

吴美双, 黎伟标, 许吟隆, 等. 2018. 华南地区 21 世纪中后期旱涝变化的情景分析 [J]. 气候与环境研究, 23 (2): 241–251. Wu Meishuang, Li Weibiao, Xu Yinlong, et al. 2018. Scenario analysis of drought/flood change in the middle and late 21st century in South China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (2): 241–251, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17018.

华南地区 21 世纪中后期旱涝变化的情景分析

吴美双¹ 黎伟标² 许吟隆³ 李秀珍² 张敏¹

¹ 国家海洋局南海预报中心, 广州 510000

² 中山大学大气科学学院, 广州 510275

³ 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081

摘要 利用区域气候模式 PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies), 首先选取若干旱涝指标, 在验证模式对各旱涝指标的模拟能力的基础上, 分析 SRES A1B (Special Report on Emissions Scenarios A1B) 情景下华南地区 21 世纪中后期 (2040~2099 年) 各旱涝指标相对气候基准时段 (1961~1990 年) 的变化情况, 进而初步探讨华南地区未来旱涝情况的可能变化。研究表明, PRECIS 能够较好地模拟出所选取的旱涝指标的年际变化和月变化特征; 在 SRES A1B 情景下, 21 世纪中后期华南地区极端强降水事件的发生频率和强度都将显著增加, 且强降水期将有所延长, 从而使得华南地区出现雨涝灾害的可能性大大增加。与此同时, 华南地区未来在春季、夏季和秋季发生气象干旱的可能性变化不显著, 但在冬季发生气象干旱的可能性却将增加, 尤其是在 21 世纪后 30 年冬季出现气象干旱的可能性更高。

关键词 华南地区 PRECIS 模式 旱涝变化 情景分析

文章编号 1006-9585 (2018) 02-0241-11

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17018

Scenario Analysis of Drought/Flood Change in the Middle and Late 21st Century in South China

WU Meishuang¹, LI Weibiao², XU Yinlong³, LI Xiuzhen², and ZHANG Min¹

¹ South China Sea Forecast Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510000

² School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275

³ Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081

Abstract This paper exploits the regional climate mode PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies) to analyze the changes of the drought and flood indices in South China in the middle and later period of the 21st century under the SRES A1B (Special Report on Emissions Scenarios A1B) scenario compared with the climatic reference period (1961-1990). Plenty of drought and flood indices are utilized first to verify the capacity of PRECIS for drought and flood indices simulation. Possible changes of the future drought and flood conditions in South China are preliminarily discussed. Results indicate that PRECIS can well simulate yearly and monthly changing features of the selected drought and flood indices. Under the SRES A1B scenario, the frequency and intensity of extreme precipitation event in South China in the

收稿日期 2017-02-13; 网络预出版日期 2017-07-07

作者简介 吴美双, 1985 年出生, 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事气候情景分析。E-mail: wumsh2009@qq.com

资助项目 国家海洋局南海分局海洋科学技术局长基金 1716, 国家自然科学基金面上项目 41675043、41375050, 广东省水利科技创新项目 2016-02

Funded by Director Foundation for Marine Science and Technology by State Oceanic Administration, South China Sea Branch (Grant 1716), National Natural Science Foundation of China (Grants 41675043 and 41375050), the Water Resource Science and Technology Innovation Program of Guangdong Province (Grant 2016-02)

middle and later period of the 21st century will increase dramatically, and the period of precipitation extreme will increase too, thereby the possibility of flood disaster occurrence will grow to a large extent. Meanwhile, possible changes of meteorological drought in spring, summer and autumn in South China is not obvious, but in winter the possibility will rise, especially in the winters of the last thirty years of the 21st century, the possibility will be higher.

Keywords South China area, PRECIS model, Drought/Flood Change, Scenario analysis

1 引言

IPCC 第 5 次评估报告指出, 1880~2012 年, 全球平均地上气温上升了 0.65~1.06 °C, 最近 30 年, 每 10 年的温度都高于 1850 年以后的任何一个 10 年。受气候变暖的影响, 全球受干旱影响的地区增加的可能性较高, 同时强降水事件发生频率也将有所增加, 大雨发生频率增加“在中纬度与热带湿润地区, 可能性非常高”(IPCC, 2013)。伴随全球气候变化, 自 1951 年以来中国大陆地区与降水有关的极端气候事件频率和强度发生了一定变化, 但这种变化存在明显的区域差异和季节差异。例如, 1951~1995 年期间全国平均 1 d 和 3 d 最大降水量没有出现明显的变化, 但华北地区趋于减少, 而西北西部地区趋于增加(翟盘茂等, 1999)。我国西部大部分地区强降水频数和降水量有比较明显的增多(Zhai et al., 2005)。长江及长江以南地区年降水量和极端降水量趋于增加, 极端降水值和降水事件强度有所加强, 江淮流域暴雨洪涝时间发生频率增加(秦大河等, 2005; 杨宏青等, 2005; 苏布达等, 2006, 2007; 邹用昌等, 2009)。我国多数地区秋季极端强降水减少, 冬季一般增多, 夏季南方和西部增多, 而北方减少(Wang and Yan, 2009)。华南地区夏季的雨涝范围在不断扩大, 尤其是 1990 年代以来, 雨涝范围扩大的趋势更加明显(王志伟等, 2005); 华南地区在 1991 年出现了转湿突变, 大暴雨事件增多(钱维宏等, 2007)。另外, 1951 年以来, 中国干旱化面积总体上趋于增加(翟盘茂和邹旭恺, 2005)。近 60 年来, 我国气象干旱面积增加主要出现在北方地区, 其中松花江流域、辽河流域、海河流域增加趋势显著, 海河流域干旱化最为突出, 南方大多数的江河流域气象干旱面积的变化趋势不明显, 只有西南诸河流域有显著的减少趋势(邹旭恺等, 2010)。

干旱与洪涝是我国最主要的自然灾害, 旱涝灾害的频发不仅会给国民经济和粮食生产带来巨大

损失, 同时也严重威胁人民群众的生命和财产安全。因此, 对未来旱涝格局变化的研究显得格外重要。目前国内学者们在这方面的研究, 主要是依靠各种气候模式并基于未来温室气体排放情景下进行模拟分析。例如, 翟建青等(2011)利用全球气候模式 ECHAM5/MPI-OM(由德国马普气象研究所研发的大气海洋环流模式)分析了中国未来近 40 年在 A2、A1B 和 B1 3 种排放情景下旱涝格局的演变, 结果表明, 过去 40 年来中国有一条由东北向西南延伸的干旱趋势带, A2 情景下, 这条干旱带将持续存在, A1B 情景下, 贯穿中国中部及南部沿海区域呈湿润化趋势, B1 情景下, 中国东部将出现“北涝南旱”的旱涝格局。江志红等(2009)则利用 7 个 IPCC AR4 (Fourth Assessment Report) 模式对中国区域未来不同排放情景下极端降水事件变化进行了预估, 结果表明中国地区 21 世纪与降水有关的事件都有趋于极端化的趋势, 极端降水强度可能增强, 干旱也将加重, 且变化幅度与排放强度成正比。这和 Gao et al.(2002)、Kitoh et al.(2005)的结果较为一致。许吟隆等(2005)、Zhang et al.(2006)分析表明在 B2 情景下, 21 世纪末中国地区平均日降水量大于 40 mm 的发生频率将明显上升, 中国大部分地区的极端降水事件将增加。莫伟强等(2007)分析表明, 在 A2 和 B2 情景下 2071~2100 年华南地区极端降水的发生频率、降水量和强度都将有所增加。

