

未来半个世纪江淮流域夏季降水变化 趋势的数值模拟结果分析

李永平^{1, 2} 于润玲¹ 秦曾灏¹

¹ 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030

² 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

摘 要 基于政府间气候变化委员会(IPCC)排放情景特别报告(SRES)A2 和 B2 温室气体排放方案下全球海气耦合模式模拟结果, 分析了未来半个世纪中国江淮流域夏季降水变化趋势, 发现江淮流域在经历 21 世纪开始 10 年降水偏多时期后, 从 2010 年开始该地区将经历一段降水偏少的时期, 在温室气体和 SO₂ 排放量较多的 A2 方案下, 该时期将维持较长时间。这些地区夏季降水的减少与夏季西北太平洋副热带高压环流的减弱东撤有关, 由此伴随这些地区夏季风和对流层中大气上升运动的减弱, 而西北太平洋副热带高压环流的减弱东撤与北太平洋海表面南高北低的温度梯度的减小有关。

关键词 全球增暖 降水 副热带高压 海表温度梯度

文章编号 1006-9895(2006)01-0153-09

中图分类号 P463

文献标识码 A

A Numerical Study of Summer Precipitation in the Changjiang River and the Huaihe River Valleys Within Coming Half Century

LI Yong-Ping^{1, 2}, YU Run-Ling, and QIN Zeng-Hao

¹ Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, Shanghai 200030

² Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract The precipitation change in the future over the Changjiang River and the Huaihe River valleys of China in response to the global climate change has been of great concern. However the results from different research would be controversial. Different model used and different scenarios of greenhouse gas concerned would lead to different conclusions. In this study, based on the output of the GFDL R30 coupled climate model under the latest scenarios forcing of A2 and B2 released by the United Nation's Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Special Report on Emission Scenarios (SRES), the simulated current climatological state of precipitation over the Changjiang River and the Huaihe River valleys and the general circulation over East Asia and northern West Pacific are proved reasonable, and then the long-term trend of precipitation in the Changjiang River and the Huaihe River valleys within coming half century are assessed. It is revealed that after experiencing more precipitation in the first ten years of this century, there will be a long period with less precipitation in summer over this area after the year of 2010. The range of this period will be longer till the end of the 2050s of this century with a normal state period in the 2020s under the A2 scenario in which there is more greenhouse gas and SO₂ extricated into atmosphere. Comparatively, a less precipitation period will end at the middle 2020s under the B2 scenario with less greenhouse gas and SO₂ extricated into atmosphere. The reduced precipitation over this area results from the weaker and eastward re-

treating subtropical high over the northern West Pacific in summer, accompanying by weaker summer monsoon and weaker upward motion of air in the troposphere. The weakening and eastward retreating subtropical high is related to the decreasing of sea surface temperature gradient between the tropical and middle-latitude North Pacific.

Key words global warming, precipitation, subtropical high, gradient of sea surface temperature

1 引言

观测事实揭示, 由于人类活动造成的大气中温室气体的急剧增加正在引起全球大气和海表层温度的明显增暖, 据政府间气候变化委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, 简称 IPCC)第三次评估报告^[1], 过去一百年中全球地面平均气温上升了约 0.6°C, 这种增暖趋势在本世纪还将继续, 到本世纪末全球地面平均气温有可能上升 1.4~5.8°C, 比 20 世纪观测到的增暖高出 2~10 倍, 其增暖速率极有可能是最近一万年内从未出现过的。科学家们普遍认为, 全球增暖极有可能对大气和海洋环流结构产生大的影响^[2, 3]。

我国科学家十分关心全球变暖背景下的区域响应问题, Guo 等^[4]利用 IAP/LASG GOALS 全球海-陆-气耦合模式模拟了 CO₂ 加倍时东亚气候变化, 指出它将导致东亚地区气温上升 2.1°C, 最大增温发生在东亚中纬度大陆, 降水增加 5%, 最大的降水增加发生在 25°N 附近, 而 Bueh 等^[5]关于 CO₂ 加倍时的数值试验结果显示, 未来 2041 至 2050 年期间东亚夏季风将增强, 我国东部雨季将提前 1 个月, 华北降水增多, 但长江流域降水量变化不大。徐影等^[6]基于 IPCC 数据分发中心提供的 7 个气候模式在 IS92 版本关于全球温室气体和 SO₂ 排放方案下的数值模拟结果, 指出长江中下游地区的降水在 21 世纪的初期略有增加, 随后增加趋势逐渐减弱, 21 世纪中期降水减少, 到 2080~2090 年降水有增加趋势。

最近, IPCC 排放情景的特别报告 (Special Report on Emission Scenarios, 简称 SRES) 提出 4 个新的排放方案, 即 IPCC SRES A1、A2、B1 和 B2 排放方案, 用于更新 IS92 版本。一般认为其中的 A2 和 B2 方案反映的温室气体和 SO₂ 未来排放情景更趋于真实^[6, 7]。布和朝鲁^[7]基于 IPCC SRES A2 和 B2 方案, 利用海气耦合模式模拟了 2070~2100 年的东亚季风气候, 指出全球变暖导致夏季海-陆温差增大和冬季海-陆温差减弱, 使该时期内东亚

