

SRES 情景下多模式集合对淮河流域未来气候变化的预估*

吴迪^{1,2}, 严登华^{1,2}

(1: 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038)

(2: 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 采用偏差修正/空间降尺度方法处理后的 IPCC AR4 中 8 个全球海气耦合模式的集合平均结果, 分析了 SRES A2、A1B 和 B1 情景下淮河流域未来 30 a(2011–2040 年)相对于现状(1961–1990 年)地面温度和降水的可能变化。结果表明:(1) 多模式集合能较好地反映流域现状年、季温度和降水的大尺度空间分布特征;对温度和降水的年内分配过程模拟较好,各月温度集合平均与观测值相差 0.2℃左右(冬季各月除外),而降水集合平均与观测值相对误差在 5%左右(9 月除外)。(2) 不同情景下未来流域年、季温度一致增加,年温度增加幅度在 0.85~1.12℃之间;冬、春季温度增加相对明显,而夏、秋季温度增加并不显著;年际和年代际温度增加趋势显著。(3) 不同情景下未来流域年降水有增加趋势,增加幅度为 0.13%~5.24%,增幅不明显;降水季节变化有增有减,季节、年际和年代际降水变化较为复杂,不同情景下降水空间变化差异显著。

关键词: 区域气候变化预估;多模式集合;地面温度;降水;淮河流域

Projections of future climate change over Huaihe River basin by multimodel ensembles under SRES scenarios

WU Di^{1,2} & YAN Denghua^{1,2}

(1: *Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, R. R. China*)

(2: *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of River Basin Water Cycle, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, P. R. China*)

Abstract: Using multimodel ensemble mean results of 8 global coupled ocean-atmosphere models in the Fourth Assessment Report (AR4) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) by bias-corrected statistical downscaling method, possible changes of surface air temperature and precipitation over Huaihe River basin were predicted in future (2011–2040) relative to baseline (1961–1990) under SRES A2, A1B and B1 scenarios. The results indicate that (1) multimodel ensembles can reproduce a large-scale spatial distribution of annual, seasonal temperature and precipitation over the Huaihe River basin. It can also reflect better on monthly temperature and precipitation distributed processes within the year. Compared with the observations, the monthly temperature has a difference about 0.2℃ (except winter), and the precipitation has a difference about 5% (except September). (2) The annual and seasonal temperature presents an upward trend under different scenarios. The annual temperature increases with a range of 0.85–1.12℃, while temperature in winter and spring increases more obviously than that in summer and autumn. (3) The annual precipitation increases with a range of 0.13%–5.24% in future, but the changes are not significant. Seasonal precipitation presents an increasing or decreasing tendency, however seasonal, interannual and interdecadal precipitation changes are more complex. The spatial pattern of precipitation varies obviously under different scenarios.

Keywords: Regional climate change projection; multimodel ensembles; surface air temperature; precipitation; Huaihe River basin

随着全球气候变暖和近年来极端天气事件发生强度、频次的增加,区域(流域)尺度气候变化预估问题

* 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2010CB951102)和国家科技支撑计划“十二五”项目(2012BAC19B03)联合资助。2012–10–31 收稿;2012–12–09 收修改稿。吴迪,男,1978 年生,博士;E-mail: wudisyau075@163.com.

受到国际社会的普遍关注^[1-2]. 目前, 全球气候模式被认为是认识和归因过去气候变化并对未来进行预估的主要工具, 近年来已得到较快的发展. IPCC 第四次评估报告 (AR4) 开展了“气候模式诊断与比较计划 (PCM-DI)”, 有 23 个复杂的海气耦合模式 (AOGCM, Atmosphere-Ocean General Circulation Model) 参与, 并提供了 9 种不同排放情景下的预估结果; 与第三次评估报告 (TAR) 比较, 这些模式无论在物理过程还是模式分辨率上, 较之以往都有很大的提高^[3-6].

关于 IPCC AR4 中全球模式对中国区地面温度的模拟效果评估表明^[7-8]: 全球模式对温度年变化及空间分布模拟较好, 特别是在低纬地区及东部地区; 新一代模式能模拟出温度的线性变化趋势, 但年平均温度演变趋势的模拟能力较低. 对降水、东亚季风等的模拟性能评估表明^[9-11]: 大部分模式基本上能够模拟出中国东部地区降水的季节进退, 能够一定程度上再现中国区降水的分布型, 也能模拟出降水的区域性差异, 但不同模式对东亚季风降水空间分布模拟差异较大. 整体来看, 全球模式对未来气候变化预估还存在较大的不确定性^[12]. 多模式集合结果与观测值的相关性更好, 较好地反映了气候变化的趋势; 多模式集合一般优于大部分单个模式, 而单一模式的预估很难给出可信的结果. 目前主要对多模式的模拟结果进行集合, 以减小全球模式模拟的不确定性^[13]. 国外在气候变化多模式集合预估方面研究较早^[14], 而近年来我国在这一领域发展较快. 姜大膀等^[15]利用 IPCC 资料中心的 7 个耦合模式开展了集合预估研究, 分析了 SRES A2 温室气体和气溶胶排放情景下中国大陆 21 世纪前 30 年的十年际气候变化趋势; 江志红等^[10]评估了 AR4 中 7 个新一代全球模式及多模式集合对现代气候情景下 5 个极端降水指数的模拟能力; 许崇海等^[16]利用中国地区温度和降水格点观测数据以及多模式集合平均数据计算了 PDSI 指数, 评估了全球气候模式对中国区 1961—2000 年干旱变化特征的模拟能力, 预估了 SRES A1B 情景下 2011—2025 年干旱的可能变化. 此外, 其他学者也利用多模式集合进行了大量区域 (流域) 的气候变化预估研究^[17-18].

本文利用 IPCC AR4 中不同排放情景下 8 个全球海气耦合模式的输出结果, 通过偏差修正/空间降尺度处理, 将单模式月平均地表温度和降水结果统一插值到同一分辨率 ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) 下, 并采用多模式集合平均的方法得到多模式集合结果. 首先, 与基准时段 (1961—1990 年) 站点观测数据比较, 分析了多模式集合对淮河流域地面温度和降水的模拟效果; 在此基础上, 预估了 IPCC SRES A2 (高排放)、A1B (中排放) 和 B1 (低

排放) 情景下, 淮河流域未来 30 a (2011—2040 年) 相对于基准时段 (1961—1990 年) 的可能气候变化, 并对比分析了不同情景下流域地面温度和降水时 (年、月、年代际) 空尺度的变化特征.

