气候		$T_{\text{hot}} \geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$
	EF 冰原气候		$T_{\text{hot}} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$

注： $T_{\text{cold}}$ 表示最冷月平均气温； $T_{\text{hot}}$ 表示最热月平均气温； $P_{\text{dry}}$ 表示最干月降水量； $P_{\text{sdry}}$ 表示夏半年（4月-9月）最干月降水量； $P_{\text{wdry}}$ 表示冬半年（10月-次年3月）最干月降水量； $P_{\text{swet}}$ 表示夏半年最多雨月降水量； $P_{\text{wwet}}$ 表示冬半年最多雨月降水量；MAP表示年降水量；MAT表示年平均气温。 $P_{\text{th}}$ ：若区域夏季降水量大于等于年降水量的70%，则 $P_{\text{th}}=2(\text{MAT}+14)\text{ mm}$ ；若区域冬季降水量大于等于年降水量的70%，则 $P_{\text{th}}=2\text{MAT mm}$ ；不足上述比例，则 $P_{\text{th}}=2(\text{MAT}+7)\text{ mm}$ 。

下的模拟数据预估21世纪2041-2050和2091-2100年两个时间段的模拟数据柯本气候型，以此推测未来30~80年间气候变化敏感带的变化。同时，分别基于20世纪60年代、20世纪70年代、20世纪80年代、20世纪90年代、21世纪初10年以及1961-2010年50年间的实测数据划分柯本气候型。

柯本气候带、气候型区划数据采用上一节计算结果，为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 格点数据。计算面积时使用6371 km作为地球半径（ $r$ ），根据每个格点对应纬度（lat0为纬度下限，lat1为纬度上限）计算格点面积（ $s$ ），计算公式如下：

$$s = 2\pi \times r^2 \times [1 - \sin(\pi \times \text{lat0}/180)] - 2\pi \times r^2 \times [1 - \sin(\pi \times \text{lat1}/180)]$$

(1)

并统计50年间每年各气候型面积。

3 结果分析

3.1 基于柯本气候分类法的气候变化敏感区划分

从图1可以看出,基于柯本气候分类法的气候稳定区在国内分布较广,而气候变化敏感区则分布较少。而基于柯本气候年际变化(图1a)和年代际变化(图1b)的气候变化敏感区划分存在较大差异。

从图1a可看出,50年间基于气候型年际变化的气候变化敏感区极少,零星分布于秦岭淮河一线及附近区域。气候变化较敏感区则分布较广,包括长江淮河流域,黑河—腾冲线两侧,青藏高原中西部、南部边缘,阿尔泰山附近和海南的部分区域。气候稳定区则广泛分布于东北大部分地区、珠江流域、西南地区、青藏高原中东部,和昆仑山、祁连山以北、天山以南、贺兰山以西的大片区域。气候较稳定区则分布于气候稳定区与气候变化较敏感区之间的过渡地带。整体来看,基于柯本气候型年际变化的气候变化敏感区和较敏感区主要分布于90°E以西和110°E以东地区。

图1b显示,基于柯本气候型年代际变化的气候变化敏感区分布主要在黑河—腾冲线和秦岭—淮河线附近以及青藏高原中部和东南沿海地区(北回归线附近),阿尔泰山附近有少量分布。气候变化较敏感区则主要分布于青藏高原中西部、东南丘陵地区和黑河—腾冲线附近,祁连山、天山和阿尔泰山附近有少量分布。气候稳定区广泛分布在中国各地,广泛地分布在中国东南沿海地区,青藏高原东部,黑河—腾冲线和秦岭—淮河线附近,以及塔里木盆地、内蒙古地区。而气候变化较稳定区则分布于黑河—腾冲线附近、华北地区、青藏高原中部和东南部以及天山以北地区。整体来看,基于柯本气候型年代际变化的气候变化敏感区和气候变化较敏感区主要分布于南方地区和青藏高原西部,北方地区分布较少。

总体而言,基于年代际气候类型变化的气候变化敏感区比基于年际气候类型变化的有更广泛的分布,并且他们的分布之间存在一定的差异。也就是说,气候变化敏感区的分类结果随研究的时间尺度变化而出现了不同。