季风环流在夏季增强, 冬季减弱, 江淮流域夏季降水量将增加。

至今还未见关于在 IPCC 新的排放方案下未来半个世纪我国降水趋势的研究或分析报道, 为此, 本文利用美国地球流体动力实验室(Global Fluid Dynamic Laboratory)的 GFDL R30 海气耦合气候模式在 IPCC SRES A2 和 B2 排放方案下的模拟输出数据(来自美国国家海洋大气管理局业务模式资料系统, 见 <http://nomads.gfdl.noaa.gov>), 对预测时间相对较短的未来半个世纪夏季我国江淮流域的降水趋势作出分析。GFDL 耦合气候模式是 IPCC 推荐的全世界 7 个气候模式之一, 它作为 IPCC 评估报告关于气候变化的模式评估工具, 有相对较高的可信度和代表性。GFDL R30 耦合气候模式^[8]比原来在 IS92 方案下作数值模拟时使用的 GFDL R15 模式^[6]有了较大的改进。另外, 本文将根据模式层上的资料进一步分析产生江淮流域降水趋势异常的大气环流特征, 同时考虑到北太平洋海温异常对于控制夏季江淮流域降水主要天气系统——西北太平洋副热带高压的重要影响^[9~11], 分析了未来两者在年代际时间尺度上的联系。

2 模式和模拟方案

GFDL R30 海气耦合气候模式由一个全球大气环流模式和一个全球海洋环流模式构成, 大气环流模式的水平分辨率大约为 3.75 经度×2.25 纬度, 垂直方向有 14 层, 海洋环流模式水平分辨率大约 1.875 经度×2.25 纬度, 垂直方向分成 18 个等深面。模式包括比较全面的物理过程, 考虑了云与太阳辐射季节变化的关系, 为减小系统误差模式进行了季节的和全球的水热量通量调整, 模式还包括海冰动力模型。它能较好地模拟出全球大气和海洋气候平均状态, 并且基本消除了气候模式普遍存在的气候漂移现象^[8, 12]。

模式在 IPCC SRES A2 和 B2 排放方案^[1]下模拟了过去和未来各 100 年左右的全球气候变化, 它通过国际互联网提供模拟的大气和海洋数据资料的

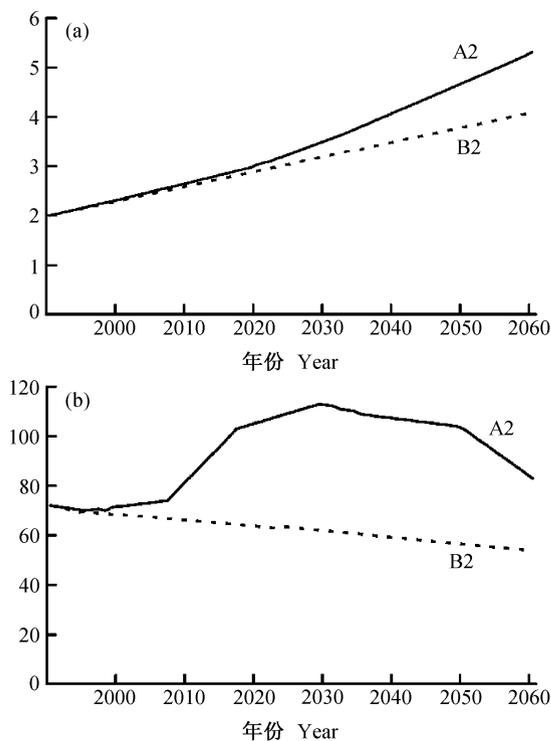


图1 年平均全球温室气体辐射强迫(a, 单位: W/m^2)和 SO_2 排放量(b, 单位: Tg/a)。实线: A2 方案; 虚线: B2 方案
Fig. 1 Temporal evolutions of the global mean (a) radioactive forcing greenhouse gases (units: W/m^2), (b) sulphur dioxide emission (units: Tg/a). Solid and dashed lines are for A2 and B2 scenarios respectively

时间长度为 1965~2100 年, 共 140 年。A2 方案反映了未来全球各国对新技术的适应较慢, 全球人口持续性增长, B2 排放方案假定未来全球生态环境得到一定的改善, 全球人口持续性增长。A2 和 B2 方案中温室气体的辐射强迫从 1990 年的 $2.0 W/m^2$ 分别持续增加到 2060 年的 $5.3 W/m^2$ 和 $4.2 W/m^2$, A2 和 B2 方案中 SO_2 的排放量差异较大, A2 方案中 SO_2 的排放量从 1990 年的 $72 Tg/a$ (以 S 计, 全文同) 迅速增加到 2025 年的 $115 Tg/a$, 之后缓慢下降, B2 方案中 SO_2 的排放量从 1990 年一直维持下降趋势。显然, A2 方案中温室气体和 SO_2 的排放量都大于 B2 方案(见图 1)。

