

“三江源”地区未来气候变化的模拟分析

许吟隆¹ 张颖娴¹ 林万涛² 徐 宾¹ 肖子牛³

1 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所农业部农业环境与气候变化重点开放实验室, 北京 100081
2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029
3 云南省气象局, 昆明 650034

摘 要 利用 ECMWF 1979~1993 年的再分析数据 (ERA15) 作为边界条件, 驱动区域气候模式系统 PRE-CIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies) 模拟“三江源”地区的月均降水与台站实际观测资料进行的对比表明, PRECIS 模拟的降水值偏大, 但总体上能够模拟出降水的季节变化特征。气候基准时段 (1961~1990 年) 的模拟结果与同期观测资料的对比分析表明, PRECIS 能够模拟出“三江源”地区降水的季节分布特征和空间差异, 但模拟值总体偏大。相对于气候基准时段, SRES A2、B2 情景下 2071~2100 年 (2080s 时段) “三江源”地区增温明显, 两种情景下年均升温分别可达 4℃和 2.8℃, 降水略有增加; 冬季升温幅度最大, 分别可达 4.4℃和 3.2℃, 降水增加的比例也最大; 夏季“三江源”地区的升温达到 4.2℃和 3℃以上, 但有些地区的降水呈减少趋势。夏季降水量的减少和气温的升高会加剧“三江源”地区气候变干的趋势, 导致源区水源补给不足。应当采取切实可行的措施保护江河源区的自然生态系统, 避免源区气候环境的进一步恶化。

关键词 三江源 气候变化 气温 降水 模拟
文章编号 1006-9585 (2007) 05-0667-09 **中图分类号** P468 **文献标识码** A

Analyses on the Climate Change Scenarios over the Three Rivers’
Headstream Region in China

XU Yin-Long¹, ZHANG Ying-Xian¹, LIN Wan-Tao², XU Bin¹, and XIAO Zi-Niu³

1 Key Laboratory of Agro-Environment and Climate Change, Ministry of Agriculture, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081
2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
3 Yunnan Meteorological Bureau, Kunming 650034

Abstract ECMWF 1979—1993 reanalysis data (ERA15) is used as quasi-observational boundary conditions to drive the PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies), a regional climate modeling system developed in UK Met Office Hadley Centre, and the direct comparison of the simulated monthly mean precipitation and *in situ* observation in meteorological stations in the Three Rivers’ Headstream Region shows that the precipitation is over-estimated by PRECIS, however, the PRECIS can reproduce the seasonal cycle of precipitation in the Three Rivers’

收稿日期 2006-09-20 收到, 2007-07-15 收到修定稿
资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2003CB415101-03、国家“十五”科技攻关课题 2004BA611B02 和国家“十一五”科技支撑计划课题 2007BAC03A02
作者简介 许吟隆, 男, 1964 年出生, 博士, 研究员, 主要从事中国区域气候变化情景的构建及其对农业的影响评估研究。
E-mail: xuyi@ami.ac.cn

Headstream Region. It is indicated from the comparison between the simulated baseline (1961—1990) precipitation and observation that the seasonal precipitation regime and spatial distribution over the Three Rivers' Headstream Region can be simulated by the PRECIS, but the simulated precipitation is systematically larger than observation. The temperature increments over the Three Rivers' Headstream Region could reach 4 °C, 2.8 °C annually, 4.4 °C, 3.2 °C in winter, and 4.2 °C, 3 °C in summer during 2071—2100 (2080s) under SRES A2 and B2 scenarios, respectively, relative to baseline, while the corresponding annual precipitation would increase slightly, the winter precipitation would increase in high percentage, but the summer precipitation would decrease in some areas of the Three Rivers' Headstream Region. The coincidence of temperature increase and precipitation decrease in summer would enhance the drought in the Three Rivers' Headstream Region and result in water supply shortage to the three rivers. Protective measures should be taken to conserve the natural ecosystems and avoid the deterioration of the climate and environment over the Three Rivers' Headstream Region in China.

