王恺曦, 姜大膀, 华维. 2020. 中国干湿变化的高分辨率区域气候模式预估 [J]. 大气科学, 44(6): 1203−1212. WANG Kaixi, JIANG Dabang, HUA Wei. 2020. Dry/Wet Climate Projections over China Using a High-Resolution Regional Climate Model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(6): 1203−1212. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19176

中国干湿变化的高分辨率区域气候模式预估

王恺曦[1] 姜大膀[2,3] 华维[1]

1 成都信息工程大学，成都 610225
2 中国科学院大气物理研究所，北京 100029
3 中国科学院大学，北京 100049

摘 要 本文使用三个全球气候模式驱动下的高分辨率区域气候模式 RegCM4 的试验数据，首先评估了 RegCM4 对参考时段（1986～2005 年）中国干燥度指数（AI）的模拟能力，而后根据典型浓度路径中等排放（RCP4.5）情景下 RegCM4 试验对中国未来干湿变化进行了预估研究。结果表明，RegCM4 能够合理模拟中国区域 AI 的空间分布。两种潜在蒸散发计算方法得到的参考时段 AI 在空间分布和数值上存在一定差异，尤其是在中国西部高海拔地区和北方地区。在三个全球气候模式驱动场作用下的 RegCM4 预估试验中，21 世纪中期（2046～2065 年）和末期（2081～2098 年）中国区域平均 AI 较参考时段分别减小 2%～4% 和 2%～5%，其中西北中部变湿，其他地区均变干。不同地区未来干湿变化的主要影响因素存在差异，西北中部降水变化为主导因素，其他地区主要受控于升温所引起的潜在蒸散发变化。

关键词 RegCM4 模式 干湿变化 潜在蒸散发 预估
文章编号 1006-9895(2020)06-1203-10 **中图分类号** P467 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19176

Dry/Wet Climate Projections over China Using a High-Resolution Regional Climate Model

WANG Kaixi[1], JIANG Dabang[2,3], and HUA Wei[1]

1 *Chengdu University of Information Technology*, *Chengdu* 610225
2 *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
3 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049

Abstract We evaluate the ability of models to simulate the aridity index (AI) and project the dry/wet climate changes in China under ther epresentative concentration pathway (RCP) 4.5 scenario using experimental data of a high-resolution regional climate model (RegCM4) nested within three global climate models. For the reference period of 1986–2005, RegCM4 can reasonably simulate the spatial pattern of AI in China, and the results of the simulated AI slightly differ between the two methods for calculating potential evapotranspiration, especially in the western high-altitude and northern regions over the country. Based on the projections of RegCM4, the AI averaged over China would decrease by 2%–4% and 2%–5% in the middle (2046–2065) and end (2081–2098) of the 21st century relative to the reference period,

收稿日期 2019-12-07；**网络预出版日期** 2020-04-27
作者简介 王恺曦，女，1994 年出生，博士研究生，主要从事气候变化研究。E-mail: 605259856@qq.com
通讯作者 姜大膀，E-mail: jiangdb@mail.iap.ac.cn
资助项目 国家重点研发计划项目 2016YFA0600704，国家自然科学基金项目 41421004
Funded by Research and Development Program of China (Grant 2016YFA0600704), National Natural Science Foundation of China (Grant 41421004)

respectively, with central Northwest China becoming wetter and other regions becoming drier. The predominant factor influencing the future dry/wet climate changes in China varies with regions. Precipitation is the leading factor in central Northwest China, while in the other regions, temperature increase plays the dominant role via potential evapotranspiration changes.

Keywords RegCM4 model, Dry/wet changes, Potential evapotranspiration, Projection

1 引言

气候干湿平均状况主要决定于大尺度大气环流和地形（Scheff and Frierson, 2012），其变化深刻影响着自然生态环境和社会经济发展（Huang et al., 2017b）。例如，在哈得莱环流下沉支气流所在的副热带高压区，气候普遍干燥；而在副热带高压带内的喜马拉雅山迎风坡地区，受地形抬升作用，气候相对湿润。影响气候干湿变化的主要因子包括气候系统内部变率和人类活动（Dai, 2013; Dai and Zhao, 2017）。其中，太平洋年代际振荡和大西洋多年代际振荡是引起干湿年代际变化的主因（McCabe et al., 2004; 马柱国和邵丽娟, 2006; 马柱国和符淙斌, 2007），厄尔尼诺—南方涛动则在年际尺度上起调制作用（Dai and Wigley, 2000）；人类活动引起的变暖显著影响了全球和区域干湿变化（Dai, 2013; 李春香等, 2014）。

政府间气候变化专门委员会（IPCC）第五次评估报告指出，1880～2012 年全球平均地表温度升高了 0.65～1.06°C，1951～2012 年全球平均地表温度上升速率几乎是 1880 年来升温速率的两倍（IPCC, 2013）。全球变暖背景下，降水和潜在蒸散发变化会影响地表水分收支平衡，改变地表干湿状况（刘珂和姜大膀, 2015a）。降水对干湿变化起主要作用，全球升温过程中潜在蒸散发的影响亦不断增大（Feng and Fu, 2013; Fu and Feng, 2014）。已有观测数据表明，自 20 世纪 50 年代以来，全球大部分地区干旱程度有所增加（Dai et al., 2004; 马柱国和符淙斌, 2007; Dai, 2013; Feng and Fu, 2013; Trenberth et al., 2014; Huang et al., 2016; Dai and Zhao, 2017），尽管在定量上还存在着不确定性（Sheffield et al., 2012）。在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的多模式预估试验中，21 世纪全球干旱区范围扩大（Dai, 2013; Feng and Fu, 2013; Fu and Feng, 2014; Zhao and Dai, 2017）。在中国区域，近 60 年来干旱面积有所增加，总体变干，其中以华北、东北和西南最为典型（尹云鹤等, 2005; 马柱国和符淙斌, 2006; 邹旭恺等, 2010; 熊光洁等, 2013; 刘珂和姜大膀, 2015a; 姜江等, 2017），西北则在 20 世纪 80 年代中期出现由暖干向暖湿转型的信号（施雅风等, 2002）。在 RCP4.5 情景下的 21 个和 18 个全球气候模式的预估试验中，未来中国整体变干，仅在西北局部存在变湿（刘珂和姜大膀, 2015b; 姜江等, 2017）。

回顾以往有关中国干湿变化的模拟和预估工作，它们大多使用全球气候模式的试验数据，模式的水平分辨率偏低，对降水和温度等气象要素的模拟存在不同程度的偏差，进而影响了对干湿状况及其变化的研究（Jiang et al., 2016; Huang et al., 2017a）。相对而言，高分辨率区域气候模式对局地降水和温度的模拟一般要优于全球模式（Giorgi et al., 2012），特别是对具有复杂地形的中国地区，它能较好地模拟更小尺度的气候信息，一定程度上纠正了全球气候模式的冷偏差（Gao et al., 2012; 张冬峰等, 2017）。