目前国内外关于气候模式对未来极端降水事件变化的情景分析已有比较完善的研究, 但对于单独的华南地区而言却只有少量的模拟研究。虽然莫伟强等(2007)已对华南地区极端降水事件进行了情景分析, 但分析只局限于 21 世纪末 30 年, 且其更侧重于对强降水事件的研究, 而没有关注干旱事件的可能变化。华南地区作为中国重要的人口分布区和粮食生产区, 加强对华南地区未来旱涝变化的情景分析对于保障该地区的经济发展和粮食生产有着重要的现实意义。因此, 本文将采用区域气候模式 PRECIS (Providing Regional Climates for

Impacts Studies), 在利用 1962~2001 年 40 年的 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 再分析数据验证 PRECIS 模拟能力的基础上, 基于 SRES A1B 情景下, 对华南地区 21 世纪中后期 2040~2099 年旱涝情况的可能变化进行初步探讨。

2 数据与分析方法

本文使用的区域气候模式 PRECIS 是英国 Hadley 气候预测中心基于 GCM-HadCM3 发展而来, 是一个单向嵌套的静力平衡模式, 由全球气候模式 HadAM3P 为其提供初始场和边界场, 其水平分辨率在旋转坐标下为 0.44° (纬度) $\times 0.44^\circ$ (经度), 在中纬度地区水平格点间距约为 50 km, 积分时间步长为 5 min, 垂直方向采用 σ 坐标, 分为 19 层, 最上层为 0.5 hPa, 水平方向计算应用 Arakawa B 网格, 应用水平扩散项控制非线性不稳定。关于 PRECIS 物理过程的详细介绍可参考文献 Jones et al. (2004)。在本文中, 首先, 将由 ECMWF 再分析资料 ERA-40 作为初始场和边界场去驱动 PRECIS 得到 1962~2001 年的 40 年逐日降水资料, 将其与观测资料进行比较从而验证模式的模拟能力。本文选取由 Xie et al. (2007) 发展的一套高分辨率格点 0.5° (纬度) $\times 0.5^\circ$ (经度) 的 1962~2001 年逐日降水资料作为观测实况资料。其次, 将全球气候模式 HadAM3P 在 A1B 情景下的模拟结果去驱动 PRECIS, 得到气候基准时段(即 1961~1990 年) 和 2040~2099 年逐日降水的模拟数据。这里提到的 SRES A1B 情景是指《IPCC 排放情景特别报告》中所描述的温室气体中等排放情景, 它代表了各种能源之间的平衡利用 (IPCC, 2007)。

要分析旱涝情况, 首先需选择衡量旱涝的指标。以往学者们多把降水距平百分率、标准化降水指数和 Z 指数等作为旱涝指标 (张尚印等, 1998; 袁文平和周广胜, 2004; 牛佳田等, 2011), 考虑到极端降水事件更容易导致雨涝和干旱的发生, 因此本文尝试选取一些极端降水指标来衡量旱涝灾害发生的可能性。极端降水的定义参考了目前通用的极端气候事件的定义方法 (Frich et al., 2002), 其中, 极端降水日数和最大连续 5 d 降水量分别体现了强降水的频数和强度特征, 本文中选取其作为雨涝的指标; 降水量是我国干旱变化的最主要因素

(翟盘茂和邹旭恺, 2005), 最大连续干日数可以在一定程度上反映潜在干旱的趋势, 本文将其选做气象干旱的指标 (各指标定义见表 1)。

表 1 本文所选取的极端降水指标及其定义

Table 1 The selected extreme precipitation indices and definition in this paper

指标	定义
极端降水日数	将每年逐日 (日降水量大于或等于 1.0 mm) 降水量按升序排列, 第 99 个百分位值的多年平均值定义为极端降水的阈值, 当某日降水量超过此极端阈值时, 称之为一个极端降水日数。
最大连续 5 d 降水量	连续 5 d 降水量的最大值
最大连续干日数	最大的连续日降水量小于 1.0 mm 的日数

在本文中, 为检验未来不同时段相对气候基准时段的变化是否稳定, 对各时段之间的均值采用 t 检验方法来进行显著性检验 (魏凤英, 2009); 另外, 对相关系数的显著性检验也是采用 t 检验方法。

3 模式验证

在对华南地区未来旱涝变化进行情景分析之前, 非常有必要验证模式对所选取的极端降水指标在华南地区的模拟能力。在本节中将分别验证模式对极端降水日数、最大连续 5 d 降水量和最大连续干日数的年际变化以及月变化分布特征的模拟能力。

为了便于分析, 分别选取了华南地区 (包括广东、广西、福建和海南四省) 267 个模式格点及与其最为接近的 267 个观测资料格点来进行比较验证 (格点分布见图 1)。

图 2 给出了模式和观测的 1962~2001 年华南地区平均极端降水日数的年际变化比较情况, 可以看出模式能够比较好地模拟出春季 (3~5 月)、夏季 (6~8 月), 秋季 (9~11 月) 和冬季 (12 月至次年 2 月) 华南地区极端降水日数的年际波动特征, 只是模拟的年际波动比实况的略强一些, 但模拟结果与观测结果的相关系数均通过了显著性检验 (显著性水平 $\alpha=0.05$) (表 2)。模式对最大连续 5 d 降水量在各个季节的年际变化模拟效果很好 (图 3), 尤其是对冬季的模拟与观测非常接近, 相关系数达 0.84 (表 2)。另外, 模式还非常好地模拟出各季节最大连续干日数的年际波动特征 (图 4), 其中对春季和冬季的模拟与观测结果的相关系