3 模拟结果分析

3.1 对当代气候的模拟

应用气候模式模拟未来气候变化首先要求模式能较好地模拟出当代气候状况。文献[8]已证实 GFDL R30 海气耦合气候模式对于行星尺度的大气

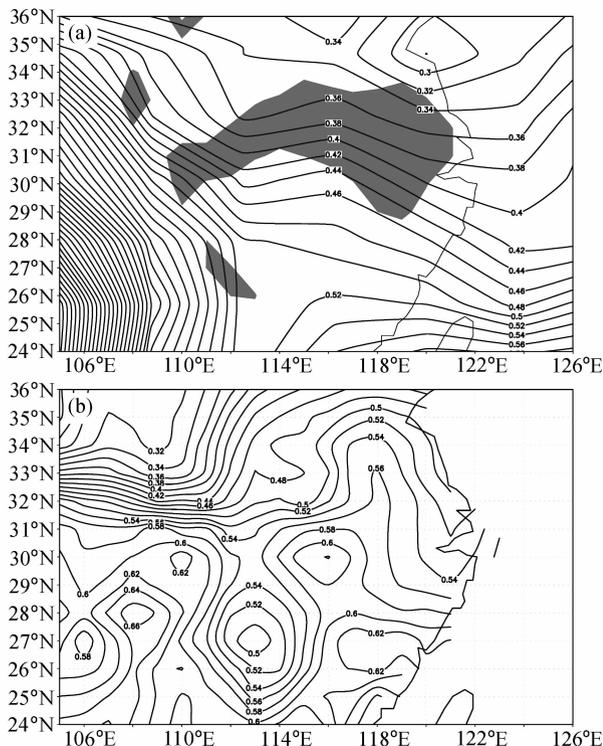


图2 1965~2003 年平均的夏季江淮流域降水率(单位: cm/d): (a) A2 方案下的模式模拟, 阴影区为模拟的降水率年际变化方差与观测降水率年际变化方差之间的比值在 0.7~1.3 的区域; (b) 观测值

Fig. 2 Mean precipitation rate over the Changjiang River and the Huaihe River valleys in summer during 1965 to 2003 (units: cm/d): (a) Model simulation under A2 scenarios (the shaded area represents the area where the ratio of precipitation interannual variance between the simulated and observed is from 0.7 to 1.3); (b) observation

和海洋气候状态及其变化总体上有较强的模拟能力, 但其中未涉及对类似江淮流域这类区域性的气候模拟能力的评价。

江淮流域夏季风的变化受控于东亚夏季风的变化。东亚夏季风的成因和变化较为复杂, 它不仅受控于海陆的分布及其热力差异, 还受许多大尺度大气环流系统的影响, 例如西太平洋副热带高压、南亚高压、西风带环流型等等, 但是西太平洋副热带高压的强度和形态以及位置是影响江淮流域夏季风的主要因子^[13]。

为此, 本文首先验证了模式对于夏季江淮流域降水与与之密切相关的西北太平洋副热带高压当代气候平均状况的模拟能力。

图 2a 为 A2 方案下模拟的 1965~2003 年共 39

年平均的夏季(6~8月,下同)我国江淮流域降水率分布(B2方案下结果相似,图略),图2b则为同期观测的平均降水率,它根据我国160个常规气象观测站的历史降水资料绘制得到。

比较图2a和b可见,模式模拟的江淮流域夏季降水虽然在细致结构上与观测存在一定的差异,但总体特征有一定的相似性。例如,模拟的降水率反映出从青藏高原东侧伸向长江上游和中游的高值区以及从东南沿海地区向西北方向降水逐渐减小的观测事实,而且整个江淮流域模拟降水率量值大小与观测的也接近,误差绝大多数小于 0.18 cm/d ,但是模式模拟的青藏高原中东部的降水量与实况相比明显偏大。计算($24^{\circ}\text{N}\sim 36^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{E}\sim 121^{\circ}\text{E}$)范围内模拟的夏季降水率与同期观测值之间空间相关系数值为0.53。进一步,计算模式模拟我国夏季降水率年际变化方差与观测的降水率年际变化方差之间的比值,在江淮流域多表现为 $0.7\sim 1.3$ 之间,

说明模拟的降水率年际变率与观测接近,相比较而言我国其他地区其比值通常较大,在西北地区和华北部分地区其值超过10。从以上分析可知,模式对于江淮流域的夏季降水具有一定的模拟能力。

图3a为模拟的1965~2003年共39年平均的模式700 hPa层上夏季我国中东部和西北太平洋西北部的风场,图3b为根据NCEP再分析资料计算获得的同期该区域700 hPa层上的风场。

由图3可见,模式能较好地再现东亚夏季风流场的主要特征,例如,夏季我国东部沿海位于 27°N 左右的西北太平洋副热带高压脊位置和处于副热带高压脊西侧我国中东部广大地区的偏南气流强度与观测事实接近(模拟的略偏弱),副热带高压脊西侧我国中东部广大地区的偏南气流强度与观测事实接近(模拟的略偏弱),副热带高压脊北侧西风带的地理位置和强度等也都与观测事实接近。进一步地,计算模式模拟的700 hPa层上风速年际变化方差与观测风场年际变化方差之间的比值,显示在副热带、中纬度的西太平洋和我国中东

