

刘珂, 姜大膀. 2015. RCP4.5 情景下中国未来干湿变化预估 [J]. 大气科学, 39 (3): 489–502, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1406.14119. Liu Ke, Jiang Dabang. 2015. 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.

RCP4.5 情景下中国未来干湿变化预估

刘珂^{1,2} 姜大膀^{1,3}

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院气候变化研究中心, 北京 100029

摘 要 本文采用国际耦合模式比较计划第五阶段 (CMIP5) 中 21 个气候模式的试验数据, 利用土壤湿度以及由其他 8 个地表气象要素计算所得的干旱指数, 预估了 RCP4.5 (Representative Concentration Pathway 4.5) 情景下 21 世纪中国干湿变化。结果表明: 全球气候模式对 1986~2005 年中国现代干湿分布具备模拟能力, 尽管在西部地区模式与观测间存在一定的差异。在 RCP4.5 情景下, 21 世纪中国区域平均的标准化降水蒸散发指数和土壤湿度均有减小趋势, 与之对应的是短期和长期干旱发生次数增加以及湿润区面积减小。从 2016 到 2100 年, 约 1.5%~3.5% 的陆地面积将从湿润区变成半干旱或半湿润区。空间分布上, 干旱化趋势明显的区域主要位于西北和东南地区, 同时短期和长期干旱发生次数在这两个地区的增加幅度也最大, 未来干旱化的发生时间也较其他地区要早; 只在东北和西南地区未来或有变湿倾向, 但幅度较小。在季节尺度上, 北方地区变干主要发生在暖季, 南方则主要以冷季变干为主。造成中国干旱化的原因主要是由降水与蒸散发所表征的地表可用水量减少。

关键词 RCP4.5 干湿气候 土壤湿度 标准化降水蒸散发指数 预估

文章编号 1006-9895(2015)03-0489-14

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1406.14119

Projected Changes in the Dry/Wet Climate of China under the RCP4.5 Scenario

LIU Ke^{1,2} and JIANG Dabang^{1,3}

1 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

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

Abstract This study projects changes in China's dry/wet climate in the 21st century using datasets from 21 climate models from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) under the RCP4.5 (Representative Concentration Pathway 4.5) scenario through soil moisture levels and a drought index, with the latter being calculated using eight surface meteorological variables. Results show that the models can reproduce the basic characteristics of the climatological dry/wet climate in China during 1986–2005, although there are some differences between the models and observations for the spatial pattern of dry climate over western China. Under the RCP4.5 scenario, the standardized precipitation evapotranspiration index and soil moisture levels would generally decrease across the whole of China, corresponding to an upward trend in the frequency of short- and long-term droughts, and a downward trend in the wet climate region. From 2016 to 2100, approximately 1.5 to 3.5 percent of the land area of China would change from a

收稿日期 2014-02-21; **网络出版日期** 2014-06-24

资助项目 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目 2012CB955401, 公益性行业(气象)科研专项 GYHY201006022, 国家自然科学基金项目 41375084

作者简介 刘珂, 女, 1985 年出生, 博士研究生, 主要从事干旱监测和预估方面研究。E-mail: liuke@mail.iap.ac.cn

humid to semi-humid or semi-arid climate. With respect to the geographical distribution, the most obvious dryness would occur in northwestern and southeastern China where short- and long-term drought frequencies would increase remarkably, and the dryness would be detectable earlier than in other regions. Wetness would only occur in northeastern and southwestern China, but would be very weak. Seasonally, there would be warm season dryness in northern China and cold season dryness in southern China. The dryness trend of China would be primarily due to the decrease of available surface water as determined by precipitation and evapotranspiration levels.

Keywords RCP4.5, Dry/wet climate, Soil moisture, Standardized precipitation evapotranspiration index, Projection

1 引言

IPCC (2013) 指出近百年来气候变暖是一个毋庸置疑的事实, 1880~2012 年全球地表温度平均增加了 0.65~1.06°C。近百年来全球变暖引起了生态环境恶化 (林而达等, 2006), 同时导致了各种极端气候事件的频发 (Frich et al., 2002; Milly et al., 2002), 在全球变化的背景下, 气候变暖及其环境影响已成为各国政府和民众普遍关心的焦点。在各类极端天气和气候事件中, 干旱是造成影响和损失最大的一种气象灾害 (Wilhite et al., 2007), 1990 s 以来中国由干旱造成的直接经济损失每年在 1000 亿以上 (符淙斌等, 2005), 因此对干旱进行专门研究有重要的学术和现实意义。目前, 有关干旱的研究中最常使用的是土壤湿度和能综合考虑降水和蒸散发作用的干旱指数, 其中帕尔默干旱指数 (Palmer, 1965) 和标准化降水蒸散发指数 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI; Vicente-Serrano et al., 2010a) 是使用最为广泛的两种干旱指数 (卫捷等, 2003; 翟盘茂和邹旭恺, 2005; 苏明峰和王会军, 2006; 姜大膀等, 2009; 许崇海等, 2010; Vicente-Serrano et al., 2011; Dai, 2012; 石崇和刘晓东, 2012)。

在未来全球持续变暖背景下, 全球和区域尺度干湿气候如何变化是应对和适应气候变化的关键参考因素, 也是气候变化预估领域的主题之一。利用干旱指数和土壤湿度等预估未来世界范围的干湿变化趋势结果表明: 随着气候变暖, 全球整体表现出干旱化倾向, 其中北美中北部、中亚、东亚、西非以及地中海地区变干最明显 (Wetherald and Manabe, 1999, 2002; Wang, 2005; IPCC, 2007; Gao and Giorgi, 2008; Sheffield and Wood, 2008; Dai, 2012)。目前有关中国气候变化的预估研究仍多着眼于温度和降水及其极端值方面, 对于干湿变化的关注有限。以往采用单一指标和少数模式数据的几项分析结果综合表明, 21 世纪中国气候有变干

倾向, 但幅度及其地域分布具有很大的不确定性 (姜大膀等, 2009; 翟建青等, 2009; 许崇海等, 2010; 李明星和马柱国, 2012), 现阶段亟待采用更多的指标和新一代的气候模式试验数据开展工作。为此, 我们使用 RCP4.5 (Representative Concentration Pathway4.5) 情景下 CMIP5 (国际耦合模式比较计划第五阶段) 中 21 个模式的试验资料, 以土壤湿度和干旱指数——SPEI 为指标, 集中分析了未来中国干湿变化, 以期为更好地理解未来气候变化及其影响评估提供参考。

2 资料和方法

2.1 资料

本文使用了 CMIP5 中所有满足使用彭曼-蒙特斯公式计算 SPEI 要素需求的 21 个气候模式的试验数据, 相关信息请参阅表 1。其中, 用到的气象要素包括月平均温度 (经地形校正后)、降水、地表气压、2 m 风速、相对湿度、比湿、地表长、短波辐射通量和整层土壤湿度; 1986~2005 年为历史气候模拟试验, 2006~2100 年为 RCP4.5 情景试验。评估模式模拟能力的再分析资料是美国普林斯顿大学研发的高分辨率全球陆面同化数据 (Sheffield et al., 2006), 包括月平均温度、降水、地表气压、2 m 风速、相对湿度、比湿等要素, 以及 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 的净辐射数据 (Kalnay et al., 1996)。模式模拟能力评估时段为 1986~2005 年, 期间所有模式资料均插值到了统一的 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 水平分辨率上。

2.2 方法

文中干湿气候区划分标准使用的是 1994 年联合国防治荒漠化公约 (UNCCD) 中的定义, 干旱、半干旱和半湿润区为年降水与潜在蒸散发之比在 0.05~0.60 之间的大陆地区, 0.05~0.20 为干旱区, 0.20~0.50 为半干旱区, 0.50~0.65 为半湿润区, 而大于 0.65 则为湿润区。

表 1 CMIP5 模式及其集合, “*” 代表挑选的 10 个较好模式
Table 1 CMIP5 models and their ensemble means, in which “*” denotes the 10 better models

| 序号 | 模式 | 序号 | 模式 | 序号 | 模式 |
|----|----------------|----|---------------|----|--------------------|
| 01 | ACCESS1.0* | 09 | GISS-E2-H | 17 | IPSL-CM5B-LR* |
| 02 | ACCESS1.3 | 10 | GISS-E2-H-CC | 18 | MIROC5 |
| 03 | BCC-CSM1.1* | 11 | GISS-E2-R | 19 | MIROC-ESM |
| 04 | BCC-CSM1.1(m) | 12 | GISS-E2-R-CC | 20 | MIROC-ESM-CHEM |
| 05 | BNU-ESM | 13 | HadGEM2-CC* | 21 | MRI-CGCM3* |
| 06 | CanESM2* | 14 | INM-CM4* | 22 | 所有模式集合 (MME-21) |
| 07 | CNRM-CM5 | 15 | IPSL-CM5A-LR* | 23 | 较好模式集合 (MME-10) |
| 08 | CSIRO-Mk3.6.0* | 16 | IPSL-CM5A-MR* | | |

