

# 中国干湿格局对未来高排放情景下气候变化响应的敏感性

马丹阳<sup>1,2,3</sup>, 尹云鹤<sup>1</sup>, 吴绍洪<sup>1</sup>, 郑 度<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 河南省发展和改革委员会, 郑州 450018)

**摘要:** 气候变化影响下干湿状况的区域分异格局如何变化是一个重要科学问题。基于参与耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)的5个全球气候模式(GCM), 预估了RCP 8.5情景下未来百年中国干湿区面积的变化趋势, 分析了干湿格局变化的敏感地区以及对气候变化响应的敏感性。结果表明: 未来干湿格局变化以湿润区显著减少、干湿过渡区显著扩张为主要特征, 特别是半湿润区面积在远期(2070-2099年)相对基准期(1981-2010年)增加了28.69%。升温2℃~4℃条件下, 全国发生干湿类型转变的面积从10.17%增加至13.72%, 尤其在淮河流域南部, 这里主要受未来潜在蒸散增加的影响, 湿润区向南明显退缩从而转变为半湿润区。总体上, 随着未来升温加剧, 中国干湿格局对气候变化响应的敏感性将可能增强。

**关键词:** 干湿格局; 气候变化; 敏感性; 干湿指数; 中国

DOI: 10.11821/dlxb201905002

## 1 引言

气候变化背景下, 地域系统动态的研究成为地理学研究的前沿热点问题<sup>[1]</sup>。体现大尺度区域差异的气候区是气候要素综合作用的结果, 能够同时反映区域水热耦合状况<sup>[2]</sup>, 并与区域特定植被类型密切相关<sup>[3]</sup>。全球平均温度在1880-2012年期间升高了约0.85℃(0.65℃~1.06℃), 气候情景预估显示未来百年变暖仍将持续, 20世纪末至21世纪末升温幅度可能达到0.3℃~4.8℃<sup>[4]</sup>。气候变化加剧将对气候区产生一定影响, 甚至可能使之发生重要转变<sup>[5]</sup>。

过去几十年, 气候变化对全球<sup>[6-8]</sup>和区域<sup>[9-11]</sup>尺度的气候区空间分布影响越来越明显。基于观测数据的研究表明, 全球范围内的半干旱气候区发生了显著扩张<sup>[7]</sup>, 温带气候、大陆性气候和极地气候向极地方向移动<sup>[8]</sup>。20世纪下半叶, 中国干湿气候波动显著, 并呈现较大区域差异<sup>[12]</sup>, 北方干旱化趋势向东、向南扩展<sup>[13]</sup>, 半干旱与半湿润分界线也明显东移南进<sup>[14]</sup>。气候区动态是气候模式模拟效果的重要评价参考, 其常用的划分方法有柯本气候分类<sup>[15-16]</sup>、Thornthwaite<sup>[17]</sup>和K均值聚类等<sup>[18]</sup>。Belda等<sup>[19]</sup>研究认为, 耦合模式比较

收稿日期: 2018-01-15; 修订日期: 2018-11-25

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1502904); 国家自然科学基金项目(41571043); 国家自然科学基金重点项目(41530749) [Foundation: National Key Research and Development Program of China, No.2017YFC1502904; National Natural Science Foundation of China, No.41571043; Key Project of National Natural Science Foundation of China, No.41530749]

作者简介: 马丹阳(1990-), 女, 河南濮阳人, 博士生, 研究方向为自然地理综合研究。E-mail: mady.13s@igsnrr.ac.cn

通讯作者: 尹云鹤(1979-), 女, 山东德州人, 博士, 研究员, 主要从事综合自然地理、气候变化的影响与适应研究。

E-mail: yinyh@igsnrr.ac.cn

计划第五阶段 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP 5) 试验中的全球气候模式 (Global Climate Model, GCM) 需要提高对参考时段气候类型分布的模拟能力。

干旱风险与区域干湿变化是未来全球变暖的主要影响之一<sup>[20-22]</sup>, 变暖将可能对干湿状况及其区域分异格局产生重要影响<sup>[23]</sup>, 但是如何量化气候变化的影响仍然面临挑战。近期的研究形成了广泛共识, 未来温度和降水的变化将可能会引起全球陆表干湿格局发生较大变动<sup>[24-26]</sup>。根据Feng等<sup>[24]</sup>的研究, 现代气候类型将逐渐向更加暖干的类型转变, 干旱和半干旱气候显著扩张, 至2071-2100年其面积将增加8.4%~15.9%。预估表明21世纪, 非洲西部<sup>[27]</sup>、地中海区域<sup>[28-29]</sup>和中国<sup>[30-31]</sup>也将出现更多干旱或者半干旱的区域。随着温室气体排放加剧, 未来中国荒漠化生物气候类型区的面积将可能增加<sup>[32]</sup>, 高排放情景下, 东部热夏冬干型气候的分布范围将可能明显扩大<sup>[31]</sup>。赵天保等<sup>[33]</sup>的研究表明, 未来不同浓度路径下全球及其典型干旱半干旱区的气温变化均以显著增温为主, 降水变化则可能表现为“干愈干、湿愈湿”的基本特征。但是, 未来气候变化将在多大程度上影响中国的干湿格局动态仍然存在很大的不确定性。

基于以上考虑, 本文以气候观测数据和CMIP5 GCM气候情景数据为基础, 利用改进后的Penman-Monteith模型模拟潜在蒸散, 结合降水构造干湿指数划分干湿类型, 分析高排放情景下干湿因子的变化趋势及不同干湿类型面积变化, 揭示干湿格局对气候变化响应的敏感性和敏感地区。研究对深入理解陆地表层系统演变驱动机制、植物群落演替、土地荒漠化等具有重要意义, 可为气候变化适应策略的制定提供科学依据。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

**2.1.1 气象数据** 本文采用581个气象站点 (图1) 在1981-2010年期间的月观测值, 包括最高气温、最低气温、降水、相对湿度、日照时数和风速, 数据来自中国气象局国家气象中心。数据处理时, 对建站晚于1981年或者撤站早于2010年, 研究期内站点位置迁移或者5%以上数据缺失的站点予以删除, 对缺测数据在5%以下的站点用该站其他年份均值代替。站点气象数据基于薄盘样条函数插值成 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的格点数据。

**2.1.2 气候模式模拟** 为获取区域温度变化以及相应的干湿区时空变化, 本文采用跨领域影响模式比较计划 (Intersectoral Impact Model Intercomparison Project, ISI-MIP) <sup>[34-35]</sup> 提供的参与CMIP 5<sup>[36]</sup>的多模式数据集, 包括5个GCM (HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, GFDL-ESM2M, MIROC-ESM-CHEM和NorESM1-M) (表1)。模式输出资料经过统计降尺度处理, 空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。气候变化情景采用辐射强迫在2100年达 $8.5 \text{ W m}^{-2}$ 的典型浓度路径 (Representative Concentration Pathway 8.5, RCP 8.5)<sup>[37]</sup>, 该情景涵盖的温度变化范围较广, 适合用来评估未来气候变化影响<sup>[5, 38-39]</sup>。

模拟数据用于气候变化影响研究之前, 需要进行偏差校正, 以降低气候模式模拟与气候观测之间的差异<sup>[10, 40]</sup>。本文中, 模拟气候变量经调整后得到与基准时段 (1981-2010

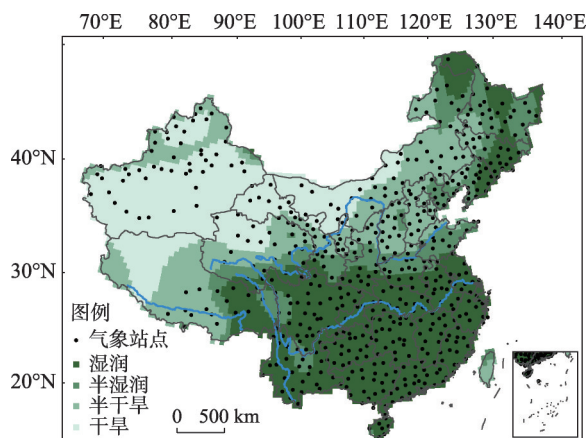


图1 581个气象站点及1981-2010年中国干湿区分布  
Fig. 1 Distribution of the 581 meteorological stations and the arid/humid climate regions in China during 1981-2010

表1 本文中用到的全球气候模式

Tab. 1 Global climate models used in this study

模式名称	原始空间分辨率(纬度×经度)	机构	国家
NorESM1-M	1.875°×2.5°	Norwegian Climate Centre	挪威
MIROC-ESM-CHEM	2.8°×2.8°	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	日本
IPSL-CM5A-LR	1.875°×3.75°	Institut Pierre-Simon Laplace	法国
HadGEM2-ES	1.25°×1.875°	Met Office Hadley Centre	英国
GFDL-ESM2M	2.0°×2.5°	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	美国

年) 相同的中国区域年平均值。具体而言, 通过计算基准时段观测数据与每套 GCM 数据之间的差值, 并加到 GCM 未来情景数据, 获得 2011-2099 年的校正后数据<sup>[41]</sup>。

本文分析了相对基准时段逐步升温条件下的 21 世纪干湿区转变。给定升温下的影响预估是有效的分析途径, 这与联合国气候变化框架公约 (UNFCCC) 分解减排目标的方法是一致的<sup>[42-45]</sup>。尽管全球温度阈值提供了有用信息, 但对承受和适应气候变化后果的人来说, 区域状况才是真正重要的<sup>[46]</sup>。因此, 采用 11 年低通滤波方法消除每个 GCM 的区域陆表温度距平序列年际波动, 进而确定中国地区达到不同升温水平的年份, 这些年份通常被看作是多年气候平均的中心点<sup>[40, 47]</sup>, 据此计算干湿区的转变。