Key words The Three Rivers' Headstream Region, climate change, temperature, precipitation, simulation

1 引言

由于青藏高原独有的热力和动力作用,形成了东亚特殊的季风气候系统。“三江源”地区位于青藏高原的东北部(31°39'~36°16'N、89°24'~102°23'E)^[1],海拔3 450~6 621 m,是我国长江、黄河及国际河流澜沧江—湄公河的发源地,素有“江河源”之称,被誉为“中华水塔”。由于受到地形及其高原加热场的作用,“三江源”地区易发生低涡、切变、气旋和局地锋面等降水系统,气温低、蒸发量少、夜雨率高,相对比较湿润,并拦截西南气流带来的大量水汽,为源地提供了水源。除此之外源区水资源的持续补给还依赖于冰川、雪山的稳定和广袤的具有“海绵”效用的草甸植被与沼泽。

“三江源”跨越暖温带和温带等气候带,由于海拔高度的垂直变化,致使地貌类型丰富而独特,气候环境多样,从而形成了“三江源”特有的生态系统类型。近几十年来,由于不合理的人类活动和气候干旱化的共同影响,“三江源”地区出现了许多生态和环境问题,如冰川退缩、湖泊萎缩、江河断流、沼泽湿地面积减少、冻土环境和地表植被退化、水土流失及土地荒漠化加剧等,生态与环境的恶化直接影响了区域经济社会的可持续发展,对长江、黄河和澜沧江中下游地区的生态与环境也带来了各种不利的影响。因此“三江源”地区气候变化及其对生态和环境的影响成为世人关注的热点问题。

近年来许多学者对青藏高原江河源区气候变

化及其对生态和环境的影响做了大量的研究工作^[2~6]。研究表明:近40多年来“三江源”地区的平均气温、日最高气温、日最低气温均呈增温态势;日最低气温的增温比日最高气温的增温更显著;20世纪90年代以来气温明显偏高^[7],江河源区的平均升温明显高于全国的平均升温^[8]。王根绪等^[9]的分析发现江河源区降水量呈现增加趋势,但主要体现在春季降水和近15年来冬季降水明显增加,对植被生长起重要作用的夏季降水虽然总体上没有明显变化,但局部地区夏季降水呈现持续减少的趋势,秋季降水也呈微弱减少趋势。总体而言,近40年来“三江源”地区气候变化表现为气温升高、降水减少和蒸发增大的干旱化趋势^[9]。江河源区脆弱的生态系统对气候的这种变化响应强烈,冰川退缩和多年冻土消融加剧,导致大范围高寒草甸与草原植被退化,破坏了生态平衡^[9,10]。在全球变暖的背景下,地处全球气候变化预警区——青藏高原腹地的“三江源”地区的气候变化将直接关系到源区的生态平衡,研究“三江源”地区未来的气候变化具有重要意义。

预估由于温室气体排放的持续增加引起的气候变化,全球气候模式(GCM)模拟被认为是一种有效的方法。但当应用GCM结果评估区域气候变化的影响时,GCM的水平分辨率则显得相对不足,需要进行降尺度分析,而区域气候模式(RCM)则是一种有效的动力学降尺度分析工具。刘鸿波等^[11]对RCM模拟现在和未来气候及极端气候事件等方面的研究进展进行了介绍,同时指出RCM在短期气候预测中尚没有得到有效的应用。高学杰等^[12~15]利用区域气候模式RegCM2单

向嵌套澳大利亚全球海气耦合模式 CSIRO R21L9, 检验了 RegCM2 对中国当代气候的模拟能力, 并对 CO₂ 倍增情景下中国区域的气候变化和气候极端事件的影响进行了模拟分析。张英娟等^[16]将欧洲区域气候模式 REMO 首次应用于东亚地区, 并利用该模式对 1980 年和 1990 年东亚季风季节变化进行了模拟研究。许吟隆等^[17]利用 1979~1983 年的 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 再分析数据作为准观测边界条件驱动 Hadley 气候中心的 RCM 系统 PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies)^[18], 对其模拟中国区域气候的能力进行了初步的统计分析, 发现 PRECIS 能够较好地模拟出全国范围最高、最低气温的型态分布特征; 对降水的模拟值偏高, 但亦显示出很强的模拟极端降水事件的能力。许吟隆等曾对 PRECIS 模拟的 SRES^[19] A2、B2 排放情景下中国 21 世纪 3 个时段的气候变化趋势进行了统计分析^[20], 对 PRECIS 模拟中国区域当代气候的模拟能力和 SRES B2 情景下 2071~2100 年 (2080s 时段) 中国区域未来气候变化的响应进行了分析^[21]。

本文利用 ECMWF 1979~1993 年的再分析数据 (ERA15) 作为准观测侧边界条件驱动 PRECIS, 通过模式模拟的降水值与“三江源”地区实际台站观测数据的对比分析, 以及气候基准时段 (1961~1990 年) 降水模拟结果与观测数据的对比分析, 验证 PRECIS 对“三江源”地区降水的模拟能力。然后分析 PRECIS 模拟的 SRES A2、B2 温室气体排放情景下 2080s 时段相对于气候基准时段“三江源”地区气温和降水变化的情景, 为“三江源”地区适应气候变化的决策提供可以参考的科学基础数据支撑。