因为 SPEI 综合考虑了降水和蒸发作用, 而且它能够在多个时间尺度上合理地评估干旱 (Vicente-Serrano et al., 2010b), 因此我们选取这一指标进行集中研究, 原始算法请见 <http://digital.csic.es/handle/10261/10002?locale=en> [2013-02-01], 更多信息请参阅 Vicente-Serrano et al. (2010b)。期间, 在计算潜在蒸散发过程中我们采用了与现实更为接近的彭曼-蒙特斯公式 (Monteith, 1965), 代替了原来的桑斯维特公式 (Thornthwaite, 1948)。

由于不同气候模式间的陆面模式或参数化方案不同, 因此对土壤深度的定义和分层存在着很大的差异。为方便对模式模拟土壤湿度的能力进行集合分析, 文中参考李明星和马柱国 (2012) 的方法, 对模式整层土壤湿度进行了标准化处理, 即: $S_{std} = (S_{grid} - S_{min}) / (S_{max} - S_{min})$, 其中 S_{std} 为标准化格点土壤湿度; S_{grid} 为模式模拟的格点土壤湿度, 单位: $kg\ m^{-2}$; S_{min} 和 S_{max} 分别为 1986~2005 年模式模拟的中国区域内土壤湿度的最小和最大值。

3 模式评估

考虑到降水是干湿变化的主要影响因子, 我们对 21 个模式模拟的 1986~2005 年中国年平均降水量进行了评估, 用到的统计量包括模拟与观测之间的空间相关系数、标准差之比以及模拟相对于观测场的中心化均方根误差。在定量上, 21 个模式模拟与观测场的空间相关系数为 0.47~0.89, 均通过了 95% 的显著性检验; 模拟与观测场的标准差比值在各模式间有较大差异, 大于 1 的模式分布相对稀疏, 而小于 1 的模式则较为密集; 同时, 大多数模式的标准化后的中心化均方根误差大多集中在小于 0.75

的范围之内 (图 1)。由此可知, 大部分模式对中国年平均降水气候态分布具有较好的模拟能力, 少数模式的模拟效果则要差一些。为此, 除了关注所有 21 个模式的等权重集合平均 (下文简称 MME-21) 外, 我们也同时分析了择优选取的 10 个较优模式的集合平均结果 (下文简称 MME-10), 其中择优的标准是模拟与观测场的标准差比值位于 0.8~1.2 区间, 标准化后的中心化均方根误差小于 0.75。较于单个模式, MME-21 和 MME-10 在评估时段与观测场之间具有更好的一致性, 其中后者表现更优 (图 1)。

根据 1986~2005 年观测资料的计算表明, 干旱区占中国陆地总面积的 16.9%, 湿润区占 26.4%, 半干旱区占 21.6%, 半湿润区占 35.1%。其中, 干

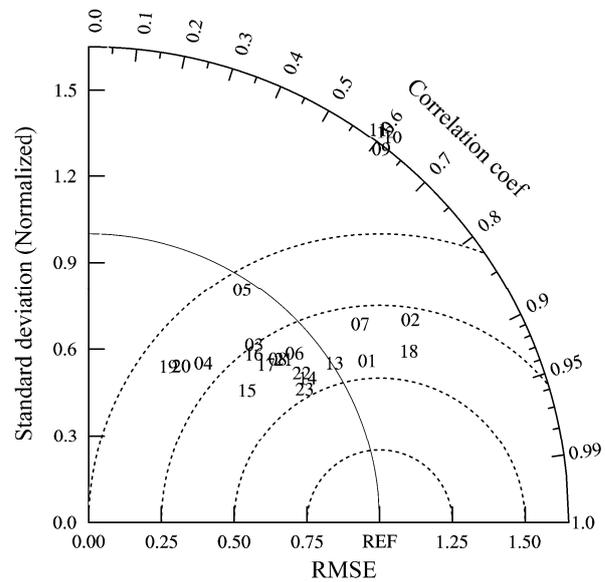


图 1 1986~2005 年 21 个模式及其集合平均模拟的中国区域年平均降水与观测的空间泰勒图 (Taylor, 2001), 图中序号对应表 1 中的模式序号, REF 点表示观测。其中, 数字到原点的距离表示模拟与观测场之间的标准差之比, 数字对应的方位角位置表示模拟与观测场之间的空间相关系数, 数字到 REF 点的距离表示经观测场标准差标准化之后的中心化均方根误差

Fig. 1 Taylor diagram (Taylor, 2001) for displaying a spatial statistical comparison between 21 models and their ensemble means and observations for the annual mean precipitation in China during 1986–2005, in which the numbers in graph correspond to the numbers of models in Table 1. The point of “REF” indicates the observations of annual mean precipitation in China, the distance between number and origin of coordinates denotes the ratio of the standard deviations from observation and model, the azimuth angle indicates spatial correlation coefficient between observation and model, the distance between number and REF denotes centralized root-mean-square error after normalization

旱区主要分布在西北地区,湿润区主要位于长江中下游和东南沿海,半湿润和半干旱区在空间上呈东北—西南向分布,主要包括东北、华北、黄河流域、云南北部以及青藏高原地区(图2)。需要指出的是,以上分布型与以往中国干湿气候区划格局相仿,特别是干旱和湿润区吻合较好;差别主要是半干旱和半湿润区的边界位置有所不同以及西北干旱区的干旱等级相对较低(周晓东等, 2002; 马柱国和符淙斌, 2005; 申双和等, 2009),这很可能是源于潜在蒸散发的算法不同所致,因为早期工作通常只考虑降水和温度而忽略风速和水汽压等因子的作用,本文所用的彭曼-蒙特斯公式则包含了更多气象因子作用,并被证明在干旱和湿润区都与实测参考作物蒸散量具有更好的一致性(Jensen et al., 1990)。在大尺度上, MME-10 合理地模拟出了中国干湿分布(图2);其中,对湿润和干旱区的模拟效果要好于半干旱和半湿润区;由于模式在青藏高原东部地区模拟的降水普遍偏多,造成了这一地区气候异常偏湿,与观测差异较大,模式对这一地区模拟降水偏多的原因可能是由于全球模式分辨率普遍不高所致(Yu et al., 2010; Gao et al., 2012)。另外,大多模式模拟的湿润区和半湿润区域面积偏大,干旱区面积偏小;模式集合结果总体上要优于单个模式, MME-10 优于 MME-21。

4 中国未来干湿变化

4.1 SPEI 未来变化

RCP4.5 情景下, 21 世纪中国区域年和季节平均 SPEI 总体上均呈减小趋势(图3), MME-10 的

减小幅度相比于 MME-21 要更大。在 10 年际尺度上, 年和季节平均 SPEI 均表现为下降趋势, 降幅在 2050s 左右达到最大, 之后趋于缓和。从模式间的离散度来看, 20 世纪和 21 世纪末期模式间差异较大, 21 世纪中期则较小(图3右列), 表明 2050s 前后的中国变干在模式间具有很高的-致性。在季节尺度上, 春季变干最为明显, 相对应的模式间离散度也最大, 秋季和夏季次之, 冬季则相对较小。这一暖季干旱化倾向与 Wang (2005) 和 IPCC (2007) 的早期工作一致, 而冬季和春季干湿变化与以往研究所得的冷季变湿结论存在一定的差异, 应与所用的模式和方法不同有关。

由于中国特殊的地理位置, 东西横跨 60 个经度, 南北从热带过渡到温带, 加之青藏高原地形的存在, 区域间气候差异很大。为此, 我们按照施晓晖和徐祥德(2006)标准将中国分区化, 具体分区见图2。图4给出了 1986~2100 年中国及其 7 个子区域内 4 个不同时段 SPEI 的季节循环变化。就中国区域平均而言, 四季 SPEI 都有不同程度的减小, 其中春季减幅最大, 这与前文直接分析结果一致。在时空变化上, SPEI 变化具有很强的地域性和季节性。在包括东北、华北、西北的北方地区, 春季和夏季 SPEI 减小最明显, 其中华北夏季的变干主要发生在 21 世纪末期, 其他地区的暖季变干则表现为逐渐变干的特点; 而在江淮、华南、西南等南方地区, SPEI 减小最明显的季节主要是冬季和春季, 其中江淮和西南地区除冷季明显变干外, 暖季干湿变化的波动特征也非常明显; 在各子区域中, 以西北西部地区变干程度最强, 从春季至秋季均呈现变

