

姜江, 姜大膀, 林一骅. 2017. 中国干湿区变化与预估 [J]. 大气科学, 41 (1): 43–56. Jiang Jiang, Jiang Dabang, Lin Yihua. 2017. Changes and projection of dry/wet areas over China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (1): 43–56, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1604.15223.

中国干湿区变化与预估

姜江^{1,2,4} 姜大膀^{1,3} 林一骅²

1 中国科学院大气物理研究所竺可桢—南森国际研究中心, 北京 100029

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

3 中国科学院气候变化研究中心, 北京 100029

4 北京市气象服务中心, 北京 100089

摘 要 本文采用干湿指数对 1962~2011 年中国干湿区范围变化进行了集中分析, 并利用 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) 模式对其变化趋势开展了预估研究。结果表明, 1962~2011 年平均极端干旱区、干旱区、半干旱区、半湿润区和湿润区分别占中国陆地总面积的 2.8%、11.7%、22.4%、32.6%和 30.5%。期间, 中国区域年干湿指数总体上呈现下降趋势, 空间上表现为西部湿润化和东部干旱化的特征。显著缩小的是湿润区和极端干旱区, 半湿润区、半干旱区和干旱区则显著扩大, 这表明中国气候敏感区域在扩张。春季和秋季干湿指数变化趋势的空间分布与年平均的较为一致, 冬季西北呈干旱化, 夏季东南部地区为湿润化。相对于参考时段 1986~2005 年, 在 RCP4.5 (Representative Concentration Pathway 4.5) 情景下 18 个气候模式中位数的预估结果中, 降水仅在东南南部减少, 而潜在蒸散发在全区域增加, 由于潜在蒸散发的增量超过了降水的增幅, 中国区域将整体趋于干旱化, 仅在西北地区呈湿润化特征; 未来湿润区、干旱区和极端干旱区缩小, 气候敏感性高的半湿润区和半干旱区仍将扩大。

关键词 干湿指数 CMIP5 模式 RCP4.5 情景 预估

文章编号 1006-9895(2017)01-0043-14

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1604.15223

Changes and Projection of Dry/Wet Areas over China

JIANG Jiang^{1,2,4}, JIANG Dabang^{1,3}, and LIN Yihua²

1 Nansen–Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Climate Change Research Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

4 Beijing Weather Service Center, Beijing 100089

Abstract Based on the dry/wet index, the authors analyzed changes in dry/wet regions over China and projected their future change scenarios using CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) models. For the period of 1962–2011, the results show that the averages of extreme arid, arid, semi-arid, semi-humid, and humid regions account for 2.8%, 11.7%, 22.4%, 32.6%, and 30.5% of the land area of the country, respectively. The dry/wet index decreases overall and tends to become wet in the west and dry in the east. There is a significant contraction of humid and extreme

收稿日期 2015-07-05; **网络预出版日期** 2016-04-19

作者简介 姜江, 女, 1987 年出生, 博士, 主要从事气候变化研究。E-mail: jiangjiang@mail.iap.ac.cn

通讯作者 姜大膀, E-mail: jiangdb@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41375084、41421004

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41375084 and 41421004)

arid regions but a significant expansion of semi-humid, semi-arid, and arid regions, indicating an increase in the climatically sensitive regions. The distribution of the change trend of dry/wet index during the spring and autumn resembles that of the annual mean, and the northwest tends to become dry during the winter while the southeast is becoming wet during the summer. Under the RCP4.5 (Representative Concentration Pathway 4.5) scenario, the median of the 18 CMIP5 models shows that, relative to the period of 1986–2005, annual precipitation would decrease only in the southeast, and the potential evapotranspiration would increase over the entire country, leading to dry/wet index decreases in most regions except the western part. The humid, arid, and extreme arid regions would reduce, while the opposite is true for the semi-arid and semi-humid regions.

Keywords Dry/wet index, CMIP5 model, RCP4.5 scenario, Projection

1 引言

工业化革命以来全球持续变暖, 1880~2012 年全球平均温度升高了 0.85°C ($0.65\sim 1.06^{\circ}\text{C}$) (IPCC, 2013)。与此同时, 全球水循环加快, 干旱等极端天气和气候事件发生频率增加, 大部分陆地表现出干旱化的趋势 (Dai, 2013)。尤其是在 1970~2002 年, 全球极端干旱区面积扩大了两倍以上 (Dai et al., 2004), 且观测与模式结果均显示干旱地区变得更加干旱 (Solomon et al., 2007; Overpeck and Udall, 2010)。

鉴于区域尺度上的干旱对自然生态系统和人类活动有重要影响, 干旱研究一直以来备受重视 (严华生等, 2004; 符淙斌等, 2005; 马柱国, 2005; Zou et al., 2005; 马柱国和符淙斌, 2006; Wang et al., 2011)。就中国区域而言, 先前的学者采用帕尔默干旱指数 (卫捷等, 2003; Zou et al., 2005; 刘珂和姜大膀, 2014)、标准化降水蒸散发指数 (石崇和刘晓东, 2012; 刘珂和姜大膀, 2015a)、地表湿润指数 (马柱国等, 2005) 和模式土壤湿度 (Wang et al., 2011; Wu et al., 2011) 开展了一系列研究工作, 结果均指出自 1950 年代以来中国总体上存在变干趋势, 区域上突出表现在西北、华北和东北地区。

需要指出的是, 以往研究主要集中在干旱化程度和干湿边界波动上, 较少关注不同干湿区的变化情况。干湿指数 (或称之为湿润指数或湿润度) 作为分析干湿区变化的指数之一, 它以水分收支为基础, 能够较合理地描述不同干湿区特征, 已被广泛应用于全球干湿区分布和变化的研究中 (Feng and Fu, 2013; Fu and Feng, 2014)。目前, 针对中国区域, 基于该指数开展的研究工作更侧重在东北、华北等区域尺度上的干湿变化 (马柱国和符淙斌, 2001; 王菱等, 2004; 王亚平等, 2008; 郑红星和刘静, 2011), 尚需对中国全域进行系统性的分析。另外,

在计算该指数所需要的潜在蒸散发这一变量时, 常用的是桑斯威特方法 (马柱国和符淙斌, 2001; 马柱国等, 2005), 而根据不同潜在蒸散发算法的比较研究结果表明彭曼公式在中国区域的适用性更优 (刘晓英等, 2006; 申双和等, 2009; 刘珂和姜大膀, 2015a), 因而有必要在干湿指数的研究中择优选取彭曼公式作为潜在蒸散发的计算方法。

在当前全球变暖的背景下, 干湿区域变化已成为气候预估的重要主题之一。例如, 有研究指出未来全球热带和中纬度陆地随着气候变暖将持续干旱化, 干旱化面积在 RCP8.5 情景下的 21 世纪末期将比当前增加 10% (Feng and Fu, 2013)。因此, 除了过去几十年干湿区域值得深入研究以外, 干湿区变化预估同样值得关注。鉴于上述认识, 本文利用干湿指数对 1962~2011 年中国干湿区范围及其变化特征进行了分析, 同时采用最新的 CMIP5 模式数据对 RCP4.5 情景下的干湿区域变化开展了预估研究。

2 方法和资料

2.1 干湿指数

干湿指数定义为: $I_{\text{DW}}=P/P_{\text{ET}}$, 其中, I_{DW} 为干湿指数 (Dry/Wet Index), P 为年降水量 (单位: mm), P_{ET} 为年潜在蒸散发量 (单位: mm)。需要指出的是, 在计算潜在蒸散发时, 桑斯威特方法对蒸发的极端情况反应并不敏感, 过程中只考虑了空气温度, 并不足以解释蒸发量, 且对于温度低于 0°C 时的蒸发停止作用的假设也与实际情况不符 (慈龙骏和吴波, 1997); 彭曼公式是根据假想的参考作物面改进后的模型, 假想面类似于同一高度、生长旺盛、完全覆盖地面、水分充足的广阔绿色植被, 同时综合了空气动力学的湍流传输与能量平衡, 考虑了植被的生理特征, 在干旱和湿润条件下准确性都相对较高 (Allen et al., 1998)。因此相比较而言,

1998 年联合国粮农组织推荐的彭曼公式计算得到的潜在蒸散发与观测之间的吻合度更优（刘晓英等，2006）。本文采用了彭曼公式：

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

其中，前项为辐射项，后项为动力项。式中， R_n 为净辐射（单位： MJ m^{-2} ）， G 为土壤热通量（单位： MJ m^{-2} ）， γ 为干湿常数（单位： $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ）， Δ 为饱和和水汽压曲线斜率（单位： $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ）， T 为平均温度（单位： $^\circ\text{C}$ ）， U_2 为 2 m 处的风速（单位： m s^{-1} ）， e_s 为平均饱和水汽压（单位： kPa ）， e_a 为实际水汽压（单位： kPa ）（由 e_s 和相对湿度计算得出）。考虑到用平均温度代替最高和最低温度会造成偏低估计 e_s 的值，相应的饱和水汽压与实际水汽压的差减少，导致潜在蒸散发的减少，因此本文中的平均温度为最高和最低温度的平均值。