3.2 气温和降水趋势

计算温度和降水的变化趋势以反

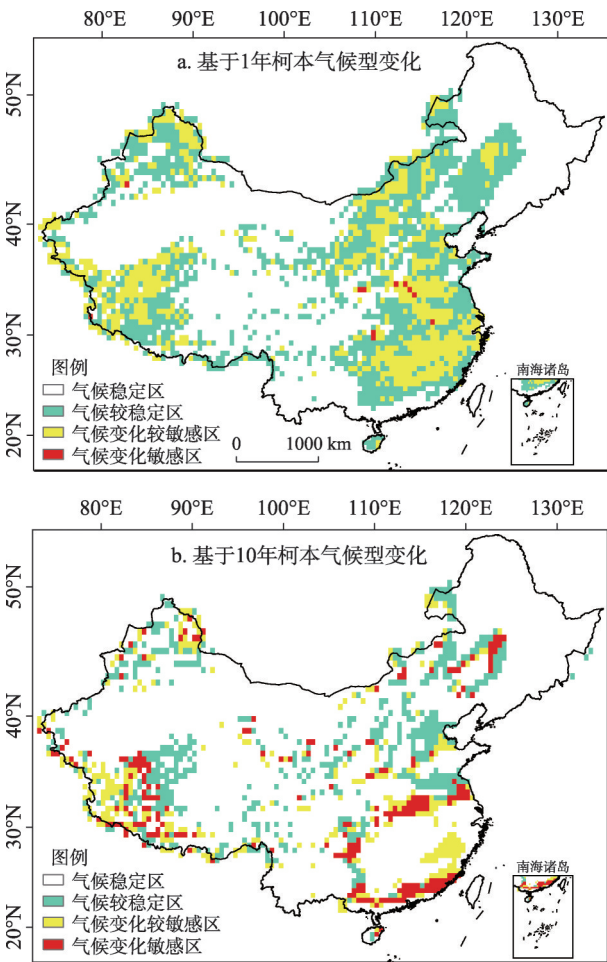


图1 基于科本气候分类气候型变化的中国气候变化敏感区分布

Fig. 1 The climate-sensitivite regions based on Köppen climate classification



映新的指标和单因素指标之间的差异。图2表明在中国北方地区,特别是在天山以北地区、青藏高原中部、柴达木盆地、内蒙古高原和东北平原的区域内部,有一个明显的暖化趋势。而中国南方变化相对没那么小,四川盆地、秦岭以南的局部地区和青藏高原西北缘甚至出现变冷趋势,这与张晶晶等<sup>[27]</sup>的研究一致。同时,降水改变的区域主要分布在天山以北地区,青藏高原中部和西部、祁连山区、喜马拉雅东南部地区、长江中下游平原、东南沿海地区和海南岛大部分地区(变湿),以及喜马拉雅山脉西段、雅鲁藏布江大峡谷、澜沧江谷地以西地区、云贵高原中部和东部地区、四川盆地、巫山和秦岭附近地区、黄土高原中部和东部地区、华北平原北部地区、内蒙古高原东部和东北平原西部地区(变干),这与已有研究<sup>[28-30]</sup>的结果一致。

### 3.3 基于CESM模型的中等碳排放(RCP 4.5)下未来30~80年气候类型分布与检验

假设某一时间段气候变化敏感区和稳定区分布与该时段气候类型的分布有关,那么只要知道未来的气候类型分布,就可以知道未来的气候变化敏感区分布。因此,划分21世纪40年代和21世纪90年代的气候区来预估相应时段的气候变化敏感区。

结合气候变化敏感区变化图(图1)与中国年代际柯本气候分布图(图3),可以发现,基于柯本气候类型年代际变化的气候变化敏感度来说,ETG、Bwk、Dwa、Dwc 4种主要的气候副型对应的区域较为稳定,Bsk、Dwb、Cwa、Cfa、Cwb 5种主要气候副型对应的区域则较为敏感。

同时,发现2006-2013年、21世纪40年代和21世纪90年代的模拟结果中柯本气候分类的变化存在一个明显的趋势,即贺兰山脉和横断山脉以西的气候区几乎没有变化,而中国东部的气候区则出现明显的向北移动趋势(图4),这与卞娟娟等<sup>[31]</sup>的研究结果一致。根据这个趋势和上面的假设,本文认为,在未来的几十年内,在中国西部的气候变化敏感地区(贺兰山脉和横断山脉以西)基本上是不变的,而中国东部的气候变化敏感区则向北移动。也就是说,在天山以北地区、青藏高原西部地区仍然是敏感的,青藏高原东部地区、昆仑山、祁连山以北、天山以南和贺兰山以西仍然是稳定的地区。同时,

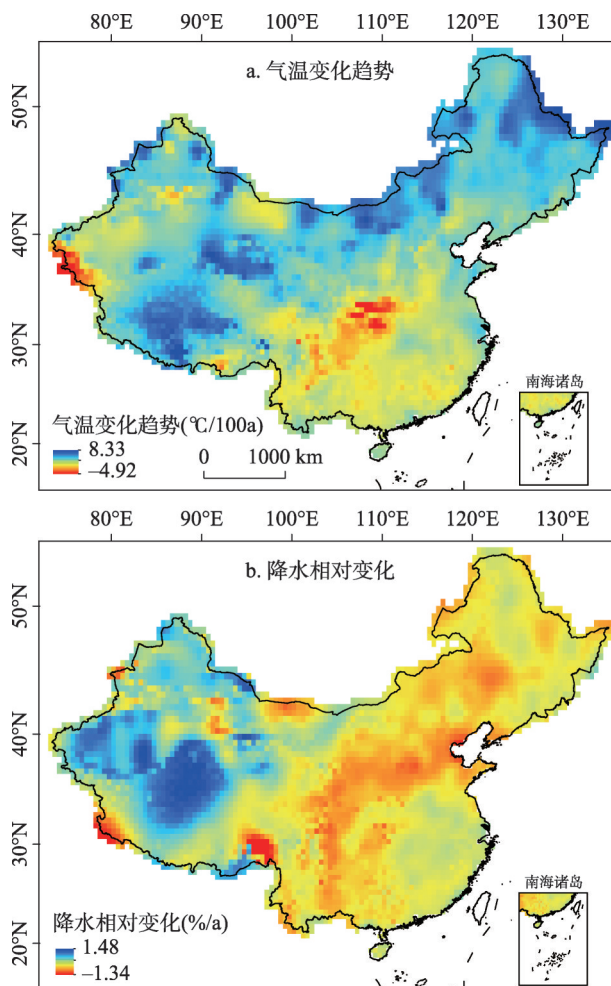


图2 1961-2010年的中国气温与降水变化趋势  
Fig. 2 The tendency of temperature and precipitation change during 1961-2010