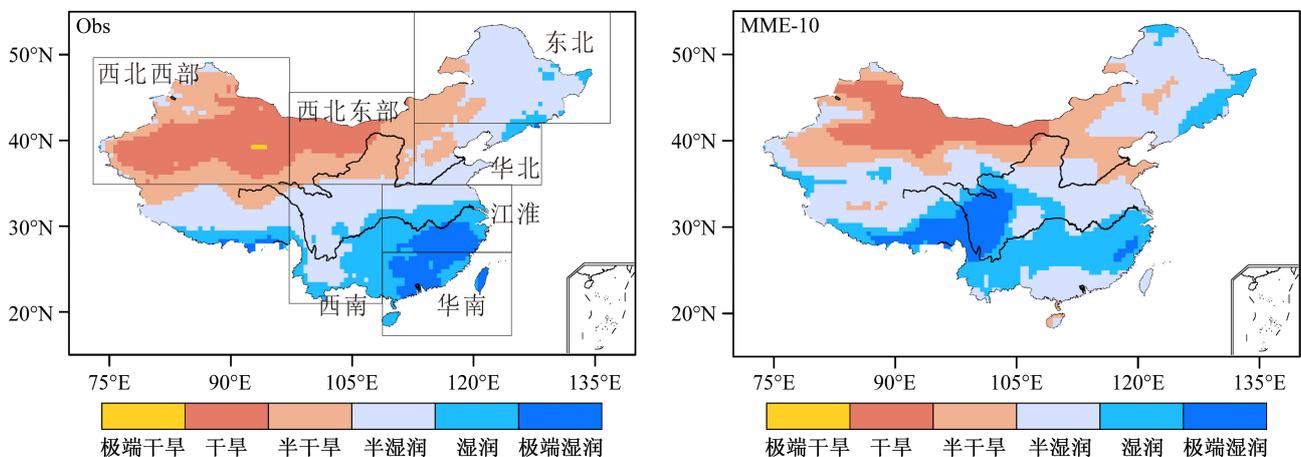


图2 1986~2005年观测和MME-10(10个最优模式的集合平均结果)的干湿区分布, 中国7个子区域范围表示在左图中

Fig. 2 The geographical distribution of division of dry and wet regions in China during 1986–2005 from the observations and MME-10 (ensemble average of 10 optimal models), the seven subregions of China show in left-hand chart

干而且程度逐渐增强。

由以上分析, SPEI 显示未来中国区域有明显的变干趋势, 但区域间在变干的时间和季节上并不相同。当具体到某一地区的变干程度时, 我们需要把

干旱定量化。这里我们把干旱分为两类: 一类是短期干旱, 即当 SPEI 值连续 4~6 个月小于 -0.5 时记为发生一次短期干旱; 一类是长期干旱, 即 SPEI 值至少连续 12 个月小于 -0.5 时记为发生一次长期

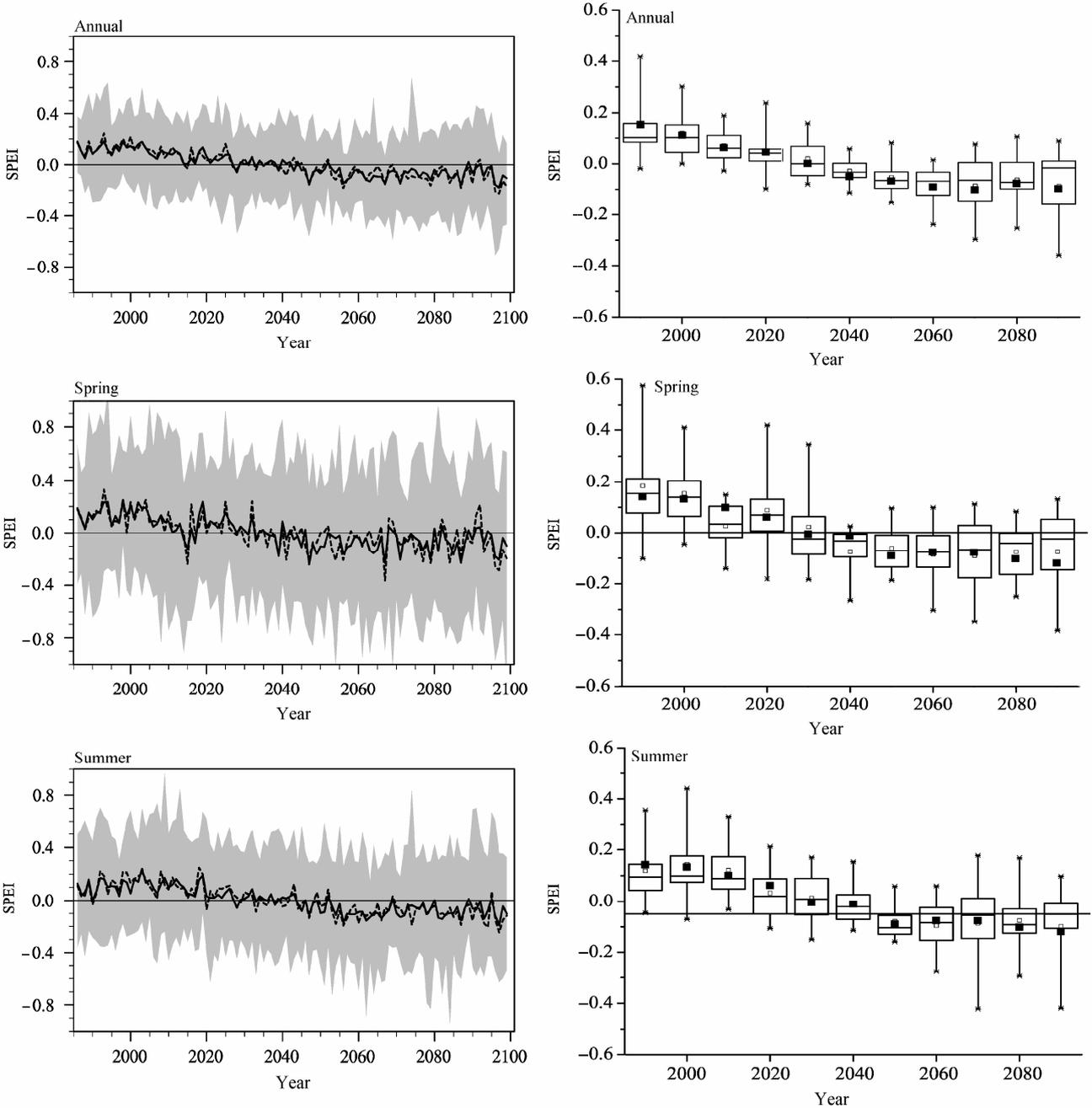


图 3 1986~2100 年中国区域年和季节平均 SPEI (标准化降水蒸散发指数) 的年度 (左列) 和 10 年 (右列) 变化。左列图中实线和虚线分别为 MME-21 和 MME-10 结果, 阴影区代表模式结果范围; 右列箱状图中方框代表所有模式模拟 SPEI 的内四分位距, 上下叉号分别代表模式最大和最小值, 空心点和叉号分别代表 MME-21 和 MME-10 结果

Fig. 3 The annual (left) and decadal (right) changes of the annual and seasonal mean SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) across the whole China during 1986–2100. The solid and dashed lines in left column figures represent results of MME-21(ensemble average of 21 equally-weighted models) and MME-10, and the shaded areas are the range of simulations; the box and cross in right column figures represent the inner quartile and the range (maximum and minimum values) of the set of models; the soft dots and cross represent MME-21 and MME-10, respectively; others are the same as Fig. 1