为此，我们使用三个全球气候模式驱动下的高分辨率区域气候模式 RegCM4 在当代和 21 世纪 RCP4.5 情景下的动力降尺度试验数据，首先检验了模式模拟中国干湿状况的能力，然后预估了中国未来干湿变化并探究其原因。

2 资料与方法

2.1 资料

所用模式数据来自三个全球气候模式 CSIRO-Mk3-6-0、HadGEM2-ES 和 MPI-ESM-MR 的历史试验和 RCP4.5 试验数据（分别简称 CSIRO_GCM、Had_GCM 和 MPI_GCM），以及这些试验数据驱动 RegCM4 下的东亚气候动力降尺度模拟数据（分别简称 CdR、HdR 和 MdR；Gao et al., 2018），其中包括日最高温度、日最低温度、降水、地面气压、2 m 风速、相对湿度和地表辐射通量的逐月资料。RegCM4 试验模拟范围为区域联合降尺度计划（CORDEX；Giorgi et al., 2009）的东亚地区（http://www.cordex.org/domains/region-7-east-asia/[2020-08-

26]），水平分辨率为 25 km×25 km，垂直方向有 18 层。

评估模式性能的数据来自再分析和观测资料，其中地表辐射通量和地面气压为欧洲中期天气预报中心（ECMWF）的再分析数据（Simmons et al., 2007），水平分辨率为 0.25°×0.25°；其余资料来自 CN05.1 格点数据集（吴佳和高学杰, 2013），水平分辨率为 0.25°×0.25°。鉴于全球气候模式与 RegCM4 和再分析资料的水平分辨率不同，采用双线性插值方法将它们插值到了与 RegCM4 相同的 0.25°×0.25°水平上。

2.2　方法

干燥度指数（AI）被用于表征气候干湿状况，其定义为降水（P）与潜在蒸散发（PET）的比值，即 AI = P/PET（Middleton and Thomas, 1997）。桑斯维特方法（Thornthwaite, 1948）和彭曼方法（Penman, 1948; Monteith, 1981）通常被用于计算 PET。前者由于计算过程中所需变量少，方法简便，得到了广泛应用，但其局限性亦较大，在中国西部高海拔和北方局部地区会低估 PET（杨庆等, 2017）；后者被联合国粮农组织（FAO）推荐为计算 PET 的首选方法（Allen et al., 1998）。在下文中，以上两种方法均被用于计算 PET，以期比较不同算法间的异同。

桑斯维特方法计算公式如下：

$$\mathrm{PET_{TH}} = 16\times\left(\frac{10T_i}{H}\right)^{A}, \tag{1}$$

$$H = \sum_{i=1}^{12}\left(\frac{T_i}{5}\right)^{1.514}, \tag{2}$$

$$A = 6.75\times10^{-7}H^3 - 7.71\times10^{-5}H^2 + 1.792\times10^{-2}H + 0.49, \tag{3}$$

其中，$\mathrm{PET_{TH}}$ 为月潜在蒸散发（单位：mm），T_i 为月平均温度（单位：°C），H 为年热量指数，A 为与年热量指数有关的常数。当 T_i≤0°C 时，月潜在蒸散发 $\mathrm{PET_{TH}}$ = 0。

彭曼方法计算公式如下：

$$\mathrm{PET_{PM}} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T_{mean}+273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}, \tag{4}$$

其中，$\mathrm{PET_{PM}}$ 为潜在蒸散发（单位：mm d^{-1}），R_n 为地表净辐射（单位：MJ m^{-1} d^{-1}），G 为土壤热通量（单位：MJ m^{-2} d^{-1}），T_{mean} 为日平均最高和最低温度的平均值（单位：°C），u_2 为 2 m 高度处风速（单位：m s^{-1}），e_s 为饱和水汽压（单位：kPa），e_a 为实际水气压（单位：kPa），Δ 为饱和水汽压曲线斜率（单位：kPa°C^{-1}），γ 为干湿表常数（单位：kPa°C^{-1}）。

3　模式模拟能力检验

在参考时段 1986～2005 年，使用观测和 $\mathrm{PET_{PM}}$ 算法所得的 AI 在中国地区分布不均（图 1a），主要表现为从西北至东南递增，最小值位于新疆，最大值位于长江以南东部沿海地区。三个全球气候模式及其集合平均能够模拟出类似观测的 AI 空间分布，但数值上不同程度偏大（图 1b、d、e 和 h）。相比于全球模式，RegCM4 的模拟更优，特别是对盆地和高原等复杂地形区的 AI 模拟更为细致，并一定程度上纠正了全球模式模拟数值过大的偏差（图 1c、f、g 和 i）。就中国区域平均而言，基于观测所得的 AI 平均值为 0.7，CSIRO_GCM、Had_GCM 和 MPI_GCM 及其集合平均（简称 EN_GCM）的模拟值分别为 1.3、2.5、1.8 和 1.9，相应的 RegCM4 模拟分别为 1.2、1.0、1.1 和 1.1，后者明显更接近观测。与此同时，CSIRO_GCM、Had_GCM 和 MPI_GCM 及其集合平均模拟与观测 AI 之间的标准差之比分别为 3.8、8.3、10.1 和 5.8，标准化中心化均方根误差分别为 3.9、8.4、11.2 和 6.0；相应的 RegCM4 模拟的标准差之比在 1.8～2.2 之间，标准化中心化均方根误差在 2.0～2.4 之间，明显小于全球模式。另外，根据 $\mathrm{PET_{TH}}$ 计算所得的参考时段观测和模拟 AI 的空间分布与图 1 类似，均在西北最小，东南最大；受方法本身所限，基于 $\mathrm{PET_{TH}}$ 计算的 AI 数值在海拔较高的青藏高原要明显偏大。

4　未来干湿变化预估

根据 RCP4.5 情景下三个全球模式驱动下的 RegCM4 动力降尺度试验，使用 $\mathrm{PET_{PM}}$ 算法所得的 AI 变化空间分布在 21 世纪中期 2046～2065 年（图 2a、e、i 和 m）和末期 2081～2098 年（图 2b、f、j 和 n）总体相似，主要表现为明显的区域差异性，在西北增加，而在其他地区以减少为主，且这种变化在各个模拟中有较高的一致性。在 CdR、HdR 和 MdR 及其集合平均（简称 MME）中，21 世纪中期中国区域平均 AI 分别减小 3%、4%、2% 和 3%，末期分别减小 5%、2%、4% 和 4%；除