以往研究对于干湿指数划分标准有所差异，毛飞等（2011）在综述了众多干湿气候区划分工作之后，根据国内外的研究成果，并结合中国气候特点，将干湿指数小于 0.05 的地区为极端干旱区，0.05~0.20 的为干旱区，0.20~0.50 的为半干旱区，0.50~1.00 的为半湿润区，1.00~1.50 的为湿润区，1.50~2.00 的为潮湿区，大于 2.00 的为过湿区。为便于阐述，本文将大于 1.00 的统称为湿润区。

在分析潜在蒸散发变化的原因时，本文采用了

敏感性分析方法。该方法假定参与计算的其他变量不变，分析单个变量的改变对潜在蒸散发的作用，其中，敏感性高的变量被视为影响潜在蒸散发的主要因素。潜在蒸散发对各个变量的敏感性由偏导数表示，并对各个变量的敏感性进行无量纲化处理，计算出相对敏感系数 S （McCuen, 1974），公式如下：

$$S = \frac{\partial P_{ET}}{\partial X} \cdot \frac{|X|}{P_{ET}}, \quad (2)$$

式中， X 为变量。

2.2 观测和模式资料

模式资料包括所有满足潜在蒸散发计算要求的 18 个 CMIP5 模式的历史气候模拟试验（即 Historical 试验）中的逐月数据。评估时段和未来预估的参考时段均为 1986~2005 年。对于 CMIP5 的未来情景预估试验，采用了根据辐射强迫而设定的典型浓度路径情景中的中低端 RCP4.5 情景（即到 2100 年，温室气体浓度增加所引起的辐射强迫为 4.5 W m^{-2} ）下的模拟结果，积分时段为 2006~2100 年。有关模式的具体信息请见表 1，模式数据和相关信息详细参见 Taylor et al.（2012）和 PCMDI 网站（<http://pcmdi9.llnl.gov> [2015-01-05]）。

使用到的观测资料为 1961~2012 年基于 2416 个中国地面气象台站资料插值所得的 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 高分辨率降水数据（简称 CN05.1）（吴佳和高学杰，2013），以及 NCEP/NCAR（美国国家环境预测中心

表 1 CMIP5 中 18 个模式及其试验信息

Table 1 Information of the 18 CMIP5 models and corresponding experiments

序号	模式名称	国家	分辨率（经向格点数×纬向格点数）	历史气候模拟试验时段	RCP4.5 试验时段
01	CESM1-CAM5	美国	128×192	1850~2005 年	2006~2100 年
02	CNRM-CM5	法国	256×128	1850~2005 年	2006~2100 年
03	GFDL-CM3	美国	144×90	1860~2005 年	2006~2100 年
04	GFDL-ESM2G	美国	144×90	1861~2005 年	2006~2100 年
05	GFDL-ESM2M	美国	144×90	1861~2005 年	2006~2100 年
06	GISS-E2-H	美国	144×90	1850~2005 年	2006~2100 年
07	GISS-E2-H-CC	美国	144×90	1850~2010 年	2006~2100 年
08	GISS-E2-R	美国	144×90	1850~2005 年	2006~2100 年
09	GISS-E2-R-CC	美国	144×90	1850~2010 年	2006~2100 年
10	HadGEM2-CC	英国	192×145	1859~2005 年	2006~2100 年
11	HadGEM2-ES	英国	192×145	1859~2005 年	2006~2100 年
12	INMCM4	俄罗斯	180×120	1850~2005 年	2006~2100 年
13	IPSL-CM5A-LR	法国	96×96	1850~2005 年	2006~2100 年
14	IPSL-CM5A-MR	法国	144×143	1850~2005 年	2006~2100 年
15	IPSL-CM5B-LR	法国	96×96	1850~2005 年	2006~2100 年
16	MIROC5	日本	256×128	1850~2012 年	2006~2100 年
17	MIROC-ESM	日本	128×64	1850~2005 年	2006~2100 年
18	MIROC-ESM-CHEM	日本	128×64	1850~2005 年	2006~2100 年

/大气研究中心)再分析资料中的风场、相对湿度、表面气压的逐月数据。为了保证较长的研究时段,同时考虑到冬季为12月、次年1月、2月的计算方法,本文选取的观测数据时段为1962~2011年。

3 结果

3.1 中国干湿区范围

如图1所示,中国极端干旱区和干旱区主要集中在西北,半干旱区和半湿润区大致呈东北—西南走向,包含东北中西部、华北、西北南部、新疆北部和青藏高原大部。除新疆北部以外,半干旱区和半湿润区范围与中国季风边缘带分布具有空间一致性(姜江等,2015)。湿润区主要覆盖了江淮、华南、西南和东北北部及东南部分区域。1962~2011年平均极端干旱区、干旱区、半干旱区、半湿润区和湿润区分别占中国陆地总面积的2.8%、11.7%、22.4%、32.6%和30.5%。

根据干湿分级标准,1962~2011年中国湿润区和极端干旱区面积显著缩小,趋势分别为 $-1.12 \times 10^4 \text{ km}^2 (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $-0.30 \times 10^4 \text{ km}^2 (10 \text{ a})^{-1}$,而半湿润区和半干旱区显著扩张,趋势分别为 $0.72 \times 10^4 \text{ km}^2 (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $0.65 \times 10^4 \text{ km}^2 (10 \text{ a})^{-1}$,干旱区则表现为波动性的不显著扩大 $[0.05 \times 10^4 \text{ km}^2 (10 \text{ a})^{-1}]$ 。换言之,极端干旱和湿润区在收缩,而其余等级分

区的范围在加大,特别是半湿润和半干旱区表现为明显的扩张(图2)。以往的干旱研究也曾指出,近些年来中国半干旱区干旱化在加剧,而干旱区的干旱化则有所缓解(李新周等,2004)。另外,在空间上半干旱和半湿润区范围的增加主要表现为向 35°N 以南和东北地区伸展的特点,这与前期多种干湿指数的分析结论一致,即华北南部自1950年代以后干旱化有明显的南扩,而东北中部半干旱分界线有明显的东扩(马柱国和符淙斌,2005)。考虑到干旱和半干旱区生态系统的脆弱性,且其对气候变化较其他区域更为敏感(黄建平等,2013),中国半干旱和半湿润区的扩大表明各类生态系统的敏感性高的区域正在扩张。

3.2 干湿指数变化趋势

1962~2011年中国表现出持续干旱化的特征。在整个区域内,年降水呈现不显著的增加,但由于潜在蒸散发的显著增加,最终导致了干湿指数呈现的显著下降趋势 $[-0.01 (10 \text{ a})^{-1}]$ 。前期研究中也指出,气候变暖所导致的潜在蒸散发增加是干旱化趋势加强的一个不可忽视的原因(马柱国和符淙斌,2007; Briffa et al., 2009; Dai, 2013)。

在变化趋势的空间分布上,1962~2011年中国降水增加最显著的区域为西部和东南部,而干湿过渡带大部降水减少,特别是西南地区(图3)。潜在

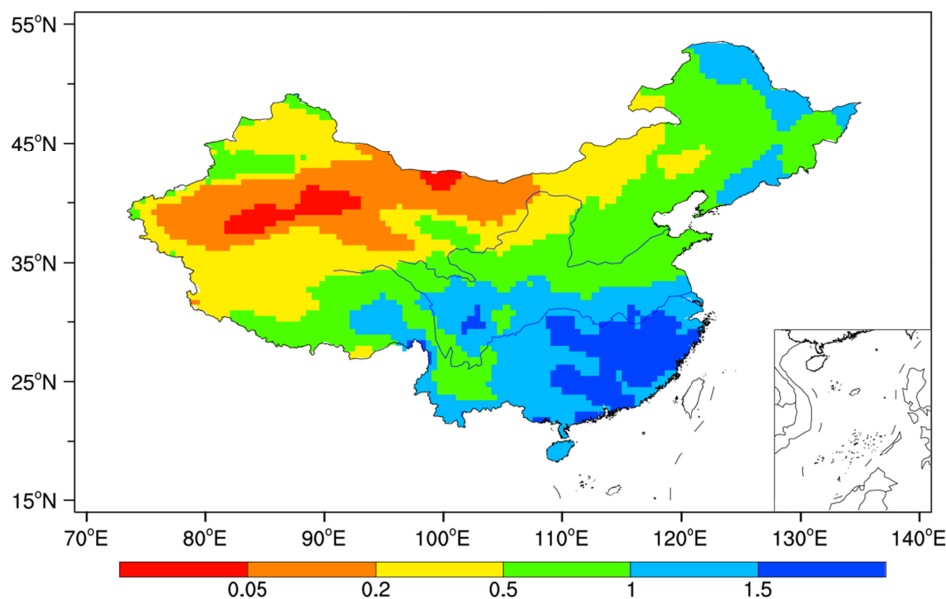


图1 1962~2011年中国干湿指数空间分布。指数 ≤ 0.05 的为极端干旱区, $0.05 \sim 0.20$ 的为干旱区, $0.20 \sim 0.50$ 的为半干旱区, $0.50 \sim 1.00$ 的为半湿润区, ≥ 1.00 的为湿润区