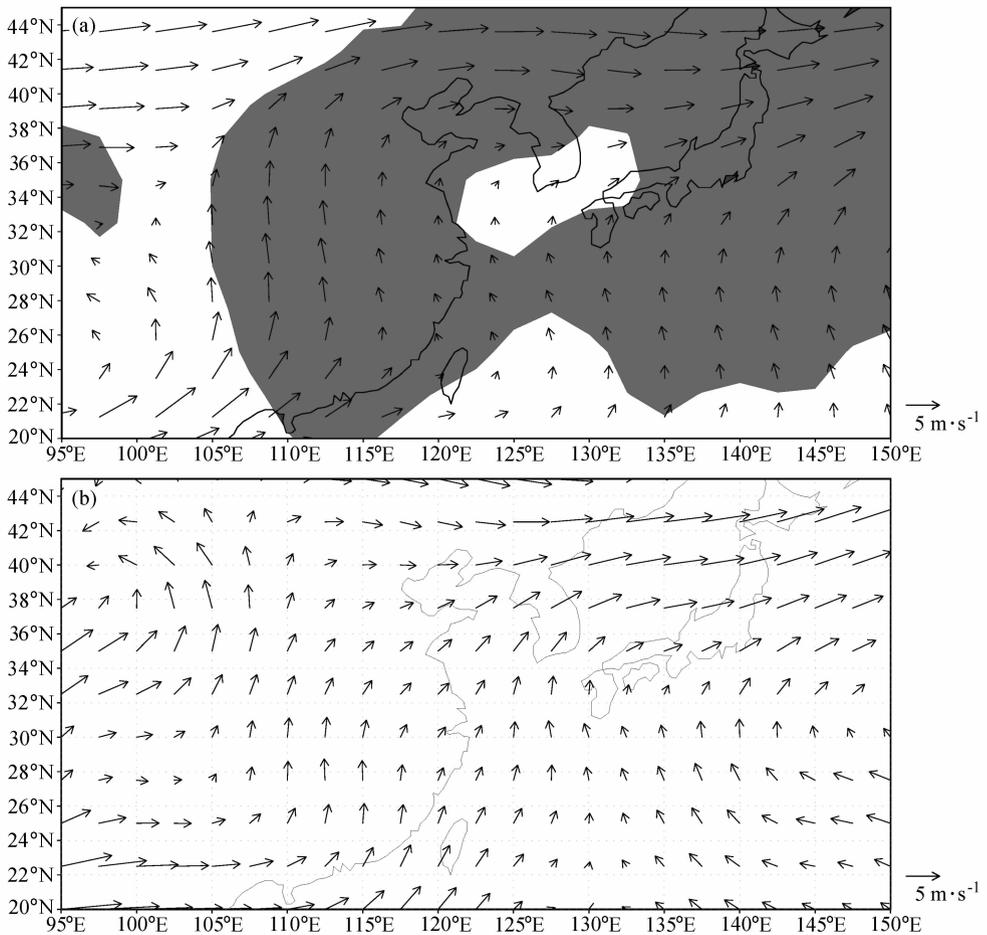


图3 同图2, 但为700 hPa风场

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for the wind at 700 hPa

部广大区域接近 1.0, 说明模拟的风场年际变率与观测的接近。

3.2 对未来气候的模拟

本文在验证 GFDL R30 海气耦合气候模式对我国夏季江淮流域降水及相关的大气环流等当代气候状况具有较强模拟能力的基础上, 将进一步分析模式模拟的未来半个世纪它们的年代际变化。

3.2.1 降水

选取(27.5°N~34°N, 110°E~123°E) 区域代表江淮流域。图 4a、b 分别为在 IPCC SRES A2 和 B2 情景方案下数值模拟的从 2000 年至 2060 年该地区夏季平均降水率距平的逐年变化曲线, 它们用相对于当今气候状态(即 1965~2003 年的平均值)的偏差表示(单位: cm/d), 图中粗实线表示经过 5 年平滑后的结果。

图 4 曲线比较明显的特点是, 江淮流域经历 21 世纪初 10 年降水偏多时期后, 从 2010 年左右起, 将经历一段降水偏少时期, 但是该时期的长度在 A2 和 B2 方案中不尽相同, 在 A2 方案中这段时期

将较长, 跨度约从 2010 至 2060 年(在 20 年代有短暂的正常期)。而 B2 方案中该时间跨度较短, 跨度约从 2010 至 2026 年, 之后在年代际时间尺度上趋于正常。如果与当代气候平均的降水率水平作比较, A2 方案在 2010 至 2060 年降水量将平均减少 9%, B2 方案在 2010 至 2026 年降水量将平均减少 10%。与徐影等^[6]基于 IPCC IS92 方案的数值模拟结果分析作比较, 两者对于 21 世纪初江淮流域降水偏多的预测是一致的。但是, 徐影等^[6]分析指出, 江淮流域随后的降水增加趋势逐渐减弱, 到 21 世纪中期降水才减少, 而本文的分析指出 2010 年以后降水就开始偏少, 这种差异可能体现了不同排放方案对预测结果的影响。另外, 分析表明 GFDL R30 海气耦合模式在 A2 和 B2 方案下模拟的 21 世纪最后 30 年江淮流域降水将有所增加, 这与布和朝鲁^[7]在同样的温室气体和 SO₂ 排放方案下的模拟结果相一致, 但是该时段不在本文讨论范围内。