1 研究区域及方法

1.1 流域概况

淮河流域 ($30^\circ 55' \sim 36^\circ 36' N$, $111^\circ 55' \sim 121^\circ 25' E$) 地处中国东部, 介于长江、黄河之间, 总流域面积 $27 \times 10^4 \text{ km}^2$. 淮河流域西起伏牛山, 东临黄海, 南以大别山、江淮丘陵与长江流域分界, 北以黄河和沂蒙山与黄河流域毗邻. 流域西部、西南部及东北部为山区、丘陵区 (约占 1/3), 其余为广阔的原野 (约占 2/3). 以废黄河为界, 淮河流域分为淮河和沂沭泗河两大水系, 流域内湖泊、洼地众多. 淮河流域是我国重要的农业生产基地和能源基地之一, 在国家经济和社会发展中占有重要地位. 淮河流域地理位置和气象站点分布如图 1 所示.

淮河流域地处我国湿润气候与半干旱气候过渡带, 季风气候极为显著; 降水年际变化很大, 时空分配不均. 降水一般集中在 6—9 月, 占全年降水的 50%~

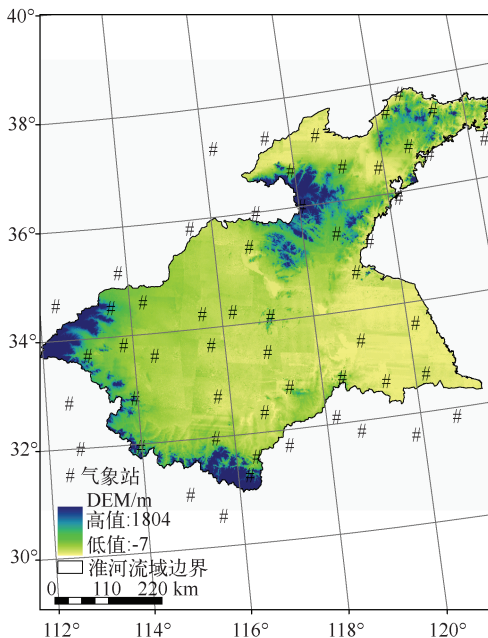


图 1 淮河流域地理位置和气象站点分布

Fig. 1 Location of the study area and distribution of meteorological stations in Huaihe River basin

80%, 而 12—次年 2 月降水不到全年的 10%。淮河流域地处我国南北气候、高低温度和海陆相 3 种过渡带的重叠区, 是典型的孕灾环境地带。由于特殊的地理位置, 受低纬和中高纬天气系统共同影响, 天气复杂多变, 流域气象灾害频繁, 一年之内常出现“旱涝交替”或“南涝北旱”现象。研究表明, 淮河流域汛期降水主要是夏季风进退、锋面移动的结果, 其旱涝异常与大尺度环流异常密切相关。

1.2 数据来源与方法

根据对 IPCC AR4 中 AOGCM 对东亚地区(或中国区)当代气候模拟能力的评估^[8,19], 研究中选择了模拟效果较好的 MIROC 3.2 (medres)、BCCR-BCM 2.0、ECHAM5/MPI-OM、CSIRO-Mk 3.0、GFDL-CM 2.1、UKMO-HadCM3、CCSM3、ECHO-G 8 个全球海气耦合模式。各耦合模式中大气模式和海洋模式的水平分辨率及垂直分层情况如表 1 所示。各模式相关详细信息可参见 PCMDI 的网址(http://www.pcmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php), 耦合模式所有数据来自世界气候研究计划(WCRP)的“耦合模式比较计划第 3 阶段(CMIP3)”多模式数据库^[20]。

AOGCM 能较好地模拟出大尺度重要的平均特征, 如高层大气场、近地面温度和大气环流等, 但其输出空间分辨率较低, 难以对区域气候情景做合理的预估。因此, 对于区域(流域)尺度气候变化情景, 就需要通过统计或动力降尺度方法来得到更小尺度的区域气候信息。区域气候变化是以大尺度气候为条件的, 降尺度主要就是对大尺度、低分辨率的全球模式输出变量进行统计或动力的次网格化, 从而将其转化为区域尺度的地面气候信息(如温度和降水等)。动力降尺度法是利用与 AOGCM 耦合的区域气候模式(RCM, Regional Climate Model)来预估区域未来气候变化情景; 而统计降尺度法一般是建立预报因子(GCM 模拟效果好的大尺度变量)和预报对象(小尺度变量, 如降水)之间的统计关系, 并用独立的观测资料检验这种关系, 最后再把这种关系应用于 AOGCM 输出的大尺度气候信息, 来预估区域未来的气候变化情景。动力方法虽然物理机制明确, 但受边界条件影响较大, 而且对计算机要求较高, 计算量大; 与之比较, 统计方法不需考虑边界条件对预测结果的影响, 其优点是方法相对简单、计算量小; 缺点是需要足够的观测资料来建立统计关系, 而且统计方法不能应用于大尺度气候要素与区域气候要素相关不明显的地区^[21]。鉴于统计降尺度方法的优点, 本文基于 1950—1999 年月平均温度和降水格点观测数据, 使用偏差修正/空间降尺度方法得到 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 分辨率的全球陆地月平均地表温度和降水格点场资料^[22-24]。研究中温室气体和气溶胶排放情景选用的是 IPCC《排放情景特别报告(SRES)》^[25] 中的 A2(高排放)、A1B(中排放)和 B1(低排放)情景。这 3 种情景下耦合模式的模拟结果基本涵盖了由于温室气体不断增加引起的淮河流域未来气候变化的可能情况。

本文选择 A2、A1B 和 B1 情景下淮河流域 1961—1990 年和 2011—2040 年两个时段各 30 a 时间尺度的模拟数据。其中, 1961—1990 年平均地面温度(以下简称温度)和降水作为现代气候状况; 2011—2040 年平均温度和降水作为未来气候状况, 两个时段平均温度和降水的差值作为未来 30 a 淮河流域可能的气候变化。以下内容的分析均是基于 8 个 AOGCM 温度和降水数据的算术平均结果, 简称多模式集合。