本文还用到 5 个 GCM 的多模式集合平均, 假设这些模式各自独立, 并给予它们相等权重。多模式集合能够体现气候系统的共性, 并且给出此共性的可信度<sup>[36]</sup>。多模式平均方法对全球及区域气候的模拟效果通常优于单个模式<sup>[33, 48-49]</sup>。研究表明, 这 5 个 GCM 在中国区域的多模式集合平均模拟值与观测值较为一致, 能够重现基准时段的干湿变化<sup>[23]</sup>。

## 2.2 干湿区划分

近年来, 许多学者采用柯本气候分类法进行气候区划分<sup>[40, 50-51]</sup>, 该方法主要以温度和降水为依据。事实上, 大气水分供给和蒸发需求, 即降水 (Precipitation,  $P$ ) 和潜在蒸散 (Reference evapotranspiration,  $ET_0$ ) 之间复杂的相互作用对于预估干旱变化<sup>[22, 52-53]</sup>和干旱/半干旱区动态<sup>[54]</sup>非常重要。 $ET_0$ 和 $P$ 的比值通常定义为干湿指数 (Aridity index,  $AI$ )<sup>[55-56]</sup>, 干湿指数既是区域干湿状况表征的常用指标, 也是干湿区划分的有效标准。

$ET_0$ 反映了保持环境水分平衡的最大水分需求,  $P$ 反映了大范围的水分供给。由于大范围的 $ET_0$ 较难获取,  $ET_0$ 通常由模型模拟得到, 未来 $ET_0$ 的合理预估对于降低干湿格局动态评估的不确定性十分重要。目前, Penman-Monteith 模型是广泛用来模拟 $ET_0$ 的方法之一<sup>[57]</sup>, 该模型强调了辐射和空气动力学对 $ET_0$ 的重要作用, 因而对于气候变化背景下干湿区变化的预估更加合适<sup>[54, 58]</sup>。1998 年联合国粮农组织 (FAO) 推荐的改进的 Penman-Monteith 模型 (简称 FAO56-PM 模型) 在干旱和湿润条件下都具有较好的适用性<sup>[57]</sup>。模型中的辐射根据 Ångström 公式计算, 其准确性取决于具有区域限制性的经验系数。通过对 FAO56-PM 模型的太阳辐射进行校正, 该模型可以更好地表征中国地区的干湿状况<sup>[59]</sup>。因此, 本文采用经过辐射校正的 FAO56-PM 模型计算 $ET_0$ , 公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中:  $R_n$  为净辐射 ( $\text{MJ m}^{-2}$ );  $G$  为土壤热通量 ( $\text{MJ m}^{-2}$ );  $\gamma$  为干湿常数 ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $\Delta$  为饱和水汽压曲线斜率 ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $T$  是日平均温度 ( $^\circ\text{C}$ );  $U_2$  为 2 m 高处的风速 ( $\text{m s}^{-1}$ );

$e_s$  为平均饱和水汽压 (kPa);  $e_a$  为实际水汽压 (kPa)。

气候变化背景下,  $AI$  同温度和降水一样在生物气候方面具有重要意义<sup>[60]</sup>。通常在大尺度上可用  $AI$  把陆地表面分为 4 个类型<sup>[61]</sup>, 即湿润区、半湿润区、半干旱区和干旱区, 分别以典型的自然潜在植被类型为标志, 包括森林、森林草原(草甸)、草原和荒漠(表 2)。

### 2.3 干湿区转变对升温的敏感性评估

敏感性分析的主要思路是, 通过建立干湿类型转变面积与温度距平的二次曲线拟合方程, 以曲线斜率衡量干湿区转变对增温的敏感性。首先对逐格点 2011-2099 年的  $AI$  序列进行 11 年滑动平均, 以减少短期气候变率的影响, 提高结果稳健性<sup>[9]</sup>。然后在格点尺度上判断未来某年干湿类型与基准期相比是否发生变化, 逐年统计全国发生干湿类型转变的格点面积比例。根据未来每年相对基准期的全国平均温度距平, 利用二次函数对干湿类型转变面积和相应的温度距平进行拟合, 公式如 (2) 所示。拟合曲线的斜率(公式 (3)) 是干湿类型转变面积随温度距平变化的速率, 认为它反映了干湿类型转变对增温的敏感性, 速率大于 0, 敏感性为正, 速率小于 0, 敏感性为负, 敏感性本身也随温度变化。

$$y = ax^2 + bx + c \quad (2)$$

$$s = 2ax + b \quad (3)$$

式中:  $x$  是相对基准时段的区域平均温度距平;  $y$  是干湿类型转变随温度距平变化的面积;  $s$  是转变面积随温度距平变化的速率;  $a$ 、 $b$  和  $c$  是拟合方程参数。

## 3 结果分析

### 3.1 未来 $ET_0$ 、 $P$ 和 $AI$ 变化

RCP 8.5 情景下, 不同气候模式模拟的  $ET_0$ 、 $P$  和  $AI$  相对 1981-2010 年的变化分布如图 2~图 4 所示。总体上, 未来三者变化都表现为增加, 并且远期(2070-2099 年)比中期(2040-2069 年)增加幅度更大, 但是变化存在区域差异。从多模式平均的结果来看,  $ET_0$  基本全国都增加, 尤其东部地区增加更为明显, 东北和秦岭—淮河以南中期增加 10%~20%, 远期增加 20% 以上;  $P$  同  $ET_0$  一样基本全国都增加, 但空间格局差别很大, 北方尤其是青藏高原地区增加较多, 远期增加 30% 以上, 南方地区则增加较少, 通常在 10% 以下;  $AI$  变化的空间分布以东南部上升、西北部下降为主, 上升最多的是长江中下游和新疆西部, 远期上升幅度可达到 20%, 西北的下降幅度在中期和远期都可超过 10%, 华北和东北的变化范围一般在 -10%~10% 之间, 东北东部地区在远期升高 10% 以上。

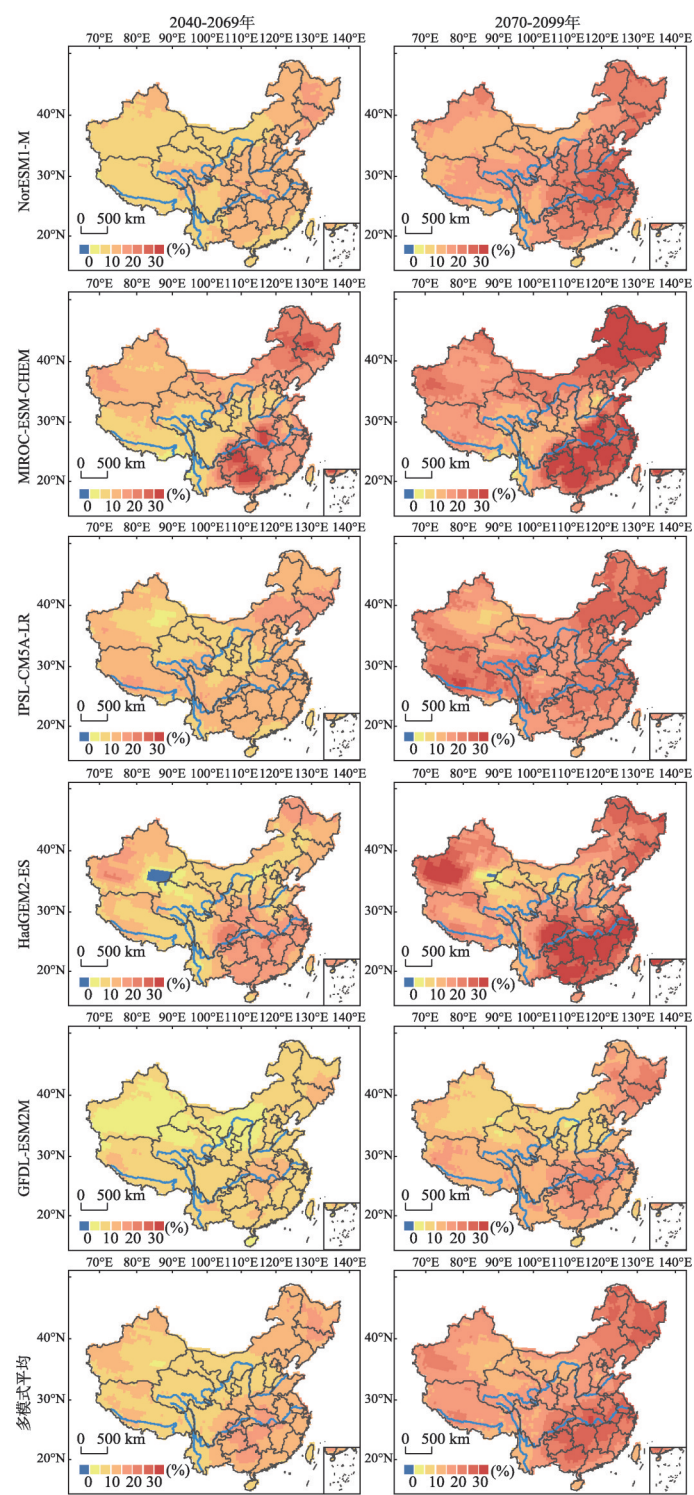
不同模式的要素变化存在一定差异。其中, IPSL-CM5A-LR 模拟的  $AI$  变化最为明显, 相对基准期的增幅最大, 几乎除了西藏和东北西部的  $AI$  呈降低以外, 其他所有地区  $AI$  都为增加, 远期增幅基本都超过 20%; HadGEM2-ES 模拟的  $AI$  增加最不明显, 仅体现在东南沿海和新疆西部, 而大部分北方地区都呈明显的降低, 并且降幅超过 10%。由于 IPSL-CM5A-LR 和 HadGEM2-ES 模拟的  $ET_0$  变化情况较为相似, 它们  $AI$  变化的原因主要在于  $P$  的变化。相对基准时段, IPSL-CM5A-LR 模拟的  $P$  变化在新疆和长江以南均为负值, 因而整体  $P$  增加最少, 导致  $AI$  升高最多; HadGEM2-ES 模拟的  $P$  变化基本全国皆为