图 5 给出 A2 方案和 B2 方案 2010 至 2026 年平均的降水率距平空间分布。图 5a 显示, A2 方案中

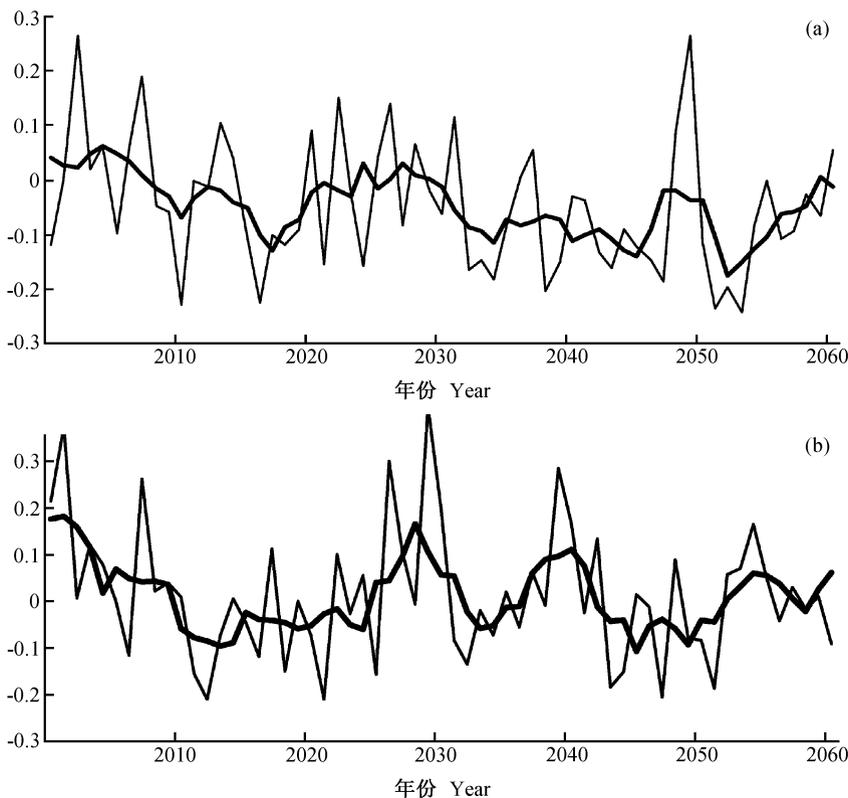


图 4 未来半个世纪江淮流域夏季降水率距平变化(单位: cm/d): (a)A2 方案; (b)B2 方案。实线: 每年, 粗实线: 5 年平滑

Fig. 4 Anomalous precipitation rate in summer over the Changjiang River and the Huaihe River valleys within coming half century (units: cm/d) for A2 scenario (a) and B2 scenario (b). Solid and heavy solid lines are for annual mean and 5-year smooth respectively

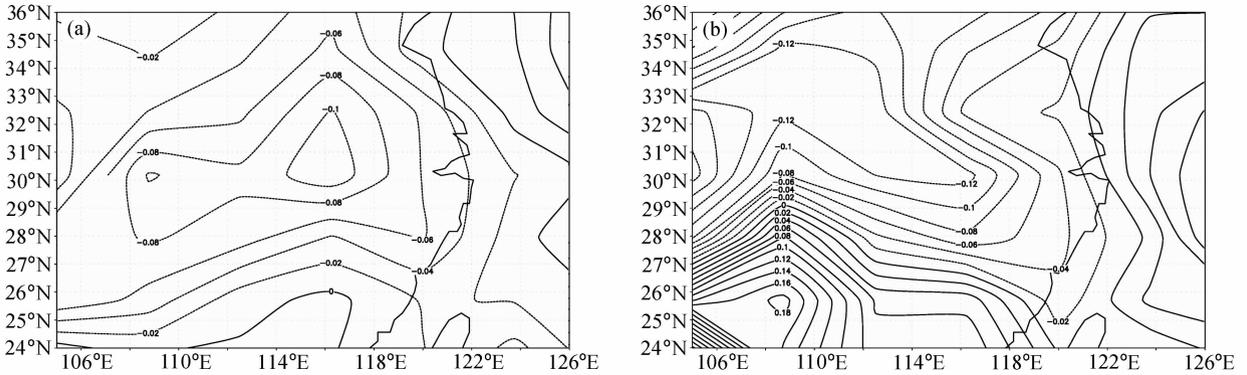


图5 2010~2060年江淮流域夏季降水率距平空间分布(单位: cm/d): (a)A2方案; (b)B2方案

Fig. 5 Spatial distribution of annual mean anomalous precipitation rate over the Changjiang River and the Huaihe River valleys in summer (units: cm/d) for A2 scenario during 2010 to 2060 (a) and B2 scenario during 2010 to 2026 (b)

沿整个长江中下游地区降水率都为明显的负距平区,在长江上游(30°N, 108.5°E)和长江下游(30°N, 116°E)各有一个-0.1 cm/d和-0.11 cm/d负距平中心,长江下游的负距平高值区向北一直延伸到淮河流域。B2方案中,整个江淮流域也都为负距平区,但是最大负距平区位于长江中上游以北地区。