2 PRECIS 对“三江源”地区降水模拟能力的验证

当前版本的 PRECIS 系统 (V1.0) 包含 Hadley 气候中心的 RCM 本身、ERA15 数据和 GCM 生成的气候基准时段、SRES A2、B2 排放情景下的气候情景数据和运行 RCM 所需的各种相关数据库。为给 PRECIS 提供高分辨率的边界场, 在

HadCM3^[20]低水平分辨率 2.5° (纬度) × 3.75° (经度) 网格模拟的基础上, 在经纬度方向上水平分辨率各增加一倍, 重新运行 HadCM3 的大气部分 HadAM3P 产生高分辨率的边界场驱动 PRECIS。PRECIS 的大气部分应用静力方程, 其水平分辨率在旋转坐标下为 0.44° × 0.44°, 在中纬度地区水平格点距约为 50 km, 积分时间步长为 5 min。垂直方向采用 σ 坐标, 分为 19 层, 关于 PRECIS 模式系统的详细介绍请参阅文献 [18]。许吟隆等^[17,20,21]通过分析发现 PRECIS 对中国区域温度分布及变化的模拟效果较好, 因此本文重点分析 PRECIS 模拟“三江源”地区降水的能力, 以期应用 PRECIS 进行“三江源”地区的气候变化情景预估奠定基础。

本文首先利用 ERA15 驱动 PRECIS 模拟的降水月均值与气象台站观测数据进行直接的对比, 以验证 PRECIS 本身的模拟能力。本文所选的区域及其中的 69 个气象台站分布如图 1 所示。为了对“三江源”及其周边地区的气候变化有更清晰的认识, 本文绘图所选区域的范围大于其他文献定义的“三江源”区域^[1]。

从 PRECIS 模拟的 1979~1993 年 15 年逐月的月均降水与观测值的对比 (图 2) 可以看出, 总体上模拟的月降水量比观测值大, 但模拟的降水变化趋势与观测值有着很好的一致, 模式系统模拟出了“三江源”地区降水的季节变化特征。

由于“三江源”地区气象台站相对稀疏, 用

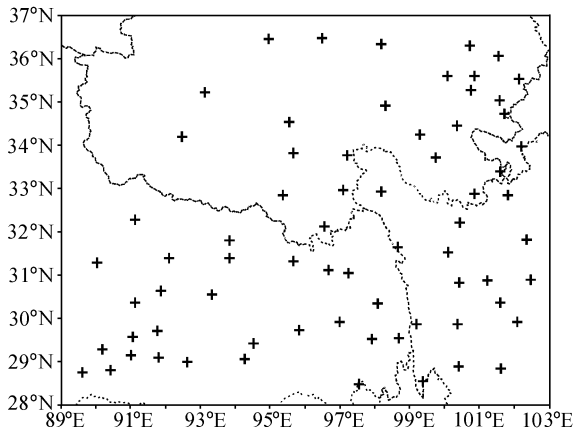


图1 “三江源”地区气象台站分布
Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the Three Rivers' Headstream Region

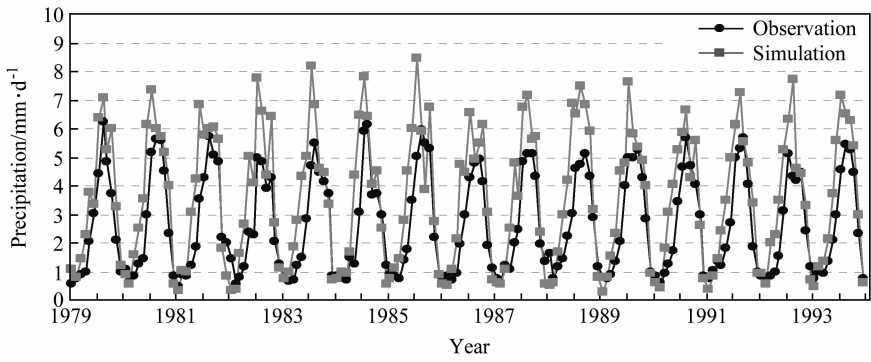


图 2 1979~1993 年“三江源”地区逐月降水量模拟值与观测值的比较
Fig. 2 Comparison of the annual mean simulated and observed precipitation in the Three Rivers' Headstream Region from 1979 to 1993