表 2 中国干湿区的干湿指数划分标准<sup>[61]</sup>

Tab. 2 Criteria for demarcating arid/humid climate regions of China according to aridity index

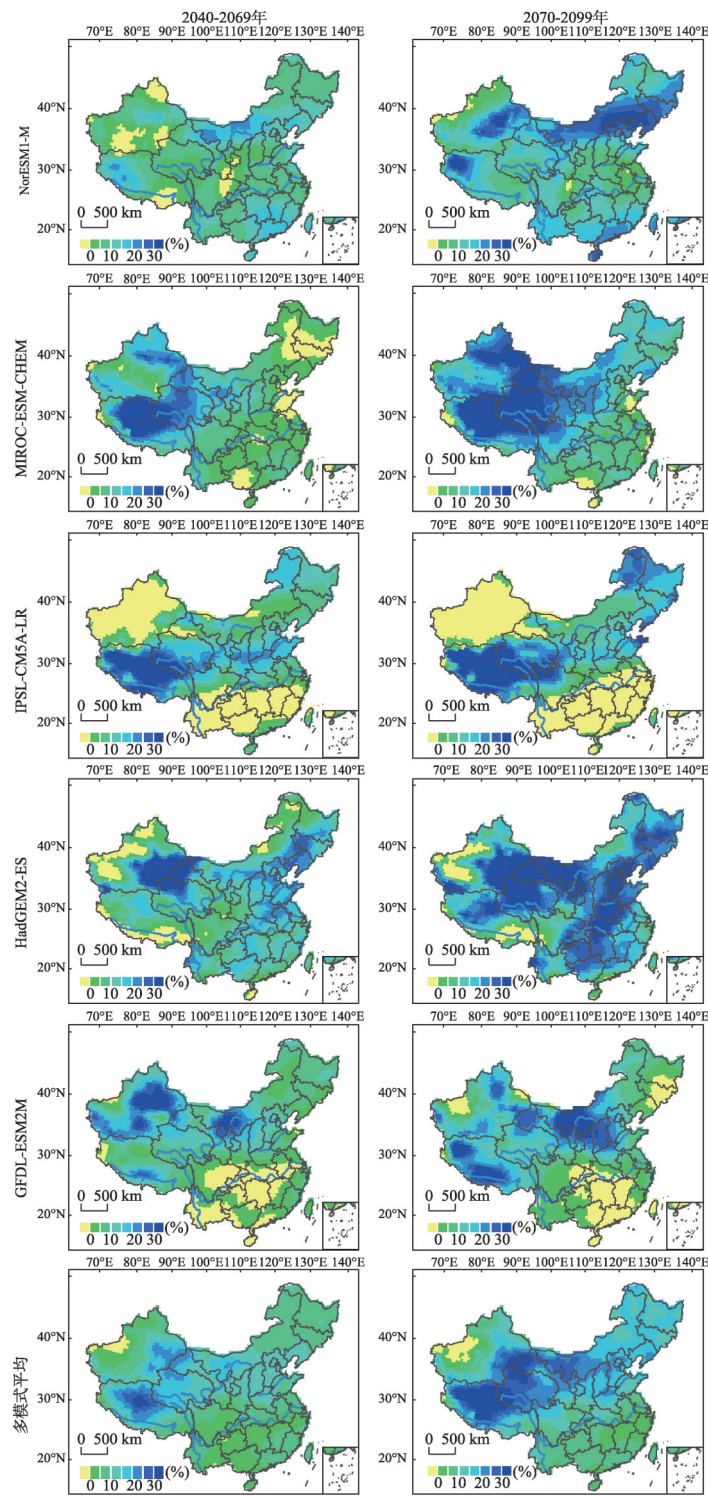
干湿区	干湿指数( $AI = ET_0/P$ )	自然潜在植被
湿润区	$AI < 1.0$	森林
半湿润区	$1.0 \leq AI < 1.5$	森林草原(草甸)
半干旱区	$1.5 \leq AI < 4.0$	草原(草甸草原, 荒漠草原)
干旱区	$AI \geq 4.0$	荒漠





注：变化程度以相对基准时段的百分偏差表示。

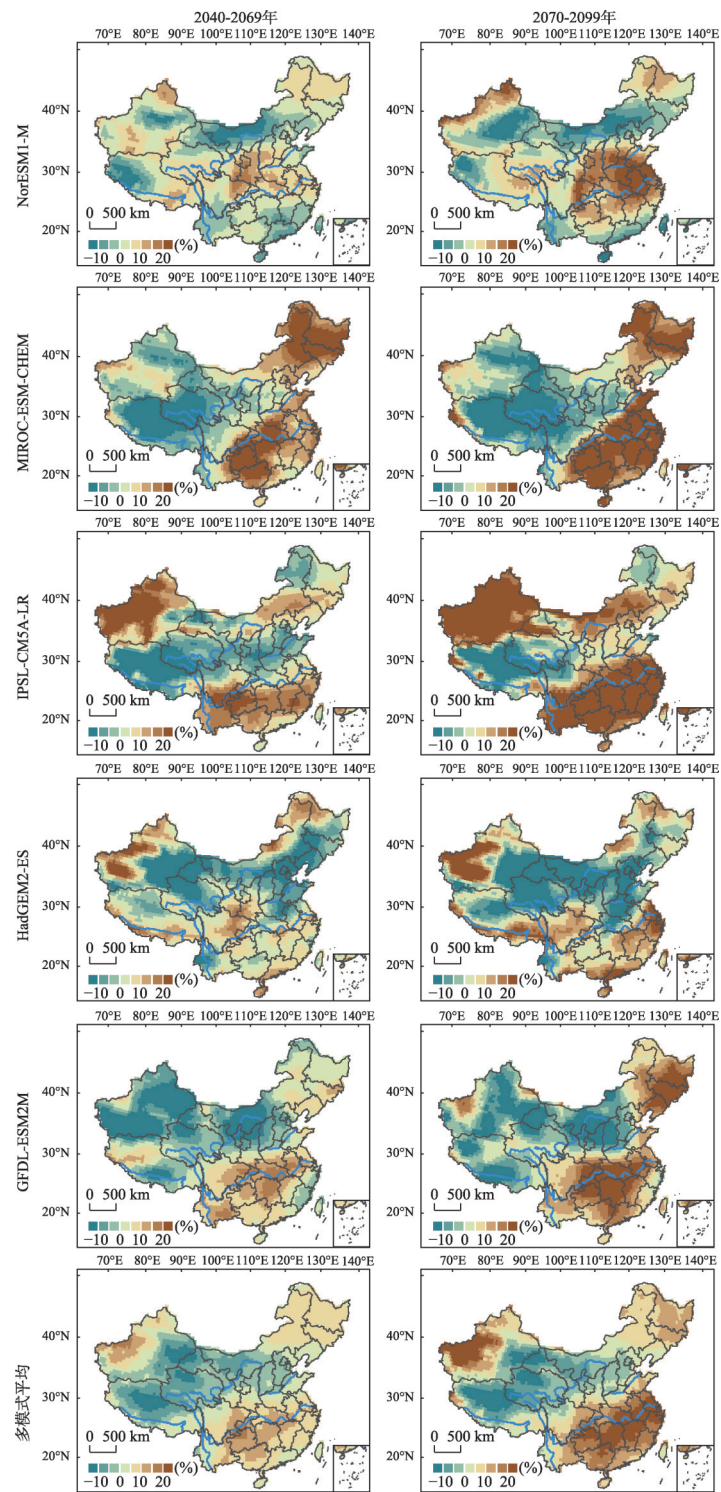
图2 RCP 8.5情景下2040-2069年和2070-2099年中国潜在蒸散相对基准时段的变化  
Fig. 2 Percentage deviations in reference evapotranspiration over China during 2040-2069 and 2070-2099 relative to the baseline period under RCP 8.5



注：变化程度以相对基准时段的百分偏差表示。

图3 RCP 8.5情景下2040-2069年和2070-2099年中国降水相对基准时段的变化

Fig. 3 Percentage deviations in precipitation over China during 2040-2069 and 2070-2099 relative to the baseline period under RCP 8.5