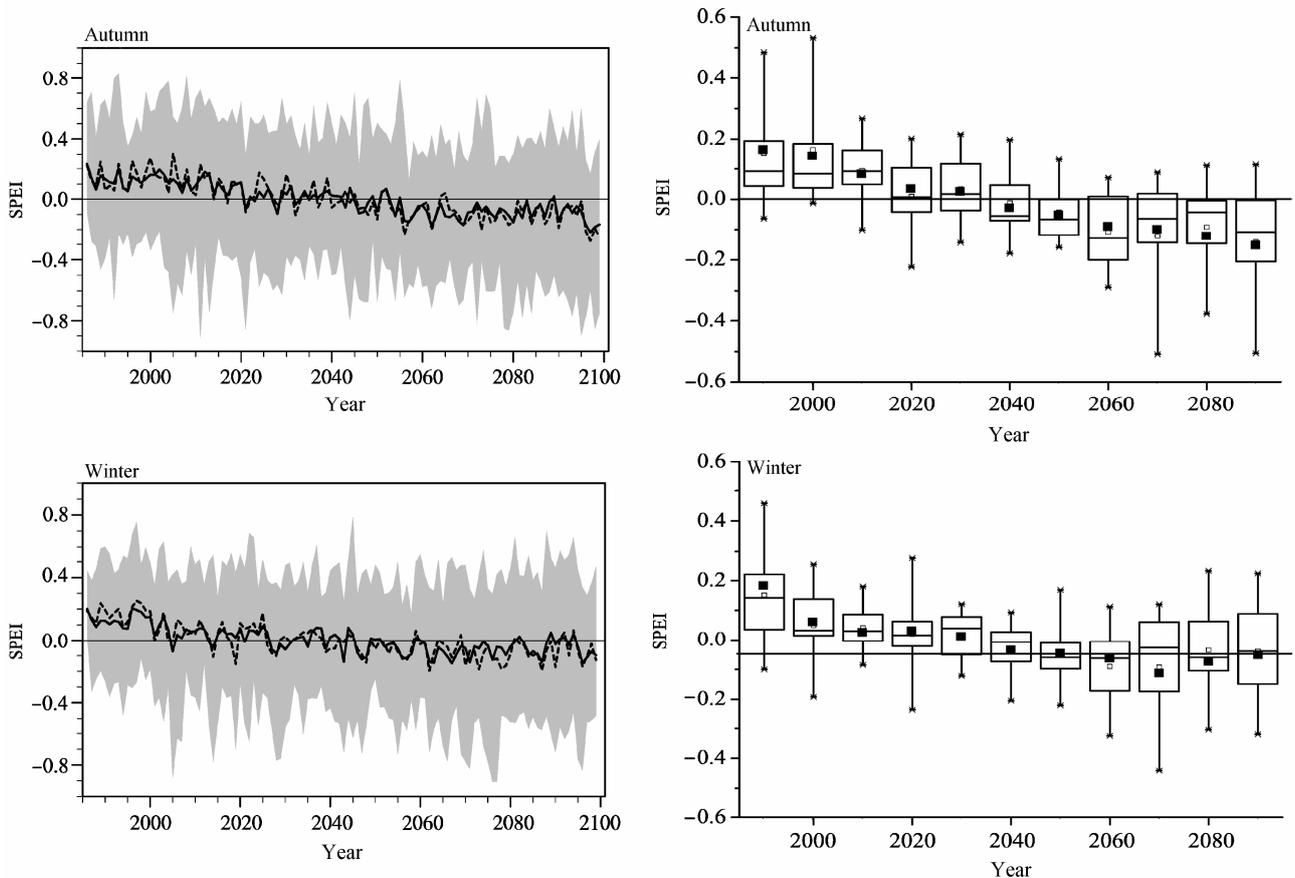


图3 (续)
Fig. 3 (Continued)

干旱。相对于 1986~2005 年参考时段, 短期干旱发生次数在中国许多地区都明显增加(图 5), 增加次数较多的地区主要位于华北东北部、内蒙古、新疆中南部、青藏高原和华南, 其中华北东北部在 2016~2035 年短期干旱的发生次数就已经增加了 5 次。到 21 世纪中期和末期, 短期干旱发生次数的增幅变大, 增加最明显的地区位于内蒙古中部和新疆南部。相对于许多地区短期干旱发生次数的大幅增加, 短期干旱减少的地区和幅度都较小, 减少的地区主要有东北西部、江淮和西南。不同于短期干旱, 未来长期干旱的变化幅度较小, 2016~2100 年长期干旱发生次数增加最明显的地区主要位于新疆中南部, 到 21 世纪末长期干旱发生次数约增加了 2 次, 其他如东北南部、华南、长江中游地区的长期干旱也有增加趋势, 但变化幅度较小。

考虑到模式间离散度较大, 同时中国各区域之间也存在较大的差异, 我们进一步利用内四分位距考察了不同区域两类干旱发生次数的变化特征。相

对于 1986~2005 年参考时段, 不管是短期干旱还是长期干旱, 中国及其子区域干旱发生次数均表现为增加(图 6)。在短期干旱方面, 西北东部和华南的增加最明显, 与之相伴的模式间离散度较大并在 2081~2100 年达到最大; 在东北和西南地区, 短期干旱发生次数的变化最不明显。对于长期干旱而言, 以西北西部和华南的增加最为明显, 对应的模式间离散度在 2081~2100 年达到最大。另外需要说明的是, 相对于 2016~2035 年和 2046~2065 年, 2081~2100 年各区域的干湿变化在模式间的离散度加大, 表明随着全球变暖加剧模式模拟的干湿变化差异性在加大。

4.2 土壤湿度未来变化

除了上述 SPEI 外, 文中也同时分析了土壤湿度变化, 以期增加中国干湿变化预估的可靠性。总的来说, 模式模拟的中国区域平均的土壤湿度及其离散度在各月间变化较小, 暖季较冷季稍大一些; 在区域尺度上, 东北、华北、西北西部和西北东部

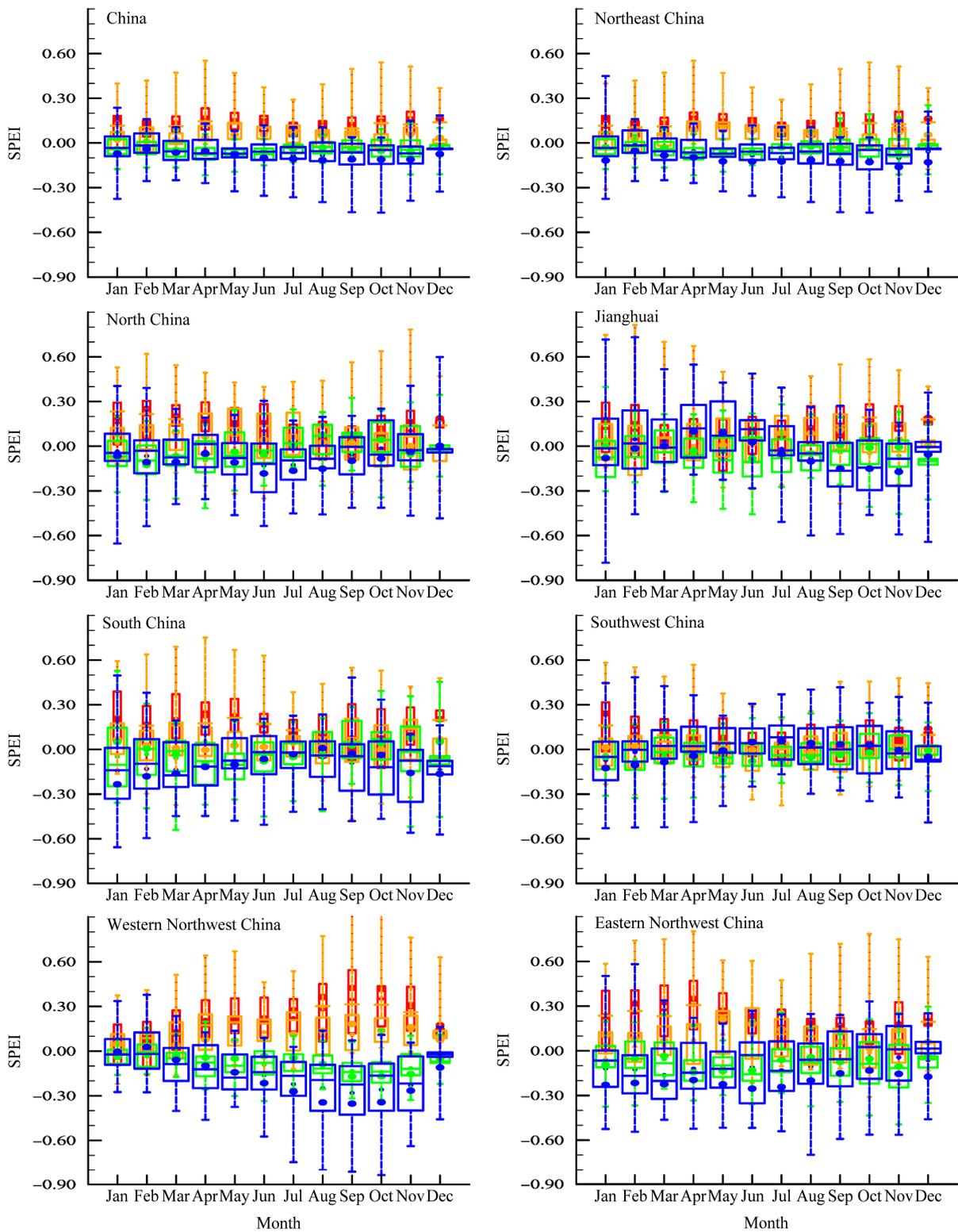


图4 1986~2100年4个时段1986~2005年(红色)、2016~2035年(橙色)、2046~2065年(绿色)、2081~2100年(蓝色)中国及其子区域SPEI月变化,箱状图中方框代表模式的内四分位距,上下端点分别代表最大和最小值,大小实心点分别代表MME-21和MME-10结果