Fig. 1 Climatological dry/wet index in China for 1962–2011. Extreme arid region, arid region, semi-arid region, semi-humid region, and humid region are defined as the regions where the dry/wet index is less than 0.05, 0.05–0.20, 0.20–0.50, 0.50–1.00, and greater than 1.00, respectively

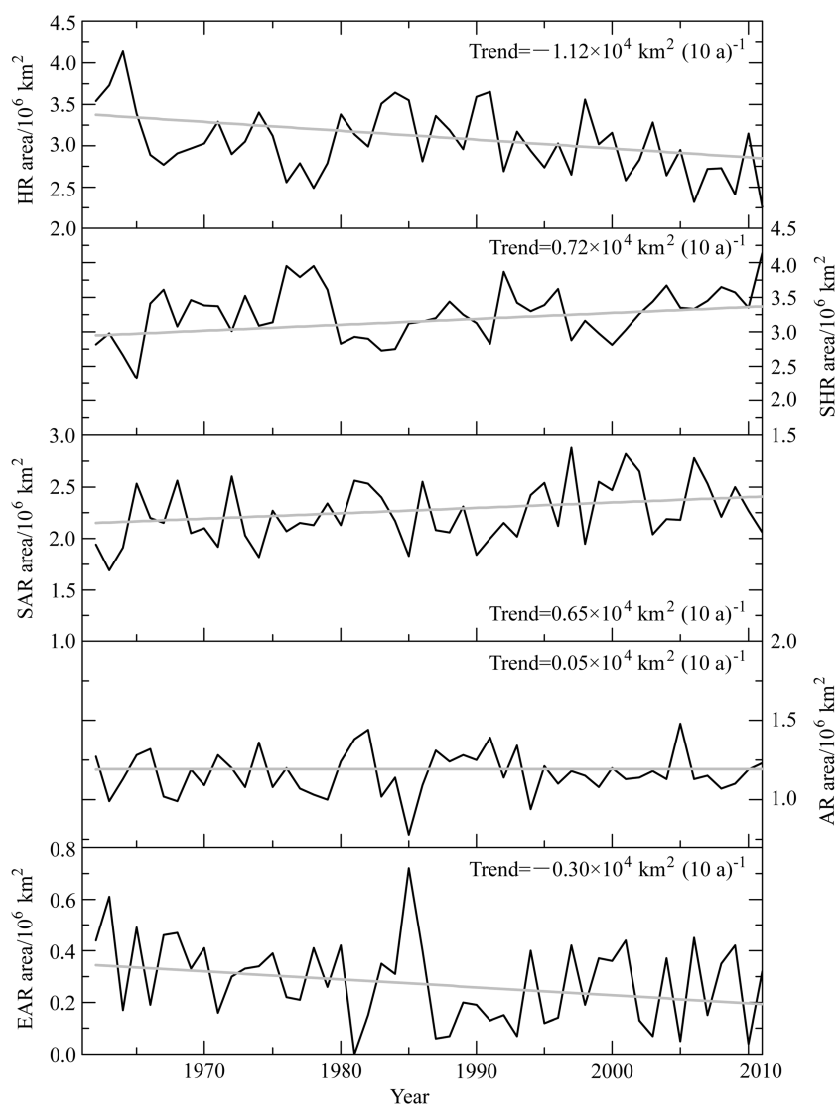


图2 1962~2011年中国极端干旱区(EAR)、干旱区(AR)、半干旱区(SAR)、半湿润区(SHR)和湿润区(HR)面积变化

Fig. 2 Area Changes in extreme arid region (EAR), arid region (AR), semi-arid region (SAR), semi-humid region (SHR), and humid region (HR) in China for 1962–2011

蒸散发在西北北部和西南地区显著下降,但在其他区域则大范围增加,尤其是在华北、江淮西部和青藏高原西部。根据干湿指数变化,1962~2011年中国西部在变湿,而东部在变干,其中显著变干的地区主要分布在东北、华北和西南(图3)。季节上,与年干湿指数变化趋势的空间分布表现一致的是春季和秋季,冬季在西北地区也呈现干旱化(图4);夏季的情况与年平均的相反,东南部出现湿润化,干旱化区域集中在半干旱区和半湿润区。

3.3 潜在蒸散发的主要影响因素

1962~2011年中国区域平均的年潜在蒸散发为 2.2 mm d^{-1} , 具体分布范围为 $1.1 \sim 3.9 \text{ mm d}^{-1}$ 。

考虑到蒸发过程主要依赖于两个条件,分别是热力作用和动力作用,即能量供给条件和水分输送条件。基于结果所示,在1962~2011年,辐射项占全年总潜在蒸散发的78%,并呈显著的下降趋势,而动力项的影响则以 $0.31\% (10 \text{ a})^{-1}$ 的趋势显著增加。同时分析影响潜在蒸散发的单一因子,即最高和最低温度、相对湿度、地表净辐射以及2 m风速,表明研究时段内最高和最低温度均显著增加,趋势分别为 $0.237^\circ\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $0.407^\circ\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$, 其中最低温度的上升速率明显快于最高温度;地表净辐射呈现波动性不显著的下降,其趋势为 $-0.005 \text{ MJ m}^{-2} (10 \text{ a})^{-1}$;相对湿度和2 m风速显著下降,趋势分别

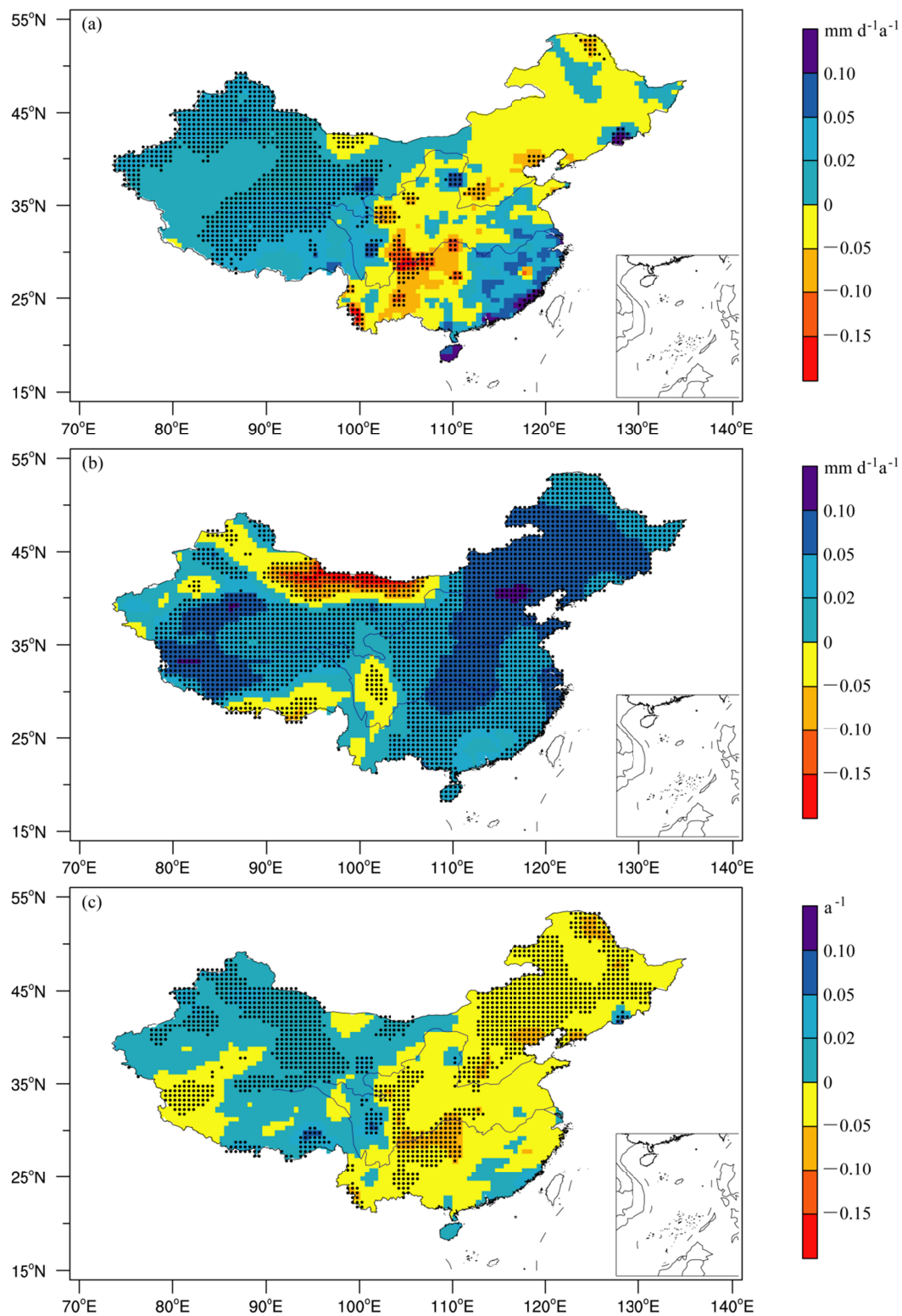


图3 1962~2011年 (a) 降水量、(b) 潜在蒸散发和 (c) 干湿指数变化趋势。图中打点区通过了95%信度检验

Fig. 3 Change trends of (a) precipitation (P), (b) potential evapotranspiration (P_{ET}), and (c) dry/wet index for 1962–2011. The dotted areas represent change trends above 95% confidence level