注：变化程度以相对基准时段的百分偏差表示。

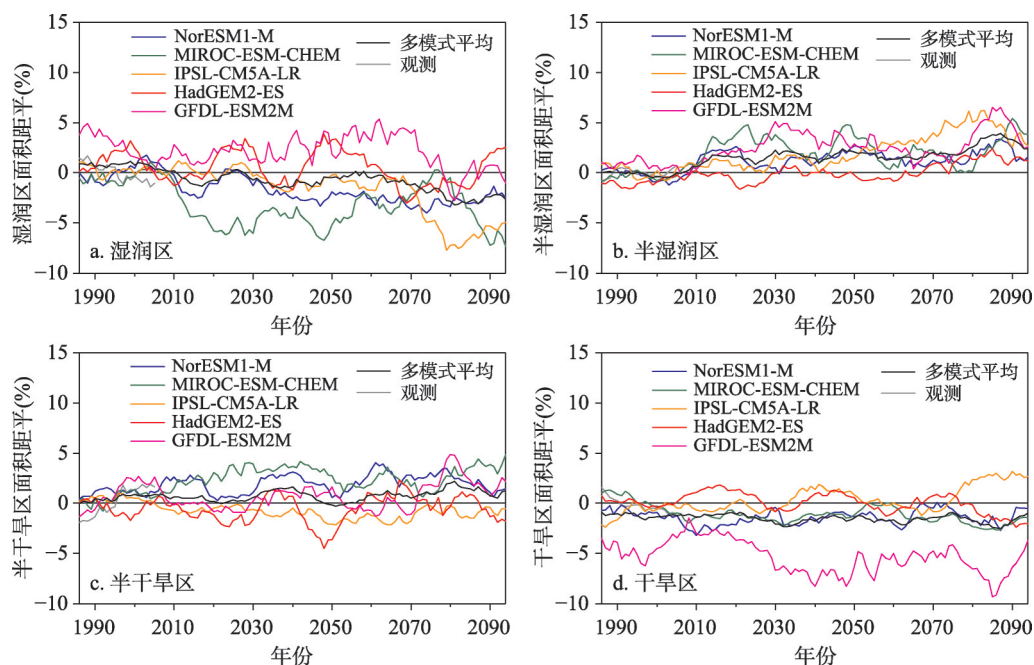
图4 RCP 8.5情景下2040-2069年和2070-2099年中国干湿指数相对基准时段的变化  
Fig. 4 Percentage deviations in aridity index over China during 2040-2069 and 2070-2099 relative to the baseline period under RCP 8.5



正值, 尤其远期大多数地区增加30%以上, 因而整体 $P$ 增加最多, 使得 $AI$ 变化最小。对于 $ET$ 和 $P$ , 远期的模式差异都比中期更大, 且远期 $P$ 的模式差异比 $ET$ 更大。

### 3.2 干湿区的时空变化

RCP 8.5 情景下, 未来中国各干湿区相对1981-2010年的面积距平变化如图5所示。就多模式平均而言, 2011-2099年湿润区面积占全国陆地面积的比例呈显著下降趋势, 速率为每年 $-0.030\%$  ( $p < 0.01$ ), 半湿润区和半干旱区面积上升显著, 上升速率分别为每年 $0.017\%$  ( $p < 0.05$ ) 和 $0.011\%$  ( $p < 0.05$ ), 干旱区面积变化不显著。与基准时段的观测结果相比, 湿润区和干旱区面积在2011-2099年期间平均减少了1.28%和1.53%, 半湿润区面积平均提高了1.98%, 半干旱区的面积距平较小, 平均仅为0.84%。5个气候模式对湿润区、半湿润区、半干旱区和干旱区面积的模拟差异, 以2011-2099年期间的平均标准差表征, 分别为5.14%、3.44%、3.74%和3.79%。



注: 面积距平以该区占全国陆地面积的百分比表示, 图中距平序列经过11年滑动平均处理。

图5 RCP 8.5情景下中国干湿区面积相对基准时段的距平变化

Fig. 5 Area percentages (%) of (a) humid, (b) sub-humid, (c) semi-arid and (d) arid regions in China during the 21st century as anomalies relative to the baseline period under RCP 8.5. The time series were smoothed using an 11-year running mean.

图6展示了RCP 8.5情景下未来中期和远期中国干湿区的空间分布, 统计结果如表3所示。相对基准时段, 湿润区和干旱区都可能出现收缩, 二者面积在2040-2069年分别减少了5.93%和1.95%, 湿润区收缩尤其明显, 其面积在2070-2099年减少了12.61%。与之相反, 半湿润区和半干旱区未来将会发生扩张, 它们的中期面积相对基准期分别增加了16.28%和1.38%, 特别是半湿润区的远期变化达到了它基准面积的28.69%。可见, 干旱区面积虽然在中期以下降为主, 但至远期有所回升, 对湿润区和半湿润区面积来说, 其在远期的变化幅度则远大于中期。

不同气候模式之间的中国干湿区分布具有一定的相似性 (图6)。其中, 干旱区主要分布在西北, 这里大部分地区未来可能由明显增加的降水引起干湿指数的显著下降 (图2~图4)。因此, 未来干旱区的收缩主要来自西北地区, 尤其是西藏西北部干旱面积的减



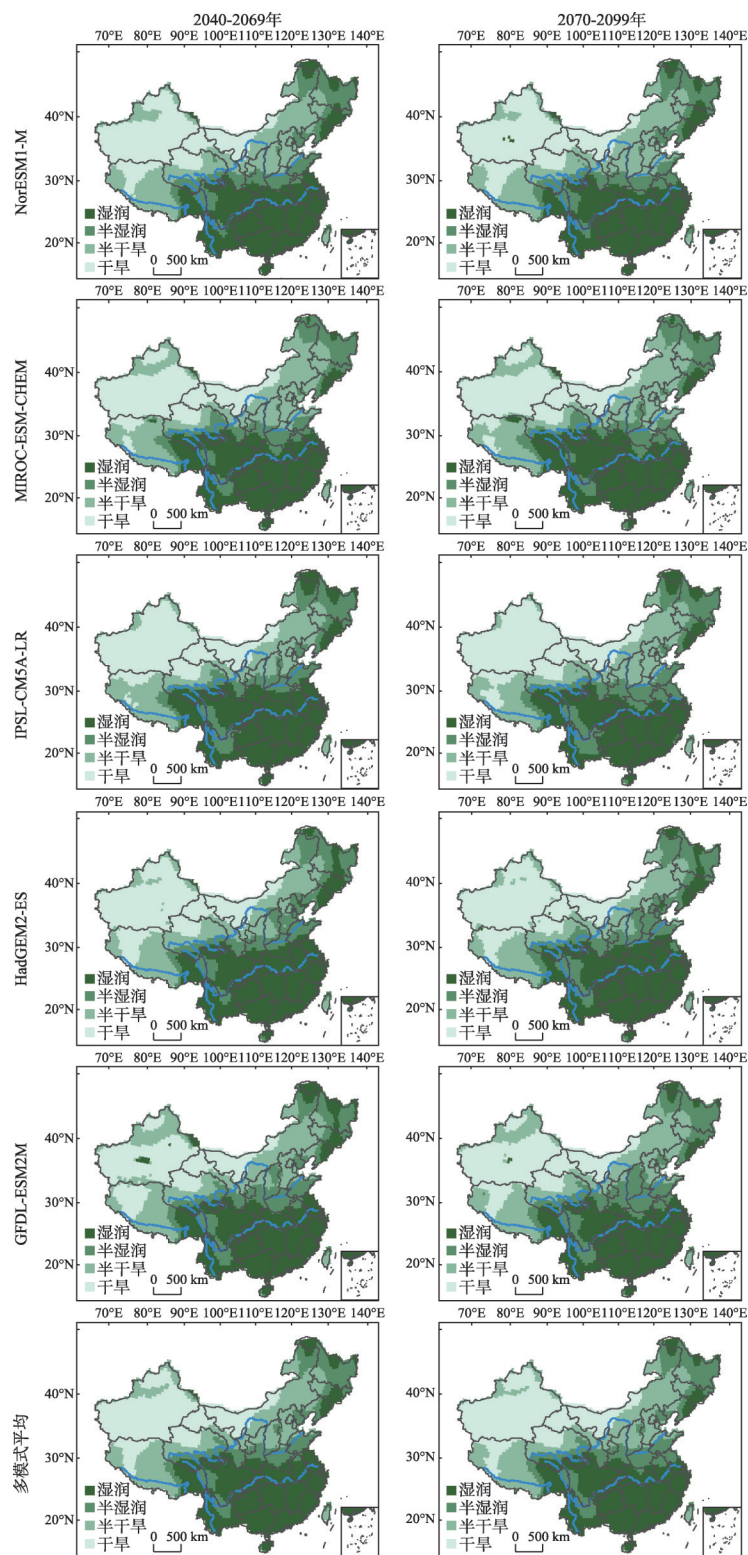


图6 RCP 8.5情景下2040-2069年和2070-2099年中国干湿区的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of arid/humid climate regions in China during 2040-2069 and 2070-2099 under RCP 8.5

表3 RCP 8.5情景下2040-2069年和2070-2099年中国干湿区的面积及其相对基准时段的变化(%)  
Tab. 3 Area percentages (%) of arid/humid climate regions in China during 2040-2069 and 2070-2099 under RCP 8.5, and percentages of area changed (%) relative to the baseline period