表 1 选用的 IPCC AR4 中 8 个全球海气耦合模式概况
Tab. 1 An overview of 8 IPCC AR4 AOGCMs adopted in this study

模式名称	所属机构(国家)	大气模式分辨率* (纬向×经向)	海洋模式分辨率
MIROC 3.2 (medres)	UT, JAMSTEC(日本)	T42(2.8°×2.8°)L20	(0.5°~1.4°×1.4°)L43
ECHAM5/MPI-OM	MPI(德国)	T63(1.9°×1.9°)L31	(1.5°×1.5°)L40
BCCR-BCM 2.0	BCCR(挪威)	T63(1.9°×1.9°)	(0.5°~1.5°×1.5°)L35
CSIRO-Mk 3.0	CSIRO(澳大利亚)	T63(1.9°×1.9°)L18	(0.8°×1.9°)L31
GFDL-CM 2.1	GFDL(美国)	(2.0°×2.5°)L24	0.3°~1.0°×1.0°
UKMO-HadCM3	UKMO(英国)	(2.5°×3.75°)L19	(1.25°×1.25°)L20
CCSM3	NCAR(美国)	T85(1.4°×1.4°)L26	(0.3°~1.0°×1.0°)L40
ECHO-G	MIUB/MRI(德国/韩国)	T30(3.9°×3.9°)L19	(0.5°~2.8°×2.8°)L20

* T 代表三角形截断, L 代表垂直方向的层次。

1.3 基准时段多模式集合模拟效果

为检验多模式集合对淮河流域平均气候(温度和降水)场的模拟效果,对基准时段(1961—1990年)年、夏季和冬季平均温度和降水多模式集合结果与流域及周边57个气象站的同期实况观测资料进行对比分析.采用克里格(Kriging)插值方法将站点观测和多模式集合数据进行空间展布.淮河流域气象站点分布见图1.

从年、季平均地面温度观测和多模式集合的对比结果可见,多模式集合对流域年平均温度分布特征模拟较好,再现了由北向南、由沿海向内陆温度逐渐递增的大尺度空间分布特征,与实况相符合.由于分辨率较高,多模式集合对淮南平原区的温度高值区和东北部沂蒙山区、西部伏牛山区等小地形引起的温度低值区模拟较好,与实际观测相吻合.从季节温度空间分布上看,多模式集合能模拟出流域温度的季节性变化特征,夏季温度空间分布的模拟效果比冬季好,冬季模拟等温线略有偏北.温度的分布受局地地形影响明显,多模式集合对流域等温线过渡带的位置模拟较为细致,再现了不同地形影响下温度随地形变化的分布特征(图2).

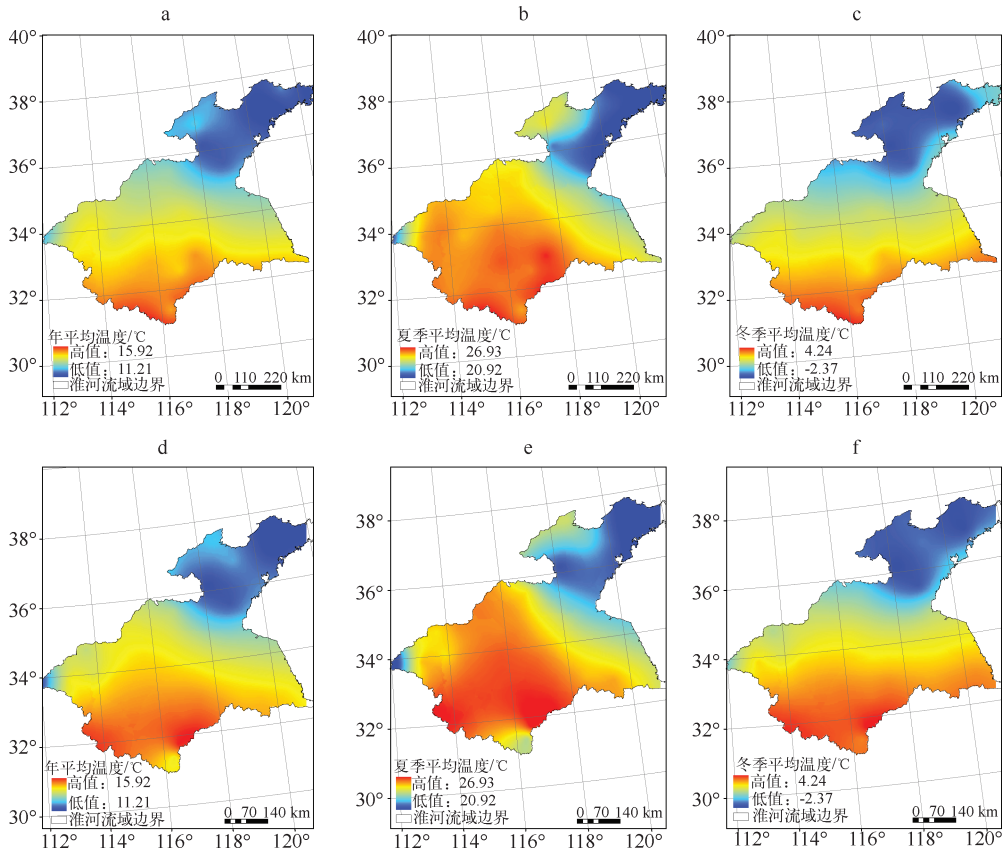


图2 基准时段年和季节地面温度空间分布:

年(a)、夏季(b)和冬季(c)观测温度;年(d)、夏季(e)和冬季(f)温度多模式集合

Fig. 2 Spatial distribution of annual and seasonal temperature between observation and multimodel ensembles during 1961—1990; annual(a), summer(b) and winter(c) observed temperature; annual(d), summer(e) and winter(f) multimodel ensembles simulated temperature

从流域温度年内分配上看,多模式集合与观测值在年内的分配过程基本一致(图3a).从各月温度比较来看,春、夏和秋季多模式集合各月温度与观测值相差较小,3月和9月温度分别比观测值偏高了0.21和

0.19℃; 而5月和6月温度分别比观测值偏低了0.21和0.16℃, 其他各月温度与观测值相差均在0.1℃以内; 冬季多模式集合各月温度与观测值相比相对较大, 2月、1月和12月温度分别比观测值偏高0.67、0.45和0.45℃.