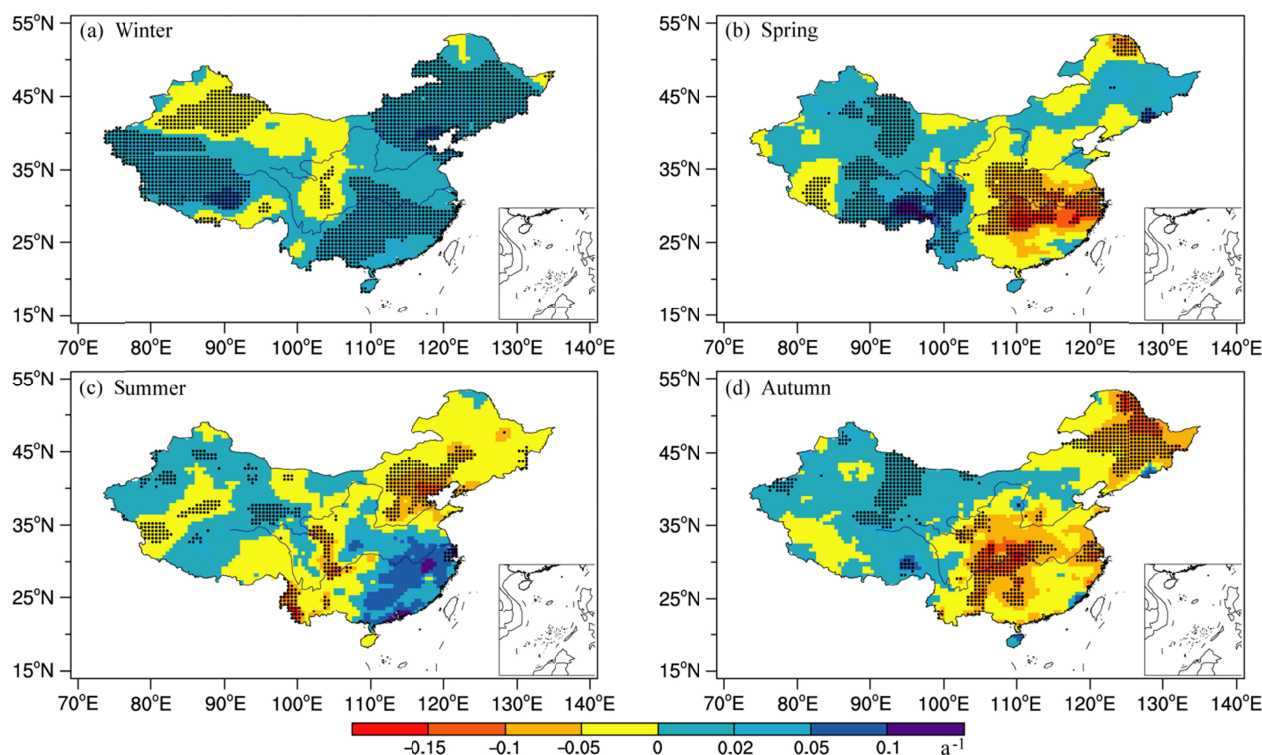


图4 1962~2011年干湿指数 (a) 冬季、(b) 春季、(c)、夏季、(d) 秋季季节变化趋势。图中打点区通过了95%信度检验

Fig. 4 Change trends of (a) winter, (b) spring, (c) summer, and (d) autumn dry/wet index for 1962–2011. The dotted areas represent change trends above 95% confidence level

为 -0.6% (10 a^{-1}) 和 -0.031 m s^{-1} (10 a^{-1}) (图5)。

根据敏感性分析,潜在蒸散发对年温度、风速和地表净辐射的敏感性均为正值,分别为0.51、0.14和0.65;相对湿度的敏感性为 -0.83 。其中,敏感性最高的是相对湿度,最低的为风速。以相对湿度为例,在其他因子保持不变时,相对湿度增加10%,则潜在蒸散发减少8.3%。因此,相对湿度的显著减少和温度显著增加是1962~2011年中国区域潜在蒸散发增加的主要原因。

3.4 CMIP5 模式能力评估

为预估中国未来干湿区变化,首先对18个可利用的CMIP5模式的模拟能力进行了评估。在参考时段1986~2005年间,观测和模拟降水气候态的空间相关系数为0.36~0.84,均通过了99%的信度检验;均一化的标准差为0.69~1.93;标准化的中心化均方根误差为0.59~1.56。同时,潜在蒸散发的空间相关系数为0.71~0.90,均通过了99%的信度检验;均一化的标准差为0.92~1.53;标准化的中心化均方根误差为0.48~0.99。综上可知,18个CMIP5模式均有合理的模拟能力,可用于预估

工作。另外,在进行多模式集合分析过程中,考虑到模式样本数量较小,本文采用中位数方法来避免潜在单个模式较大异常值对均值的影响。

在降水量级和空间分布上,多模式中位数均可以较好地与观测相对应,但青藏高原东部仍存在虚假的降水中心,且整个高原、东北东部的降水模拟偏多(图6a和图6c)。1986~2005年中国区域平均的年降水观测值为 1.6 mm d^{-1} ,分布范围为 $0.1\sim 6.0\text{ mm d}^{-1}$,多模式中位数为 2.2 mm d^{-1} ,分布范围为 $0.2\sim 6.7\text{ mm d}^{-1}$ 。同时,模式基本能够刻画潜在蒸散发的量级及其空间分布特征,但对江淮流域和新疆北部的潜在蒸散发模拟偏多,对西南和西北和高原东部的潜在蒸散发模拟偏少(图6b和图6d)。1986~2005年中国区域平均的年潜在蒸散发观测值为 1.9 mm d^{-1} ,数值范围为 $0.6\sim 3.9\text{ mm d}^{-1}$,多模式中位数的是 1.8 mm d^{-1} ,分布范围在 $0.5\sim 4.3\text{ mm d}^{-1}$ 。

3.5 干湿指数变化预估

在RCP4.5情景下,21世纪中国湿润区、干旱区和极端干旱区缩小,变化趋势分别为 -2.28×10^4

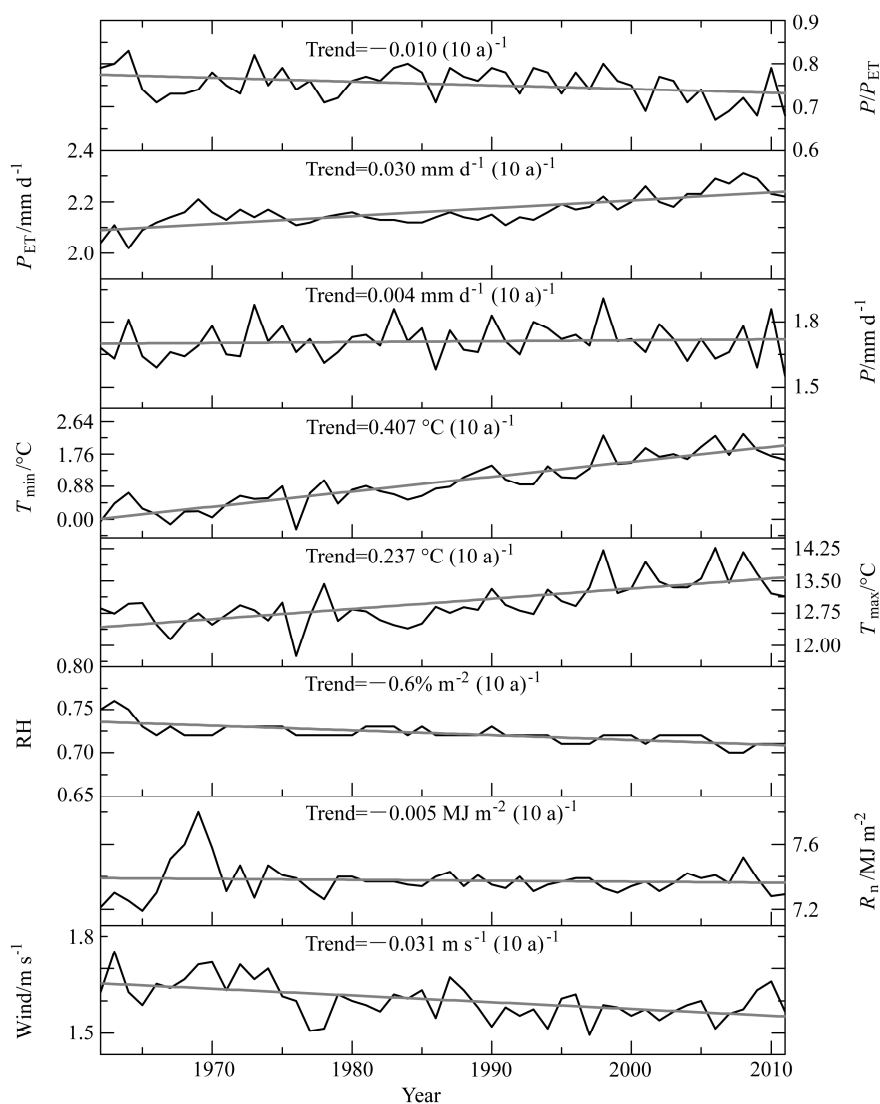


图5 1962~2011年干湿指数及其影响因子潜在蒸散发(P_{ET})、降水量(P)、最低温度(T_{min})、最高温度(T_{max})、相对湿度(RH)、地表净辐射(R_n)、2 m 风速(Wind)的变化