GCMs	时段	湿润区		半湿润区		半干旱区		干旱区	
		面积	变化	面积	变化	面积	变化	面积	变化
NorESM1-M	1981-2010	35.76		13.94		24.61		25.69	
	2040-2069	32.78	-8.33	15.27	9.54	26.65	8.29	25.29	-1.56
	2070-2099	31.47	-12	16.26	16.64	26.04	5.81	26.23	2.1
MIROC-ESM-CHEM	2040-2069	32.13	-10.15	16.24	16.5	27.62	12.23	24.01	-6.54
	2070-2099	32.75	-8.42	17.02	22.09	26.8	8.9	23.43	-8.8
IPSL-CM5A-LR	2040-2069	35.37	-1.09	16.35	17.29	22.33	-9.26	25.95	1.01
	2070-2099	30.18	-15.6	18.87	35.37	23.14	-5.97	27.81	8.25
HadGEM2-ES	2040-2069	34.45	-3.66	17.15	23.03	21.67	-11.95	26.74	4.09
	2070-2099	33.97	-5.01	18.71	34.22	21.54	-12.47	25.78	0.35
GFDL-ESM2M	2040-2069	34.15	-4.5	17.14	22.96	26.15	6.26	22.56	-12.18
	2070-2099	30.26	-15.38	20.03	43.69	26.13	6.18	23.57	-8.25
多模式平均	2040-2069	33.64	-5.93	16.21	16.28	24.95	1.38	25.19	-1.95
	2070-2099	31.25	-12.61	17.94	28.69	24.98	1.5	25.83	0.54

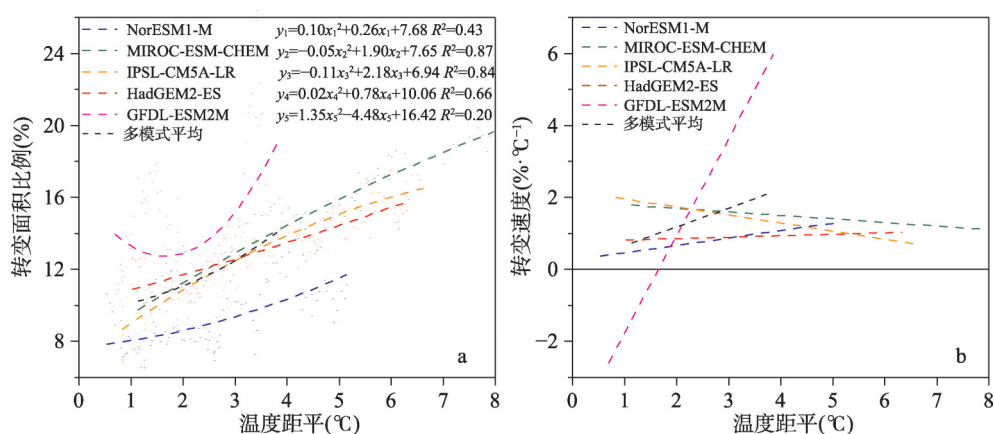
少促使干旱区南界向北移动(图1、图6)。另一方面,新疆北部的部分半干旱区有可能被干旱区代替,这使得干旱区整体上也倾向于北移。半干旱区和半湿润区的界线则在青藏高原东部向北移动,同时在东北地区和华北平原东部向东南方向移动,随着内蒙古半干旱区的东移,东北地区的半干旱范围呈现扩增。

东部大多数地区未来可能由潜在蒸散增加导致干湿指数显著上升(图2~图4),因而东北和南方地区的湿润面积与基准期分布相比将会缩减(图1、图6)。整体上,湿润区可能向南移动,该移动主要表现在淮河流域,这里的湿润区范围退缩明显,取而代之的是半湿润区,半湿润区和湿润区的界线将会更加偏南。此外,在东北地区的大兴安岭、小兴安岭和长白山等地以及西南部分地区,湿润区也将转变为半湿润区。各气候模式对湿润、半湿润面积的未来增减变化模拟较为一致,对半干旱、干旱面积变化的模拟结果则存在差异,其中NorESM1-M、MIROC-ESM-CHEM和GFDL-ESM2M显示相对基准期半干旱区以缩减为主、干旱区以增加为主,其余两个模式则相反(图6)。

3.3 干湿区转变对升温的敏感性

利用2011-2099年的11年滑动平均 $AI$ ,计算RCP 8.5情景下未来干湿类型与基准期相比发生转变的面积比例,图7a是对转变面积和温度距平进行拟合的二次曲线,图7b是相应的变化速率,表征干湿区转变对增温的敏感性。可以看出,各模式拟合的转变面积均随温度距平增加而上升,其中GFDL-ESM2M以 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右为界,表现出明显的先下降后上升。多模式平均的结果显示,在共同的温度距平范围,即 $1.14\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 3.87\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,拟合转变面积占全国陆地面积的比例由 $10.24\pm 1.89\%$ 增加至 $14.19\pm 3.30\%$ 。

除了GFDL-ESM2M的变化速率由负变正,其他模式的转变速率始终表现为正值。其中,MIROC-ESM-CHEM和IPSL-CM5A-LR的转变速率随温度升高而逐渐变慢,说明干湿区转变对增温的敏感性有所减弱;NorESM1-M和HadGEM2-ES的转变速率随温度升高而逐渐加快,说明干湿区转变对增温的敏感性呈现增强。就多模式平均而言,增温幅度越大,干湿区转变的敏感性越高。整体上,转变速率的范围从 $0.73(\pm 1.34)\%\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 增加至 $2.16(\pm 2.16)\%\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ,平均每升温 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,干湿区转变面积增加 $1.44\%$ 。



注: 图a散点表示随温度变化的转变面积, 虚线是二次拟合曲线。

图7 RCP 8.5情景下中国干湿区相对基准时段的转变面积与速率

Fig. 7 Percentage of area affected by arid/humid climate region shifts in China and its rate changing with temperature anomaly relative to the baseline period under RCP 8.5

### 3.4 2 °C和4 °C升温下的干湿区转变

图8和图9分别展示了相对1981-2010年, RCP 8.5情景下不同气候模式升温2 °C和4 °C时各干湿区所有变化过和保持不变的区域。从多模式平均的统计结果(表4)来看, 升温2 °C和4 °C时, 湿润区的变化均以收缩为主, 收缩面积分别占全国的3.56%和4.66%, 占其本身基准期的9.95%和13.03%; 半湿润区则扩张明显, 扩张区域分别占全国面积的4.62%和7.01%, 相当于基准期的33.15%和50.29%; 半干旱区同样以扩张为主, 扩张面积分别占全国3.32%和4.10%, 相比基准期扩张了13.49%和16.65%; 干旱区扩张和收缩的面积都较小。从升温2 °C到升温4 °C, 除了干旱区扩张面积有轻微减少之外, 其他所有扩张和缩减区域的面积都呈现增加, 多模式平均的全国总变化面积从10.17%增加至13.72%, 增幅为3.55%。

空间上, 湿润区的收缩区和半湿润区的扩张区主要分布于淮河流域和东北地区, 西南的部分地区也有少许分布, 半干旱的扩张区则主要见于中国东部地区半湿润—半干旱交界地带, 以及西部地区干旱—半干旱交界地带。模式间差异在湿润区的收缩区和半湿润区的扩张区比较大, 升温2 °C时标准差分别为1.83%和2.08%, 升温4 °C时标准差分别为1.20%和1.10%。干旱区的面积变化模式间差异最小。

从不同模式来看, MIROC-ESM-CHEM的湿润区收缩和半湿润区扩张的范围最广, 其全国总变化面积也是模式之中最高, 达到13.29% (2 °C) 和15.42 (4 °C); GFDL-ESM2M的全国总变化面积虽然是模式之中最低, 为8.55% (2 °C) 和11.78 (4 °C), 但从2 °C升温到4 °C后, 其湿润区收缩和半湿润区扩张的范围明显增加; NorESM1-M的全国总变化面积在2 °C~4 °C之间增幅最大, 达到4.87%, 主要表现在淮河流域的湿润转变为半湿润, 以及黄土高原和华北平原的半湿润转变为半干旱。

## 4 讨论

本文以干湿指数作为干湿区划分指标, 分析了未来变暖背景下中国干湿格局变化, 结果表明RCP 8.5情景下21世纪中国干湿区面积变化以湿润区显著减少、干湿过渡区显著增加为主要特征。这与Wang等<sup>[62]</sup>的研究结论较为一致, 他们发现未来东亚气候过渡带