从流域降水年内分配上看, 降水多模式集合与观测值在年内分配过程基本一致(图3b). 在降水集中的6—9月, 除9月多模式集合比观测值偏少16.1%以外, 其他各月多模式集合与观测值相对误差基本在5%左右; 而冬季各月降水多模式集合与观测值相差相对较大, 其中1、12和2月相对误差分别达到了40.3%、25.6%和19.2%. 由此可见, 多模式集合可以反映淮河流域降水的年内分配过程, 尤其是降水集中的雨季(如6月中旬至7月上旬梅雨季节), 对旱季(冬季)各月降水模拟能力相对较差.

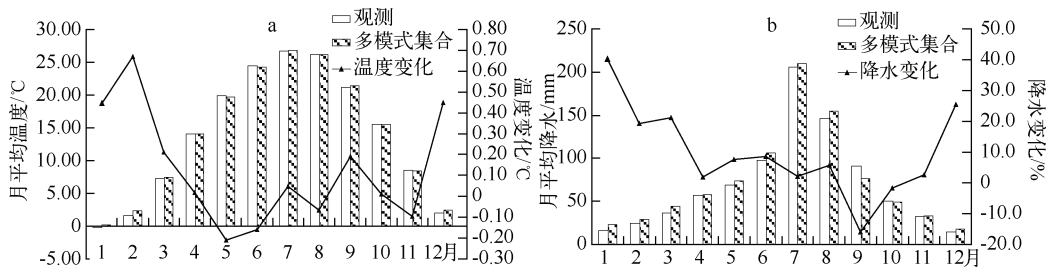


图3 淮河流域观测和多模式集合月平均温度(a)和降水(b)比较

Fig. 3 Comparison of monthly mean temperature (a) and precipitation (b) between observation and multimodel ensembles simulation in Huaihe River basin

年、季平均降水的多模式集合模拟和观测对比结果可见, 多模式集合模拟出了流域年平均降水由南向北、由沿海向内陆递减的大尺度空间分布特征, 降水等值线分布与实况拟合较好. 夏季多模式集合对流域降水空间特征描述较为细致, 对流域北部沂蒙山区(440 mm降水等值线)、南部大别山区和下游近海区(530 mm降水等值线)3个降水高值区的位置刻画较为准确, 更好地再现了复杂地形条件下降水随地形的变化特征. 多模式集合也较好地反映了冬季降水由北向南逐渐增加的空间分布特征, 降水等值表现比较平滑, 但多模式集合降水比观测值略有偏大(图4).

总之, 多模式集合能够模拟出淮河流域温度和降水的大尺度空间分布特征, 较好地反映流域现状的气候变化趋势, 对于受地形影响的局地气候特征有较好的模拟能力; 对温度的模拟效果要好于降水, 年和夏季模拟效果好于冬季; 对冬季降水的模拟效果还有待进一步提高, 这也是当前模式所面临的共性问题.

2 淮河流域未来气候变化预估

2.1 年平均温度和降水变化

3种情景下多模式集合对淮河流域未来30a地面温度的预估结果表明, 不同情景下流域年、季平均温度均呈增加趋势(表2). A2情景下年、季温度增加相对较高, 其次是A1B情景, 而B1情景下年、季温度增加相对较低, 表现出温度增幅随排放强度增加而增加的特点. A2、A1B、B1情景下未来流域年平均温度分别增加了1.12、1.02和0.85℃. 从温度季节变化上看, 3种情景下流域冬、春季温度增加幅度相对较大, 其次是秋季, 而夏季温度增加幅度相对较低.

不同情景下多模式集合对淮河流域未来30a降水的预估结果表明, 3种情景下流域年平均降水均呈增加趋势, 但增加幅度不明显(表3). A2情景下, 年降水增加相对较少, 增幅仅为0.13%; 而A1B和B1情景下, 年降水分别增加了5.88%和5.24%. 从季节变化上看, 不同情景、不同季节降水增减变化并不一致, 表现较为复杂. A2情景下, 冬季降水增加相对较多, 达到12.37%; 而夏季、春季和秋季降水增减变化并不显著. A1B和B1情景下, 冬季降水增加明显, 分别增加了16.76%和13.02%; 而其他季节降水增加幅度基本在5%左右.