3.2.2 700 hPa 环流

区域性降水异常主要是由大尺度大气环流的异常引起的,其中西北太平洋副热带高压脊的强度和位置异常基本上决定了夏季我国中东部主要雨带的异常变化。为此,图6给出A2方案和B2方案2010至2026年夏季平均的700 hPa流场和垂直速度场相对于当今气候场的偏差。

由图6a可见,位于对流层中低层的700 hPa高度上,20°N以北的西北太平洋和我国东部为一大范围的气旋性距平环流区,我国东、中部广大地区有明显的偏北风距平,与夏季平均环流(图3)相比较,它指示夏季西北太平洋副热带高压脊和控制我国东、中部偏南夏季风的减弱。受减弱的夏季风影响,我国长江、淮河流域有异常的下沉气流,它们与图5a中的降水负距平区的分布相对应。B2方案(图6b)中,700 hPa环流距平分布同样指示我国中东部广大区域偏南夏季风的减弱和江淮河流域有异常的下沉气流,它造成这些区域夏季降水的减少。

3.2.3 与北太平洋海表温度年代际变化的联系

已有大量研究表明,西北太平洋副热带高压的异常活动分别与西太平洋暖池、赤道中东太平洋、中纬度北太平洋等海域海温异常有关,Latif等^[14]

的研究表明,当中纬度北太平洋中部出现SST的正距平时,北太平洋副热带风应力旋度变小,中纬度西风减弱,即西北太平洋副热带高压减弱。Gu等^[15]的研究指出,热带太平洋SST的正距平可使中纬度北太平洋纬向西风增强。目前,大量研究表明北太平洋海表温度的年际和年代变化呈耦合形态^[16],例如发现当赤道中东太平洋SSTA为正距平时,中纬度北太平洋SSTA常为负距平,吴国雄等^[11]研究表明,夏季西北太平洋副热带高压强度与同期赤道中东太平洋SSTA呈正相关,与北太平洋西风漂流区SSTA呈负相关,因此有研究指出大气环流系统的变化更大程度上与海洋冷热源的相对分布有关^[12]。根据对GFDL R30海气耦合气候模式数值模拟输出结果的分析可知,在全球性增暖背景下,整个北太平洋海表面温度,乃至全球海洋海表面温度相对当今气候都将升高,但是各海域海温升高的幅度是不一样的。本文用经过标准化处理后的赤道中东太平洋(0°~10°S, 180°E~90°W)SST距平与中纬度北太平洋(25°N~35°N, 150°E~150°W)SST距平的差值作为影响因子,分析其时间变化,图7分别给出IPCC SRES A2和B2情景方案下数值模拟的至2060年该因子的逐年变化曲线,图中粗线是作5年平滑后的结果。

图7显示,在A2方案中,从2010年至2060年,夏季赤道中东太平洋SST距平减去中纬度北太平洋SST距平的值以负值为主,这样的SST距平分布对应于同期较弱的西北太平洋副热带高压,因此也有利于江淮河流夏季降水的减少(图4a和图5a),计算图4a与图7a两曲线表示的要素年际