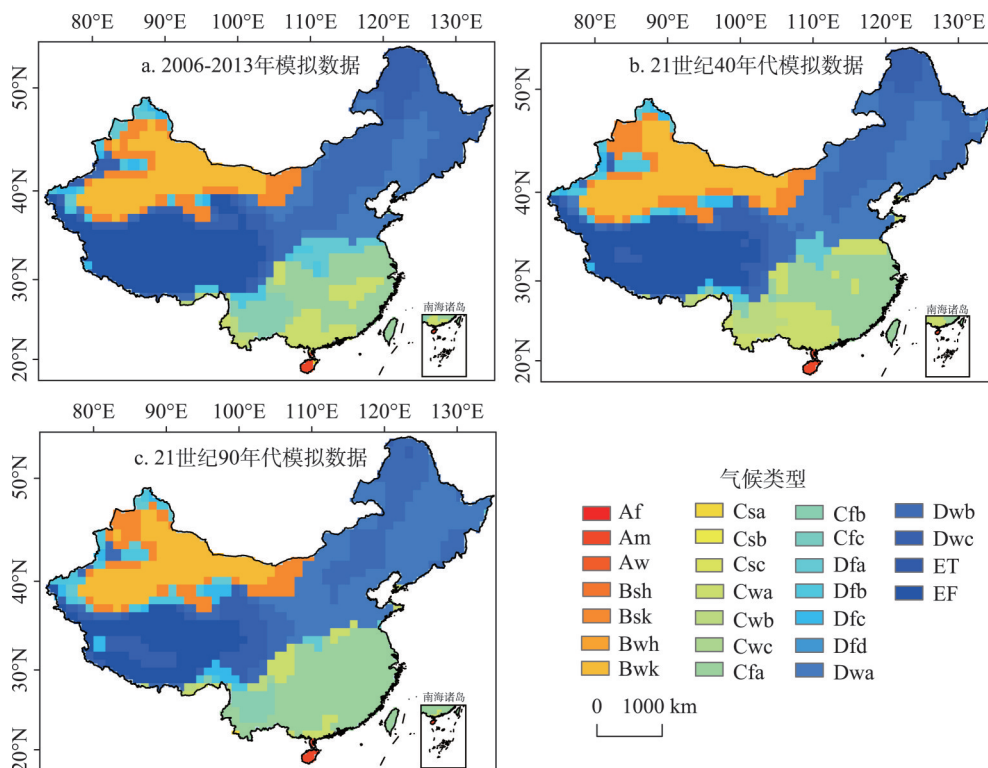


图4 中国柯本气候类型分布预测

Fig. 4 The estimated types of climate zones in the 2040s and 2090s based on Köppen climate classification in China

西部之间的湿度存在较大差异，二是西部气候稳定性较东部高。一方面，柯本气候分类法对干旱气候区和高原气候区的划分存在一定的不足<sup>[33]</sup>，因此中国西部气候类型不变的原因也许是因为柯本气候分类本身的不足。同时，青藏高原在全球气候系统中扮演着重要的角色<sup>[34-35]</sup>，青藏高原的动力作用和热力作用对其周边地区产生了深远影响<sup>[36]</sup>，因此中国西部气候类型不变的原因也可能是因为受到青藏高原的影响：即中国东部的地形较为平坦，东部气候更多的是受长时间尺度气候波动的影响，而中国西部的气候则由大尺度地貌和长时间尺度的气候变化所控制。

气候变化敏感度和气候变化敏感区近年来得到了广泛的研究。郝成元等<sup>[10]</sup>就中国气候变化敏感区降水变化过程和波动特征进行了对比分析。周天军等<sup>[7]</sup>研究气候反馈和温度系数的阈值，两者对气候变化的研究具有重要意义，但他们采用单一因素，缺乏综合分析，不能代表气候变化的总体趋势。吴浩等<sup>[8]</sup>和Giorgi等<sup>[12-17]</sup>利用综合指数来研究气候变化敏感性，但他们的指数是一些单一因素简单相加的结果。而作为研究区域气候变化的重要方式，气候类型比单一气候要素携带信息更丰富；对气候类型变化的研究可以补充单一气候要素的研究，进一步研究气候变化对生态系统的影响。柯本气候分类法具有气候指标严格、界限明确，分类系统简明，能反映世界自然植被的分布状况等优点，在全球范围内广泛使用<sup>[20-22]</sup>。因此，认为本文选取柯本气候分类法定义的基于气候型变化的新指标具有综合性和系统性的优势。同时，气候变化敏感性的范围是[0, 1]，这使得它更容易进行横向和纵向的比较。更重要的是气候类型的变化比其他因素或指数更能代表气候变化。



## 4.2 中国气温和降水与气候变化敏感区

结果显示,气候变化敏感区的分类结果随研究的时间尺度变化而出现了不同。前人已经对区域降水、气候变化、时间尺度等做了大量研究,并取得了丰富的成果。王澄海等<sup>[37]</sup>的研究显示各地区降水的变化各不相同,在1961-2010年的夏季降水存在明显的高频率变化(如3~5年)。同时,王海军等<sup>[38]</sup>的研究表明,在中国北方存在明显的变暖趋势,并提出了温度以15~22年为主周期变化。基于上述研究,可以发现,在不同时间尺度上的气候变化是由不同因素控制的,这与Zeng等<sup>[39]</sup>和Li等<sup>[40]</sup>的研究一致。