Fig. 5 Changes in dry/wet index and its impact factors P_{ET} , P , T_{min} (minimum temperature), T_{max} (maximum temperature), RH (relative humidity), R_n (surface net radiation), and wind at 2 m (Wind) for 1962–2011

$\text{km}^2 (10 \text{ a})^{-1}$ 、 $-2.17 \times 10^4 \text{ km}^2 (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $-0.02 \times 10^4 \text{ km}^2 (10 \text{ a})^{-1}$ ；半湿润区和半干旱区扩大，趋势分别为 $1.70 \times 10^4 \text{ km}^2 (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $5.53 \times 10^4 \text{ km}^2 (10 \text{ a})^{-1}$ (图7)。其中，不同等级的干旱区变化与全球范围内相应等级干旱区变化趋势总体上是定性一致的 (Feng and Fu, 2013)。在相同情景下，根据标准化降水蒸散发指数的预估结果同样显示湿润区面积减少和半干旱区面积增加 (刘珂和姜大膀, 2015b)，集成土壤湿度也显示半干旱区扩张 (李明星和马柱国, 2012)。

图8是未来各时段相对于1986~2005年不同等级干湿区面积变化的百分比值。极端干旱区面积变化在2016~2035年、2046~2065年和2081~2099年分别有28%、33%和33%的模式表现出增加，多模式中位数以及大多数模式在不同时段内的极端干旱面积为明显减少 (图8a)。在2016~2035年和2046~2065年，均有超过50%的模式模拟的干旱区面积是增加的，但多模式中位数中干旱区面积分别减少1%和2%；2081~2099年，56%的模式显示干旱区面积减少，多模式中位数中减少3% (图

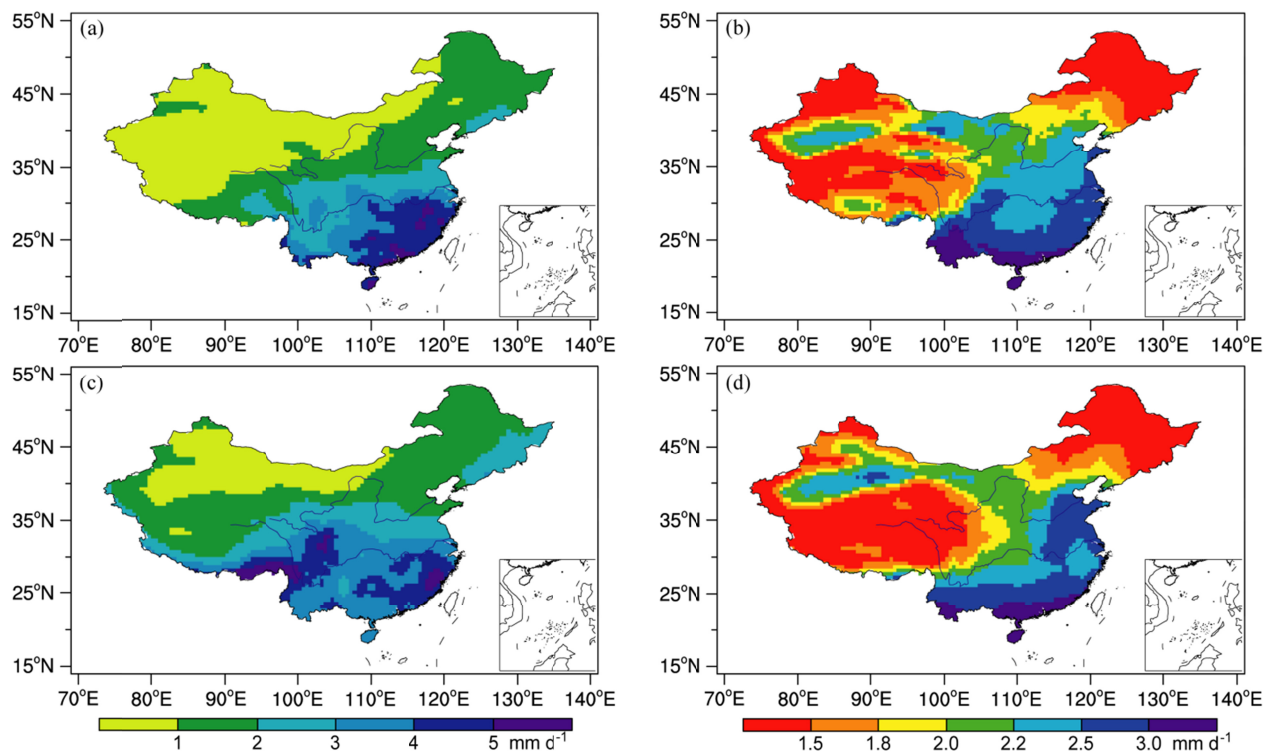


图6 1986~2005年 (a) 观测的和 (c) 模式中位数的年降水量、(b) 根据观测计算的潜在蒸散发和 (d) 相应模式中位数的值

Fig. 6 Climatological (a) precipitation from observations and (c) median precipitation from multi-model simulations, (b) P_{ET} from observations and (d) median P_{ET} from multi-model simulations for 1986–2005

8b), 即干旱区面积变化在模式之间存在着较大的差异。在 2016~2035 年、2046~2065 年和 2081~2099, 半干旱区和半湿润区面积在超过 80% 的模式中表现为增加, 与模式中位数结果一致 (图 8c 和图 8d)。在 21 世纪不同时段内, 多数模式和所有模式中位数均一致表现出湿润区的减少 (图 8e)。综上所述, 21 世纪极端干旱区和湿润区均呈缩小趋势, 干旱区面积变化在模式间存在不一致性, 半干旱区和半湿润区将扩大。

在 RCP4.5 情景下, 21 世纪干湿变化在空间上主要表现为干旱区的退缩和半湿润区的扩张 (图 9)。相对于 1986~2005 年, 半湿润区向东北扩展, 东北西南部由湿润区转变为半湿润区; 华北南部由半湿润区转为湿润区; 东部地区虽在各个阶段属于湿润区等级, 但存在变干的趋势。年降水在中国大部增加, 只在 21 世纪初期和中期的东南局部减少, 对应于同时段内东南部湿润区向半湿润区转变; 潜在蒸散发在 21 世纪表现为区域一致性的增加, 尤其在东北、江淮流域、新疆北部和青藏高原, 且增

幅随时段推移而加大 (图 10)。由于潜在蒸散发的增幅超过降水的增加, 因此干湿指数显示未来中国整体趋于干旱。之前, 在 SRES 中等排放情景下, 帕尔默干旱指数表明未来中国趋向干旱化, 总体干旱面积增加 (许崇海等, 2010)。标准化降水指数中西部和中部存在显著的变湿 (翟建青等, 2009)。相比较而言, 本文预估中变湿润的地区主要集中在西北, 极端干旱和干旱区总体缩小, 而半湿润区扩大。

4 结论

使用干湿指数研究了中国干湿分布、不同等级干湿区面积变化以及未来 RCP4.5 情景下的变化趋势, 得到如下结果:

(1) 1962~2011 年中国极端干旱区和干旱区集中在西北, 半干旱区和半湿润区与中国季风边缘带分布大体一致, 湿润区覆盖了江淮、华南、西南和东北北部及东南局部。研究时段内干湿指数呈下降趋势, 其原因在于潜在蒸散发的显著增加。空间上,