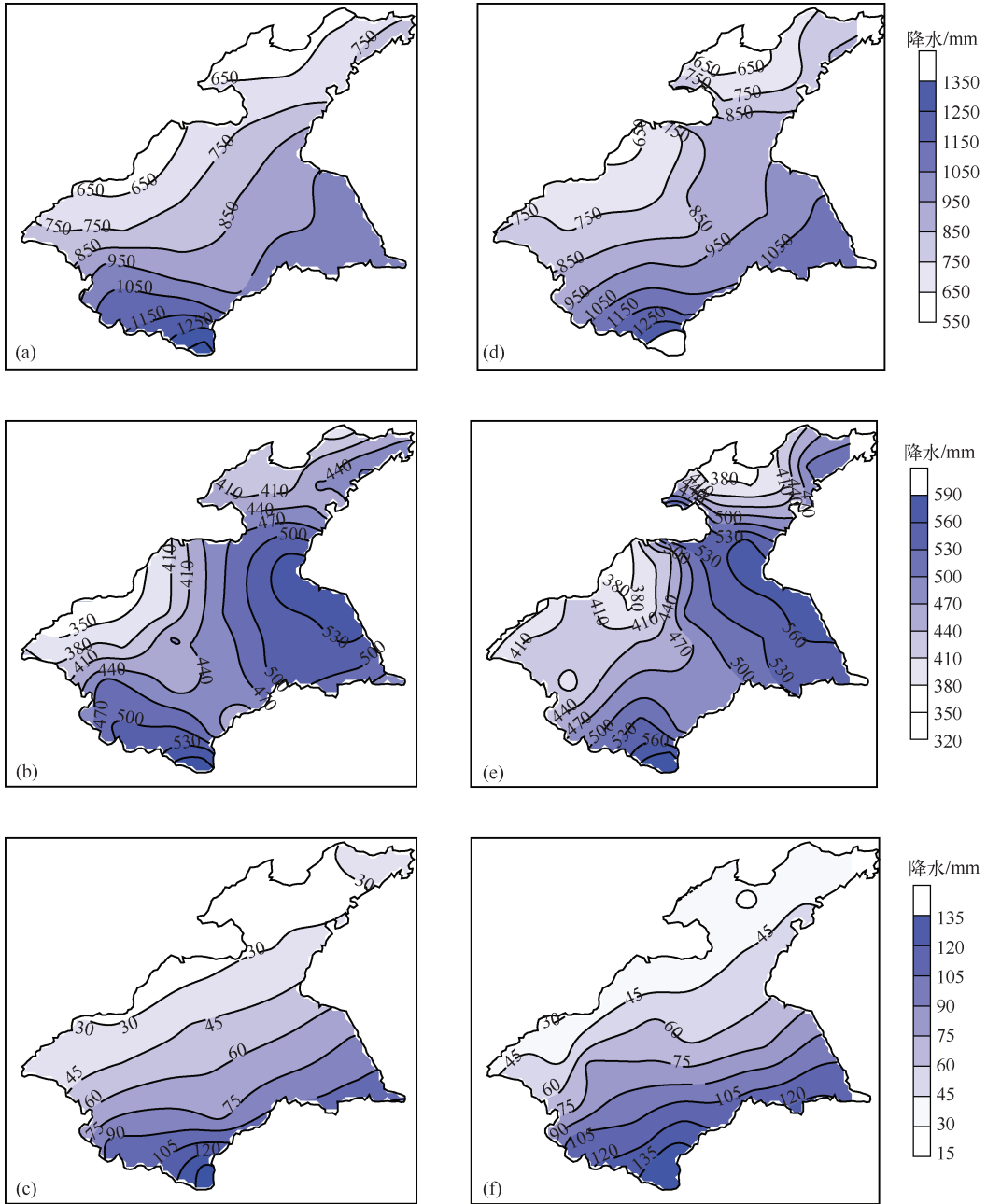


图4 基准时段年和季节降水空间分布:

年(a)、夏季(b)和冬季(c)观测降水;年(d)、夏季(e)和冬季(f)降水多模式集合

Fig. 4 Spatial distribution of annual and seasonal precipitation between observation and multimodel ensembles during 1961 - 1990; annual(a) , summer(b) and winter(c) observed precipitation; annual(d) , summer(e) and winter(f) multimodel ensembles simulated precipitation

表 2 淮河流域年、季地表温度变化(°C)

Tab. 2 Annual and seasonal mean temperature changes over Huaihe River basin

时段	基准时段 (1961—1990 年)	未来时段 (2011—2040 年)			变化		
	实际排放情景	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1
年	14.06	15.18	15.08	14.90	1.12	1.02	0.85
春季	13.73	14.90	14.73	14.60	1.17	1.00	0.87
夏季	25.73	26.73	26.67	26.53	1.00	0.94	0.80
秋季	15.08	16.18	16.06	15.94	1.10	0.98	0.86
冬季	1.69	2.88	2.86	2.55	1.19	1.17	0.86

表 3 淮河流域年、季降水变化(mm)

Tab. 3 Annual and seasonal mean precipitation changes over Huaihe River basin

时段	基准时段 (1961—1990 年)	未来时段 (2011—2040 年)			变化%		
	实际排放情景	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1
年	875	877	927	921	0.13	5.88	5.24
春季	176	174	183	185	-1.30	4.04	5.40
夏季	471	475	499	491	0.85	5.94	4.25
秋季	158	149	163	166	-5.82	2.93	4.56
冬季	70	79	82	79	12.37	16.76	13.02

2.2 月平均温度和降水变化

从月温度变化看(图 5a), 3 种情景下, 基准和未来时段温度年内分配过程基本一致, 未来各月温度均呈增加趋势. 其中 A2 和 A1B 情景下各月温度增加幅度比 B2 情景明显, 而 B2 情景下温度变化相对平缓. A2 情景下, 秋季的 11 月温度增幅最大, 达到 1.32°C; 其次是冬季的 2 月, 温度增幅为 1.23°C; 而夏季的 8 月温度增幅最小, 仅为 0.93°C. A1B 情景下, 冬季的 1 月温度增幅最大, 达到 1.25°C; 其次是秋季的 11 月, 温度增幅为 1.15°C; 而夏季的 8 月温度增幅最小, 仅为 0.86°C. B2 情景下, 冬季的 11 月温度增幅最大, 达到 0.63°C; 其次是夏季的 6 月, 温度增幅为 0.57°C; 而冬季的 2 月温度增幅最小, 仅为 0.30°C;

从月降水变化看(图 5b), 3 种情景下, 基准和未来时段降水年内分配过程基本一致, 未来各月降水增减变化并不一致, 表现较为复杂. 其中 A2 情景下, 除 2 月和 7 月外, 各月降水都呈减少趋势; 而 A1B 和 B1 情景下各月降水基本呈增加趋势. A1B 和 B1 情景降水增加幅度比 B2 情景明显, B2 情景下降水变化相对平缓. A2 情景下, 春季的 4 月降水减少较为明显, 达到了 21.71%; A1B 情景下, 冬季的 1 月降水增幅最大, 达到了 20.56%; 其次是冬季的 2 月降水增幅为 19.55%; 而秋季的 10 月降水减少了 2.09%; B1 情景下, 冬季的 12 月降水增幅最大, 达到 17.94%; 其次是冬季的 2 月, 降水增幅为 16.72%; 而秋季的 10 月降水减少了 0.53%; 整体来看, 不同情景、不同月份降水增减幅度不同, 变化较为复杂. A2 情景下各月降水呈减少趋势, 秋末冬初(10 月和 11 月)降水减少明显, 而其它各月降水增减变化并不显著; A1B 和 B2 情景下降水呈增加趋势, A1B 情景下冬季的 1 月、2 月和 B2 情景下冬季的 12 月、1 月降水增加较为明显. 这与 A2 情景下冬季降水呈减少趋势相反, 说明不同情景下对降水预估结果的不确定性较大.