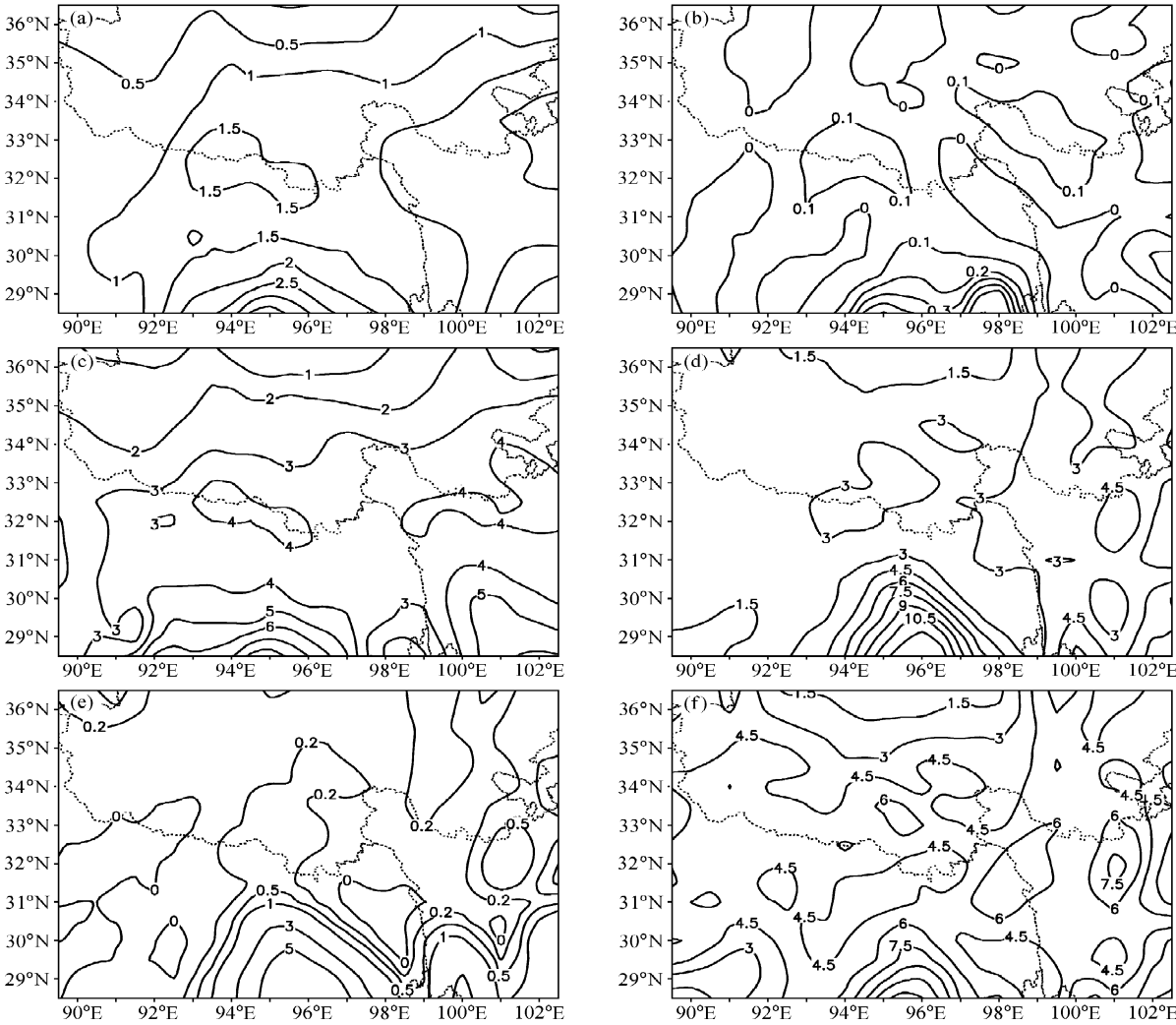


图 3 “三江源”地区气候基准时段降水模拟值与观测数据的比较 (单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$): (a) 年平均观测值; (b) 冬季观测值; (c) 夏季观测值; (d) 年平均模拟值; (e) 冬季模拟值; (f) 夏季模拟值
Fig. 3 Comparison between precipitation of PRECIS simulation and observation in baseline over the Three Rivers' Headstream Region (units: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$): (a) annual observation; (b) winter observation; (c) summer observation; (d) annual simulation; (e) winter simulation; (f) summer simulation