HdR 外，末期 AI 的减幅均要大于中期（表 1）。

为便于讨论，选择 AI 变化明显的西北中部、东北南部和华北北部、西南、东南共四个区域作重点分析，各区域范围请见图 2。在 21 世纪中期（末期），PET_{PM} 计算所得西北中部 AI 显著增加，平均为 12%～14%（9%～22%），末期增幅相对更大；东北南部和华北北部与西南 AI 显著减小，分别为−9%～−5%（−15%～−7%）和−6%～−3%

表 1　RegCM4预估的21世纪中期（2046～2065年）和末期（2081～2098年）中国各区域AI相对于1986～2005年的变化

Table 1　Projected AI changes in regions of China in the middle (2046–2065) and the end (2081–2098) of the 21st century relative to the reference period 1986–2005, obtained using RegCM4

		2046～2065年AI相对变化				2081～2098年AI相对变化			
地区	PET计算方法	CdR数据	HdR数据	MdR数据	集合平均	CdR数据	HdR数据	MdR数据	集合平均
西北中部	PET_{PM}	12%	14%	12%	13%	13%	22%	9%	15%
	PET_{TH}	−2%	−1%	5%	1%	−2%	2%	1%	0%
东北南部和华北北部	PET_{PM}	−5%	−9%	−7%	−7%	−7%	−10%	−15%	−10%
	PET_{TH}	−7%	−11%	−8%	−9%	−10%	−14%	−15%	−13%
西南	PET_{PM}	−6%	−4%	−3%	−4%	−10%	−7%	−8%	−8%
	PET_{TH}	−10%	−9%	−6%	−8%	−16%	−13%	−10%	−13%
东南	PET_{PM}	−5%	−11%	−5%	−7%	−6%	−5%	0%	−4%
	PET_{TH}	−12%	−16%	−10%	−13%	−16%	−14%	−6%	−12%
全国平均	PET_{PM}	−3%	−4%	−2%	−3%	−5%	−2%	−4%	−4%
	PET_{TH}	−8%	−10%	−5%	−8%	−11%	−10%	−7%	−10%

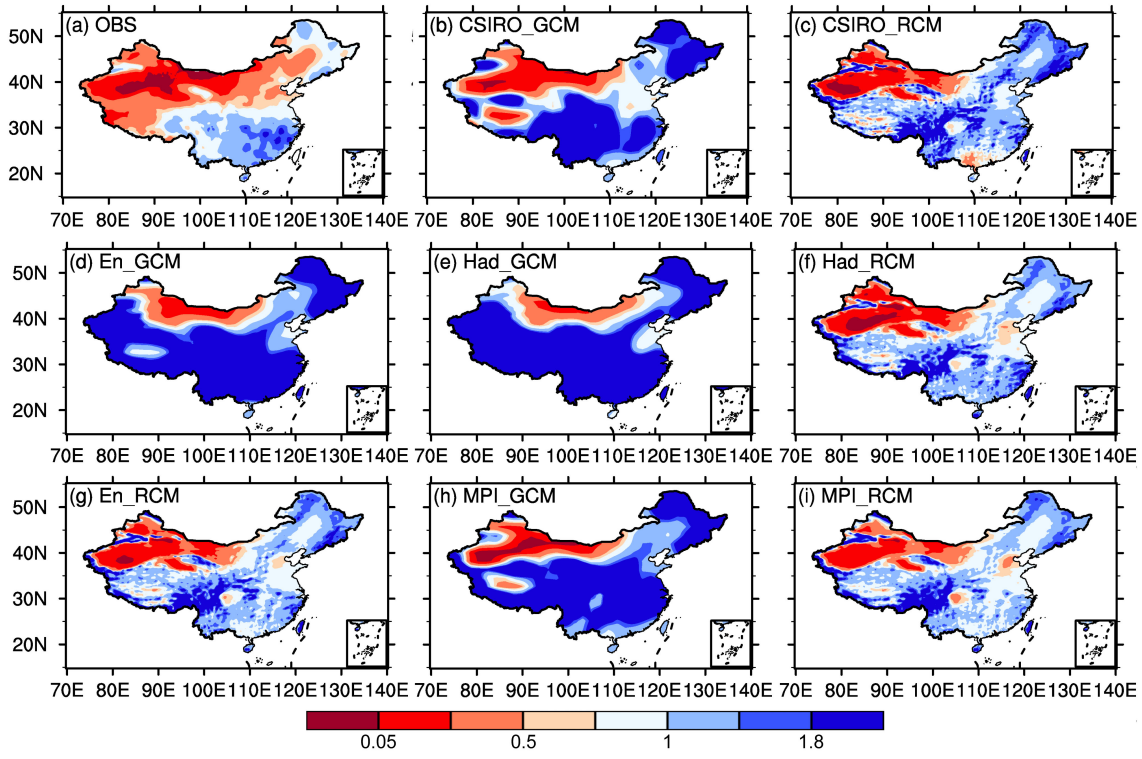

图 1　1986～2005 年（a）观测以及使用 PET_{PM} 算法所得的干燥度指数 AI 气候态分布：（b、e、h）三个全球模式试验及其（d）集合平均；（c、f、i）相应的三个 RegCM4 试验及其（g）集合平均。

Fig. 1　AI (aridity index) climatology based on (a) observations and the PET_{PM} method for the period 1986–2005: (b, e, h) Results obtained from three global climate models and (d) their ensemble mean; (c, f, i) results obtained from the corresponding simulations by RegCM4 and (g) their ensemble mean