Fig. 4 Mean seasonal cycle of SPEI for the whole China and its subdomains for the four periods including 1986~2005 (red), 2016~2035 (orange), 2046~2065 (green), and 2081~2100 (blue); the box and dendritic symbol represent the inner quartile and the range (maximum and minimum values) of the set of models; the large and small solid dots represent MME-21 and MME-10, respectively

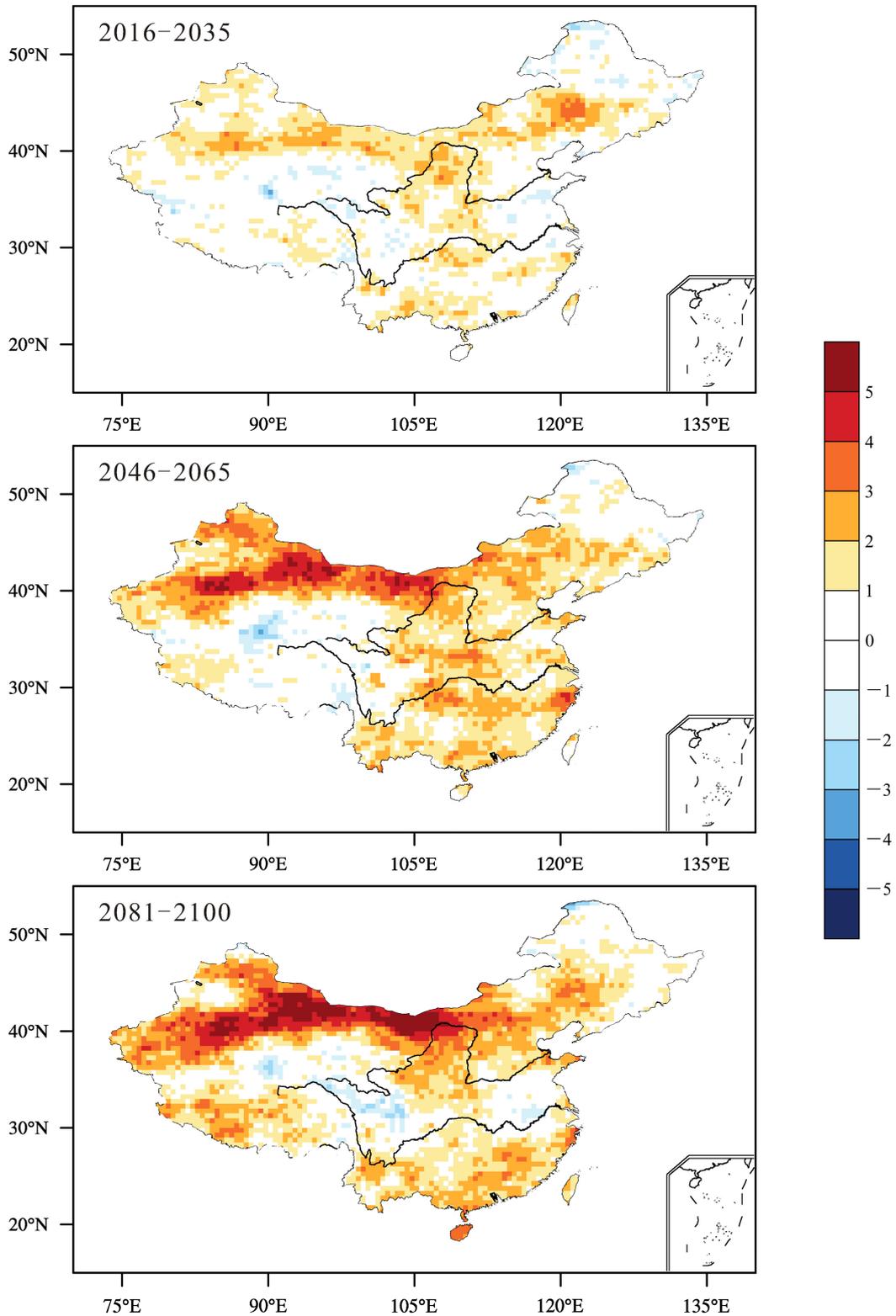


图5 相对于1986~2005年参考时段, MME-10模拟的2016~2035年、2046~2065年和2081~2100年短期干旱(SPEI连续4~6个月小于-0.5)发生次数变化

Fig. 5 The MME-10 simulated geographical distribution of the differences for the short-term drought frequency during 2016-2035, 2046-2065, and 2081-2100 with respect to 1986-2005

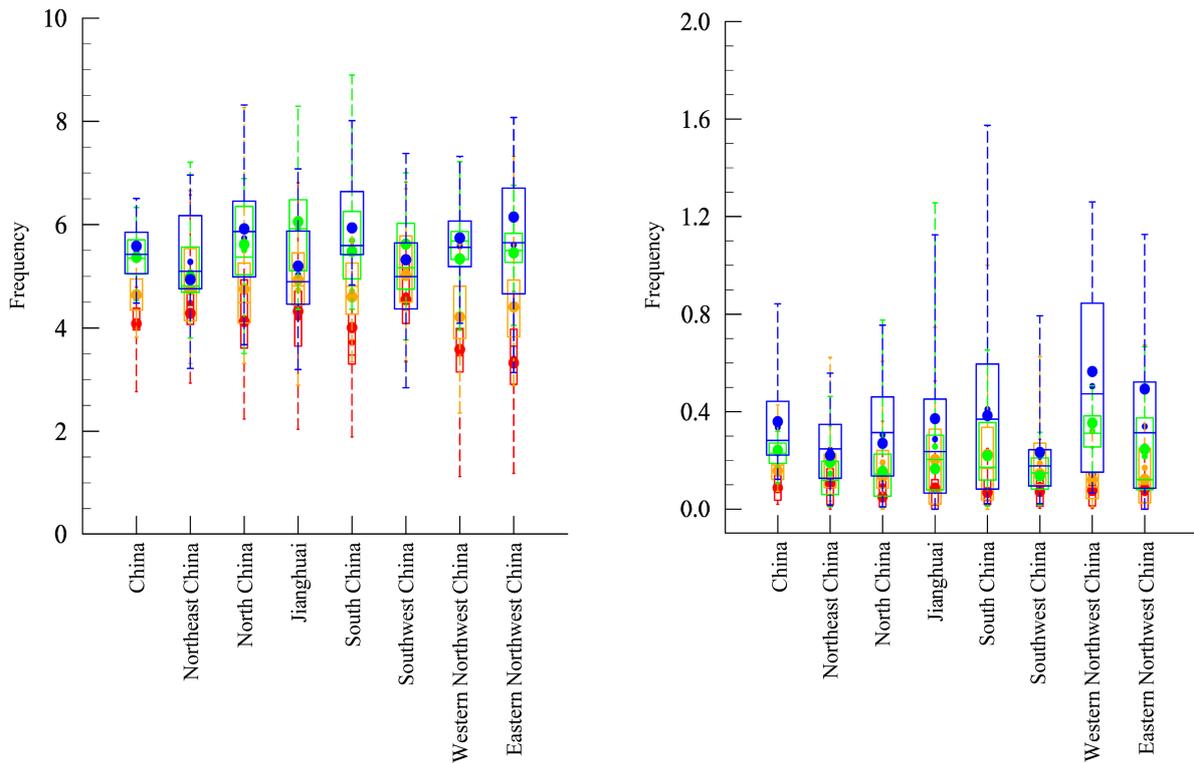


图 6 1986~2005 年 (红色)、2016~2035 年 (橙色)、2046~2065 年 (绿色)、2081~2100 年 (蓝色) 中国及其子区域短期干旱 (左, SPEI 连续 4~6 个月小于 -0.5) 和长期干旱 (右, SPEI 连续至少 12 个月小于 -0.5) 发生次数, 其他说明如图 4