2.3 年际和年代际温度和降水变化

从温度年际变化上看(图 6a), 相对于基准时段(1961—1990 年), 3 种情景下流域年平均温度均呈明显增加趋势, 都通过了 0.05 的显著性水平检验. 其中 A1B 情景下年平均温度增幅较大, 线性倾向率为 0.47°C/10 a; A2 情景下年平均温度线性倾向率为 0.21°C/10 a; 而 B1 情景下年平均温度线性倾向率为 0.17°C/10 a. 从温度年代际变化上看(图 7a), 3 种情景下, 温度年代际变化也呈增加趋势, 增温幅度随排放情景的增加而增大. 相对于基准时段, A2 情景下, 2020s 流域年平均温度增幅为 0.86°C; 2030s 年平均温度

增幅为1.24℃,而2040s年平均温度增幅为1.25℃;A1B情景下,2020s年平均温度增幅为0.56℃;2030s年平均温度增幅为0.98℃,而2040s年平均温度增幅为1.51℃;B1情景下,2020s年平均温度增幅为0.68℃;2030s年平均温度增幅为0.86℃,而2040s年平均温度增幅为1.01℃.

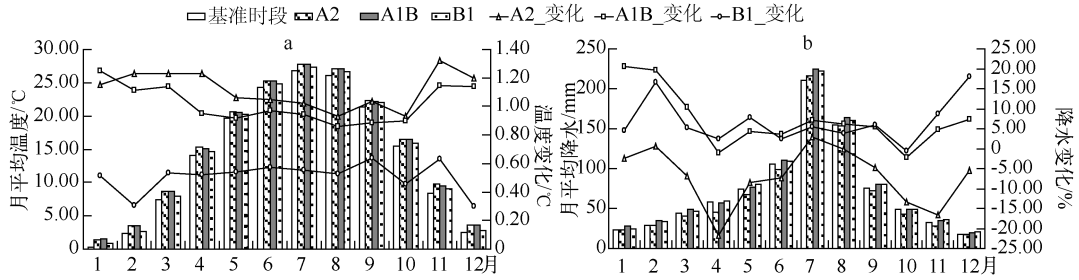


图5 淮河流域年内月平均温度(a)和降水(b)变化

Fig. 5 Monthly mean temperature(a) and precipitation(b) changes within the year over Huaihe River basin

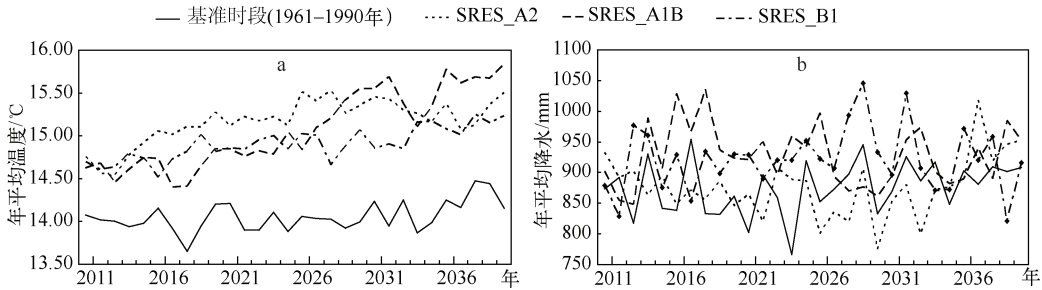


图6 不同情景下温度(a)和降水(b)年际变化

Fig. 6 Interannual changes of temperature (a) and precipitation (b) under different scenarios

从降水年际变化上看(图6b),相对于基准时段(1961-1990年),3种情景下降水年际间变化波动较大,增减趋势不明显,都没有通过0.05的显著性水平检验.其中A2情景下年平均降水增幅较大,线性倾向率为11 mm/10 a;B1情景下年平均降水线性倾向率为7 mm/10 a;而A1B情景下,年平均降水呈减少趋势,线性倾向率为-4 mm/10 a.从降水年代际变化上看(图7b),除A2情景下,2030s降水为减少趋势外,2020s和2040s降水年代际变化均呈增加趋势,但增加并不显著;2020s年平均降水增幅为3 mm;2030s年平均降水减少了25 mm,而2040s年平均降水增幅为25 mm. A1B情景下,2020s年平均降水增幅为63 mm;2030s年平均降水增幅为41 mm,而2040s年平均降水增幅为50 mm;B1情景下,2020s年平均降水增幅为31 mm;2030s年平均降水增幅为66 mm,而2040s年平均降水增幅为41 mm.整体来看,不同情景、不同年代降水增减幅度并不一致,没有一致的规律性.

2.4 年平均温度和降水空间变化

3种情景下淮河流域未来30a地面平均温度的空间变化可见,不同情景下多模式集合模拟的年平均温度空间变化差异较大,不同区域温度增幅有所不同(图8). A2情景下,全流域年平均温度呈增加趋势,温度增幅为1.04~1.25℃;北部温度增幅比南部明显,山区增温幅度比平原区明显;A1B情景下,年平均温度增幅为1.00~1.10℃;流域北部和西部山丘区温度增幅比平原区明显,不同情景下年平均温度和降水空间变化(相对于1961-1990年)表明,平原区温度增幅基本一致,等温线过渡带(东北-西南走向)表现十分明显;B1情景下,流域温度增幅在0.81~0.88℃,东部沿海地区、南部大别山区以及北部地区温度增幅基本在0.88℃左右,而流域中部地区温度增幅相对较低,约在0.81℃左右,温度增加范围并不显著(图8).