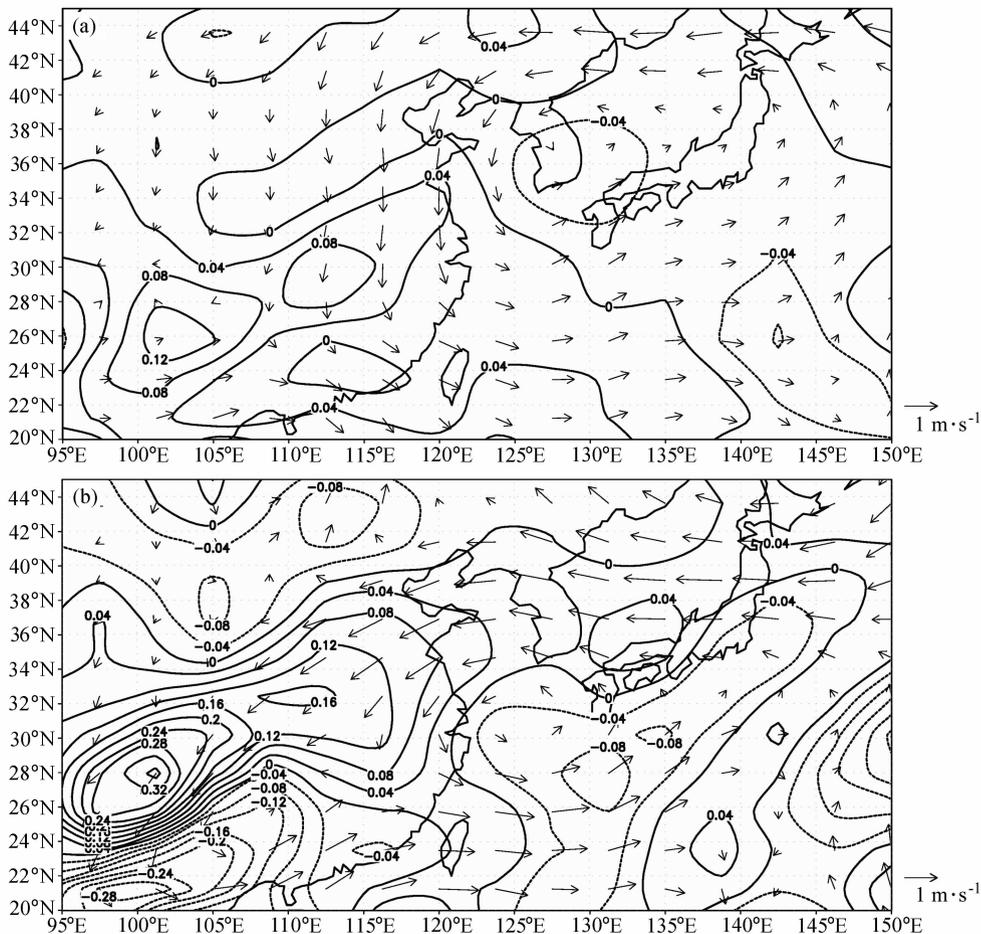


图 6 700 hPa 流场(单位: m/s)和垂直速度场(等值线, 单位: hPa/s)相对于当今气候场的偏差, 其余同图 5
Fig. 6 Same as Fig. 5, but for wind (units: m/s) and vertical velocity (isoline, units: hPa/s) at 700 hPa respectively

变化之间的相关系数值为 0.37, 它超过了 95% 的信度检验, 表明江淮河流夏季降水率与这样的 SSTa 分布有一定的相关性。同样, 在 B2 方案中, 从 2010 年至 2026 年期间也呈现类似的情景, 计算图 4b 与图 7b 两曲线表示的要素年际变化之间的相关系数值为 0.35, 也超过了 95% 的信度检验。分析 A2、B2 方案下模拟的赤道中东太平洋的 SST 距平曲线, 显示未来半个世纪 El Niño 事件的发生频率和强度与图 7a、b 曲线在年际时间尺度上的变化有很好的一致性, 说明北太平洋整体海表温度的变化与 El Niño 事件密切相关。

以上分析表明, 尽管全球增暖背景下夏季海-陆温差增大^[6]可能导致亚洲夏季风的增强, 但是由于北太平洋海表温度的南北差异并不与海-陆温差增大变化相一致, 北太平洋热带与中纬度海表温度南北差异减弱的分布可能有利西北太平洋副热带高

压的减弱东撤, 副热带高压西侧的偏南季风将减弱, 它有利于江淮流域夏季降水的减少。

4 总结

本文利用 GFDL R30 海气耦合气候模式的模拟结果, 在验证模式对于气候平均的夏季江淮流域降水和东亚大气环流有较强模拟能力的基础上, 分析了模式模拟的关于全球性气候变暖背景下未来半个世纪江淮流域夏季降水年代际变化趋势, 主要结论如下:

(1) 江淮流域夏季降水在经历 21 世纪初 10 年偏多时期之后, 从 2010 年左右起将经历一段降水偏少时期, 该时段的长度与全球大气温室气体和 SO₂ 的排放量有关, 在排放量相对较多的 IPCC SREC A2 方案下, 该降水偏少时期较长(从 2010 至 2060 年, 在 20 年代有短暂的正常期), 而在排放

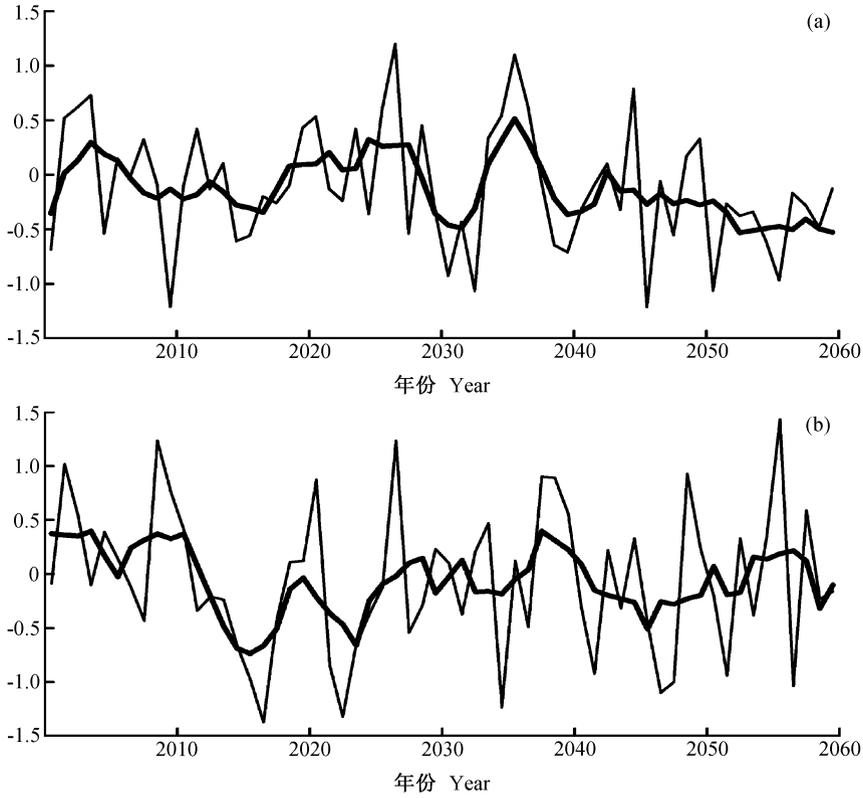


图7 夏季赤道中东太平洋($0^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{S}$, $180^{\circ}\text{E}\sim 90^{\circ}\text{W}$) SST 距平与中纬度北太平洋($25^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{W}$)的 SST 距平差(单位: $^{\circ}\text{C}$): (a)A2 方案; (b)B2 方案。粗线为作 5 年平滑后的结果