Fig. 6 The frequencies of short- and long-term droughts during 1986-2005 (red), 2016-2035 (orange), 2041-2060 (green), 2081-2100 (blue) for the whole China and its subdomains, others are the same as Fig. 4

月平均土壤湿度少变, 但仍能看出东北和华北地区春季的土壤湿度最小, 而江淮、华南和西南地区则表现出一定的季节性, 其中华南和西南地区土壤湿度最大值出现在夏季 (图 7)。这与以往根据有限土壤观测资料所得的研究结果在定性上有一致性, 但也存在着差别, 例如模式模拟的西北土壤湿度最大值出现在 5~6 月份, 而站点观测资料中则出现在冬季 (张晓影, 2009)。

尽管气候模式之间因为陆面模式及其土壤深度和分层等方面的不同导致了标准化后的模式土壤湿度差异较大, 但仍不难看出在 RCP4.5 情景下中国区域土壤湿度发生了明显变化。就整体而言, 未来中国土壤湿度减小, 特别是在夏季。针对 7 个子区域来说, 土壤湿度未来变化分为两类: 一类是不明显的增加, 一类则是显著的下降。土壤湿度增加的地区主要位于华北和江淮, 且主要发生在春季; 土壤湿度明显减小的区域主要包括西北、东北、西南和华南, 土壤湿度季节性减小最明显的区域是华南, 主要以冬季和春季减少为主。

通过与前文所述的 SPEI 变化相比较, 可以发现华南和西北地区土壤湿度和 SPEI 均为减小趋势, 因此这些地区未来变干具有较高的可信度; 而在东北和西南地区, 土壤湿度和 SPEI 变化反向, 未来干湿变化的不确定性较大; 其他如江淮和华北地区, 土壤湿度和 SPEI 变化的季节性特征则比较明显。其中, 造成东北和西南地区土壤湿度和 SPEI 之间反向变化的原因可能有两个: 一是模式间陆面过程差异所引起, 二是因为东北和西南地区内部的干湿空间变率较大, 三是增温使冬季和春季的积雪融化, 从而带来了更多的地表水分, 而模式对此的模拟能力有别。

4.3 干旱风险评估及其影响

提前对未来可能发生各种极端事件制定适应对策, 能够在一定程度上降低极端事件造成的影响和损失, 减小各种灾害的风险。通常极端事件变化是和气象指标均值的变化相联系, 即均值发生显著性变化往往对应着某一类极端事件发生频率的增加或减少, 因此对气象指标均值变化进行显著性