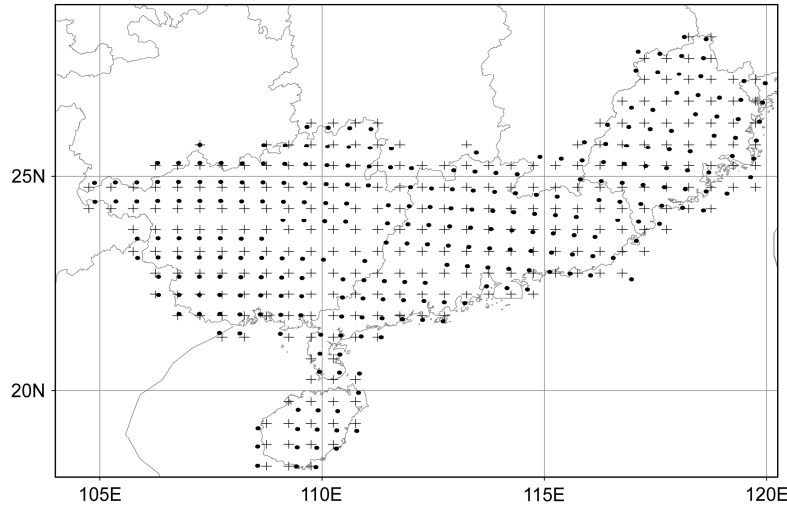


图1 华南地区观测资料格点与 PRECIS 模式格点分布 (+ 为观测格点, ● 为模式格点)

Fig. 1 Distributions of observation data grids in South China and PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies) model grids (+ refers to observation grid; ● refers to model grid)

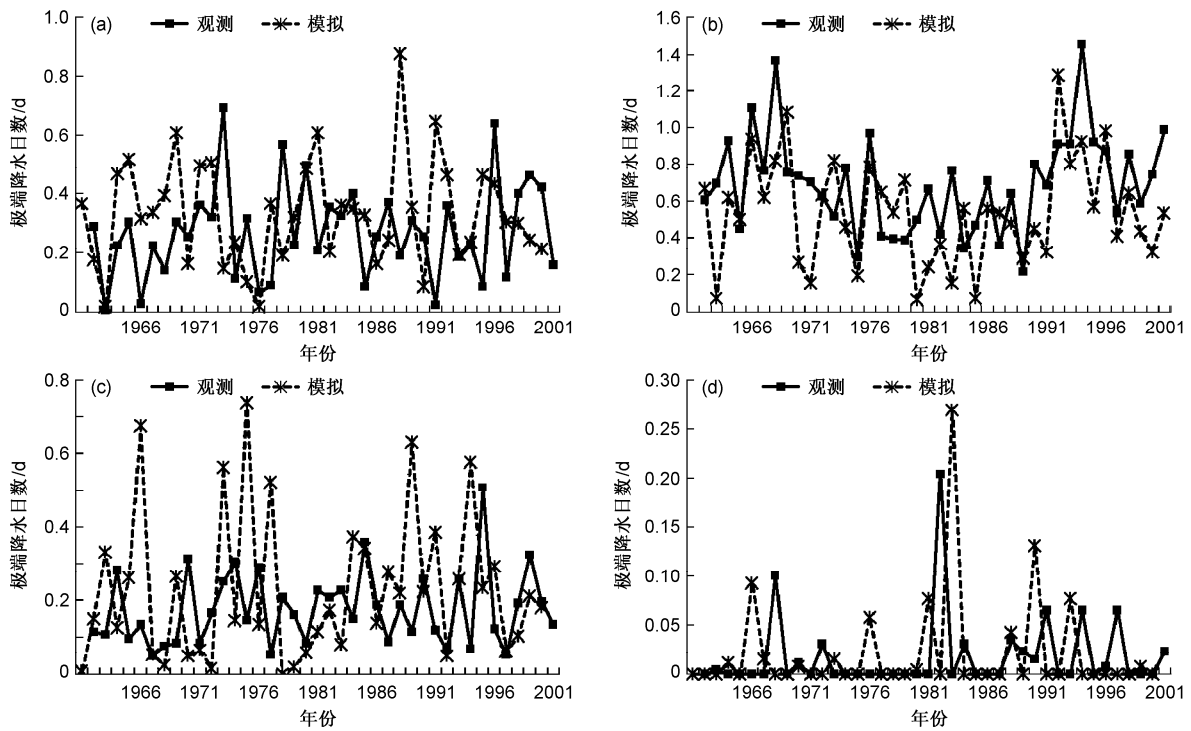


图2 1962~2001年华南地区平均极端降水日数的年际变化曲线: (a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

Fig. 2 Yearly changing curves of average days of extreme precipitation in South China during 1962~2001: (a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

数均超过了 0.8 (表 2)。从月变化上来看 (图 5、图 6、图 7), 模式非常好地模拟出了 3 个指标的月变化分布特征。其中, 模式很好地反映出了华南地区极端降水日数和最大连续 5 d 降水量由汛期(4~9 月)向非汛期(10 月到次年 3 月)减小的分布形

势, 最大值都出现在 6 月, 只是模式对 7 月的模拟较实况略偏小。而模式对最大连续干日数的月变化分布特征的模拟非常好, 表现为在非汛期较长, 在汛期较短, 正好反映了华南地区在非汛期相对干旱少雨的特征。

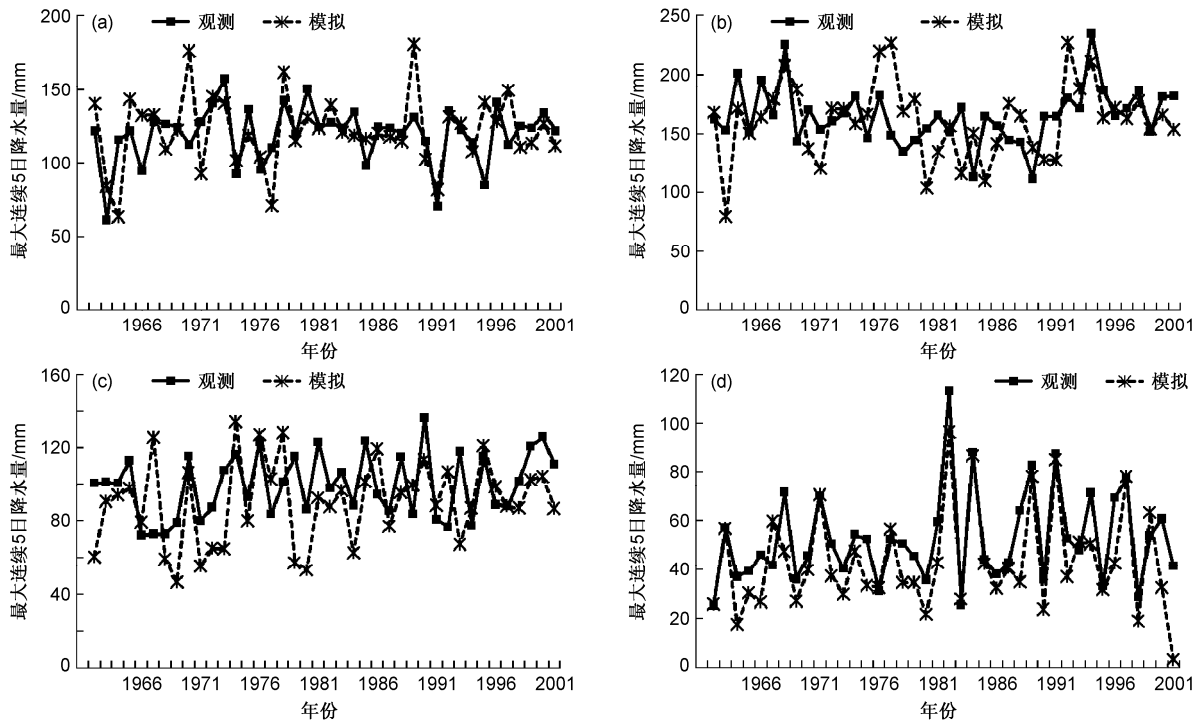


图 3 1962~2001 年华南地区平均最大连续 5 d 降水量的年际变化曲线：(a) 春季；(b) 夏季；(c) 秋季；(d) 冬季

Fig. 3 Yearly changing curves of average maximum precipitation in five consecutive days in South China during 1962-2001: (a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