Fig. 7 Temporal evolutions of the difference of SST anomaly between tropical ocean and middle latitude ocean in the northern Pacific for A2 scenario (a) and B2 scenario (b). The heavy solid lines are for those of 5-year smooth

量相对较少的 IPCC SREC B2 方案下, 该降水偏少时期较短(从 2010 至 2026 年)。

(2) 江淮流域夏季降水减少的年代际变化与夏季西北太平洋副热带高压脊的年代际减弱有关, 由于副热带高压脊的强度减弱并东撤, 使得控制我国中、东部地区的偏南夏季风减弱和这些地区与降水直接有关的对流层大气上升运动的减弱。

(3) 在全球性增暖背景下, 整个北太平洋海表面温度相对当今气候都将增高, 但是在夏季副热带高压脊年代际减弱的时期内, 赤道中东太平洋海表面温度的相对上升幅度小于中纬度北太平洋海表面温度的上升幅度, 即北太平洋海表面南高北低的温度梯度是减小的, 这样的分布有利于西北太平洋副热带高压的减弱, 因而造成江淮流域夏季风减弱和夏季降水的减少。

参考文献 (References)

[1] IPCC. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contri-

bution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al, Eds. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 944pp

[2] Wang S W, Ye D Z. Analysis of the global warming during the last one hundred years. *Climate Variability*, Beijing: China Meteorological Press, 1993. 23~32

[3] Dai A, Meehl G A, Washington W M, et al. Climate change in the 21th century over the Asia-Pacific region simulated by the NCAR CSM and PCM. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18**: 639~658

[4] Guo Yufu, Yu Yongqiang, Liu Xiyang, et al. Simulation of climate change induced by CO_2 increasing for East Asia with IAP/LASG GOALS model. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18** (1): 54~66

[5] Bueh C, Cubasch U, Hagemann S. Impact of global warming on changes in the East Asian Monsoon and related river discharge in a global time-slice experiment. *Climate Research*, 2003, **24**: 47~57

[6] 徐影, 丁一汇, 赵宗慈. 长江中下游地区 21 世纪气候变化情景预测. *自然灾害学报*, 2004, **13**(1): 25~31

- Xu Ying, Ding Yihui, Zhao Zongci. Prediction of climate change in middle and lower reaches of the Yangtze River in the 21st century. *Journal of Natural Disasters* (in Chinese), 2004, **13** (1): 25~31
- [7] 布和朝鲁. 东亚季风气候未来变化的情景分析—基于 IPCC SRES A2 和 B2 方案的模拟结果. 科学通报, 2003, **48** (7): 737~742
- Bueh C. Simulation of the future change of East Asian monsoon climate using the IPCC SRES A2 and B2 scenarios. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2003, **48** (7): 737~742
- [8] Delworth T L, Stouffer R J. Review of simulations of climate variability and change with the GFDL R30 coupled climate model. *Climate Dynamics*, 2002, **19** (7): 555~574
- [9] Ren B, Huang R. Interannual variability of the convective activities associated with the East Asia summer monsoon obtained from TBB variability. *Adv. Atmos. Sci.*, 1999, **16** (1): 77~90
- [10] Li C, Mu M, Zhou G. The variation of warm pool in the equatorial western Pacific and its impacts on climate. *Adv. Atmos. Sci.*, 1999, **16** (3): 378~394
- [11] 吴国雄, 丑纪范, 刘屹岷, 等. 副热带高压形成和变异的动力学问题. 北京: 科学出版社, 2002. 188pp
- Wu Guoxiong, Chou Jifan, Liu Yimin, et al. *Dynamics of the Formation of Subtropical Anticyclones* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2002. 188pp
- [12] Rutherford S, Mann M E, Delwoeth T L, et al. Climate field reconstruction under stationary and nonstationary forcing. *Journal of Climate*, 2003, **16** (3): 462~479
- [13] 左瑞亭, 曾庆存, 张铭. 季风及季风与西风带相互关系的数值模拟研究. 大气科学, 2004, **28**(1): 7~22
- Zuo Ruiting, Zeng Qingcun, Zhang Ming. A numerical simulation of monsoon and the correlation between monsoon and westerlies. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (1): 7~22
- [14] Latif M, Barnett T P. Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America. *Science*, 1994, **266**: 634~637
- [15] Gu D, Philander S G H. Interdecadal climate fluctuations that depend on exchanges between the tropics and extratropics. *Science*, 1997, **275**: 805~807
- [16] 陈烈庭, 吴仁广. 太平洋各区海温异常对中国东部夏季雨带类型的共同影响. 大气科学, 1998, **22**(5): 718~726
- Chen Lieting, Wu Renguang. The joint effects of SST anomalies over different Pacific regions on summer rain belt patterns in eastern China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1998, **22** (5): 718~726