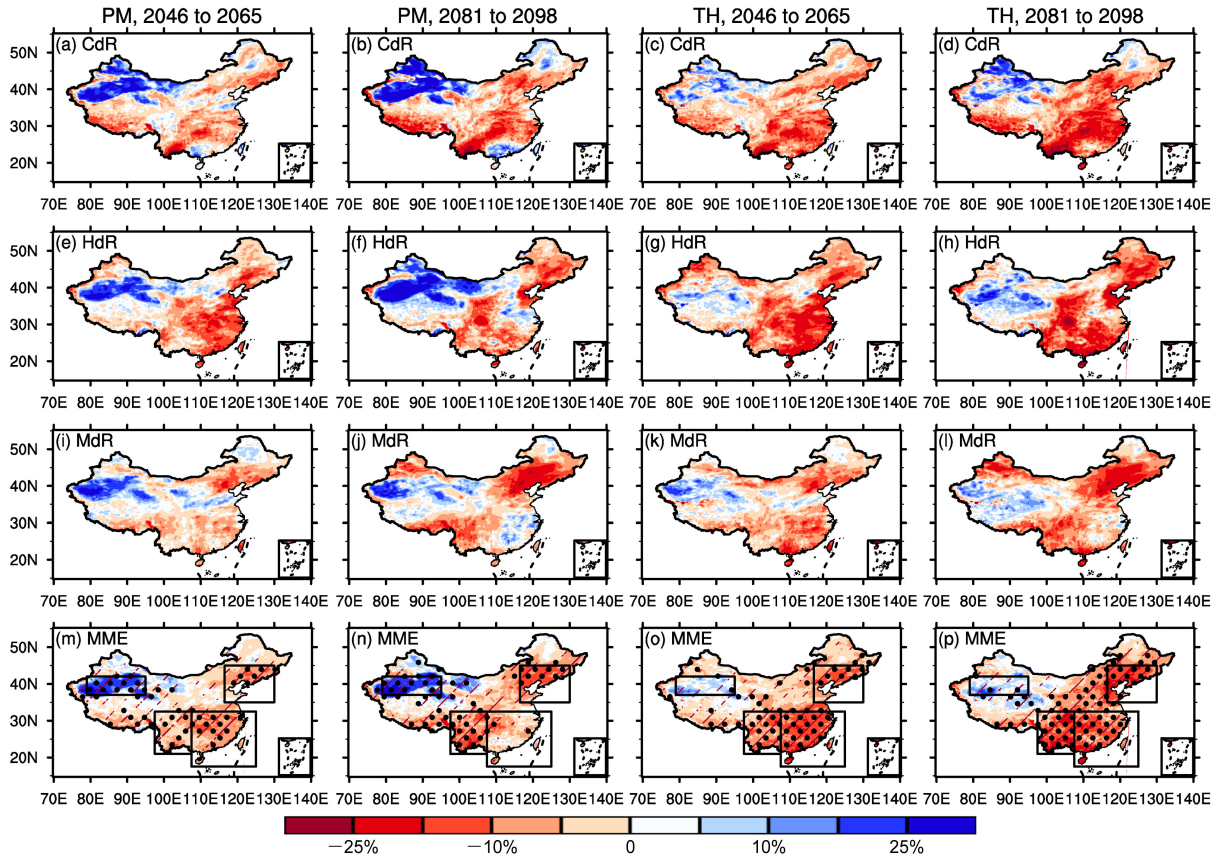

图 2　RCP4.5 情景下 RegCM4 预估的 21 世纪中期（第一、三列）和末期（第二、四列）AI 相对于 1986～2005 年的变化，从上至下依次为：CdR、HdR、MdR 及其集合平均 MME；第一和第二列基于 PET_{PM}，第三和第四列基于 PET_{TH}。在最下行图中，红色斜线代表三个模拟结果变化一致的区域，黑色圆点表示通过 95% 置信水平检验（下同）；黑色框表示 AI 变化较为显著的重点研究区域，分别是（1）西北中部（37°～42°N，79°～95°E）、（2）东北南部和华北北部（35°～45°N，116.5°～130°E）、（3）西南（21°～32.5°N，97.5°～107.5°E）、（4）东南（17.5°～32.5°N，107.5°～125°E）

Fig. 2　Projected AI changesrelative to the reference period 1986–2005 in the middle (the first and third columns) and end (the second and fourth columns) of the 21st century, obtained using RegCM4 under the RCP4.5 scenario. The panels from the top to bottom indicate results from CdR (downscaling results of CSIRO-Mk3-6-0), HdR (downscaling results of HadGEM2-ES), and MdR (downscaling results of MPI-ESM-MR) and their ensemble mean MME. The potential evapotranspiration is calculated by PET_{PM} (the first and second columns) and PET_{TH} (the third and fourth columns). In the bottom panels, the red slash represents the results of three models agreeing in sign with each other, and the black dots represent the 95% confidence level (the same below); the black boxes show key regions where large AI changes occur: (1) Central Northwest China (CNW: 37°–42°N, 79°–95°E), (2) southern Northeast China and northern–central North China (SNE plus NN: 35°–45°N, 116.5°–130°E), (3) Southwest China (SW: 21°–32.5°N, 97.5°–107.5°E), and (4) Southeast China (SE: 17.5°–32.5°N, 107.5°–125°E)

（−10%～−7%），末期减幅总体更大；东南地区 AI 亦减小，平均为−11%～−5%（−6%～0%），末期变幅相对减小（图 2 和表 1）。换言之，21 世纪中国西北中部将显著变湿；东北南部和华北北部以及西南显著变干，且其趋势随全球增温而增强；东南总体变干，但其趋势逐渐减弱。PET_{TH} 计算所得的 AI 变化空间分布与 PET_{PM} 的情形类似，均表现为西北局部变湿，而其他大部分地区变干（图 2c、d、g、h、k、l、o 和 p）；但两者之间在变幅上存在差异，主要表现为 PET_{TH} 算法所得的 AI 在西北地区增加不显著，在东北南部和华北北部、西南和东南地区显著减少（PET 的作用见图 3）。以往全球气候模式关于干旱的研究表明，在 IPCC 排放情景特别报告（SRES）中等排放情景下帕尔默干旱指数显示的未来中国总体干旱面积和干旱频率持续增加（许崇海, 2010），RCP4.5 情景下标准化降水蒸散发指数和干湿指数显示以西南和东南局部等地区为代表的湿润区面积减小和半干旱区扩张（刘珂和姜大膀, 2015b; 姜江等, 2017）；在有关 AI 的研究中，中国北部 AI 有所减小（Feng and Fu, 2013;