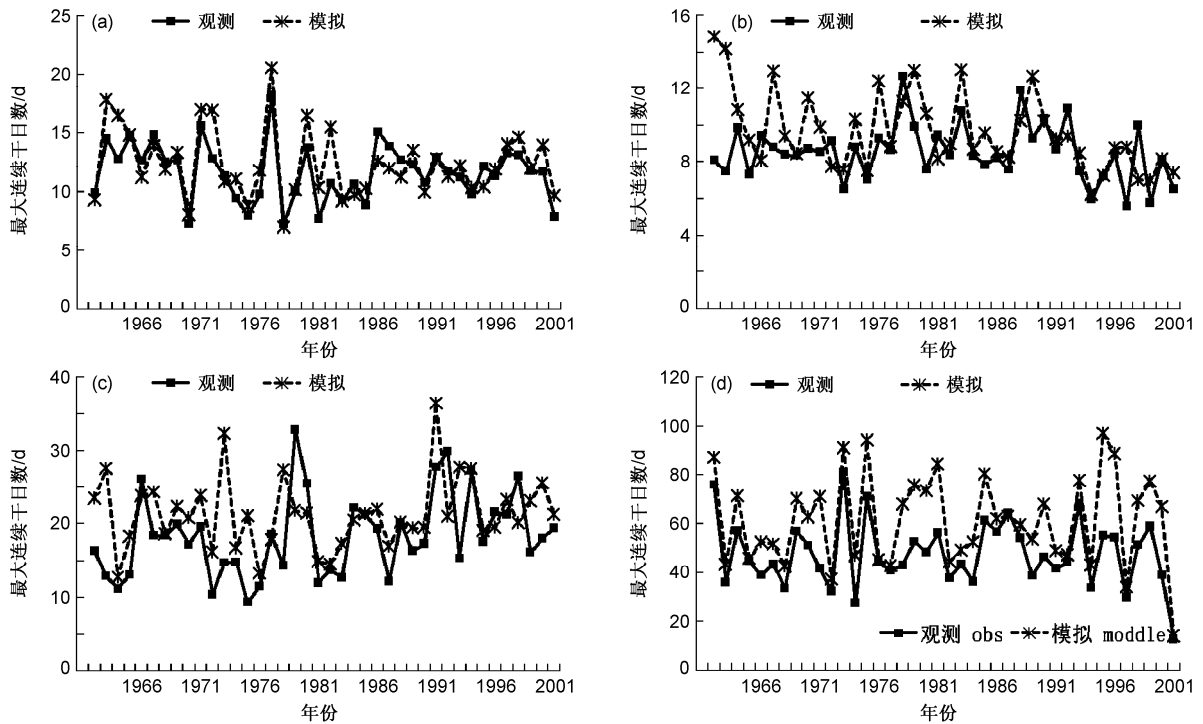


图 4 1962~2001 年华南地区平均最大连续干日数的年际变化曲线：(a) 春季；(b) 夏季；(c) 秋季；(d) 冬季

Fig. 4 Yearly changing curves of average maximum number of consecutive drought days in South China during 1962-2001: (a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

由此可见, PEESIS 对华南地区的极端降水日数、最大连续 5 d 降水量和最大连续干日数都有较好的模拟能力, 同时, 这 3 个指标能在一定程度上反映出华南地区的旱涝特征。因此, 可以利用 PEESIS 分析未来极端降水日数、最大连续 5 d 降水量和最大连续干日数的变化, 从而探索 SRES A1B 情景下华南地区 21 世纪中后期的旱涝变化情况。

表 2 1962~2001 年华南地区平均各极端降水指标的年际变化曲线的相关系数及显著性检验

Table 2 Relevant parameters and significance test of yearly changing curves of average extreme precipitation indices in South China during 1962–2001

	模拟与观测的相关系数		
	极端降水日数	最大连续 5 d 降水量	最大连续干日数
春季	0.32	0.41	0.82
夏季	0.47	0.34	0.40
秋季	0.36	0.35	0.38
冬季	0.35	0.84	0.85

注: 相关系数临界值 (显著性水平 $\alpha=0.05$) 为 0.31。

4 未来旱涝情况的可能变化

本节将通过分析 SRES A1B 情景下未来极端降水日数、最大连续 5 d 降水量以及最大连续干日数相对气候基准时段 (1961~1990 年) 的变化情况, 从而探索华南地区 21 世纪中后期旱涝情况的可能变化。在本节中把 2040~2099 年分成 2040~2069 年 (记为 A 时段) 和 2070~2099 年 (记为 B 时段) 两个时段来进行讨论。

4.1 雨涝的可能变化

极端降水日数和最大连续 5 d 降水量体现了强降水的频次和强度特征, 它们的变化在一定程度上体现了一个地区雨涝灾害发生概率的可能变化, 如果未来极端降水日数和最大连续 5 d 降水量增加了, 那么该地区发生雨涝灾害的概率将大大增加。

在分析极端降水日数和最大连续 5 d 降水量的变化前, 先来看看华南地区分别在 A 时段和 B 时段逐日平均降水量的发生频率相对气候基准时段的变化率。从图 8 来看, 未来日平均降水量少于 10 mm/d 的发生频率将减少, 而大于 10 mm/d 的发生频率将增加; 日平均降水量越大, 其发生频率增加得将越明显。可见, 未来华南地区强降水事件将明显增加, 且这种增加趋势 B 时段比 A 时段将更加突出, 如 B 时段日平均降水量为 135 mm/d 左右

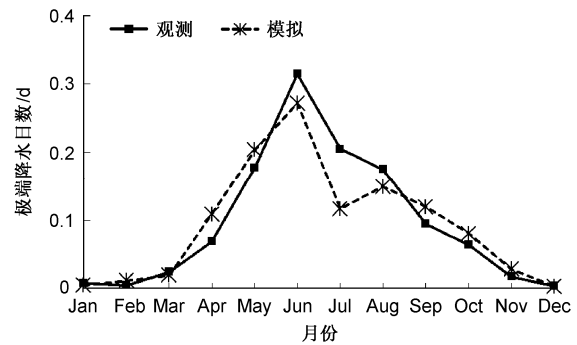


图 5 1962~2001 年华南地区平均极端降水日数的月变化曲线
Fig. 5 Monthly changing curves of the average days of extreme precipitation in South China during 1962–2001