通过比较图1和图2发现,在青藏高原地区,温度变幅普遍较大,变幅最大的为青藏高原南部以及柴达木盆地,相对应的,该区温度变幅较大的区域除柴达木盆地外都被定义为气候变化敏感区或较敏感区。在东部季风区和西北干旱半干旱区内,温度变幅较大的区域如内蒙古高原和东北平原以及天山以北地区,并未被定义为气候变化敏感区,而温度变幅较小的,如华北平原、四川盆地、云贵高原东北部以及东南丘陵地区则被定义为气候变化敏感区或较敏感区。同时,在青藏高原地区,降水变幅较大的区域如青藏高原西北部地区和柴达木盆地附近地区并未被定义为气候变化敏感区。在东部季风区和西北干旱半干旱区内,降水变幅较大的区域如黄土高原、华北平原、四川盆地、云贵高原、长江中下游平原、东南沿海地区大都被定义为气候变化敏感区或较敏感区。总的来说,降水变化较大的区域被认为比温度变化较大的区域更加敏感。也就是说,降水比温度对新的敏感区划分方法有更大影响。

## 4.3 中国环流与气候变化敏感区

从图4可知,1961-2010年中10年平均气候类型出现变化的区域(4次变化区域的并集)主要分布在天山以北地区(主要在43°N以北,93°E以西),青藏高原西部(主要在38°N以南,93°E以西),黑河腾冲一线两侧,南方地区北部、南部和西部(主要在云南至江苏一带,和广西至福建一带)。天山以北地区的气候类型变化主要为常湿冷温气候与沙漠气候间的变化,青藏高原西部的气候类型变化主要为草原气候与苔原气候间的变化,黑河腾冲线两侧主要为草原气候与冬干冷温气候之间的变化,南方地区北部主要是冬干温暖气候与冬干冷温气候和常湿温暖气候之间的变化,南方地区南部和西部主要是常湿温暖气候和冬干温暖气候之间的变化。整体来看,年代际尺度的气候类型变化表现为整个中国大陆出现变暖趋势,北方地区出现明显变干趋势。

如图5所示,热带气候在中国分布面积积极少,总面积在0~3.8万km<sup>2</sup>之间变化,整体上面积成增大趋势;干带气候在中国分布最广,分布面积在274.3万~405.3万km<sup>2</sup>之间变化,面积变化无明显趋势;温暖带气候在中国分布较广,分布面积在198.1万~279.4万km<sup>2</sup>之间变化,面积波动较冷温带小,有较弱的增长趋势;冷温带气候在中国分布面积与温暖带气候相近,分布面积在189.6万~350.7万km<sup>2</sup>之间变化,波动较大,有较明显的减少趋势;极地带在中国分布较少,分布面积在127.6万~200.6万km<sup>2</sup>之间变化,整体呈现先增加后减少的趋势,在20世纪70年代面积发展到峰值。

根据图3和图5所得的中国干带(B)和冷温带(D)年际变化,选取5个干带面积出现极大值(冷温带面积积极小值)和5个干带面积积极小值(冷温带面积积极大值)年份,计算极端气候年份平均风场与50年平均风场差值,极端气候年份平均位势高度与50年平均位势高度差值。结合图3,选取干带面积出现极大值(冷温带面积积极小值)年份为1965年、1972年、1982年、1989年和1999年,选取冷温带面积积极小值(冷温带面积积极大值)年份为1964年、1977年、1990年、1998年、2010年。