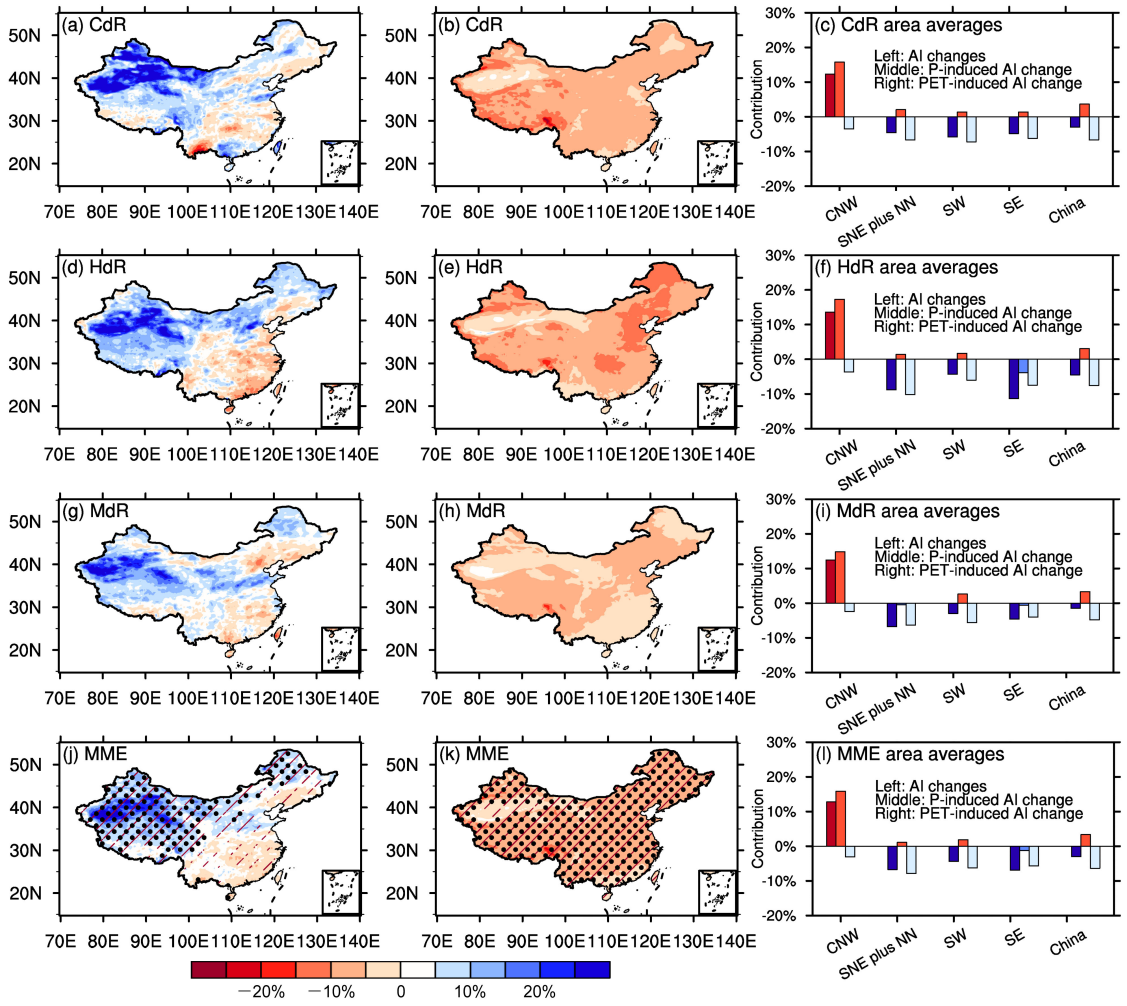

图 3 在 RCP4.5 情景下的 RegCM4 试验中，降水（左列）和 PET（中间列）及其区域平均（右列）对 21 世纪中期 AI 变化的贡献，从上至下依次为三个 RegCM4 试验及其集合平均。直方图中每个重点研究区域的三个柱形从左至右依次为区域平均的 AI 变化、降水引起的 AI 变化和 PET 引起的 AI 变化

Fig. 3 The contributions of precipitation (left column), potential evapotranspiration (middle column), and their regional average (right column) to AI changes during the mid-21st century under the RCP4.5 scenario, obtained using RegCM4. The three columns of figures from top to bottom indicate results from three sets of RegCM4 experiments and their ensemble mean. The three bars of each key region in the histogram, from left to right, are the regional average AI changesand the contributions of precipitation and potential evapotranspiration

Lin et al., 2015）；以上工作与 RegCM4 所得的中国整体变干相一致，尽管在不同区域上还存在不确定性。

5 预估结果原因分析

基于 PET_{PM} 计算的 AI 变化在 21 世纪中期和末期表现出相似的空间分布，本节以 21 世纪中期为例，分析了各个影响因子对未来干湿变化的相对贡献。

5.1 降水和 PET 对 AI 变化的贡献

降水和 PET 联合决定了 AI，因此需要进一步量化降水和 PET 的作用。根据 Feng and Fu（2013）提出的下述公式计算了降水和 PET 的贡献：

$$\Delta \mathrm{AI} \approx \mathrm{F}(\Delta \mathrm{P}) + \mathrm{G}(\Delta \mathrm{PET}), \tag{5}$$

$$F(\Delta P) = \frac{\Delta P}{\mathrm{PET}}, \tag{6}$$

$$G(\Delta \mathrm{PET}) \approx -\frac{\Delta \mathrm{PET}}{\mathrm{PET}^2} P + \frac{P}{\mathrm{PET}^3} (\Delta \mathrm{PET})^2 = \Delta \mathrm{AI} - \mathrm{F}(\Delta \mathrm{P}), \tag{7}$$