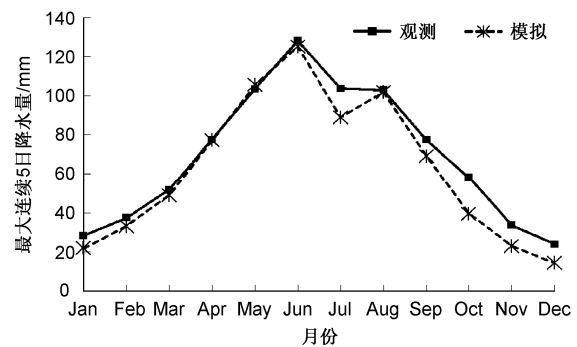


图 6 1962~2001 年华南地区平均最大连续 5 d 降水量的月变化曲线
Fig. 6 Monthly changing curves of average maximum precipitation in five consecutive days in South China during 1962–2001

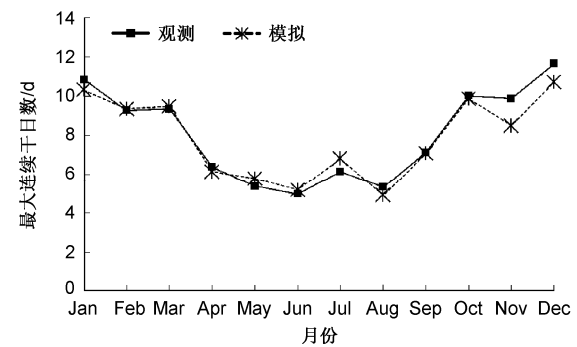


图 7 1962~2001 年华南地区平均最大连续干日数的月变化曲线
Fig. 7 Monthly changing curves of average maximum number of consecutive drought days in South China during 1962–2001

的强降水事件的发生频率相对气候基准时段的变化率甚至超过 300%。

接下来具体分析未来极端降水日数和最大连续 5 d 降水量的变化情况 (图 9a 和图 10a)。首先, 从年际分布来看, 未来华南地区的极端降水日数和最大连续 5 d 降水量相对气候基准时段的变化都具有明显的年际波动特征, 但从整体均值上看 (表 3), 两个指标分别在 A 时段和 B 时段的整体均值

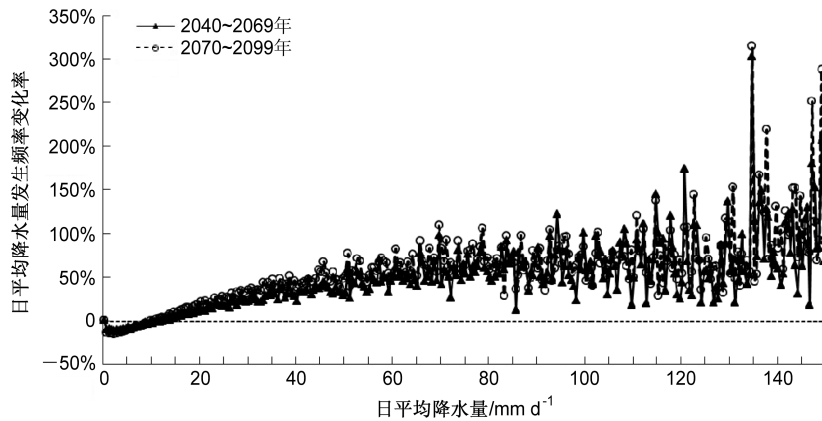


图 8 SRES A1B 情景下华南地区在不同时段逐日平均降水量发生频率相对气候基准时段的变化率分布
Fig. 8 Distributions of changing rate of daily average precipitation frequency compared with that in the climatic reference period in different periods in South China under SRES A1B (Special Report on Emissions Scenarios A1B) scenario

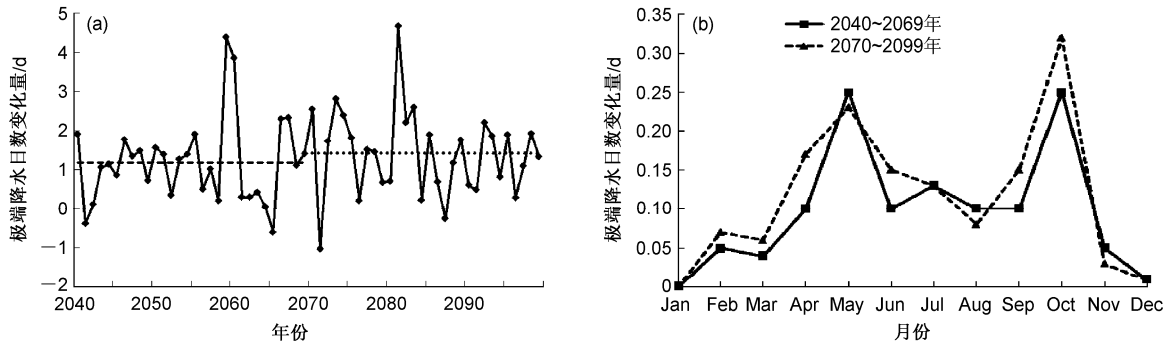


图 9 SRES A1B 情景下华南地区未来极端降水日数相对气候基准时段变化的 (a) 年际分布和 (b) 月分布
Fig. 9 (a) Yearly distribution and (b) monthly distribution of extreme precipitation days in the future compared with that in the climatic reference period in South China under SRES A1B scenario

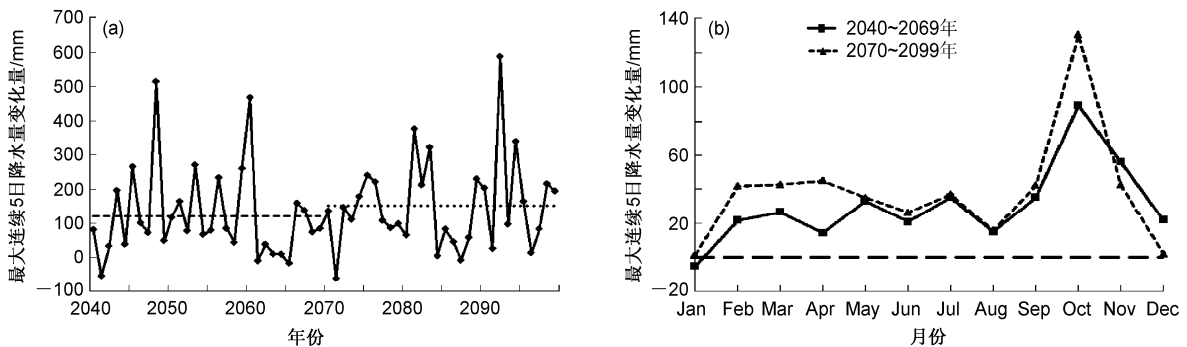


图 10 SRES A1B 情景下华南地区 2040~2099 年最大连续 5 d 降水量相对气候基准时段变化的 (a) 年际分布和 (b) 月分布
Fig. 10 (a)Yearly distribution and (b) monthly distribution of maximum precipitation in five consecutive days in the future compared with that in the climatic reference period in South China under SRES A1B scenario