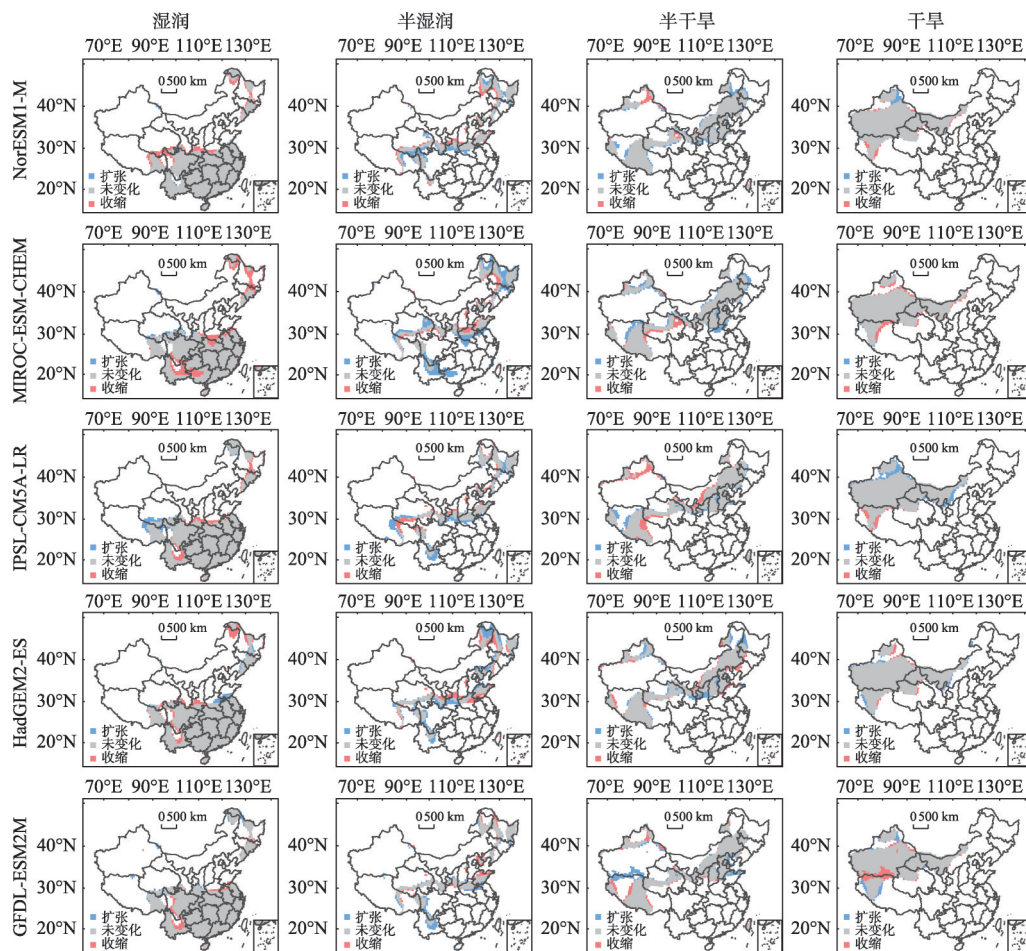


图8 RCP 8.5情景下相对基准时段升温2℃时中国干湿区转变的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of changed and unchanged areas in humid, sub-humid, semi-arid and arid regions over China for a warming level of 2°C relative to the baseline period under RCP 8.5

的边界将分别向东南和西北方向移动,并且过渡带南界的移动速度比北界快。基于柯本分类体系的研究<sup>[50]</sup>显示,21世纪末中国东南部亚热带湿润气候与20世纪末相比呈现大幅收缩,特别是在较高排放情景RCP 6.0和RCP 8.5下。以土壤湿度为干湿区划指标的研究<sup>[30]</sup>也反映了未来中国湿润区面积显著收缩,以及北方地区半干旱、半湿润气候带东移南扩的特征。全球尺度的研究表明,21世纪末旱地面积将在RCP 4.5和RCP 8.5情景下分别达到全球陆地面积的50%和56%,其中半干旱区对旱地扩张贡献最大<sup>[54]</sup>。相比较而言,本文中的半干旱区扩张程度则小于半湿润区,这可能与干湿指数划分不同干湿区时的指标范围有关,Huang等<sup>[54]</sup>研究对半干旱区的定义( $AI = P/ET_0$ ,  $0.2 \leq AI < 0.5$ )涵盖范围更广。

干湿区边界或面积变化与区域干湿趋势密切相关,受到自然因素和人类活动的共同影响。有学者基于观测和模式模拟<sup>[20, 63]</sup>认为,大气环流和海表温度变化是陆地降水变化的关键驱动力,降水减少是过去许多热带和亚热带地区干旱加剧的主要原因。但是随着全球变暖的持续,温度变化可能对21世纪的气候类型变动起到越来越重要的作用<sup>[24]</sup>。温度升高将引起水汽压差增大和蒸发需求增加以及土壤水分下降,从而与干旱过程相互强



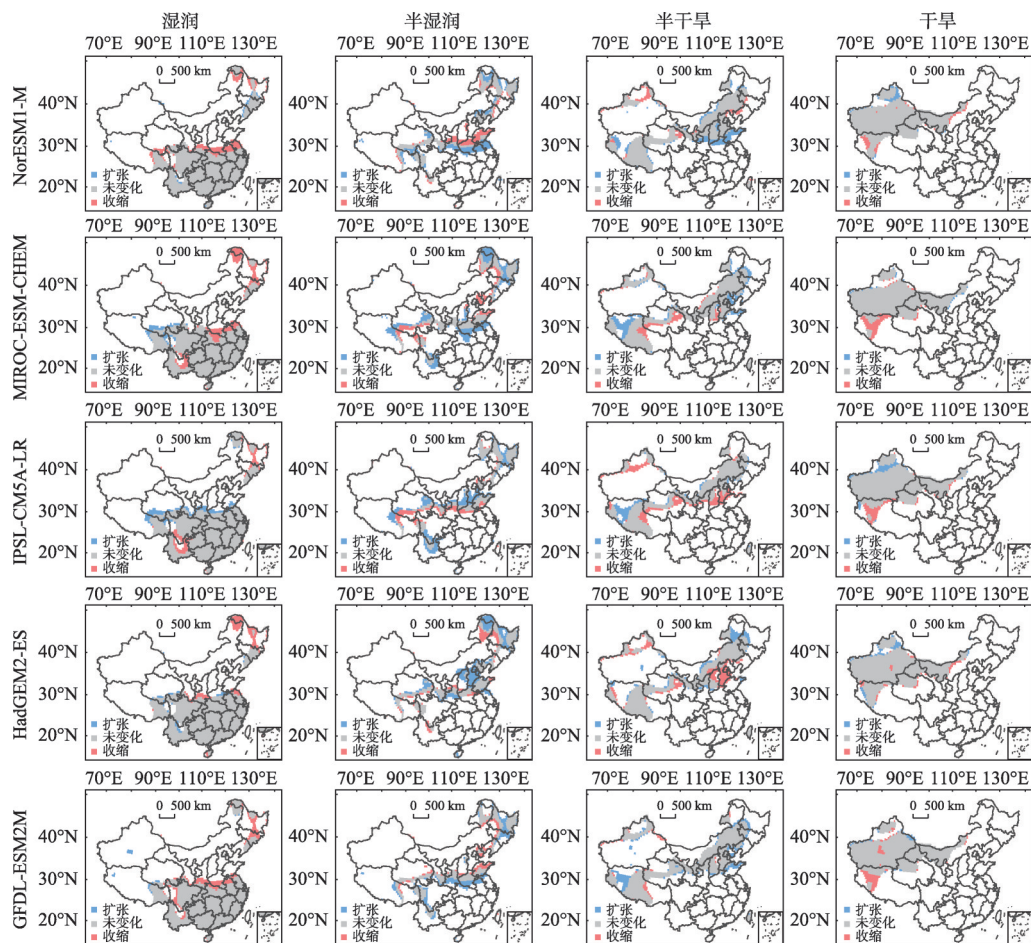


图9 RCP 8.5情景下相对基准时段升温4℃时中国干湿区转变的空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of changed and unchanged areas in humid, sub-humid, semi-arid and arid regions over China for a warming level of 4°C relative to the baseline period under RCP 8.5

化<sup>[54, 58]</sup>, 进而改变区域干湿格局。此外, 气候变化或者人类活动导致的植被覆盖变化也可能反过来对干旱趋势或者干湿状况产生影响。Zeng等<sup>[64]</sup>利用大气—海洋—陆地耦合模型并考虑动态植被组成, 发现增温效应叠加植被—反照率反馈作用可能会加剧未来亚热带半干旱地区的荒漠扩张。本文中由于气候变暖情景下大气水分需求增加超过了降水增加的幅度, 未来东部大部分湿润区的干旱化倾向可能影响了中国干湿格局演变, 这与Wang等<sup>[65]</sup>基于帕尔默干旱指数 (Palmer drought severity index, PDSI) 的分析基本一致。

本文通过考察中国干湿格局对未来气候变化响应的敏感性, 发现多模式平均的干湿区转变面积随区域平均温度上升而增加, 并且升温幅度越大干湿区转变速率越快。在全球尺度上也有研究发现, RCP 8.5情景下全球柯本分类的气候区变动速率随温度上升而加快, 21世纪末的速率大约是20世纪初的2倍<sup>[5]</sup>, 未来百年将有近1/3的温带旱地转变成亚热带旱地, 同时可能伴随植被变迁和生态系统服务转移<sup>[66]</sup>。本文还指出, 中国干湿区交界处通常是干湿类型转变的显著区域。中国从西南延伸至东北的干湿气候过渡地带, 受东亚夏季风和西风的相互作用影响<sup>[67]</sup>, 具有明显的气候梯度和生物群区分异<sup>[68]</sup>, 农牧活动交错, 生态环境脆弱, 对气候变化和人类活动的敏感程度都比较高<sup>[69]</sup>, 随着全球变

表4 RCP 8.5情景下相对基准时段升温2℃和4℃时中国干湿区转变的面积  
Tab. 4 Percentages of changed area (%) in humid, sub-humid, semi-arid and arid regions over China  
at warming levels of 2℃ and 4℃ relative to the baseline period under RCP8.5