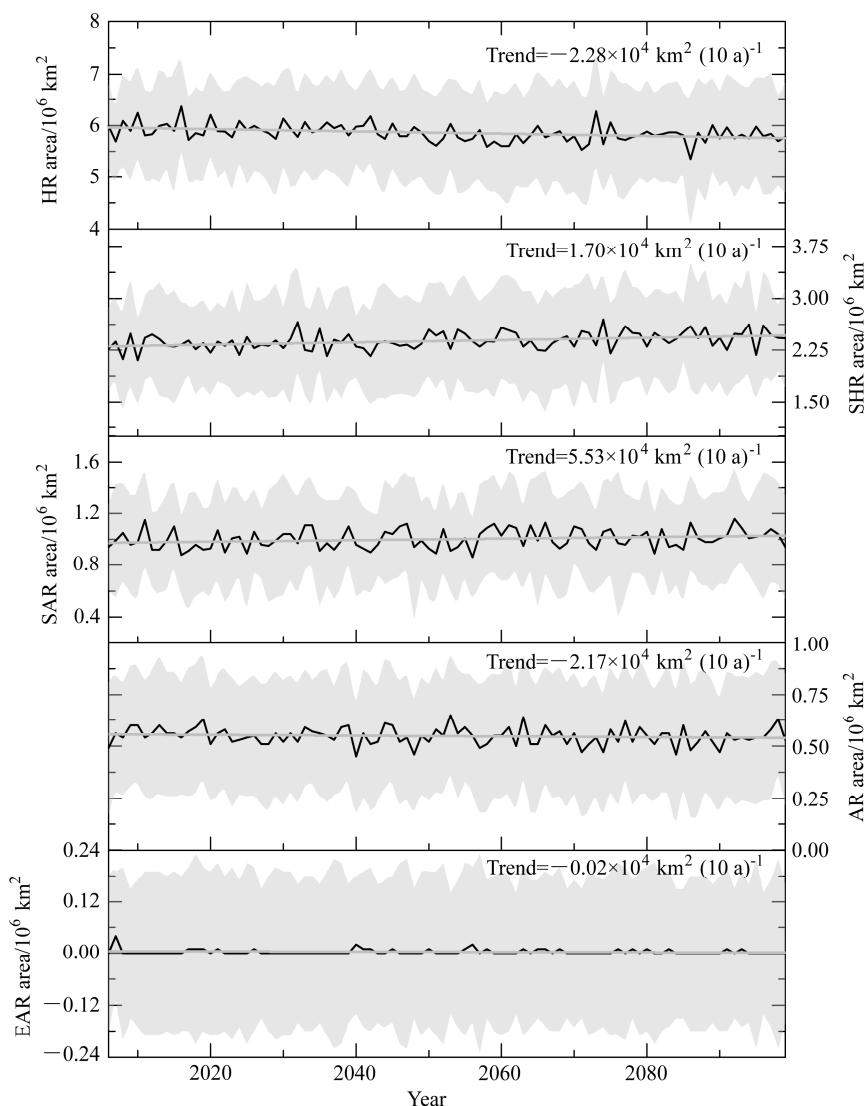


图7 在RCP4.5情景下多模式中位数预估的未来百年极端干旱区(EAR)、干旱区(AR)、半干旱区(SAR)、半湿润区(SHR)和湿润区(HR)面积变化。灰色区域代表多个模式结果间的1倍标准差

Fig. 7 Area changes projection of extreme arid region (EAR), arid region (AR), semi-arid region (SAR), semi-humid region (SHR), and humid region (HR) based on median values of multi-model simulations under the RCP4.5 (Representative Concentration Pathway 4.5) scenario. Grey areas denote one standard deviation of individual model simulations

年干湿指数变化反映了西部的湿润化和东部的干旱化；季节上，春季和秋季与年变化的空间分布一致，冬季西北仍呈现干旱化，而夏季东南部出现湿润化。

(2) 根据干湿指数分级标准，1962~2011年间范围呈现缩小的是湿润区和极端干旱区，显著扩大的是半湿润区、半干旱区，不显著变化的是干旱区。

(3) 18个CMIP5模式均能合理地模拟降水和潜在蒸散发的量级及其空间分布，其中青藏高原东

部存在虚假降水中心，整个高原和东北东部的降水模拟偏多；江淮流域和新疆北部的潜在蒸散发模拟偏多，在西南和西北则模拟偏少。

(4) 相对于1986~2005年参考时段，在RCP4.5情景下21世纪中国区域湿润区、干旱区和极端干旱区缩小，而半湿润区和半干旱区扩张；年降水在中国大部增加，而在东南南部减少；潜在蒸散发呈现全域性增加，尤其在东北、江淮流域、新疆北部和青藏高原。由于潜在蒸散发的增幅超过降水的增加，中国整体上趋于干旱。未来半湿润和半干旱区

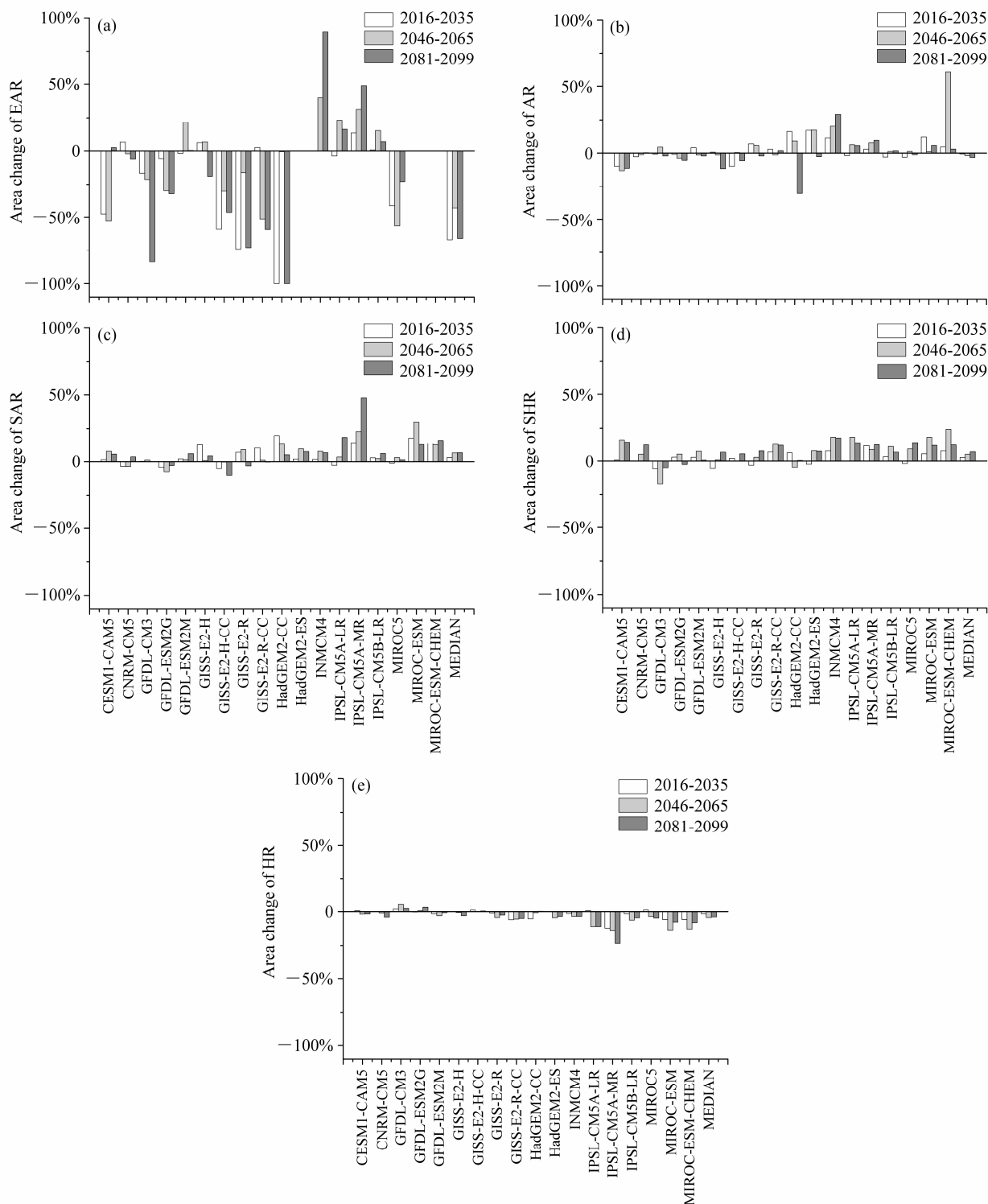


图8 相对于1986~2005年,在RCP4.5情景下不同时段(2016~2035年、2046~2065年和2081~2099年)内,模式预估的(a)极端干旱区、(b)干旱区、(c)半干旱区、(d)半湿润区、(e)湿润区的干湿区面积变化。MEDIAN表示多模式中位数

Fig. 8 Projected area changes in (a) arid region (EAR), (b) arid region (AR), (c) semi-arid region (SAR), (d) semi-humid region (SHR), and (e) humid region (HR) under the RCP4.5 for different periods (2016-2035, 2046-2065, and 2081-2099) derived from individual model simulations and their medians (MEDIAN) relative to those from the 1986-2005 historical run