相比较气候基准时段都是增加的,例如在气候基准时段极端降水日数平均每年只有 1.55 d,而在 A 时段和 B 时段将分别增加 1.18 d/a 和 1.41 d/a。为了判断 3 个时段极端降水日数和最大连续 5 d 降水量的均值差异是否显著,采用 t 检验的方法,分别计算了这两个指标在 3 个时段中任何两个时段做均

值显著性检验的统计值 t (表 4)。可见,极端降水日数和最大连续 5 d 降水量在 A 时段和 B 时段相对气候基准时段的均值存在显著差异,差异程度均通过显著水平 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,但是 A 时段和 B 时段的均值差异没有通过显著性检验,也就是说,未来 A 时段和 B 时段极端降水日数和最大

表 3 极端降水指数在不同时段的均值

Table 3 Averages of extreme precipitation indices during different periods

时段	极端降水日数/d a ⁻¹	最大连续 5 d 降水量/mm
气候基准时段	1.55	232.18
A 时段	2.73	353.49
B 时段	2.96	384.61

表 4 3 个时段极端降水指数之间进行均值差异显著性检验的统计值 *t*

Table 4 Statistical value *t* of mean difference test for extreme precipitation indices during the three different periods

	统计值 <i>t</i>	
	极端降水日数	最大连续 5 d 降水量
A 时段与气候基准时段	4.966	4.781
B 时段与气候基准时段	5.886	5.906
B 时段与 A 时段	0.804	0.912

注: $\alpha=0.05$ 检验标准值 $t_{\alpha}=2.002$ 。

连续 5 d 降水量相对气候基准时段将呈显著增加趋势, 但 B 时段相对 A 时段没有明显的变化趋势。

其次, 从月分布来看(图 9b 和图 10b), 未来两个时段里, 极端降水日数和最大连续 5 d 降水量在大多数月份相对气候基准时段都是增加的, 且 B 时段比 A 时段增加得更加明显。其中极端降水日数在 A 时段和 B 时段里的月分布都呈现出明显的双峰结构, 两个峰值分别出现在 5 月和 10 月。对比图 3 发现, 未来两个时段在极端降水日数多发的华南汛期(4~9 月)极端降水日数将继续增加, 而在 10 月极端降水日数也将明显增加。同时, 最大连续 5 d 降水量在 A 时段和 B 时段也在 10 月存在一个明显的峰值, 这与极端降水日数对应得很好, 可见, 未来 A 时段和 B 时段, 最大连续 5 d 降水量在 10 月的增加量的贡献主要来源于极端降水日数的增多, 从而使得强降水期将延长至 10 月。由此可见, 21 世纪中后期, 华南地区强降水期将会延长, 即从每年 4 月到 10 月都可能是极端强降水事件的高发时期。

总而言之, 在 SRES A1B 情景下, 21 世纪中后期, 华南地区的极端降水日数和最大连续 5 d 降水量将显著增加, 强降水事件的发生频率将增加, 同时强降水期将延长, 从而使得出现雨涝灾害的可能性大大增加。

4.2 干旱的可能变化

最大连续干日数在一定程度上反映了潜在干旱趋势, 如果未来最大连续干日数增加了, 则表明

未来发生气象干旱的可能性增加了。

从图 11 中可以看到, 2040~2099 年华南地区最大连续干日数在各个季节相对气候基准时段的变化都呈现出明显的年际波动特征。从整体均值上看(表 5), 在夏季和秋季, 未来两个时段 A 时段和 B 时段最大连续干日数相对气候基准时段都是减少的, 而在春季和冬季, 最大连续干日数相对气候基准时段却是相对增加的。其中, 在冬季, 最大连续干日数在气候基准时段均值为 23.2 d/season, A 时段均值将增加为 25.9 d/season, B 时段均值将进一步增加为 28.6 d。然而在计算最大连续干日数在 3 个时段中任何两个时段做均值显著性检验的统计值 *t*(表 6)后发现, 最大连续干日数在春季、夏季和秋季, A 时段相对气候基准时段的变化、B 时段相对气候基准时段的变化、B 时段相对 A 时段的变化都没有通过显著性检验(无论 $\alpha=0.05$ 或 $\alpha=0.10$ 均未通过); 最大连续干日数在冬季的 A 时段相对气候基准时段、B 时段相对 A 时段的变化也没通过显著性检验(无论 $\alpha=0.05$ 或 $\alpha=0.10$ 均未通过显著性检验), 而 B 时段相对气候基准时段的变化却通过了 $\alpha=0.10$ 的显著性检验。也就是说, 春、夏、秋 3 个季节最大连续干日数在未来两个时段相对气候基准时段的变化趋势均不显著, 且从 A 时段到 B 时段也没有明显的变化趋势; 冬季最大连续干日数虽然在 A 时段相对气候基准时段增加的趋势不显著, 但在 B 时段相对气候基准时段将有显著的增加趋

表 5 最大连续干日数在不同时段各季节的均值

Table 5 Averages of maximum number of consecutive drought days during different periods

时段	最大连续干日数			
	春季	夏季	秋季	冬季
气候基准时段	10.99	9.04	27.00	23.2
A 时段	12.11	8.92	25.55	25.9
B 时段	11.05	8.77	24.29	28.6

表 6 3 个时段最大连续干日数之间进行均值差异显著性检验的统计值 *t* 和检验标准值 t_{α}

Table 6 Statistical value *t* and test standard value t_{α} of mean difference test for maximum number of consecutive drought days during three different periods

时段	统计值 <i>t</i>			
	春季	夏季	秋季	冬季
A 时段与气候基准时段	1.245	0.223	0.665	1.191
B 时段与气候基准时段	0.081	0.564	1.278	1.799
B 时段与 A 时段	1.245	0.316	0.564	0.897

注: $\alpha=0.05$ 检验标准值 $t_{\alpha}=2.002$; $\alpha=0.10$ 检验标准值 $t_{\alpha}=1.672$ 。