GCMs		2℃				4℃			
		湿润	半湿润	半干旱	干旱	湿润	半湿润	半干旱	干旱
NorESM1-M	扩张区	0.47	3.61	3.26	0.73	0.72	6.28	4.84	1.10
	收缩区	3.23	2.54	1.19	1.09	5.05	4.07	2.38	1.44
	总变化	8.06				12.93			
MIROC-ESM-CHEM	扩张区	0.87	8.05	4.24	0.13	1.64	8.33	4.92	0.54
	收缩区	6.61	2.84	1.68	2.17	6.15	4.06	2.64	2.57
	总变化	13.29				15.42			
IPSL-CM5A-LR	扩张区	1.59	3.75	2.25	2.55	3.17	7.00	2.63	1.61
	收缩区	2.50	2.89	3.85	0.90	2.95	3.63	5.74	2.10
	总变化	10.13				14.41			
HadGEM2-ES	扩张区	1.23	4.97	3.35	1.24	1.22	7.81	3.41	1.58
	收缩区	3.57	3.68	2.69	0.86	4.08	3.33	5.32	1.30
	总变化	10.79				14.03			
GFDL-ESM2M	扩张区	1.12	2.72	3.50	1.21	0.58	5.62	4.70	0.88
	收缩区	1.87	2.04	2.00	2.64	5.08	3.05	1.34	2.32
	总变化	8.55				11.78			
多模式平均	扩张区	1.06	4.62	3.32	1.17	1.47	7.01	4.10	1.14
	收缩区	3.56	2.80	2.28	1.53	4.66	3.63	3.48	1.94
	总变化	10.17				13.72			

暖趋势加剧，可能遭受更为严重的自然灾害，土地退化和荒漠化风险也可能进一步增加<sup>[54, 62]</sup>。姜江等<sup>[70]</sup>研究发现，半湿润区和半干旱区在RCP 4.5情景下同样对气候变化具有较高敏感性，未来中国气候敏感区域将进一步扩大，湿润区将向半湿润区转变。

气候模式对于准确模拟气候类型的地理分布及其位置、面积等的变动至关重要<sup>[18]</sup>，模式不确定性是气候预估不确定性的来源之一，模式之间预估结果的差异随时间、空间以及升温水平变化而不同<sup>[5, 47, 71]</sup>。Mahlstein等<sup>[5]</sup>的研究指出RCP 8.5情景下21世纪末全球将有约20%的陆地区域经历柯本气候区变动，不同模式的结果在17%~27%范围内变化，并且模式差异随全球平均温度上升而增加。Belda等<sup>[71]</sup>对未来气候类型面积变化的研究显示多模式模拟的差异在沙漠气候类型最小，北方气候和苔原气候最大，并且RCP 8.5情景下的模式差异要大于RCP 4.5情景。Chen等<sup>[47]</sup>的研究发现对于中国地区极端气温指数和极端降水指数的模拟来说，其不确定性随时间推移而增加，并且接近本世纪末时，情景不确定性的贡献将超过气候模式的不确定性。以往中国地区未来干湿变化的研究<sup>[23]</sup>显示，相比于温度、降水和潜在蒸散等要素，干湿指数变化的波动性较强、趋势性较弱，但模式之间的差异相对较小。本文基于校正后的干湿指数，发现相对其他3个干湿区，湿润区面积变化的模式差异稍大一些。

5 结论

本文结合气候观测数据和CMIP5 GCM预估数据，基于改进后的Penman-Monteith模型模拟潜在蒸散并构造干湿指数，通过分析未来中国干湿区的面积变化及其对增温的敏

感性,揭示了不同升温水平下的干湿区空间格局变化。主要结论包括:

整体上,RCP 8.5情景下未来 $ET_0$ 、 $P$ 和 $AI$ 相对1981-2010时段都呈现增加, $ET_0$ 增加程度东高西低, $P$ 增加程度北高南低, $AI$ 呈现东南增、西北减的格局。远期(2070-2099年)比中期(2040-2069年)各要素的变化程度更大,潜在蒸散整体上比降水的变化程度更大。不同模式之间的要素变化存在差异。

未来21世纪湿润区面积显著下降,半湿润区和半干旱区面积显著上升;与基准期观测值相比,半湿润区面积变化最大,平均每年增加全国陆地面积的1.98%,远期较基准期扩张了28.69%。空间上,中国东部地区湿润程度降低,淮河流域的湿润—半湿润界线南移,东北和华北的半湿润—半干旱界线向东南移动;西部地区干旱程度减轻,干旱—半干旱界线略向北移。

RCP 8.5情景下,多模式平均的干湿类型转变面积随温度上升而持续增加。对多数GCM来说,随着温度距平增加,未来干湿区的转变面积对温度变化的敏感性逐渐提高。总体上,未来湿润区的变化以收缩为主,半湿润区和半干旱区的变化以扩张为主。升温 $2\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,全国总变化面积从10.17%增加至13.72%。气候变化影响下,淮河流域南部潜在蒸散的增加超过降水增量,因而可能出现湿润区向半湿润区的转变。

## 参考文献(References)

- [1] Zheng Du, Wu Shaohong, Yin Yunhe et al. Frontiers in terrestrial system research in China under global change. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(9): 1475-1483. [郑度, 吴绍洪, 尹云鹤, 等. 全球变化背景下中国自然地域系统研究前沿. *地理学报*, 2016, 71(9): 1475-1483.]
- [2] Grundstein A. Assessing climate change in the contiguous United States using a modified Thornthwaite climate classification scheme. *Professional Geographer*, 2008, 60(3): 398-412.
- [3] Bailey R G. *Ecosystem Geography: From Ecoregions to Sites*. 2nd ed. New York: Springer, 2009.
- [4] IPCC. Summary for Policymakers. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [5] Mahlstein I, Daniel J S, Solomon S. Pace of shifts in climate regions increases with global temperature. *Nature Climate Change*, 2013, 3(8): 739-743.
- [6] Reid P C, Hari R E, Beaugrand G, et al. Global impacts of the 1980s regime shift. *Global Change Biology*, 2016, 22(2): 682-703.
- [7] Huang J P, Ji M X, Xie Y K, et al. Global semi-arid climate change over last 60 years. *Climate Dynamics*, 2016, 46(3-4): 1131-1150.
- [8] Chan D, Wu Q. Significant anthropogenic-induced changes of climate classes since 1950. *Scientific Reports*, 2015, 5: 13487.
- [9] Gerstengarbe F W, Werner P C. A short update on Koeppen climate shifts in Europe between 1901 and 2003. *Climatic Change*, 2009, 92(1/2): 99-107.
- [10] Feng S, Ho C-H, Hu Q, et al. Evaluating observed and projected future climate changes for the Arctic using the Köppen-Trewartha climate classification. *Climate Dynamics*, 2012, 38(7/8): 1359-1373.
- [11] 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*, 2015, 38(6): 1121-1132.]
- [12] Yang Jianping, Ding Yongjian, Chen Rensheng, et al. The interdecadal fluctuation of dry and wet climate boundaries in China in recent 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(6): 655-661. [杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等. 近50年来中国干湿气候界线的10年际波动. *地理学报*, 2002, 57(6): 655-661.]
- [13] Ma Zhuguo, Fu Congbin. Decadal variations of arid and semi-arid boundary in China. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(3): 519-525. [马柱国, 符淙斌. 中国干旱和半干旱带的10年际演变特征. *地球物理学报*, 2005, 48(3): 519-525.]
- [14] Zheng Jingyun, Bian Juanjuan, Ge Quansheng, et al. The climate regionalization in China for 1981-2010. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(30): 3088-3099. [郑景云, 卞娟娟, 葛全胜, 等. 1981-2010年中国气候区划. *科学通报*,

- 2013, 58(30): 3088-3099.]
- [15] Lohmann U, Sausen R, Bengtsson L, et al. The Köppen climate classification as a diagnostic tool for general circulation models. *Climate Research*, 1993, 3(3): 177-193.
- [16] Gnanadesikan A, Stouffer R J. Diagnosing atmosphere-ocean general circulation model errors relevant to the terrestrial biosphere using the Köppen climate classification. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(22): 2832-2849.
- [17] Elguindi N, Grundstein A, Bernardes S, et al. Assessment of CMIP5 global model simulations and climate change projections for the 21st century using a modified Thornthwaite climate classification. *Climatic Change*, 2014, 122(4): 523-538.
- [18] Zhang X L, Yan X D. Deficiencies in the simulation of the geographic distribution of climate types by global climate models. *Climate Dynamics*, 2016, 46(9/10): 2749-2757.
- [19] Belda M, Holtanova E, Halenka T, et al. Evaluation of CMIP5 present climate simulations using the Köppen-Trewartha climate classification. *Climate Research*, 2015, 64(3): 201-212.
- [20] Dai A G. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 52-58.
- [21] Trenberth K E, Dai A G, van der Schrier G, et al. Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 2014, 4(1): 17-22.
- [22] Greve P, Seneviratne S I. Assessment of future changes in water availability and aridity. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(13): 5493-5499.
- [23] Yin Y H, Ma D Y, Wu S H, et al. Projections of aridity and its regional variability over China in the mid-21st century. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(14): 4387-4398.
- [24] Feng S, Hu Q, Huang W, et al. Projected climate regime shift under future global warming from multi-model, multi-scenario CMIP5 simulations. *Global and Planetary Change*, 2014, 112: 41-52.
- [25] Hanf F, Korper J, Spanghel T, et al. Shifts of climate zones in multi-model climate change experiments using the Köppen climate classification. *Meteorologische Zeitschrift*, 2012, 21(2): 111-123.
- [26] Rohli R V, Joyner T A, Reynolds S J, et al. Globally extended Köppen-Geiger climate classification and temporal shifts in terrestrial climatic types. *Physical Geography*, 2015, 36(2): 142-157.
- [27] Sylla M B, Elguindi N, Giorgi F, et al. Projected robust shift of climate zones over West Africa in response to anthropogenic climate change for the late 21st century. *Climatic Change*, 2016, 134(1/2): 241-253.
- [28] Alessandri A, De Felice M, Zeng N, et al. Robust assessment of the expansion and retreat of Mediterranean climate in the 21st century. *Scientific Reports*, 2014, 4: 7211.
- [29] Gao X J, Giorgi F. Increased aridity in the Mediterranean region under greenhouse gas forcing estimated from high resolution simulations with a regional climate model. *Global and Planetary Change*, 2008, 62(3/4): 195-209.
- [30] Li Mingxing, Ma Zhuguo. Soil moisture-based study of the variability of dry-wet climate and climate zones in China. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(28/29): 2740-2754. [李明星, 马柱国. 中国气候干湿变化及气候带边界演变: 以集成土壤湿度为指标. *科学通报*, 2012, 57(28/29): 2740-2754.]
- [31] Cheng Zhigang, Zhang Yuanmeng, Xu Ying. Projection of climate zone shifts in the 21st century in China based on CMIP5 models data. *Advances in Climate Change Research*, 2015, 11(2): 93-101. [程志刚, 张渊萌, 徐影. 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.]
- [32] Ci Longjun, Yang Xiaohui, Chen Zhongxin. The potential impacts of climate change scenarios on desertification in China. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2): 287-294. [慈龙骏, 杨晓晖, 陈仲新. 未来气候变化对中国荒漠化的潜在影响. *地学前缘*, 2002, 9(2): 287-294.]
- [33] Zhao Tianbao, Chen Liang, Ma Zhuguo. Simulation of historical and projected climate change in arid and semiarid areas by CMIP5 models. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(12): 1148-1163. [赵天保, 陈亮, 马柱国. CMIP5 多模式对全球典型干旱半干旱区气候变化的模拟与预估. *科学通报*, 2014, 59(12): 1148-1163.]
- [34] Hempel S, Frieler K, Warszawski L, et al. A trend-preserving bias correction: The ISI-MIP approach. *Earth System Dynamics*, 2013, 4(2): 219-236.
- [35] Warszawski L, Frieler K, Huber V, et al. The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP): Project framework. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States America*, 2013, 111(9): 3228-3232.
- [36] Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(4): 485-498.
- [37] Moss R H, Edmonds J A, Hibbard K A, et al. The next generation of scenarios for climate change research and