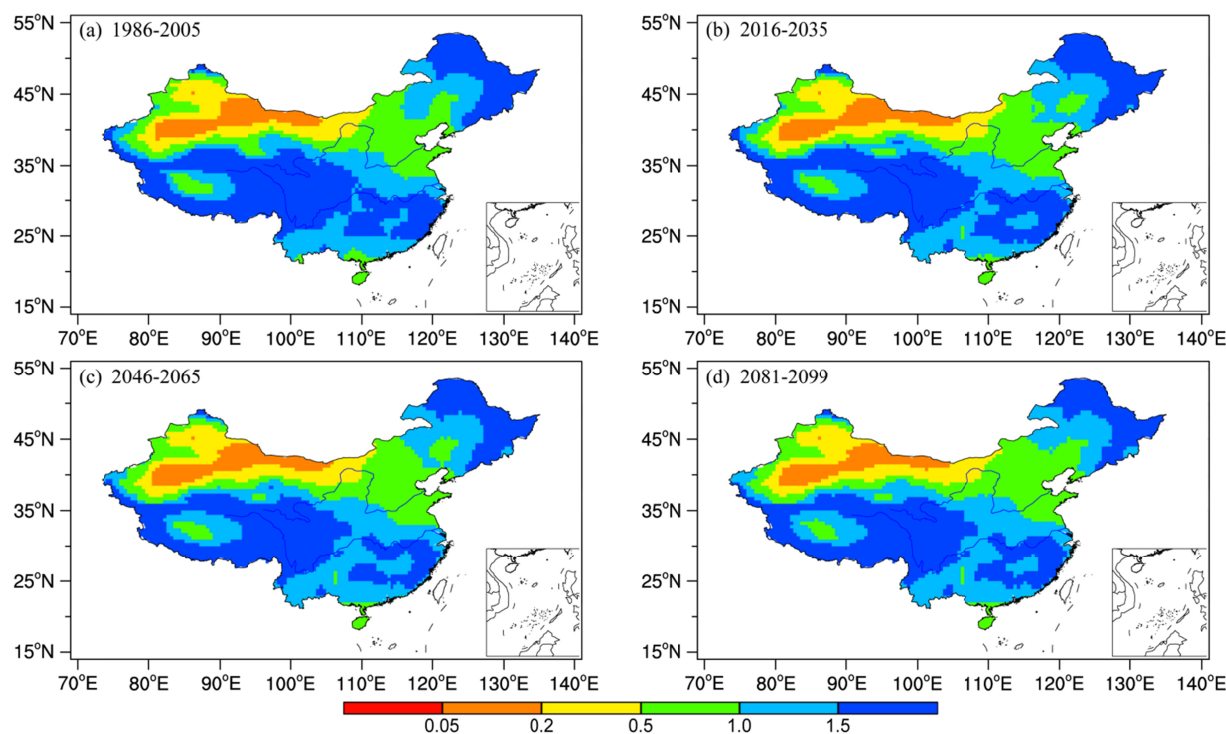


图9 RCP4.5 情景下 (a) 1986~2005 年、(b) 2016~2035 年、(c) 2046~2065 年、(d) 2081~2099 年的模式模拟的中位数干湿指数空间分布

Fig. 9 Distributions of dry/wet index based on multi-model medians (a) from 1986–2005 historical run, and for periods (b) 2016–2035, (c) 2046–2065, and (d) 2081–2099 under the RCP4.5 scenario

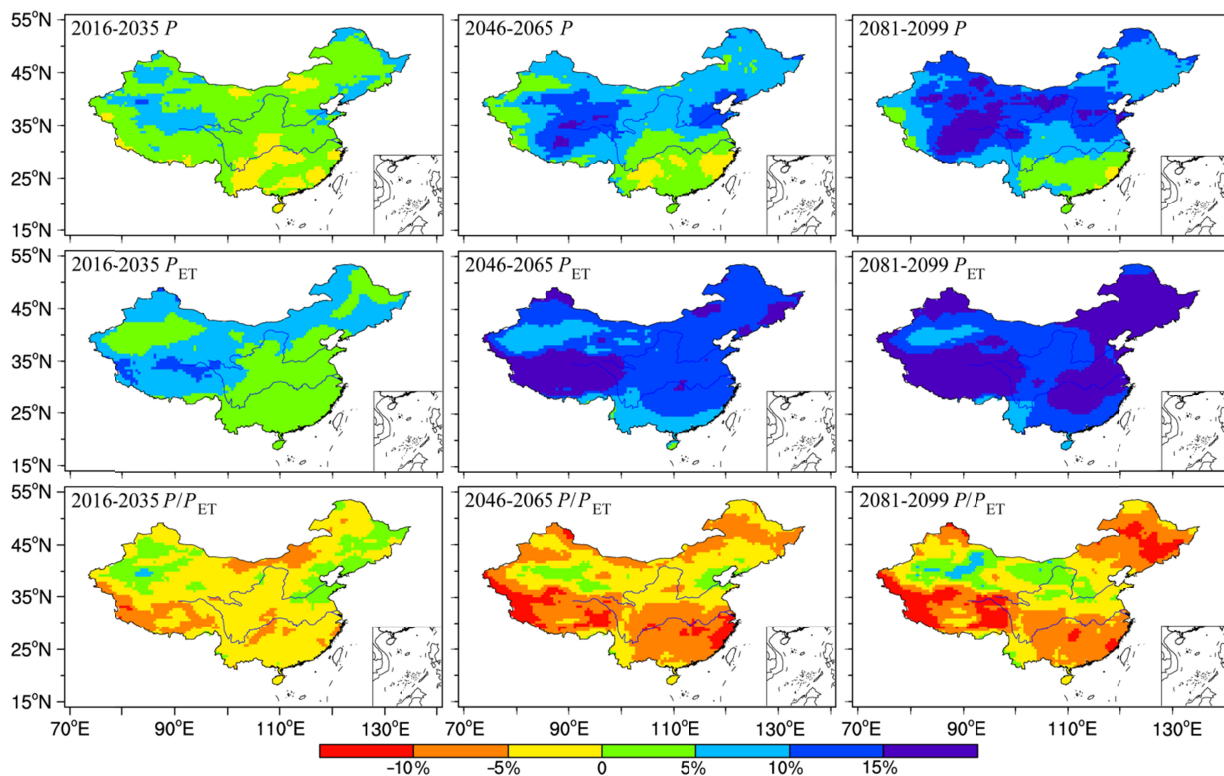


图10 相对于 1986~2005 年, 2016~2035 年(左)、2046~2065 年(中)、2081~2099 年(右)的模式中位数模拟的年降水量(上)、潜在蒸散发(中)和干湿指数(下)变化

Fig. 10 Changes in annual precipitation (top), P_{ET} (middle), and dry/wet index (bottom) projected by multi-model medians for 2016–2035 (left), 2046–2065 (middle), and 2081–2099 (right) under the RCP4.5 scenario relative to 1986–2005

扩张、湿润区向半湿润区转变, 这意味着生态系统敏感性较高的地区将会扩大。

在后续工作中, 需要进一步研究观测时段内不同潜在蒸散发算法在区域之间的表现差异, 及其对不同等级干湿分区变化趋势的影响; 在预估过程中除了多模式中位数结果外, 还应进一步从信噪比等角度进一步探讨预估的信度及其不确定性。

致谢 感谢两位审稿人的宝贵审阅意见, 感谢国际耦合模式比较计划第五阶段 (CMIP5) 模式组提供数值试验结果。

参考文献 (References)

- Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. 1998. Crop Evapotranspiration—guidelines for Computing Crop Water Requirements [M]. Rome: United Nations Food and Agriculture Organization.
- Briffa K R, van der Schrier G, Jones P D. 2009. Wet and dry summers in Europe since 1750: Evidence of increasing drought [J]. *Int. J. Climatol.*, 29 (13): 1894–1905, doi:10.1002/oc.1836.
- 慈龙骏, 吴波. 1997. 中国荒漠化气候类型划分与潜在发生范围的确定 [J]. *中国沙漠*, 17 (2): 107–111. Ci Longjun, Wu Bo. 1997. Climatic type division and the potential extent determination of desertification in China [J]. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 17 (2): 107–111.
- Dai A G. 2013. Increasing drought under global warming in observations and models [J]. *Nature Climate Change*, 3 (1): 52–58, doi:10.1038/nclimate1633.
- Dai A G, Trenberth K E, Qian T T. 2004. A global dataset of Palmer drought severity index for 1870–2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 5 (6): 1117–1130, doi:10.1175/JHM-386.1.
- Feng S, Fu Q. 2013. Expansion of global drylands under a warming climate [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 13: 10081–10094, doi:10.5194/acp-13-10081-2013.
- Fu Q, Feng S. 2014. Responses of terrestrial aridity to global warming [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119 (13): 7863–7875, doi:10.1002/2014JD021608.
- 符淙斌, 安芷生, 郭维栋. 2005. 我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究 (I): 主要研究成果 [J]. *地球科学进展*, 20 (11): 1157–1167.
- Fu Congbin, An Zhisheng, Guo Weidong. 2005. Evolution of life-supporting environment in our nation and the predictive study of aridification in northern China (I): Main scientific issues and achievements [J]. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 20 (11): 1157–1167.
- 黄建平, 季明霞, 刘玉芝, 等. 2013. 干旱半干旱区气候变化研究综述 [J]. *气候变化研究进展*, 9 (1): 9–14. Huang Jianping, Ji Mingxia, Liu Yuzhi, et al. 2013. An overview of arid and semi-arid climate change [J]. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 9 (1): 9–14.
- IPCC. 2013. Summary for policymakers [M]// *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al., Eds. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press.
- 姜江, 姜大膀, 林一骅. 2015. 1961~2009 年中国季风区范围和季风降水变化 [J]. *大气科学*, 39 (4): 722–730. Jiang Jiang, Jiang Dabang, Lin Yihua. 2015. Monsoon area and precipitation over China for 1961–2009 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 39 (4): 722–730, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1410.14195.
- 李明星, 马柱国. 2012. 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 [J]. *科学通报*, 57 (28–29): 2740–2754. Li Mingxing, Ma Zhuguo. 2013. Soil moisture-based study of the variability of dry–wet climate and climate zones in China [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 58 (4): 531–544, doi:10.1007/s11434-012-5428-0.
- 李新周, 刘晓东, 马柱国. 2004. 近百年来全球主要干旱区的干旱化特征分析 [J]. *干旱区研究*, 21 (2): 97–103. Li Xinzhou, Liu Xiaodong, Ma Zhuguo. 2004. Analysis on the drought characteristics in the main arid regions in the world since recent hundred-odd years [J]. *Arid Zone Research* (in Chinese), 21 (2): 97–103.
- 刘珂, 姜大膀. 2014. 中国夏季和冬季极端干旱年代际变化及成因分析 [J]. *大气科学*, 38 (2): 309–321. Liu Ke, Jiang Dabang. 2014. Interdecadal change and cause analysis of extreme summer and winter droughts over China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 38 (2): 309–321, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12219.
- 刘珂, 姜大膀. 2015a. 基于两种潜在蒸散发算法的 SPEI 对中国干湿变化的分析 [J]. *大气科学*, 39 (1): 23–36. Liu Ke, Jiang Dabang. 2015a. Analysis of dryness/wetness over China using standardized precipitation evapotranspiration index based on two evapotranspiration algorithms [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 39 (1): 23–36, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1402.13265.
- 刘珂, 姜大膀. 2015b. RCP4.5 情景下中国未来干湿变化预估 [J]. *大气科学*, 39 (3): 489–502. Liu Ke, Jiang Dabang. 2015b. Projected changes in the dry/wet climate of China under the RCP4.5 scenario [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 39 (3): 489–502, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1406.14119.
- 刘晓英, 李玉中, 王庆锁. 2006. 几种基于温度的参考作物蒸散量计算方法的评价 [J]. *农业工程学报*, 22 (6): 12–18. Liu Xiaoying, Li Yuzhong, Wang Qingsuo. 2006. Evaluation on several temperature-based methods for estimating reference crop evapotranspiration [J]. *Transaction of the CSAE* (in Chinese), 22 (6): 12–18.
- 马柱国. 2005. 我国北方干湿演变规律及其与区域增暖的可能联系 [J]. *地球物理学报*, 48 (5): 1011–1018. Ma Zhuguo. 2005. Dry/wet variation and its relationship with regional warming in arid-regions of northern China [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 48 (5): 1011–1018.
- 马柱国, 符淙斌. 2001. 中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析 [J]. *气象学报*, 59 (6): 737–746. Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2001. Trend of surface humid index in the arid area of northern China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 59 (6): 737–746.
- 马柱国, 符淙斌. 2005. 中国干旱和半干旱带的 10 年际演变特征 [J]. *地球物理学报*, 48 (3): 519–525. Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2005. Decadal variations of arid and semi-arid boundary in China [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 48 (3): 519–525.
- 马柱国, 符淙斌. 2006. 1951~2004 年中国北方干旱化的基本事实 [J]. *科学通报*, 51 (20): 2429–2439. Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2006. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004 [J].

- Chinese Science Bulletin, 51 (23): 2913–2925, doi:10.1007/s11434-006-2159-0.
- 马柱国, 符淙斌. 2007. 20 世纪下半叶全球干旱化的事实及其与大尺度背景的联系 [J]. 中国科学: 地球科学, 37 (2): 222–233. Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2007. Evidences of drying trend in the global during the later half of 20th century and their relationship with large-scale climate background [J]. Science China: Earth Sciences, 50 (5): 776–788.
- 马柱国, 黄刚, 甘文强, 等. 2005. 近代中国北方干湿变化趋势的多时段特征 [J]. 大气科学, 29 (5): 671–681. Ma Zhuguo, Huang Gang, Gan Wenqiang, et al. 2005. Multi-scale temporal characteristics of the dryness/wetness over northern China during the last century [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (5): 671–681, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.05.01.
- 毛飞, 孙涵, 杨红龙. 2011. 干湿气候区划研究进展 [J]. 地理科学进展, 30 (1): 17–26. Mao Fei, Sun Han, Yang Honglong. 2011. Research progress in dry/wet climate zoning [J]. Progress in Geography (in Chinese), 30 (1): 17–26, doi:10.11820/dlkxjz.2011.01.002.
- McCuen R H. 1974. A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evaporation [J]. Water Resour. Bull., 10 (3): 486–498, doi:10.1111/j.1752-1688.1974.tb00590.x.
- Overpeck J, Udall B. 2010. Dry times ahead [J]. Science, 328 (5986): 1642–1643.
- 申双和, 张方敏, 盛琼. 2009. 1975–2004 年中国湿润指数时空变化特征 [J]. 农业工程学报, 25 (1): 11–15. Shen Shuanghe, Zhang Fangmin, Sheng Qiong. 2009. Spatio-temporal changes of wetness index in China from 1975 to 2004 [J]. Transactions of the CSAE (in Chinese), 25 (1): 11–15.
- 石崇, 刘晓东. 2012. 1947–2006 年东半球陆地干旱化特征——基于 SPEI 数据的分析 [J]. 中国沙漠, 32 (6): 1691–1701. Shi Chong, Liu Xiaodong. 2012. Continent drought characteristics over the Eastern Hemisphere from 1947 to 2006: Analyses based on the SPEI dataset [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 32 (6): 1691–1701.
- Solomon S, Qin D H, Manning M, et al. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis [M]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press.
- Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 93 (3): 485–498, doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1.
- Wang A H, Lettenmaier D P, Sheffield J. 2011. Soil moisture drought in China, 1950–2006 [J]. J. Climate, 24 (13): 3257–3271, doi:10.1175/2011JCLI3733.1.
- 王菱, 谢贤群, 李运生, 等. 2004. 中国北方地区 40 年来湿润指数和气候干湿带界线的变化 [J]. 地理研究, 23 (1): 45–54. Wang Ling, Xie Xianqun, Li Yunsheng, et al. 2004. Changes of humid index and borderline of wet and dry climate zone in northern China over the past 40 years [J]. Geographical Research (in Chinese), 23 (1): 45–54, doi:10.11821/yj2004010006.
- 王亚平, 黄耀, 张稳. 2008. 中国东北三省 1960–2005 年地表干燥度变化趋势 [J]. 地球科学进展, 23 (6): 619–627. Wang Yaping, Huang Yao, Zhang Wen. 2008. Variation and tendency of surface aridity index from 1960 to 2005 in three provinces of Northeast China [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 23 (6): 619–627, doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2008.06.0619.
- 卫捷, 陶诗言, 张庆云. 2003. Palmer 干旱指数在华北干旱分析中的应用 [J]. 地理学报, 58 (S1): 91–99. Wei Jie, Tao Shiyang, Zhang Qingyun. 2003. Analysis of drought in northern China based on the Palmer severity drought index [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58 (S1): 91–99.
- 吴佳, 高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其他资料的对比 [J]. 地球物理学报, 56 (4): 1102–1111. Wu Jia, Gao Xuejie. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 56 (4): 1102–1111, doi:10.6038/cjg20130406.
- Wu Z Y, Lu G H, Wen L, et al. 2011. Reconstructing and analyzing China's fifty-nine year (1951–2009) drought history using hydrological model simulation [J]. Hydrol. Earth Syst. Sci., 15: 2881–2894, doi:10.5194/hess-15-2881-2011.
- 许崇海, 罗勇, 徐影. 2010. IPCC AR4 多模式对中国地区干旱变化的模拟及预估 [J]. 冰川冻土, 32 (5): 867–874. Xu Chonghai, Luo Yong, Xu Ying. 2010. Simulation and prediction of the drought variations in China by multi-model ensemble [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 32 (5): 867–874.
- 严华生, 万云霞, 严小东, 等. 2004. 近 500 年中国旱涝时空分布特征的研究 [J]. 云南大学学报 (自然科学版), 26 (2): 139–143. Yan Huasheng, Wan Yunxia, Yan Xiaodong, et al. 2004. A study of the temporal and spatial features of dryness & wetness last 500-year period in China [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences) (in Chinese), 26 (2): 139–143.
- 翟建青, 曾小凡, 苏布达, 等. 2009. 基于 ECHAM5 模式预估 2050 年前中国旱涝格局趋势 [J]. 气候变化研究进展, 5 (4): 220–225. Zhai Jianqing, Zeng Xiaofan, Su Buda, et al. 2009. Patterns of dryness/wetness in China before 2050 projected by the ECHAM5 model [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 5 (4): 220–225.
- 郑红星, 刘静. 2011. 东北地区近 40 年干燥指数变化趋势及其气候敏感性 [J]. 地理研究, 30 (10): 1765–1774. Zheng Hongxing, Liu Jing. 2011. Long-term trends of aridity index and its sensitivity to climate factors in Northeast China: 1971–2008 [J]. Geographical Research (in Chinese), 30 (10): 1765–1774, doi:10.11821/yj2011100003.
- Zou X K, Zhai P M, Zhang Q. 2005. Variations in droughts over China: 1951–2003 [J]. Geophys. Res. Lett., 32 (4): L04707, doi:10.1029/2004GL021853.