其中，ΔAI、ΔP 和 ΔPET 分别表示 AI、降水和 PET 变化，F（ΔP）和 G（ΔPET）分别表示降水和 PET 对 AI 变化的贡献。

RegCM4 三个动力降尺度试验及其集合平均结

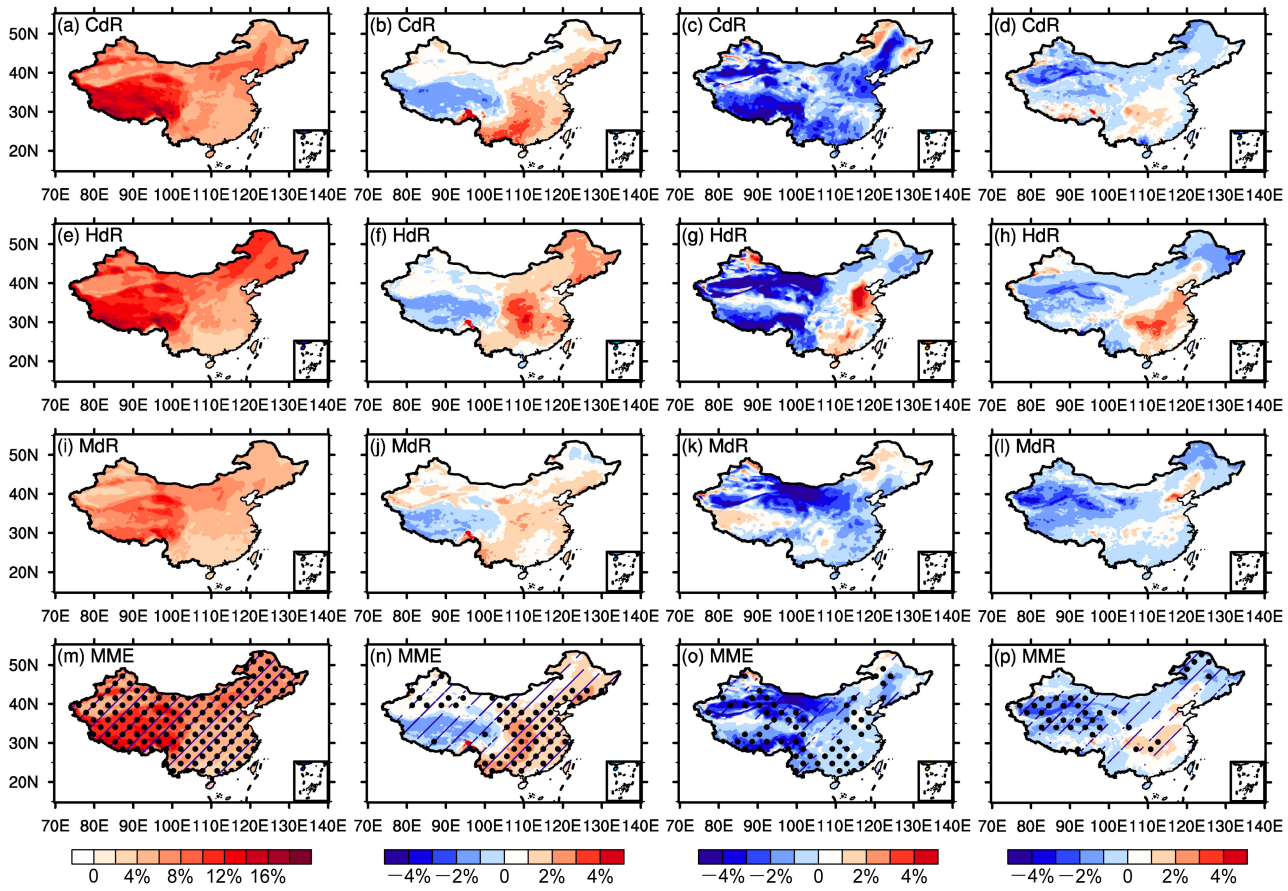

图 4　在 RCP4.5 情景下的 RegCM4 试验中，平均温度（第一列）、有效能量（第二列）、2 m 风速（第三列）和相对湿度（第四列）对 21 世纪中期 PET_{PM} 变化的贡献，从上至下依次为三个 RegCM4 及其试验集合平均

Fig. 4　The contributions of temperature (first column), available energy (second column), 2-m wind speed (third column), and relative humidity (fourth column) to PET_{PM} changes during the mid-21st century under the RCP4.5 scenario, obtained using RegCM4. The figures from top to bottom indicate results from three sets of RegCM4 experiments and their ensemble mean

果显示，在 21 世纪中期，降水对中国 AI 变化的作用整体为正，区域平均贡献为 3%～4%（图 3a、d、g 和 j）；PET 的作用为负，区域平均贡献为 −8%～−5%（图 3b、e、h 和 k）。在空间上，未来西部降水一致增加，对 AI 变化起正作用；东部黄河以北降水变化以正向作用为主，以南的则为负作用，但幅度相对较小，而且模式间存在较大的不确定性。PET 在全国范围内一致增加，负贡献显著。之前关于全球干湿变化的研究曾指出，由于 PET 增加和降水减少，中低纬度大部分地区有变干趋势（Feng and Fu, 2013），这与 RegCM4 模拟的黄河以南地区显著变干相一致。

在所选择的四个典型研究区，西北中部降水对 AI 的作用远大于 PET，其贡献为 15%～17%，PET 的仅为−4%～−2%；在其余三个研究区，PET 引起的 AI 变化均要大于降水，其中东北南部和华北北部降水贡献仅为 0～2%，PET 的则为−10%～−6%；西南和东南降水的贡献分别为 1%～3% 和 −4%～1%，PET 的为 −7%～−6% 和 −8%～−4%。综上，虽然降水在大部分地区有所增加，但 PET 的增幅相对更大，后者导致 21 世纪中期中国以变干为主。（图 3c、f、i 和 l）。

5.2　PET_{PM} 变化中各因子贡献

PET_{PM} 由平均温度、有效能量 AE、相对湿度与 2 m 风速共同决定。为了探究这些因素对 PET_{PM} 的单独影响，有必要进一步量化各因子的作用。为此，采用 Fu and Feng（2014）提出的方法，分别研究了 21 世纪中期上述四个因子的贡献。

三个全球模式驱动下的 RegCM4 试验及其集合平均结果一致表明，平均温度变化增加 PET，其作用在青藏高原存在大值区，在东南地区最小（图 4a、e、i 和 m），区域平均贡献为 6%～8%。