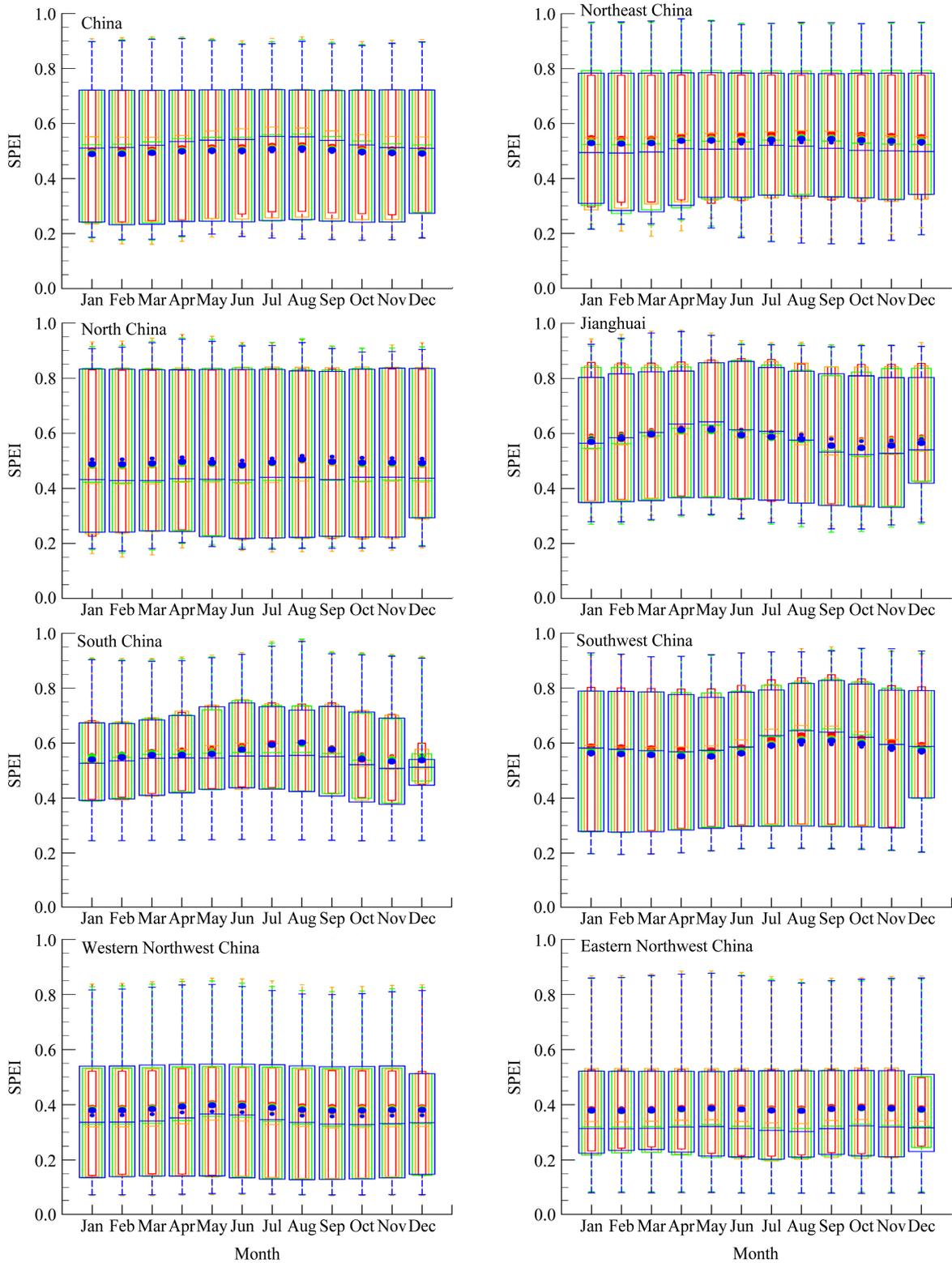


图 7 同图 4，但为土壤湿度

Fig. 7 Same as Fig. 4, but for soil moisture

检验，可以作为某一类极端气候事件变化的信号。
图 8 给出了 RCP4.5 情景下中国及其 7 个子区域年

平均 SPEI 和土壤湿度变化相对于 1986~2005 年均
值出现显著性差异的 *T* 检验结果，显示许多地区

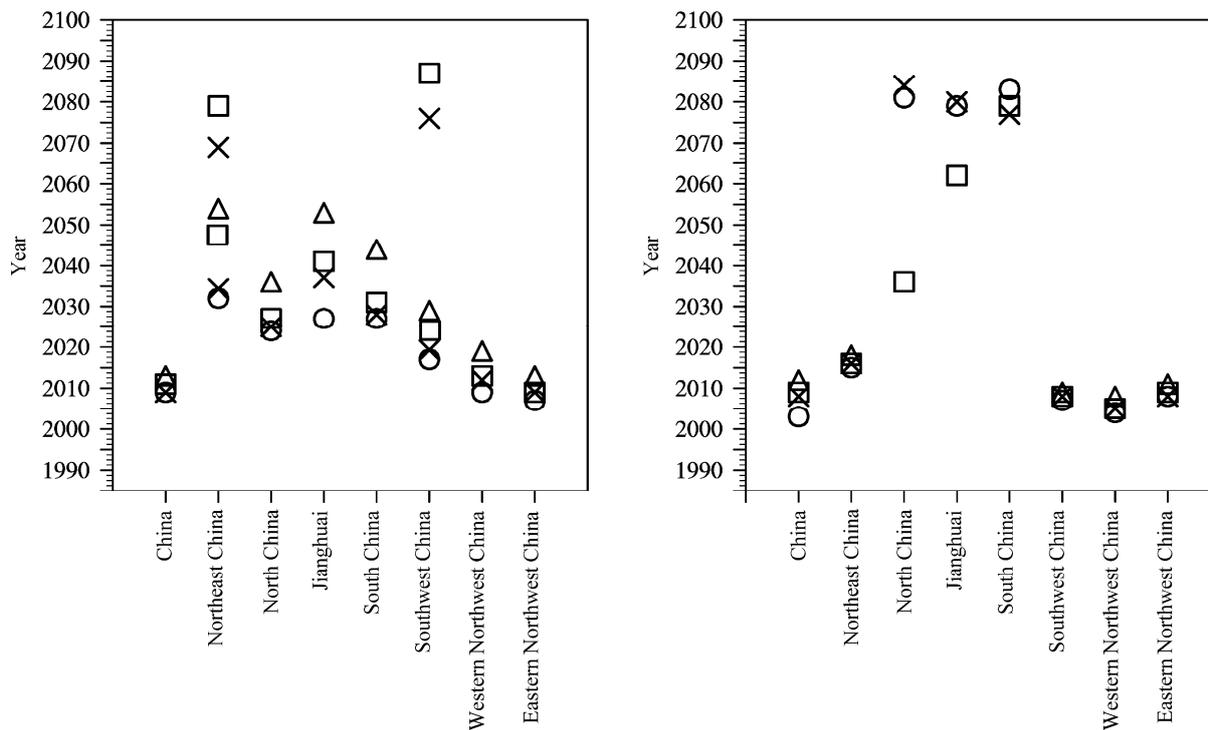


图 8 RCP4.5 情景下 MME-10 模拟的中国及其子区域年平均 SPEI (左) 和土壤湿度 (右) 相对于 1986~2005 时段的均值差异显著性检验 (空心圈、叉号、方框、三角分别代表 95%、98%、99%、99.9% 显著性水平, 图中四种标记对应的年份代表 20 年的中间年份)

Fig. 8 Years of statistically significant changes in annual mean SPEI (left) and soil moisture (right) between the period of 1986~2005 and the RCP4.5 future scenarios from MME-10 for the whole China and its subdomains, in which hollow circle, cross, box, and hollow triangle denote the 95%, 98%, 99%, 99.9% confidence levels, respectively, the corresponding years are the middle years of 20-year period

SPEI 和土壤湿度均值出现显著性差异的时间具有较好的一致性。就地区而言, 西北和西南出现的时间较早, 而江淮和华南则相对较晚; 在东北、江淮和华南地区, 二者的检验结果差异较大。这说明未来干旱化在西北地区发生较早, 华南干旱化发生的时间较晚, 而东北和西南地区未来的干湿变化则具有较大的不确定性, 且对应着相反的气候极端化趋向。

根据 RCP4.5 情景下 SPEI 和土壤湿度预估结果, 中国区域未来在整体上有变干倾向。短期和长期干旱都有所增加, 特别是短期干旱, 当干旱事件逐渐增加, 区域的干湿气候属性也将随之发生变化。如图 9 所示, 相对于 1986~2005 年参考时段的平均态, RCP4.5 情景下未来中国湿润、半湿润和半干旱区面积发生了明显变化。2016~2035 年, 大多数模式模拟的湿润区和极端干旱区面积减小, 半湿润和半干旱区面积增加。2046~2065 年, 干湿气候区面积变化与前一时期类似, 湿润区和极端干旱区面积减少, 半湿润和半干旱区面积增加, 但变

化幅度明显要大于前一时期。2081~2100 年, 干湿气候区面积变化不明显, 模式之间差异性较大, 多模式集合平均仍表现为湿润区面积减小, 半干旱区面积增加, 但与 21 世纪早期和中期时段相比, 这一时期干湿区面积变化的不确定性明显加大。就 MME-21 和 MME-10 而言, 2016~2100 年中国湿润区面积比 1986~2005 年减少了 1.5%~3.5%, 2016~2065 年这部分面积主要转变成了半湿润区, 而到 2081~2100 年则主要变成了半干旱区。这与以往区域气候模式及陆面模式的预估结果相似 (李明星和马柱国, 2012; Shi et al., 2012), 但也存在较大差异, 如 21 世纪末期全球模式预估的干湿变化趋势的不确定性明显增加。

5 结论和讨论

本文利用 21 个 CMIP5 模式结果, 在模式验证的基础上, 采用干旱指数和土壤湿度预估研究了 RCP4.5 情景下中国未来干湿变化。主要结论有: (1) 相对于 1986~2005 年参考时段, 21 世纪中国区域

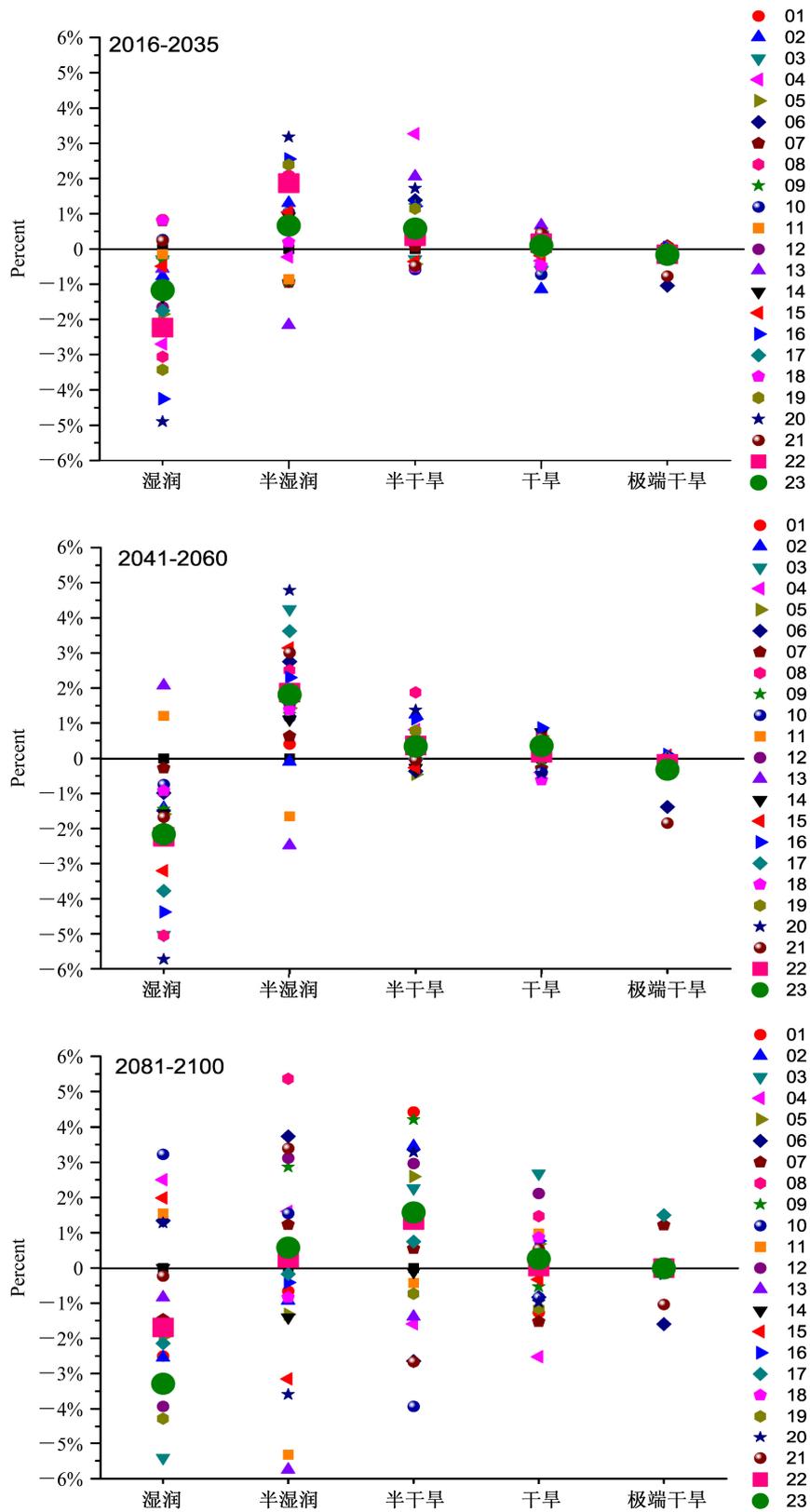


图9 相对于1986~2005年参考时段, 2016~2035年、2046~2065年和2081~2100年干湿气候区面积的百分比变化, 右侧序号对应于表1所列模式
Fig. 9 The change in the dry- and wet-region areas (units: %) during 2016~2035, 2046~2065 and 2081~2100 relative to 1986~2005, others are the same as Fig. 1