图6中,当中国干带面积出现极大值时,位于中国东面的阿留申低压和西面的中亚



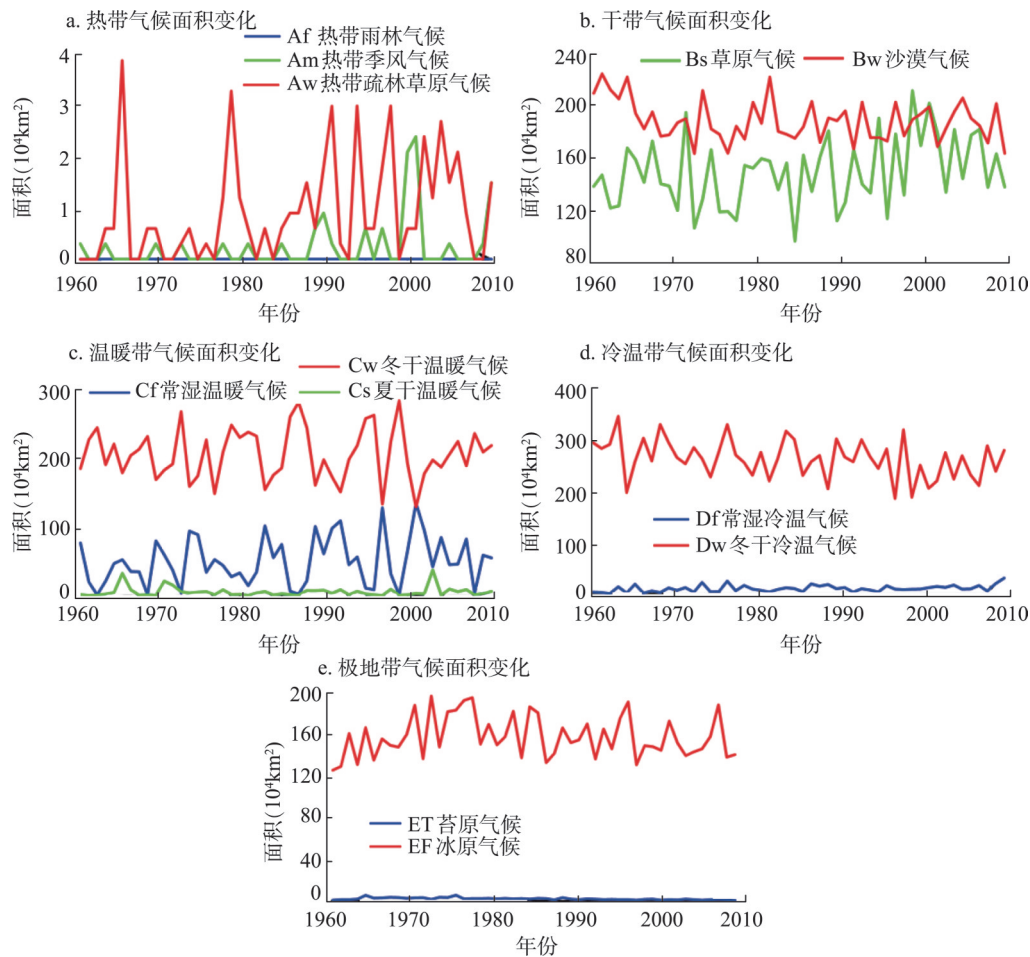


图5 基于柯本气候分类法的1961-2010年各气候类型面积变化

Fig. 5 Area changes for climate zones from 1961 to 2010 based on Köppen climate classification

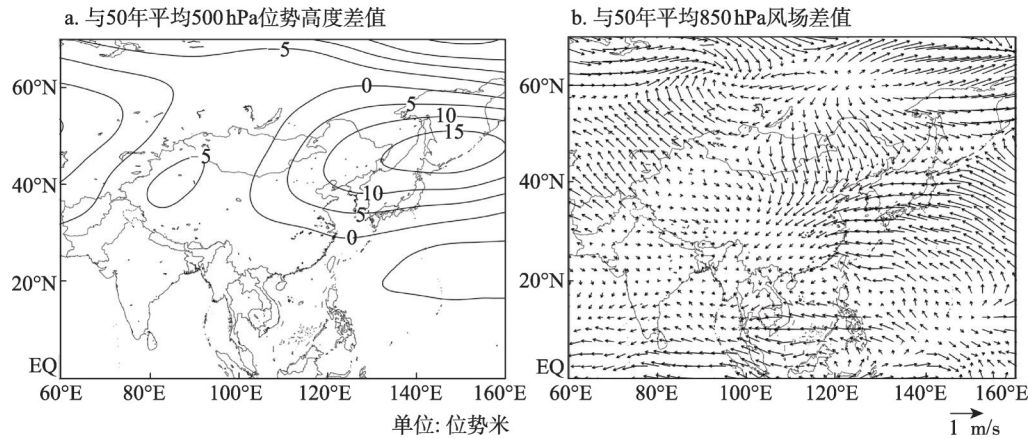


图6 中国干带面积极大值年份平均与50年平均500 hPa 位势高度和850 hPa 风场的差值

Fig. 6 The difference between dry zone area of the maximum annual average and 50-year average of 500 hPa geopotential height and 850 hPa wind field in China

低压均减弱（位势高度升高），中国西部和南部的位势高度降低，导致海陆气压差减小，海陆之间季风减弱，降水减少，干带面积增加。当中国干带面积出现极大值时，中国西北地区风速变化较小，对中国气候影响较小；青藏高原区风速向东分量增强，即西风加强；东部和南部地区，风速向西向南分量加强，即东风和北风加强，理论上此区域出现降水增多，但这个区域不受干带控制，所以不影响干带面积增加；而北方大部分区域风速向南分量增加，即南风减弱，北风增强，降水减少，导致中国北方干带面积增大<sup>[41-42]</sup>。

图 7 中，当中国冷温带面积出现极大值时，位于中国东面的阿留申低压和西面的中亚低压均加强（位势高度降低），中国大部分地区，和北面的西伯利亚高压增强（位势高度增加），导致海陆气压差增加，海陆之间季风增强，降水增多，干带面积减少，冷温带面积增加；同时，中国北部的西伯利亚高压增强，带来的冷空气会导致中国大部分区域气温降低，也会带来干带、温暖带面积减少、冷温带面积加强的结果。当中国冷温带面积出现极大值时，中国以 100°E 经线为界，西部向南向西分量加强，即东北风加强，西南风减弱，整体来看降水减少，但温度也有所降低，对干带和冷温带的影响不强；东部区域风速向北向西分量增加，即东南风增强，西北风减弱，降水增多，干带减少，冷温带面积增大<sup>[43-44]</sup>。