3种情景下淮河流域未来30a降水空间分布变化见图8. 预估结果表明:不同情景下,流域不同区域年

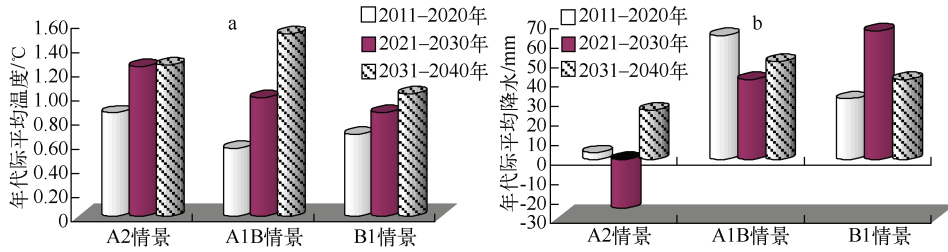


图 7 淮河流域年代际温度(a)和降水(b)变化

Fig. 7 Interdecadal changes of temperature(a) and precipitation (b) over Huaihe River basin

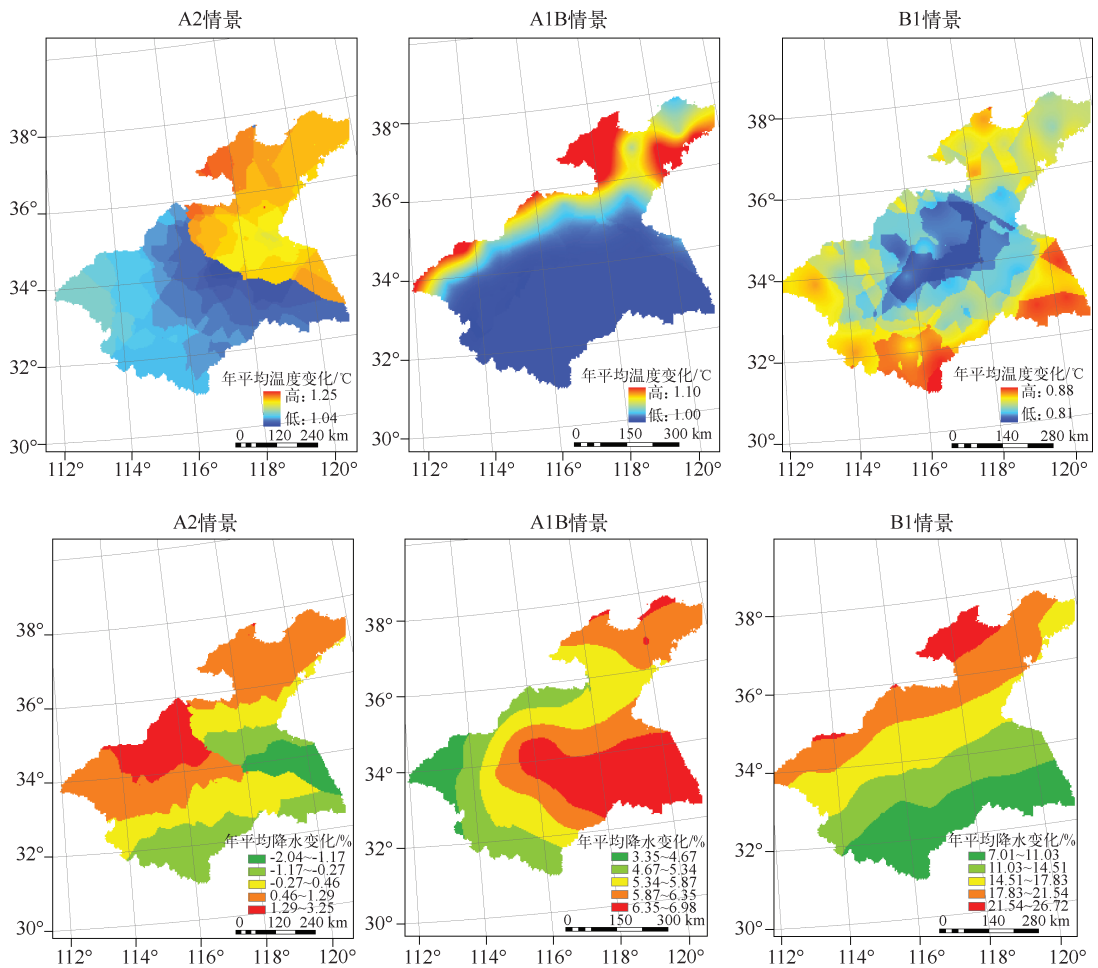


图 8 不同情景下年平均温度和降水空间变化(相对于 1961—1990 年)

Fig. 8 Spatial changes of annual mean temperature and precipitation under different scenarios (relative to 1961 - 1990)

平均降水增减变化趋势并不一致,表现较为复杂. A2 情景下,流域北部和西部山丘区年平均降水有增加趋势,增加幅度为 0.46%~3.25%,增幅并不明显;而东部沿海地区和南部平原区降水呈减少趋势,减少幅度为 0.27%~2.04%. A1B 情景下,流域降水由东部平原区向西部山区逐渐增加,呈弧形带状分布,增加幅度为

3.35%~6.98%; B1 情景下, 流域降水由南向北逐渐增加, 基本呈带状分布, 降水增加幅度为 7.01%~26.72%, 流域北部和西部降水增加幅度相对较多。

3 结论

基于偏差修正/空间降尺度方法处理的 IPCC AR4 中 8 个全球海气耦合模式集合平均结果, 分析了 SRES A2(高排放)、A1B(中排放)和 B1(低排放)情景下淮河流域未来 30 a(2011—2040 年)相对于基准时段(1961—1990 年)地面温度和降水的时空变化特征。初步得到以下几点结论:

1) 与基准时段站点观测温度和降水资料比较, 多模式集合较好地反映了温度由北向南、由沿海向内陆递增的空间分布特征, 对受地形影响的温度空间分布模拟较好, 再现了不同地形过渡区温度的变化特点, 与实况相符合。多模式集合对降水由南向北、由沿海向内陆递减的空间分布特征模拟也较好, 对受局地地形影响的降水模拟更为细致, 较好地反映了流域内降水高/低值区的分布特征。多模式集合能很好地模拟流域温度和降水的年内分配特征, 与观测基本一致, 但冬季各月温度和降水模拟效果还有待于提高。