平均的 SPEI 减小, 对应干旱化趋势, 四季中以春季变干最为明显。在空间上, 西北和华南变干最强, 东北和西南则表现为弱的变湿。在季节上, 东北、华北和西北的变干主要发生在暖季, 而华南和西南则为明显的冷季变干。在干旱发生次数上, 短期和长期干旱未来都有增加, 前者增加较多的地区主要位于内蒙古、新疆中南部、青藏高原、东南和华南地区, 而后者未来变幅相对较小, 且变化主要集中在新疆中南部。(2) 在西北和华南地区, 土壤湿度和 SPEI 未来都有明显减小, 变干趋势一致; 而在东北和西南地区两者变化反向, 表明未来干湿变化有较大的不确定性。(3) 在定量上, 21 世纪中国湿润和半湿润区面积减小, 半干旱区面积增加。其中面积减小最明显的是湿润区, 2016~2100 年中国有 1.5%~3.5% 的国土面积将从湿润区转变成半湿润或者半干旱区。

最后需要说明的是, 以往的干湿气候变化预估结果在东北亚地区的一致性较差, 而东南亚地区未来的变干趋势在许多模式中均得到了体现, 后者可能是由于降水和潜在蒸散发变化所引起的地表可用水量减少所致 (Wang, 2005; Sheffield and Wood, 2008; 翟建青等, 2009; 许崇海等, 2010; Dai, 2012)。在定性上, 本文所得的中国干湿变化预估结果与之前的相关研究有一致性但也存有差别。例如, SPEI 和土壤湿度表明西北和华北变干, 而以往研究则指出未来这些地区有湿润化倾向 (许崇海等, 2010; Dai, 2012)。未来, 还有待于采用更多的全球气候模式、具有更好模拟能力的区域气候模式、优选的排放情景以及干旱指标进行集中分析, 以期更加合理地预估全球变暖背景下中国干湿变化, 为适应和应对气候变化提供参考。

参考文献 (References)

Dai A G. 2012. Increasing drought under global warming in observations and models [J]. *Nature Climate Change*, 3 (1): 52–59.

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: 1157–1167.

Frich P, Alexander L V, Della-Marta P, et al. 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century [J]. *Climate Research*, 19: 193–212.

Gao X, Giorgi F. 2008. Increased aridity in the Mediterranean region under

greenhouse gas forcing estimated from high resolution simulations with a regional climate model [J]. *Global and Planetary Change*, 62 (3–4): 195–209.

Gao X, Shi Y, Zhang D, et al. 2012. Uncertainties in monsoon precipitation projections over China: Results from two high resolution RCM simulations [J]. *Climate Research*, 52: 213–226.

IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* [M]. Solomon S, Qin D, Manning M, et al., Eds. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 996.

IPCC. 2013. *Climate Change 2013: Summary for Policymakers* [M]. Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al., Eds. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 35.

Jensen M E, Burman R D, Allen R G. 1990. *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements* [M]. New York, NY: American Society of Civil Engineers, 360pp.

姜大膀, 苏明峰, 魏荣庆, 等. 2009. 新疆气候的干湿变化及其趋势预估 [J]. *大气科学*, 33 (1): 90–98.

Jiang Dabang, Su Mingfeng, Wei Rongqing, et al. 2009. Variation and projection of drought and wet conditions in Xinjiang [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (1): 90–98.

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77 (3): 437–471.

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): 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 Science Bulletin*, 58: 531–544.

林而达, 许吟隆, 蒋金荷, 等. 2006. 气候变化国家评估报告 (II): 气候变化的影响与适应 [J]. *气候变化研究进展*, 2 (2): 51–56.

Lin Erda, Xu Yinlong, Jiang Jinhe, et al. 2006. National assessment report of climate change (II): Climate change impacts and adaptation [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 2 (2): 51–56.

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.

Milly P C D, Wetherald R T, Dunne K A, et al. 2002. Increasing risk of great floods in a changing climate [J]. *Nature*, 415 (6871): 514–517.

Monteith J L. 1965. Evaporation and environment [J]. *Symposium of the Society for Experimental Biology*, 19: 205–234.

Palmer W C. 1965. *Meteorological drought* [C]. Research Paper 45, U.S. Department of Commerce, Weather Bureau, Washington D.C., 58pp.

Sheffield J, Goteti G, Wood E F. 2006. Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling [J]. *J. Climate*, 19 (13): 3088–3111.

Sheffield J, Wood E F. 2008. Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations [J]. *Climate Dyn.*, 31 (1): 79–105.

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 CASE (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.
- 施晓晖, 徐祥德. 2006. 中国大陆冬夏季气候型年代际转折的区域结构特征 [J]. 科学通报, 51 (17): 2075–2084. Shi Xiaohui, Xu Xiangde. 2006. Regional characteristics of the interdecadal turning of winter/summer climate modes in Chinese mainland [J]. Chinese Science Bulletin, 52 (1): 101–112.
- Shi Y, Gao X, Wu J. 2012. Projected changes in Köppen climate types in the 21st century over China [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 5 (6): 495–498.
- 苏明峰, 王会军. 2006. 中国气候干湿变率与 ENSO 的关系及其稳定性 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 36 (10): 951–958. Su Mingfeng, Wang Huijun. 2007. Relationship and its instability of ENSO–Chinese variations in droughts and wet spells [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 50 (1): 145–152.
- Taylor K E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. J. Geophys. Res., 106 (D7): 7183–7192.
- Thornthwaite C W. 1948. An approach toward a rational classification of climate [J]. Geographical Review, 38 (1): 55–94.
- Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I, et al. 2010a. A new global 0.5° gridded dataset (1901–2006) of a multiscalar drought index: Comparison with current drought index datasets based on the Palmer drought severity index [J]. Journal of Hydrometeorology, 11 (4): 1033–1043.
- Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. 2010b. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index [J]. J. Climate, 23 (7): 1696–1718.
- Vicente-Serrano S M, López-Moreno J I, Lorenzo-Lacruz J, et al. 2011. The NAO impact on droughts in the Mediterranean region [J]. Advances in Global Change Research, 46: 23–40.
- Wang G L. 2005. Agricultural drought in a future climate: Results from 15 global climate models participating in the IPCC 4th assessment [J]. Climate Dyn., 25 (7–8): 739–753.
- 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 (增刊): 91–99. Wei Jie, Tao Shiyun, Zhang Qingyun. 2003. Analysis of drought in northern China based on the Palmer severity drought index [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58 (supplement): 91–99.
- Wetherald R T, Manabe S. 1999. Detectability of summer dryness caused by greenhouse warming [J]. Climatic Change, 43 (3): 495–511.
- Wetherald R T, Manabe S. 2002. Simulation of hydrologic changes associated with global warming [J]. J. Geophys. Res., 107 (D19): ACL7-1–ACL7-15.
- Wilhite D A, Svoboda M D, Hayes M J. 2007. Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness [J]. Water Resources Management, 21 (5): 763–774.
- 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 variation in China by multi-model ensemble [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 32 (5): 867–874.
- Yu E T, Wang H J, Sun J Q. 2010. A quick report on a dynamical downscaling simulation over China using the nested model [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 3 (6): 325–329.
- 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. Pattern of dryness/wetness in China before 2050 projected by the ECHAM5 model [J]. Advance in Climate Change Research (in Chinese), 5 (4): 220–225.
- 翟盘茂, 邹旭恺. 2005. 1951~2003 年中国气温和降水变化及其对干旱的影响 [J]. 气候变化研究进展, 1 (1): 16–18. Zhai Panmao, Zou Xukai. 2005. Changes in temperature and precipitation and their impacts on drought in China during 1951–2003 [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 1 (1): 16–18.
- 张晓影. 2009. 中国区域土壤湿度特征分析及评估 [D]. 中国地质大学硕士学位论文. Zhang Xiaoying. 2009. Analysis and assessment of soil moisture in China based on the situ observation data [D]. M. S. thesis (in Chinese), China University of Geosciences.
- 周晓东, 朱启疆, 孙中平, 等. 2002. 中国荒漠化气候类型划分方法的初步探讨 [J]. 自然灾害学报, 11 (2): 125–131. Zhou Xiaodong, Zhu Qijiang, Sun Zhongping, et al. 2002. Preliminary study on regionalization desertification climate in China [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 11 (2): 125–131.