- assessment. *Nature*, 2010, 463(7282): 747-756.
- [38] Piontek F, Müller C, Pugh T A, et al. Multisectoral climate impact hotspots in a warming world. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(9): 3233-3238.
- [39] Leng G, Tang Q, Rayburg S. Climate change impacts on meteorological, agricultural and hydrological droughts in China. *Global and Planetary Change*, 2015, 126: 23-34.
- [40] Engelbrecht C J, Engelbrecht F A. Shifts in Köppen-Geiger climate zones over southern Africa in relation to key global temperature goals. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 123(1/2): 247-261.
- [41] Yin Y H, Wu S H, Zhao D S. Past and future spatiotemporal changes in evapotranspiration and effective moisture on the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2013, 118(19): 10850-10860.
- [42] Schleussner C F, Lissner T K, Fischer E M, et al. Differential climate impacts for policy-relevant limits to global warming: The case of 1.5 °C and 2 °C. *Earth System Dynamics*, 2016, 7(2): 327-351.
- [43] Vautard R, Gobiet A, Sobolowski S, et al. The European climate under a 2 °C global warming. *Environmental Research Letters*, 2014, 9: 034006.
- [44] Roudier P, Andersson J C M, Donnelly C, et al. Projections of future floods and hydrological droughts in Europe under a +2 °C global warming. *Climatic Change*, 2016, 135(2): 341-355.
- [45] Swain S, Hayhoe K. CMIP5 projected changes in spring and summer drought and wet conditions over North America. *Climate Dynamics*, 2015, 44(9): 2737-2750.
- [46] Joshi M, Hawkins E, Sutton R, et al. Projections of when temperature change will exceed 2 °C above pre-industrial levels. *Nature Climate Change*, 2011, 1(8): 407-412.
- [47] Chen H P, Sun J Q. Changes in climate extreme events in China associated with warming. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(10): 2735-2751.
- [48] Pierce D W, Barnett T P, Santer B D, et al. Selecting global climate models for regional climate change studies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(21): 8441-8446.
- [49] Knutti R, Furrer R, Tebaldi C, et al. Challenges in combining projections from multiple climate models. *Journal of Climate*, 2010, 23(10): 2739-2758.
- [50] Chan D, Wu Q G, Jiang G X, et al. Projected shifts in Köppen climate zones over China and their temporal evolution in CMIP5 multi-model simulations. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2016, 33(3): 283-293.
- [51] Crosbie R S, Pollock D W, Mpelasoka F S, et al. Changes in Köppen-Geiger climate types under a future climate for Australia: Hydrological implications. *Hydrology Earth System Sciences*, 2012, 16(9): 3341-3349.
- [52] Cook B I, Smerdon J E, Seager R, et al. Global warming and 21st century drying. *Climate Dynamics*, 2014, 43(9): 2607-2627.
- [53] Mcevoy D J, Huntington J L, Mejia J F, et al. Improved seasonal drought forecasts using reference evapotranspiration anomalies. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(1): 377-385.
- [54] Huang J, Yu H, Guan X, et al. Accelerated dryland expansion under climate change. *Nature Climate Change*, 2016, 6(2): 166-171.
- [55] Budyko M I. *Climate and Life*. New York: Academic Press, 1974.
- [56] Wu S H, Yin Y H, Zheng D, et al. Moisture conditions and climate trends in China during the period 1971-2000. *International Journal of Climatology*, 2006, 26(2): 193-206.
- [57] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: United Nations Food and Agriculture Organization, 1998.
- [58] Sherwood S, Fu Q. A drier future? *Science*, 2014, 343(6172): 737-739.
- [59] Yin Y H, Wu S H, Zheng D, et al. Radiation calibration of FAO56 Penman-Monteith model to estimate reference crop evapotranspiration in China. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(1): 77-84.
- [60] Moral F J, Paniagua L L, Rebollo F J, et al. Spatial analysis of the annual and seasonal aridity trends in Extremadura, southwestern Spain. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016: 1-16.
- [61] Wu S, Yin Y, Zheng D, et al. Aridity/humidity status of land surface in China during the last three decades. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(9): 1510-1518.
- [62] Wang L, Chen W, Huang G, et al. Changes of the transitional climate zone in East Asia: Past and future. *Climate Dynamics*, 2017, 49: 1463-1477.
- [63] Fu R. Global warming-accelerated drying in the tropics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(12): 3593-3594.

- [64] Zeng N, Yoon J. Expansion of the world's deserts due to vegetation- albedo feedback under global warming. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L17401.
- [65] Wang L, Chen W. A CMIP5 multimodel projection of future temperature, precipitation, and climatological drought in China. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(6): 2059-2078.
- [66] Schlaepfer D R, Bradford J B, Lauenroth W K, et al. Climate change reduces extent of temperate drylands and intensifies drought in deep soils. *Nature Communications*, 2017, 8: 14196.
- [67] Qian W, Ding T, Hu H, et al. An overview of dry-wet climate variability among monsoon-westerly regions and the monsoon northernmost marginal active zone in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26(4): 630-641.
- [68] Fu C. *Transitional Climate Zones and Biome Boundaries: A Case Study from China*. New York, NY: Springer, 1992.
- [69] Shi Zhengtao. Regional characters of natural disaster in marginal monsoon belt of China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1996, 10(4): 1-7. [史正涛. 中国季风边缘自然灾害的区域特征. 干旱区资源与环境, 1996, 10(4): 1-7.]
- [70] Jiang Jiang, Jiang Dabang, Lin Yihua. Changes and projection of dry/wet areas over China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2017, 41(1): 43-56. [姜江, 姜大膀, 林一骅. 中国干湿区变化与预估. 大气科学, 2017, 41(1): 43-56.]
- [71] Belda M, Holtanová E, Kalvová J, et al. Global warming induced changes of climate zones based on CMIP5 projections. *Climate Research*, 2016, 71(1): 17-31.

## Sensitivity of arid/humid patterns in China to future climate change under high emission scenario

MA Danyang<sup>1,2,3</sup>, YIN Yunhe<sup>1</sup>, WU Shaohong<sup>1</sup>, ZHENG Du<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Henan Province Development and Reform Commission, Zhengzhou 450018, China)

**Abstract:** Changes in the regional differentiation patterns of moisture conditions under the impact of climate change are an important scientific question. Based on the five global climate models (GCMs) participating in the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5), this paper projected the trend in the area of arid/humid climate regions in China for the next hundred years, and analysed the sensitive regions of arid/humid patterns change and its sensitivity of responses to climate change. Results show that the future arid/humid patterns change would be characterized by a significant decrease in the humid region and a significant expansion in the arid/humid transition zones. In particular, the area of sub-humid region would increase by 28.69% in the long term (2070-2099) relative to the baseline period (1981-2010). Under 2 °C and 4 °C warming, the area of shifts between arid/humid climate regions was projected to increase from 10.17% to 13.72%. Particularly in the south of the Huaihe River basin, which was mainly affected by the future increase in reference evapotranspiration, the humid region would retreat southward and shift to the sub-humid region. In general, the sensitivity of responses of arid/humid patterns to climate change in China would intensify with the acceleration of global warming.

**Keywords:** arid/humid patterns; climate change; sensitivity; aridity index; China