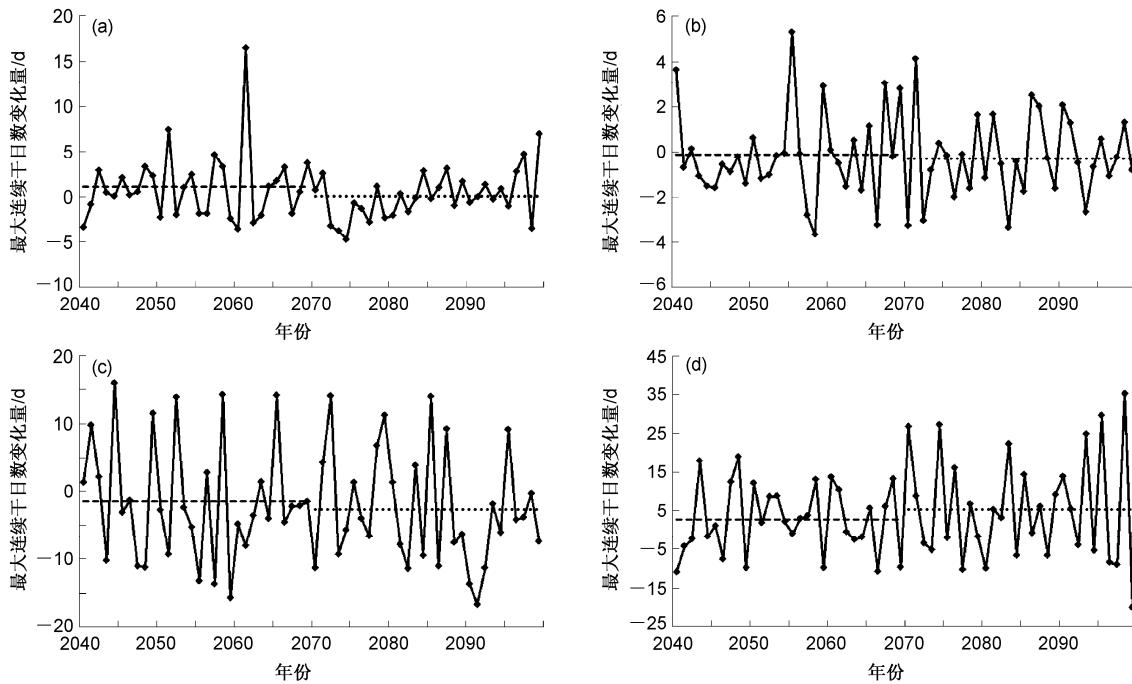


图 11 SRES A1B 情景下华南地区 2040~2099 年最大连续干日数相对气候基准时段变化的年际分布：(a) 春季；(b) 夏季；(c) 秋季；(d) 冬季
Fig. 11 Yearly distributions of changes in maximum number of consecutive drought days during 2040–2099 compared with that in the climatic reference period in South China area under the SRES A1B scenario: (a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

势。对比图 7 发现，华南地区在每年冬季的最大连续干日数在过去 40 年就比较长，那么到了 21 世纪后 30 年，冬季的最大连续干日数将变得更长，也就意味着冬季的干旱可能将进一步加重。

由此可见，在 SRES A1B 情景下，21 世纪中后期华南地区虽然在春季、夏季和秋季最大连续干日数相对气候基准时段没有明显的变化趋势，但是在冬季，尤其是在 2070~2099 年，相对气候基准时段将有明显的增加趋势。换言之，华南地区未来冬季发生气象干旱的可能性将有所增加，尤其是在 21 世纪后期冬季发生气象干旱的可能性更大。

5 结论与讨论

本文主要是利用英国 Hadley 气候中心提供的区域气候模式 PRECIS，并基于 SRES A1B 情景下，对 21 世纪中后期（2040~2099 年）华南地区旱涝情况相对气候基准时段（1961~1990 年）的可能变化进行了分析，得到以下主要结论：

(1) PRECIS 能够比较好地模拟极端降水日数、最大连续 5 d 降水量和最大连续干日数的年际变化和月变化特征。同时，这 3 个指标能在一定程度上

反映出华南地区的旱涝特征。

(2) SRES A1B 情景下，华南地区 21 世纪中后期极端降水日数和最大连续 5 d 降水量相对气候基准时段都将明显增加，强降水事件的发生频率将大大增加，这与莫伟强等（2007）的研究结果较为一致；强降水期将会有所延长，从每年 4~10 月都是强降水事件的高发时期；另外，华南地区未来最大连续干日数在春季、夏季和秋季没有明显变化，但是在冬季却将有所增加，这种趋势 21 世纪后 30 年表现得更为显著。

(3) SRES A1B 情景下，华南地区 21 世纪中后期雨涝灾害发生的可能性将明显增加；与此同时，华南地区在春季、夏季和秋季发生气象干旱的可能性变化不大，但冬季发生气象干旱的可能性却将有所增加，尤其是在 21 世纪后 30 年冬季发生气象干旱的可能性更大。也就是说，华南地区未来将面临汛期更长更涝，冬季更早的旱涝并存局面。

21 世纪初华南地区降水出现了一次由偏多转为偏少为主的年代际突变，降水偏多的地区北移至华北、黄淮和江淮地区（王艳娇和闫峰，2014）。而本文研究表明 21 世纪中后期华南地区强降水事件频次和强度都将显著增加，与最近一次的年代际

变化趋势刚好相反,由此可以排除 21 世纪中后期的变化并非是由年代际突变造成的。

气象干旱不仅和降水少有关,还与高温、大风等有关,最大连续干日数只考虑了降水因素,将其作为干旱指标并不能全面反映实际的干旱情况,因此本文中对未来干旱趋势的预估仍旧存在不确定性,在以后的研究工作中将尝试选取一些综合气象干旱指标,从而进行更可靠的探讨。另外,未来温室气体的排放情况也存在不确定性,本文只分析了 SRES A1B 情景下的模拟结果,而 SRES 温室气体排放情景是在 2000 年发布的,IPCC 第 5 次评估报告 (IPCC, 2013) 中新设定了名为代表性浓度路径 (RCPs) 情景,未来还需要进行 RCPs 情景下的模拟分析,以便增进对未来旱涝事件变化的科学认识。

参考文献 (References)