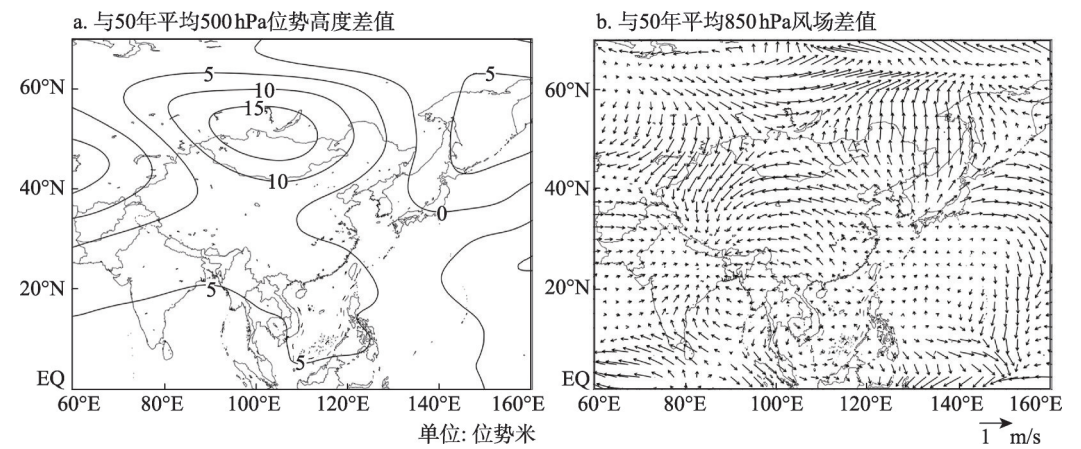


图 7 中国冷温带面积极大值年份平均与 50 年平均 500 hPa 位势高度和 850 hPa 风场的差值  
Fig. 7 The difference between cold temperate zone maximum annual average and 50-year average of 500 hPa geopotential height and 850 hPa wind field in China

## 5 结论

本文基于柯本气候分类法所划分出的中国气候类型分布及其变化频次，提出一种新的气候敏感区定义方法，并使用该方法划分中国的气候敏感区，气候类型变化频繁的区域被认为是敏感区。该方法具有综合性的优点，且气候敏感度的数值区间为[0, 1]，易于进行横向与纵向的各种比较。同时，该气候敏感区划分方法与降水敏感区较拟合。

基于本文提出的气候敏感区划分方法，中国气候最敏感的区域分布在黑河腾冲线附近、秦岭淮河一线，青藏高原西部和天山以北部分地区。气候最为稳定的区域分布在青藏高原中东部、昆仑山、祁连山以北、天山以南、贺兰山以西的大片区域和大兴安岭附近。

基于本文提出的气候敏感区划分方法，未来 30~80 年间，西部（贺兰山、横断山以西）地区气候敏感区基本不变，即天山以北地区，青藏高原西部地区仍然为气候敏感

区,而青藏高原中东部和昆仑山、祁连山以北、天山以南、贺兰山以西的大片区域仍为气候稳定区。而东部地区的气候敏感区则逐渐向北偏移,即气候敏感区的北界于50°N左右不断北移,直到超出国界,而气候敏感区的南界不断北移,珠江流域的气候敏感区也向北偏移。

### 参考文献(References)

- [1] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Computational Geometry, 2013, 18(2): 95-123.
- [2] Wei M, Qiao F, Deng J. A quantitative definition of global warming hiatus and 50-year prediction of global-mean surface temperature. Journal of the Atmospheric Sciences, 2015, 72(8): 581-590.
- [3] Giddens A. The Politics of Climate Change. Cambridge, UK: Polity, 2009.
- [4] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 1-996.
- [5] Yin Yunhe, Wu Shaohong, Chen Gang. Regional difference of climate trend and abrupt climate change in China during 1961-2006. Journal of Natural Resources, 2009, 24(12): 2147-2157. [尹云鹤, 吴绍洪, 陈刚. 1961-2006年我国气候变化趋势与突变的区域差异. 自然资源学报, 2009, 24(12): 2147-2157.]
- [6] Wu Jia, Zhou Botao, Xu Ying. Response of precipitation and its extremes over China to warming: CMIP5 simulation and projection. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(9): 3048-3060. [吴佳, 周波涛, 徐影. 中国平均降水和极端降水对气候变暖的响应: CMIP5模式模拟评估和预估. 地球物理学报, 2015, 58(9): 3048-3060.]
- [7] Zhou Tianjun, Chen Xiaolong. The uncertainty in the 2°C warming threshold related to climate sensitivity and climate feedback. Journal of Meteorological Research, 2015, 73(4): 624-634. [周天军, 陈晓龙. 气候敏感度、气候反馈过程与2°C升温阈值的不确定性问题. 气象学报, 2015, 73(4): 624-634.]
- [8] Wu Hao, Hou Wei, Qian Zhonghua, et al. The research on the sensitivity of climate change in China in recent 50 years based on composite index. Acta Physica Sinica, 2012, 61(14): 562-571. [吴浩, 侯威, 钱忠华, 等. 基于气候变化综合指数的中国近50年来气候变化敏感性研究. 物理学报, 2012, 61(14): 562-571.]
- [9] Jiang Dabang, Liu Yeyi. How hot will the greenhouse world be? A brief review of equilibrium climate sensitivity. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(7): 691-694. [姜大膀, 刘叶一. 温室效应会使地球温度上升多高?关于平衡气候敏感度. 科学通报, 2016, 61(7): 691-694.]
- [10] Hao Chengyuan, Zhao Tongqian. Comparative research on the precipitation variation in the regions susceptible to global climate change in China: A case study in Heilongjiang, Xinjiang and Tibet. Progress in Geography, 2011, 30(1): 73-79. [郝成元, 赵同谦. 中国气候变化敏感区降水量区域对比: 以黑龙江、新疆和西藏三省区为例. 地理科学进展, 2011, 30(1): 73-79.]
- [11] Baettig M B, Wild M, Imboden D M. A climate change index: Where climate change may be most prominent in the 21st century. Geophysical Research Letters, 2007, 34(1): 155-170.
- [12] Giorgi F. Climate change hot-spots. Geophysical Research Letters, 2006, 33(8): L08707.
- [13] Diffenbaugh N S, Giorgi F, Pal J S. Climate change hotspots in the United States. Geophysical Research Letters, 2008, 35(16): 375-402.
- [14] Diffenbaugh N S, Giorgi F. Climate change hotspots in the CMIP5 global climate model ensemble. Climatic Change, 2012, 114(3/4): 813-822.
- [15] Xu Y, Gao X J, Giorgi F. Regional variability of climate change hot-spots in East Asia. Advances in Atmospheric Sciences, 2009, 26(4): 783-792.
- [16] Liang Yulian, Han Mincheng, Yan Xiaodong, et al. CMIP5 model-based prediction and sensitivity analysis of climate change in China. Journal of the Meteorological Sciences, 2016, 36(2): 158-164. [梁玉莲, 韩明臣, 延晓冬, 等. 基于CMIP5模式的中国气候变化敏感性预估与分析. 气象科学, 2016, 36(2): 158-164.]
- [17] Cheng Zhigang, Zhang Yuanmeng, Xu Ying, et al. Projection of climate zone shifts in the 21st century in China based on CMIP5 models data. Advance in Climate Change Research, 2015, 11(2): 93-101. [程志刚, 张渊萌, 徐影, 等. 基于CMIP5模式集合预估21世纪中国气候带变迁趋势. 气候变化研究进展, 2015, 11(2): 93-101.]
- [18] Li Yu, Zhu Gengrui. Interannual-interdecadal changes in climate zones in China and controlling factors. Resources Science, 2015, 37(3): 605-618. [李育, 朱耿睿. 年际-年代际尺度中国气候区类型变化与影响因素研究. 资源科学, 2015, 37(3): 605-618.]