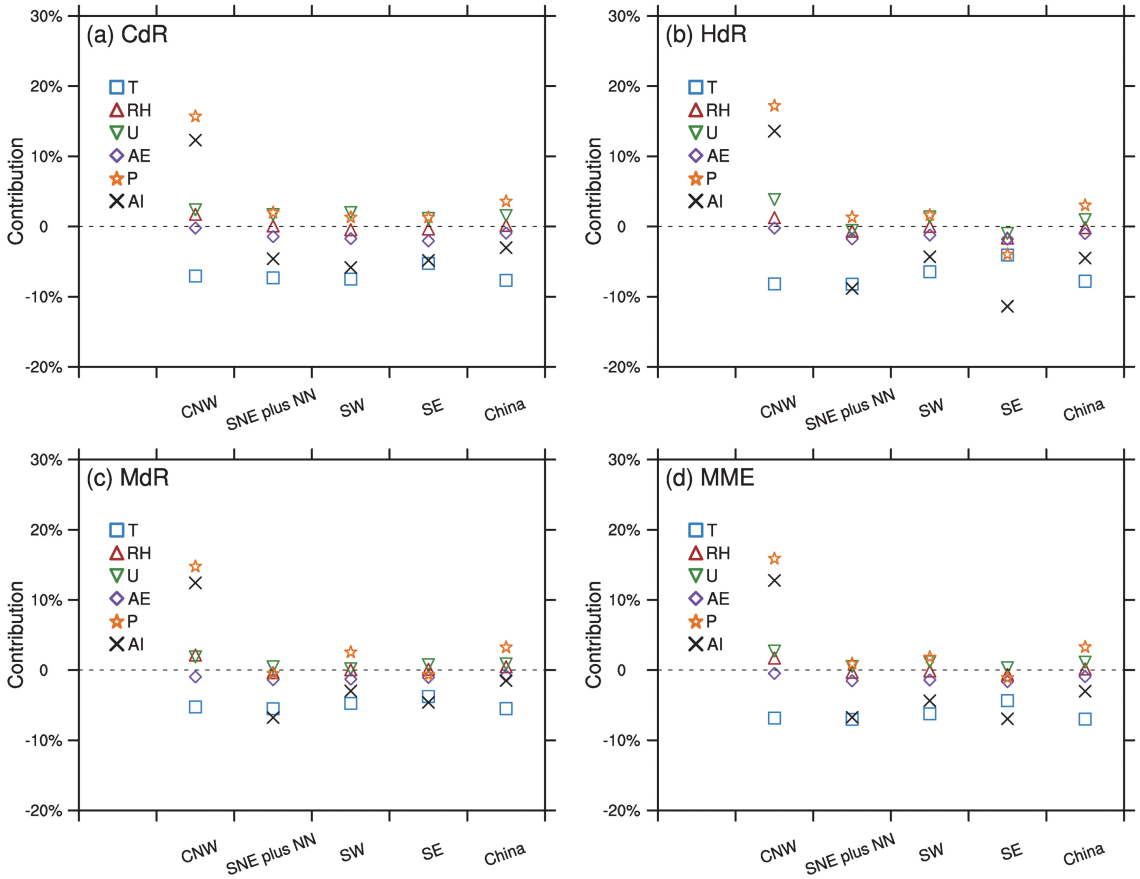

图 5 在 RCP4.5 情景下的（a, b, c）三套 RegCM4 试验及其（d）集合平均中，中国及其四个重点地区的平均温度（蓝）、相对湿度（红）、2 m 风速（绿）、有效能量（紫）和降水（橙）对 21 世纪中期 AI（黑）变化的贡献

Fig. 5 Regionally averaged AI (black) changes over China and its four key regions in the mid-21st century under the RCP4.5 scenario and the associated contributions of mean temperature (blue), relative humidity (red), 2-m wind speed (green), effective energy (purple), and precipitation (orange) as obtained from (a, b, c) three sets of RegCM4 experiments; (d) their ensemble mean

除青藏高原外，有效能量变化总体增加 PET，且在各模拟结果间有较好一致性，但其贡献相对较小，区域平均仅为 0.8%～1%（图 4b、f、j 和 n）。2 m 风速变化引起的 PET 变化基本为负，在中国西部数值较大，局部可超过 4%，在东部数值则相对较小，且模拟间一致性较差（图 4c、g、k 和 o），区域平均贡献为−2%～−1%。相对湿度变化对 PET 的作用在西部以负为主；在东部地区，各模拟间有一定差异，集合平均的贡献整体呈北负南正分布（图 4d、h、l 和 p），区域平均贡献为−1%～0。综合上述各项因子作用可知，平均温度是 PET 变化的主导因素。

5.3 各影响因素对 AI 贡献分析

各影响因子作用的诊断分析显示，降水、平均温度、有效能量、相对湿度和 2 m 风速变化对 AI 变化的贡献在中国区域平均分别为 3%～4%、−8%～−6%、−1%～−0.8%、0%～1% 和 1%～2%（图 5）。总体上，降水和平均温度是引起 AI 变化的主要要素，其他因子的影响相对较小。另外，不同区域主要影响因素的作用存在差异。在所选取的四个典型研究区中，西北中部 AI 增加，气候变湿，其主因是降水变化，贡献可达 15%～17%；其次源于平均温度变化，贡献为−8%～−5%；相对湿度、风速和有效能量的影响较小，其中相对湿度和风速为正作用，而有效能量作用接近于零。与西北中部不同，东北南部和华北北部、东南和西南地区 AI 减小，气候变干，这主要是因为平均温度变化，降水、相对湿度、风速和有效能量的作用远小于平均温度。

6 结论

本研究主要利用 PET_{PM} 方法计算的 AI 作为衡

量中国干湿变化的指标，评估了三个全球气候模式驱动下的 RegCM4 动力降尺度试验对当代 AI 的模拟能力，并与 PET_{TH} 方法计算的 AI 进行了比较分析；而后，采用 RCP4.5 情景下的 RegCM4 试验数据，预估了 21 世纪中期和末期相对于参考时期的中国干湿变化，得到如下结论：

（1）RegCM4 能合理模拟中国区域 AI 分布，比与之嵌套的三个全球气候模式性能总体更优，它在一定程度纠正了全球气候模式模拟 AI 过大的偏差，尤其体现在山地、高原和盆地等复杂地形区域。

（2）相对于参考时期，在 21 世纪中期和末期中国区域 AI 平均减小，气候变干，仅在西北部局部变湿。中国区域 AI 变化总体上不依赖于 PET 算法的选择，尽管采用 PET_{PM} 和 PET_{TH} 算法所得的 AI 在数值上存在一定差异。

（3）AI 变化的主导因素在不同区域有差异，在西北中部降水起主要作用，在其他地区则由 PET 主控，而 PET 变化主要源于平均温度改变。

需要指出的是，由于全球气候模式之间在动力框架、物理过程和参数化方案等方面有差异（Giorgi, 2010），使得相同试验下的数值试验结果存在不同，这导致它们驱动 RegCM4 所得到的动力降尺度模拟亦有区别；本文使用三个全球气候模式试验来驱动 RegCM4，分析了不同试验及其集合平均，有些变量的模拟表现出一定的不确定性，未来有必要通过更多全球气候模式试验驱动场进行动力降尺度集合模拟试验。其次，亦有必要使用其他高分辨率区域气候模式进行动力降尺度模拟试验。另外，限于现阶段 RegCM4 仅开展了 RCP4.5 情景试验，本文仅在这一中等排放情景下进行了诊断分析，未来还需要关注低端 RCP2.6 和高端 RCP8.5 排放情景试验并进行相应的预估研究，新一代共享社会经济路径（SSPs）情景下的预估工作亦待开展。

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: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 300pp.

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, Wigley T M L. 2000. Global patterns of ENSO-induced precipitation [J]. Geophys. Res. Lett., 27(9): 1283−1286. doi:10.1029/1999GL011140

Dai A G, Zhao T B. 2017. Uncertainties in historical changes and future projections of drought. Part I: Estimates of historical drought changes [J]. Climatic Change, 144(3): 519−533. doi:10.1007/s10584-016-1705-2

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]. Atmospheric Chemistry and Physics, 13(19): 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., 119(13): 7863−7875. doi:10.1002/2014JD021608

Gao X J, Shi Y, Zhang D F, et al. 2012. Uncertainties in monsoon precipitation projections over China: Results from two high-resolution RCM simulations [J]. Climate Research, 52(1): 213−226. doi:10.3354/cr01084

Gao X J, Wu J, Shi Y, et al. 2018. Future changes in thermal comfort conditions over China based on multi–RegCM4 simulations [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 11(4): 291−299. doi:10.1080/16742834.2018.1471578

Giorgi F. 2010. Uncertainties in climate change projections, from the global to the regional scale [J]. EPJ Web of Conferences, 9: 115−129. doi:10.1051/epjconf/201009009

Giorgi F, Jones C, Asrar G R. 2009. Addressing climate information needs at the regional level: The CORDEX framework [J]. WMO Bulletin, 58(3): 175−183.