2) 3 种情景下未来流域年、季平均温度均呈增加趋势, 表现出温度增幅随排放强度增加而增加的特点。A2、A1B 和 B1 情景下, 年平均温度增幅分别为 1.12、1.02 和 0.85℃。季节温度变化与年温度增加趋势一致, 3 种情景下流域冬、春季温度增加幅度相对较大, 其次是秋季, 而夏季温度增幅相对较小。未来流域年平均降水有增加趋势, 但增幅不明显。A2 情景下, 年降水增加相对较小, 增幅仅为 0.13%; 而 A1B 和 B1 情景下, 年降水分别增加了 5.88% 和 5.24%。不同情景和不同季节降水增减变化并不一致, 表现较为复杂。

3) 3 种情景下未来流域年平均温度变化呈明显增加趋势, 其中 A2、A1B 和 B1 情景下年平均温度线性倾向率分别为 0.21、0.47 和 0.17℃/10 a, 未来不同年代际温度增加幅度逐渐增大。流域降水年际间波动较大, 表现较为复杂, 增减趋势不明显。其中 A2 和 B1 情景下降水增幅相对较大, 线性倾向率分别为 11 和 7 mm/10 a; 而 A1B 情景下, 降水呈减少趋势, 线性倾向率为 -4 mm/10 a。不同年代际降水增减幅度并不一致, 没有明显的规律性。

4) 3 种情景下未来流域年温度空间变化整体呈现出北部增温幅度大于南部、山丘区增温幅度大于平原区的特点, 但局部地区温度增幅有所差异。不同情景下年降水空间变化较为复杂, 不同区域降水增减幅度差异并不明显, 没有很好的一致性。

5) 由于目前对气候变化认识的局限性、排放情景的多样性、气候模式的不确定性(模式参数化、气溶胶气候效应、模式中云辐射强迫模拟等)以及气候系统各圈层相互作用的复杂性等问题还没有很好地解决; 同时, 多模式集合以等权重法为主, 对集合分析方法还需进一步改进, 因此, 未来要结合不同降尺度(动力或统计)技术, 采用不同分析方法, 对区域气候变化预估的不确定性问题进行深入研究。

4 参考文献

- [1] Solomon S, Qin D, Manning M *et al.* Climate Change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Tebaldi C, Smith RL, Nychka D *et al.* Quantifying uncertainty in projections of regional climate change: a bayesian approach to the analysis of multimodel ensembles. *Journal of Climate*, 2005, **18**: 1524-1540.
- [3] 赵宗慈. 全球气候变化预估最新研究进展. 气候变化研究进展, 2006, **2**(2): 68-70.
- [4] 郝振纯, 鞠琴, 余钟波等. IPCCAR4 气候模式对长江流域气温和降水的模拟性能评估及未来情景预估. 第四纪研究, 2010, **30**(1): 127-137.
- [5] Phillips TJ, Gleckler PJ. Evaluation of continental precipitation in 20th century climate simulations; The utility of multimodel statistics. *Water Resources Research*, 2006, **42**: W03202. doi:10.1029/2005WR004313.
- [6] 孙颖. 用于 IPCC 第四次评估报告的气候模式比较研究简介. 气候变化研究进展, 2005, **1**(4): 162-163.
- [7] 刘珂, 许吟隆, 陶生才等. 多模式集合对中国气温的模拟效果及未来 30 年中国气温变化预估. 高原气象, 2011, **30**(2): 363-370.
- [8] 刘敏, 江志红. 13 个 IPCC AR4 模式对中国区域近 40a 气候模拟能力的评估. 南京气象学院学报, 2009, **32**(2):

- 256-268.
- [9] 张莉,丁一汇,孙颖. 全球海气耦合模式对东亚季风降水模拟的检验. *大气科学*, 2008, **32**(2): 261-276.
- [10] 江志红,陈威霖,宋洁等. 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. *大气科学*, 2009, **33**(1): 109-120.
- [11] 许崇海,罗勇,徐影. 全球气候模式对中国降水分布时空特征的评估和预估. *气候变化研究进展*, 2010, **6**(6): 398-404.
- [12] 李博,周天军. 基于 IPCC A1B 情景的中国未来气候变化预估: 多模式集合结果及其不确定性. *气候变化研究进展*, 2010, **6**(4): 270-276.
- [13] Semenov MA, Stratonovitch P. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research*, 2010, **41**: 1-14.
- [14] Collins M. Ensembles and probabilities: a new era in the prediction of climate change. *Philosophical Transactions Royal Society, London*, 2007, **365A**: 1957-1970.
- [15] 姜大膀,王会军,郎咸梅. 全球变暖背景下东亚气候变化的最新情景预测. *地球物理学报*, 2004, **47**(4): 590-596.
- [16] 许崇海,罗勇,徐影. IPCC AR4 多模式对中国地区干旱变化的模拟及预估. *冰川冻土*, 2010, **32**(5): 867-874.
- [17] 程炳岩,刘晓冉,张天宇等. 基于全球气候系统模式结果的重庆 21 世纪气候变化预估分析. *气象科技*, 2009, **37**(4): 415-419.
- [18] 赵宗慈,罗勇. 21 世纪中国东北地区气候变化预估. *气象与环境学报*, 2007, **23**(3): 1-4.
- [19] 许崇海,沈新勇,徐影. IPCC AR4 模式对东亚地区气候模拟能力的分析. *气候变化研究进展*, 2007, **3**(5): 287-292.
- [20] Meehl GA, Covey C, Delworth T *et al.* The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, **88**: 1383-1394.
- [21] 范丽军,符淙斌,陈德亮. 统计降尺度法对未来气候变化情景预估的研究进展. *地球科学进展*, 2005, **20**(3): 320-329.
- [22] Maurer EP, Adam JC, Wood AW. Climate model based consensus on the hydrologic impacts of climate change to the Rio Lempabasin of Central America. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, **13**: 183-194.
- [23] Adam JC, Lettenmaier DP. Adjustment of global gridded precipitation for systematic bias. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(D9): 4257. doi:10.1029/2002JD002499.
- [24] Wood AW, Leung LR, Sridhar V *et al.* Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Climatic Change*, 2004, **62**: 189-216.
- [25] Nakicenovic N, Alcamo J, Davis G *et al.* Special Report on Emission Scenarios, Working Group III, Intergovernment Panel on Climate Change (IPCC), UK. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 595.