- [19] Li Yu, Zhu Gengrui. Changes of climate zones in the transition area of Three Natural Zones during the past 50 years and their responses to climate change. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(7): 791-801. [李育, 朱耿睿. 三大自然区过渡地带近 50 年来气候类型变化及其对气候变化的响应. *地球科学进展*, 2015, 30(7): 791-801.]
- [20] Zhu Gengrui, Li Yu. Types and changes of Chinese climate zones from 1961 to 2013 based on Köppen climate classification. *Arid Land Geography*, 2015, 38(6): 1121-1132. [朱耿睿, 李育. 基于柯本气候分类的 1961-2013 年我国气候区类型及变化. *干旱区地理(汉文版)*, 2015, 38(6): 1121-1132.]
- [21] Peel M C, Finlayson B L, McMahon T A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2007, 11(3): 1633-1644.
- [22] Kottek M, Grieser J, Beck C, et al. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2006, 15(3): 259-263.
- [23] Wang ZY, Li Y, Liu B, et al. Global climate internal variability in a 2000-year control simulation with Community Earth System Model (CESM). *Chinese Geographical Science*, 2015, 25(3): 263-273.
- [24] Lipscomb W H, Fyke J G, Vizcaino M, et al. Implementation and initial evaluation of the Glimmer Community Ice Sheet Model in the Community Earth System Model. *Journal of Climate*, 2013, 26(19): 7352-7371.
- [25] Bitz C M, Shell K M, Gent P R, et al. Climate sensitivity of the Community Climate System Model, Version 4. *Journal of Climate*, 2012, 25(9): 3053-3070.
- [26] Sanderson B M, Oleson K W, Strand W G, et al. A new ensemble of GCM simulations to assess avoided impacts in a climate mitigation scenario. *Climatic Change*, 2015, 146(3-4): 304-318.
- [27] Zhang Jingjing, Chen Shuang, Zhao Xinyi. Spatial divergency of temperature change during 1951-2000 in China and its correlation with global climate change. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 20(4): 1-6. [张晶晶, 陈爽, 赵昕奕. 近 50 年中国气温变化的区域差异及其与全球气候变化的联系. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(4): 1-6.]
- [28] Shi P J, Sun S, Wang M, et al. Climate change regionalization in China (1961-2010). *Science China (Earth Sciences)*, 2014, 57(11): 2676-2689.
- [29] Liu Xiaoyun, Li Dongliang, Wang Jingsong. Spatiotemporal characteristics of drought over China during 1961-2009. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(2): 473-483. [刘晓云, 李栋梁, 王劲松. 1961-2009 年中国区域干旱状况的时空变化特征. *中国沙漠*, 2012, 32(2): 473-483.]
- [30] Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, et al. Climate changes of China's mainland over the past half century. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(6): 942-956. [任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近 50 年中国地面气候变化基本特征. *气象学报*, 2005, 63(6): 942-956.]
- [31] Bian Juanjuan, Hao Zhixin, Zheng Jingyun, et al. The shift on boundary of climate regionalization in China from 1951 to 2010. *Geographical Research*, 2013, 32(7): 1179-1187. [卞娟娟, 郝志新, 郑景云, 等. 1951-2010 年中国主要气候区划界线的移动. *地理研究*, 2013, 32(7): 1179-1187.]
- [32] Yang Qiang, Zheng Xinan, He Liheng. Spatial-temporal shift for major boundary of climate regionalization based on meteorological data stimulated by HadCM3 during from 1950-2059 in China. *Arid Land Geography*, 2017, 40(1): 17-25. [杨强, 郑西楠, 何立恒. 基于 HadCM3 模式的我国主要气候区划界线时空预测研究. *干旱区地理(汉文版)*, 2017, 40(1): 17-25.]
- [33] Zhou Shuzhen, Zhang Ruyi, Zhang Chao. *Meteorology and Climatology*. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 1997. [周淑贞, 张如一, 张超. *气象学与气候学*. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 1997.]
- [34] Chatterjee S, Goswami A, Scotese C R. The longest voyage: Tectonic, magmatic, and paleoclimatic evolution of the Indian plate during its northward flight from Gondwana to Asia. *Gondwana Research*, 2013, 23(1): 238-267.
- [35] Molnar P, England P, Martinod J. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian Monsoon. *Reviews of Geophysics*, 1993, 31(31): 357-396.
- [36] Ye Duzheng. *Meteorology of the Qinghai-Tibet Plateau*. Beijing: Science Press, 1979. [叶笃正. *青藏高原气象学*. 北京: 科学出版社, 1979.]
- [37] Wang Chenghai, Li Jian, Li Xiaolan, et al. Analysis on quasi-periodic characteristics of precipitation in recent 50 years and trend in next 20 years in China. *Arid Zone Research*, 2012, 29(1): 1-10. [王澄海, 李健, 李小兰, 等. 近 50a 中国降水变化的准周期性特征及未来的变化趋势. *干旱区研究*, 2012, 29(1): 1-10.]
- [38] Wang Haijun, Zhang Bo, Zhao Chuanyan, et al. The spatio-temporal characteristics of temperature change in recent 57 years in northern China. *Progress in Geography*, 2009, 28(4): 643-650. [王海军, 张勃, 赵传燕, 等. 中国北方近 57 年气温时空变化特征. *地理科学进展*, 2009, 28(4): 643-650.]
- [39] Zeng S D, Xia J, Du H. Separating the effects of climate change and human activities on runoff over different time