Giorgi F, Coppola E, Solmon F, et al. 2012. RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains [J]. Climate Research, 52: 7−29. doi:10.3354/cr01018

Huang J P, Ji M X, Xie Y K, et al. 2016. Global semi-arid climate change over last 60 years [J]. Climate Dynamics, 46(3-4): 1131−1150. doi:10.1007/s00382-015-2636-8

Huang J P, Xie Y K, Guan X D, et al. 2017a. The dynamics of the warming hiatus over the Northern Hemisphere [J]. Climate Dynamics, 48(1-2): 429−446. doi:10.1007/s00382-016-3085-8

Huang J, Li Y, Fu C, et al. 2017b. Dryland climate change: Recent progress and challenges [J]. Rev. Geophys., 55(3): 719−778. doi:10.1002/2016RG000550

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 [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1535pp.

Jiang D B, Tian Z P, Lang X M. 2016. Reliability of climate models for China through the IPCC third to fifth assessment reports [J]. International Journal of Climatology, 36(3): 1114−1133. doi:10.1002/joc.4406

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 J, Jiang D B, Lin Y H. 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

李春香, 赵天保, 马柱国. 2014. 基于 CMIP5 多模式结果评估人类活动对全球典型干旱半干旱区气候变化的影响 [J]. 科学通报, 59(12): 1148−1163.　Li C X, Zhao T B, Ma Z G. 2014. Impacts of anthropogenic activities on climate change in arid and semiarid areas

based on CMIP5 models [J]. Chinese Science Bulletin, 59(30): 2972–2988. doi:10.1360/N972014-00039

Lin L, Gettelman A, Feng S, et al. 2015. Simulated climatology and evolution of aridity in the 21st century [J]. J. Geophys. Res., 120(12): 5795−5815. doi:10.1002/2014JD022912

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 K, Jiang D B. 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 K, Jiang D B. 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

马柱国, 邵丽娟. 2006. 中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系 [J]. 大气科学, 30(3): 464−474. Ma Z G, Shao L J. 2006. Relationship between dry/wet variation and the Pacific Decade Oscillation (PDO) in northern China during the last 100 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30(3): 464−474. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.03.10

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 Z G, Fu C B. 2006. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004 [J]. Chinese Science Bulletin, 51(23): 2913–2925. doi:10.3321/j.issn:0023-074X.2006.20.016

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 D 辑: 地球科学, 37(2): 222–233. Ma Z G, Fu C B. 2007. Global aridification in the second half of the 20th century and its relationship to large-scale climate background [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 50(5): 776–788. doi:10.3321/j.issn:1006-9267.2007.02.010

McCabe G J, Palecki M A, Betancourt J L. 2004. Pacific and Atlantic Ocean influences on multidecadal drought frequency in the United States [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 101(12): 4136−4141. doi:10.1073/pnas.0306738101

Middleton N, Thomas D. 1997. World Atlas of Desertification [M]. 2nd ed. London: Arnold.

Monteith J L. 1981. Evaporation and surfacetemperature [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 107(451): 1−27. doi:10.1002/qj.49710745102

Penman H L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass [J]. Proc. Roy. Soc. London. Ser. A: Math. Phys. Sci, 193(1032): 120−145. doi:10.1098/rspa.1948.0037

Scheff J, Frierson D M W. 2012. Robust future precipitation declines in CMIP5 largely reflect the poleward expansion of model subtropical dry zones [J]. Geophys. Res. Lett., 39(18): L18704. doi:10.1029/2012GL052910

Sheffield J, Wood E F, Roderick M L. 2012. Little change in global drought over the past 60 years [J]. Nature, 491(7424): 435−438. doi:10.1038/nature11575

施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 2002. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨 [J]. 冰川冻土, 24(3): 219−226. Shi Y F, Shen Y P, Hu R J. 2002. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 24(3): 219−226. doi:10.3969/j.issn.1000-0240.2002.03.001

Simmons A, Uppala S, Dee D, et al. 2007. ERA–interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards [N]. ECMWF Newsletter. doi:10.21957/pocnex23c6

Thornthwaite C W. 1948. An approach toward a rational classification of climate [J]. Geographical Review, 38(1): 55−94. doi:10.2307/210739

Trenberth K E, Dai A G, Van Der Schrier G, et al. 2014. Global warming and changes in drought [J]. Nature Climate Change, 4(1): 17−22. doi:10.1038/nclimate2067

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 J, Gao X J. 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

熊光洁, 张博凯, 李崇银, 等. 2013. 基于 SPEI 的中国西南地区 1961—2012 年干旱变化特征分析 [J]. 气候变化研究进展, 9(3): 192–198. Xiong G J, Zhang B K, Li C Y, et al. 2013. Characteristics of drought variations in Southwest China in 1961–2012 based on SPEI [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 9(3): 192–198. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2013.03.006

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 C H, Luo Y, Xu Y. 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.

杨庆, 李明星, 郑子彦, 等. 2017. 7 种气象干旱指数的中国区域适应性 [J]. 中国科学: 地球科学, 47(3): 337–353. Yang Q, Li M X, Zheng Z Y, et al. 2017. Regional applicability of seven meteorological drought indices in China [J]. Science China Earth Sciences, 60(4): 745–760. doi:10.1360/N072016-00133

尹云鹤, 吴绍洪, 郑度, 等. 2005. 近 30 年我国干湿状况变化的区域差异 [J]. 科学通报, 50(15): 1636–1642. Yin Y H, Wu S H, Zheng D, et al. 2010. Determining factors in potential evapotranspiration changes over China in the period 1971–2008 [J]. Chinese Science Bulletin, 55(29): 3329–3337. doi:10.3321/j.issn:0023-074X.2005.15.015

张冬峰, 韩振宇, 石英. 2017. CSIRO-Mk3.6.0 模式及其驱动下 RegCM4.4 模式对中国气候变化的预估 [J]. 气候变化研究进展, 13(6): 557–568. Zhang D F, Han Z Y, Shi Y. 2017. Comparison of climate projection between the driving CSIRO-Mk3.6.0 and the downscaling simulation of RegCM4.4 over China [J]. Advances in Climate Change Research, 8: 245−255. doi:10.12006/j.issn.1673-1719.2017.101

Zhao T B, Dai A G. 2017. Uncertainties in historical changes and future projections of drought. Part II: Model-simulated historical and future drought changes [J]. Climatic Change, 144(3): 535−548. doi:10.1007/s10584-016-1742-x

邹旭恺, 任国玉, 张强. 2010. 基于综合气象干旱指数的中国干旱变化趋势研究 [J]. 气候与环境研究, 15(4): 371−378. Zou X K, Ren G Y, Zhang Q. 2010. Droughts variations in China based on a compound index of meteorological drought [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15(4): 371−378. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2010.04.04