- 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, doi: 10.3354/cr019193.
- Gao X J, Zhao Z C, Giorgi F. 2002. Changes of extreme events in regional climate simulations over East Asia [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 19 (5): 927–942, doi: 10.1007/s00376-002-0056-2.
- IPCC. 2007. *Climate change 2007: The physical science basis—summary for policymakers* [M]// Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- 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, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- 江志红, 陈威霖, 宋杰, 等. 2009. 7 个 IPCC AR4 模式对中国地区极端降水指数模拟能力的评估及其未来情景预估 [J]. *大气科学*, 33 (1): 109–120. Jiang Zhihong, Chen Weilin, Song Jie, et al. 2009. Projection and evaluation of the precipitation extremes indices over China based on seven IPCC AR4 coupled climate models [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 33 (1): 109–120, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2009.01.10.
- Jones R G, Noguier M, Hassell D C, et al. 2004. Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS [Z]. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK, http://precis.metoffice.com/docs/Flyers_COP9_RCM.pdf.
- Kitoh A, Hosaka M, Adachi Y, et al. 2005. Future projections of precipitation characteristics in East Asia simulated by the MRI CGCM2 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 22(4): 467–478, doi: 10.1007/BF02918481.
- 莫伟强, 许吟隆, 黎伟标. 2007. 华南地区未来极端气候事件变化的情景分析[C]// 中国气象学会 2007 年年会气候变化分会场论文集. 广州: 中国气象学会. Mo Weiqiang, Xu Yinlong, Li Weibiao. 2007. Scenario Analysis of future extreme climates change in South China [C]// Chinese Meteorological Society Proceedings of Conference on Climate Change at the Venue in 2007 (in Chinese). Guangzhou: Chinese Meteorological Society.
- 牛佳田, 邵学礼, 刘兆金, 等. 2011. 三江平原桦川县近 60 年降水变化特征与旱涝分析 [J]. *中国农学通报*, 27 (11): 198–202. Niu Jiatian, Tai Xueli, Liu Zhaojin, et al. 2011. Analysis on precipitation characteristics and drought–flood in Huachuan county of Sanjiang Plain for nearly 60 years [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (in Chinese), 27 (11): 198–202.
- 钱维宏, 符娇兰, 张玮玮, 等. 2007. 近 40 年中国平均气候与极值气候变化的概述 [J]. *地球科学进展*, 22 (7): 673–684. Qian Weihong, Fu Jiaolan, Zhang Weiwei, et al. 2007. Change in mean climate and extreme climate in China during the last 40 years [J]. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 22 (7): 673–684.
- 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰, 等. 2005. 中国气候与环境演变评估 (I): 中国气候与环境变化及未来趋势 [J]. *气候变化研究进展*, 1 (1): 4–9. Qin Dahe, Ding Yihui, Su Jilan, et al. 2005. Assessment of climate and environment changes in China (I): Climate and environment changes in China and their projection [J]. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 1 (1): 4–9.
- 苏布达, 姜彤, 任国玉, 等. 2006. 长江流域 1960~2004 年极端强降水时空变化趋势 [J]. *气候变化研究进展*, 2 (1): 9–14. Su Buda, Jiang Tong, Ren Guoyu, et al. 2006. Observed trends of precipitation extremes in the Yangtze River basin during 1960 to 2004 [J]. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 2 (1): 9–14.
- 苏布达, Gemmer M, 姜彤, 等. 2007. 1960~2005 年长江流域降水极值概率分布特征 [J]. *气候变化研究进展*, 3 (4): 208–213. Su Buda, Gemmer M, Jiang Tong, et al. 2007. Probability distribution of precipitation extremes over the Yangtze River Basin during 1960–2005 [J]. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 3 (4): 208–213.
- Wang Y, Yan Z W. 2009. Trends in seasonal precipitation over China during 1961–2007 [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2 (3): 165–171, doi: 10.1080/16742834.2009.11446798.
- 王艳娇, 闫峰. 2014. 1960–2010 年中国降水区域分异及年代际变化特征 [J]. *地理科学进展*, 33 (10): 1354–1363. Wang Yanjiao, Yan Feng. 2014. Regional differentiation and decadal change of precipitation in China in 1960–2010 [J]. *Progress in Geography* (in Chinese), 33 (10): 1354–1363, doi: 10.11820/dlkxjz.2014.10.007.
- 王志伟, 唐红玉, 李芬. 2005. 近 50 年中国华南雨涝变化特征分析 [J]. *热带气象学报*, 21 (1): 87–92. Wang Zhiwei, Tang Hongyu, Li Fen. 2005. Analysis of changing characteristics of floods in South China during the recent 50 years [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 21 (1): 87–92.
- 魏凤英. 2009. *现代气候统计诊断与预测技术* [M]. 北京: 气象出版社, 27–29. Wei Fengying. 2009. *Modern Climatic Statistical Diagnostics and Prediction Technique* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 27–29.
- Xie P P, Chen M Y, Yang S, et al. 2007. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 8 (3):

- 607–626, doi: 10.1175/JHM583.1.
- 许吟隆, 黄晓莹, 张勇, 等. 2005. 中国 21 世纪气候变化情景的统计分析 [J]. 气候变化研究进展, 1 (2): 80–83. Xu Yinlong, Huang Xiaoying, Zhang Yong, et al. 2005. Statistical analyses of climate change scenarios over China in the 21st Century [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 1 (2): 80–83.
- 杨宏青, 陈正洪, 石燕, 等. 2005. 长江流域近 40 年强降水的变化趋势 [J]. 气象, 31 (3): 66–68. Yang Hongqing, Chen Zhenghong, Shi Yan, et al. 2005. Change trends of heavy rainfall events for last 40 years in the Changjiang Valley [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 31 (3): 66–68, doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2005.3.015.
- 袁文平, 周广胜. 2004. 标准化降水指标与 Z 指数在我国应用的对比分析 [J]. 植物生态学报, 28 (4): 523–529. Yuan Wenpin, Zhou Guangsheng. 2004. Comparison between standardized precipitation index and Z-index in China [J]. *Acta Phytocologica Sinica (in Chinese)*, 28 (4): 523–529.
- 翟建青, 曾小凡, 姜彤. 2011. 中国旱涝格局演变(1961~2050 年)及其对水资源的影响 [J]. 热带地理, 31 (3): 237–242. Zhai Jianqin, Zeng Xiaofan, Jiang Tong. 2011. Evolution of drought and flood pattern and its effect on water resources in China from 1961 to 2050 [J]. *Tropical Geography (in Chinese)*, 31 (3): 237–242.
- 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.
- 翟盘茂, 任福民, 张强. 1999. 中国降水极值变化趋势检测 [J]. 气象学报, 57 (2): 208–216. Zhai Panmao, Ren Fumin, Zhang Qiang. 1999. Detection of trends in China's precipitation extremes [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 57 (2): 208–216, doi: 10.11676/qxxb1999.019.
- Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al. 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. *J. Climate*, 18: 1096–1108, doi: 10.1175/JCLI-3318.1.
- 张尚印, 姚佩珍, 吴虹, 等. 1998. 我国北方旱涝指标的确定及旱涝分布状况 [J]. 自然灾害学报, 7 (2): 22–28. Zhang Shangyin, Yao Peizhen, Wu Hong, et al. 1998. Determination of drought flood index and distribution of drought flood in the north of China [J]. *Journal of Natural Disasters (in Chinese)*, 7 (2): 22–28.
- Zhang Y, Xu Y L, Dong W J, et al. 2006. A future climate scenario of regional changes in extreme climate events over China using the PRECIS climate model [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33 (24): L24702, doi: 10.1029/2006GL027229.
- 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. Zhou Xukai, Ren Guoyu, Zhang Qiang. 2010. Droughts variations in China based on a compound index of meteorological drought [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 15 (4): 371–378.
- 邹用昌, 杨修群, 孙旭光, 等. 2009. 我国极端降水过程频数时空变化的季节差异 [J]. 南京大学学报(自然科学版), 45 (1): 98–109. Zou Yongchang, Yang Xiuqun, Sun Xuguang, et al. 2009. Seasonal difference of the spatio-temporal variation of the number of the extreme precipitation processes in China [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese)*, 45 (1): 98–109.