- scales in the Zhang River basin. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 2014, 28(2): 401-413.
- [40] Li Y, Morrill C. Multiple factors causing Holocene lake-level change in monsoonal and arid central Asia as identified by model experiments. *Climate Dynamics*, 2010, 35(6): 1119-1132.
- [41] Wang Zun, Ding Yihui, He Jinhai. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(2): 228-236. [王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 近50年来中国气候变化特征的再分析. *气象学报*, 2004, 62(2): 228-236.]
- [42] Wang Ning, Xu Xiazhen, Wang Ying, et al. The influence of upper level jet streams in East Asia on climatic effects of Eurasian teleconnection pattern in the winter. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2017, 41(3): 461-474. [汪宁, 许遐祯, 王莹, 等. 东亚高空急流协同变化对冬季欧亚遥相关型气候效应的影响. *大气科学*, 2017, 41(3): 461-474.]
- [43] Ye Dan, Zhang Yaocun. Association of concurrent variation between the east Asian polar front and subtropical jets with winter cold air activity in China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 38(1): 146-158. [叶丹, 张耀存. 冬季东亚副热带急流和温带急流协同变化与我国冷空气活动的关系. *大气科学*, 2014, 38(1): 146-158.]
- [44] Zhu Yimin, Yang Xiuqun. Relationships between Pacific decadal oscillation (PDO) and climate variabilities in China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 61(6): 641-654. [朱益民, 杨修群. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的关系. *气象学报*, 2003, 61(6): 641-654.]

## A new definition method of climate-sensitive region and its prediction

LI Yichan, LI Yu, ZHU Gengrui

(College of Earth and Environmental Sciences, Center for Hydrologic Cycle and Water Resources  
in Arid Region, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract** The climate-sensitive region is an important direction of climate change research, however most previous studies paid more attention to research on single index, instead of that on comprehensive indicators. Based on the spatial distribution and temporal variation of climate types defined by the Köppen climate classification, this research presents a new definition method to classify the Chinese climate-sensitive regions, where climate types varied frequently. Here we selected Community Earth System Model (CESM) under the intermediate carbon emission scenario (RCP4.5) to simulate the change of climate types during 2006-2013, the 2040s and the 2090s, and predicted the variation of climate-sensitive regions in the next 30 to 80 years. The results indicate that the climate change sensitive regions were consistent with the precipitation sensitive regions. The most sensitive regions in China are located near the Heihe-Tengchong Line, the Qinling-Huaihe region, the western Qinghai-Tibet Plateau and the north of the Tianshan Mountains, while the most stable regions are distributed in the east-central Qinghai-Tibet Plateau, the Kunlun Mountains, the north of Qilian Mountains, the south of the Tianshan Mountains, the west of Helan Mountains and the Da Hinggan Mountains region. In the next 30 to 80 years, the climate change sensitive regions in the western part of China (the west of Helan Mountains and Hengduan Mountains) will be stable, while in the eastern they are shifting northward significantly. This study provides a new perspective for the research of climate change sensitivity and regional responses to climate change, and it is conducive to a timely and effective decision-making in tackling climate change.

**Keywords:** climate type; climate change; sensitive region; Köppen climate classification; prediction