CRU (Climate Research Unit)^[23]数据结合台站观测数据与基准时段气候模拟结果进行比较分析。从气候基准时段降水模拟值与观测值的对比可以看出(图3),“三江源”地区模拟的年均降水值较观测偏大,PRECIS 模拟出了唐古拉山东部降水的高值区以及自北向南降水增加的空间分布特征;“三江源”地区冬季降水的模拟值与观测值符合较好,但模拟的横断山脉西侧降水的极大值区较观测值偏大明显;对于夏季降水,PRECIS 模拟出了唐古拉山东部和川西高原降水的高值区,且模拟值与观测值较为接近。总体而言,PRECIS 模拟值较观测值偏大,但 PRECIS 模式系统较好地模拟出了“三江源”地区降水的空间分布特征和季节差异,体现出了“三江源”地区降水型态的基本特征。

3 “三江源”地区未来气候变化情景分析

本文基于政府间气候变化专门委员会(IPCC)2000 年发布的《排放情景特别报告》(SRES)^[19]

中构建的 A2、B2 两种温室气体排放方案,对“三江源”地区 2080s 时段的气候变化情景进行分析,其中 A2 是温室气体的中—高排放情景,B2 是中—低排放情景。从图 4 可以看出,SRES A2、B2 情景下 2080s 时段“三江源”地区的气温明显上升,虽然降水总体趋势是增加的,但年际变化的波动很大,有些年份降水的减少和高温事件同时发生,加剧该地区的干旱化趋势。

从 SRES A2、B2 情景下 2080s 相对于基准时段年均和冬夏两季气温、降水量的变化(图 5 和图 6)可以看出,“三江源”地区明显增温,A2、B2 情景下“三江源”地区年均增温超过 4℃和 2.8℃,冬季增温明显,超过 4.4℃和 3.2℃,增温幅度南北差异较大;夏季“三江源”的大部分区域增温在 4.2℃和 3℃以上。年均降水是增加的,但冬季降水增加很少,夏季“三江源”的部分区域降水减少。相对于基准时段,A2 情景下“三江源”地区的年均降水增加幅度约为 0.1~0.5 mm·d⁻¹,B2 情景下约为 0.1~0.4 mm·d⁻¹,相对于整个区域来说增幅较小;冬季降水增加幅度很小,A2 情景下约为 0.05~0.25 mm·d⁻¹,B2 情景下约为 0.05~0.15 mm·d⁻¹,只有在唐

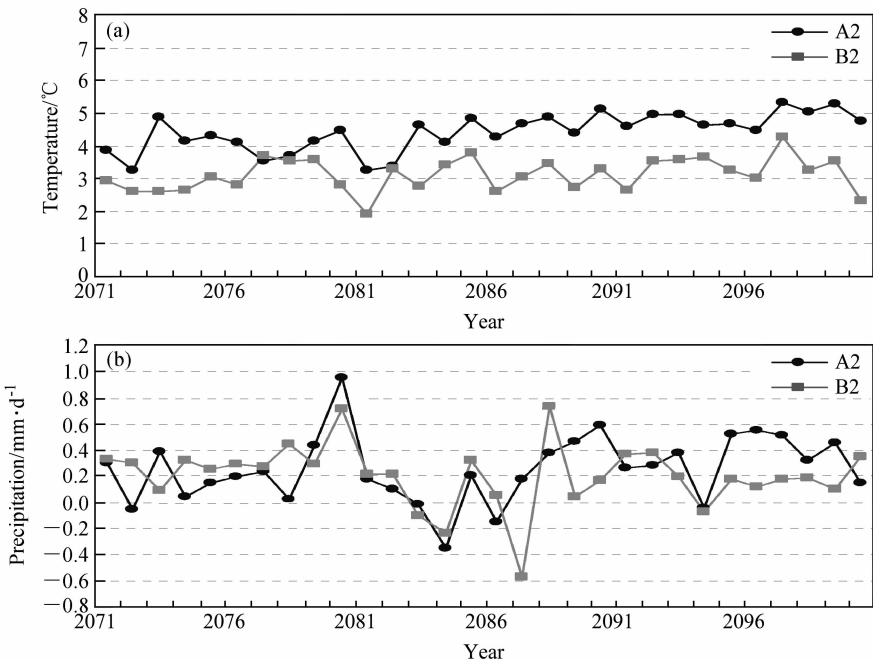


图 4 SRES A2、B2 情景下“三江源”地区 2080s 相对于气候基准时段年均温度和降水的时间序列变化:(a) 温度;(b) 降水
Fig. 4 Time series variety of annual temperature and precipitation changes in 2080s over the Three Rivers' Headstream Region under SRES A2 and B2 relative to baseline: (a) temperature; (b) precipitation

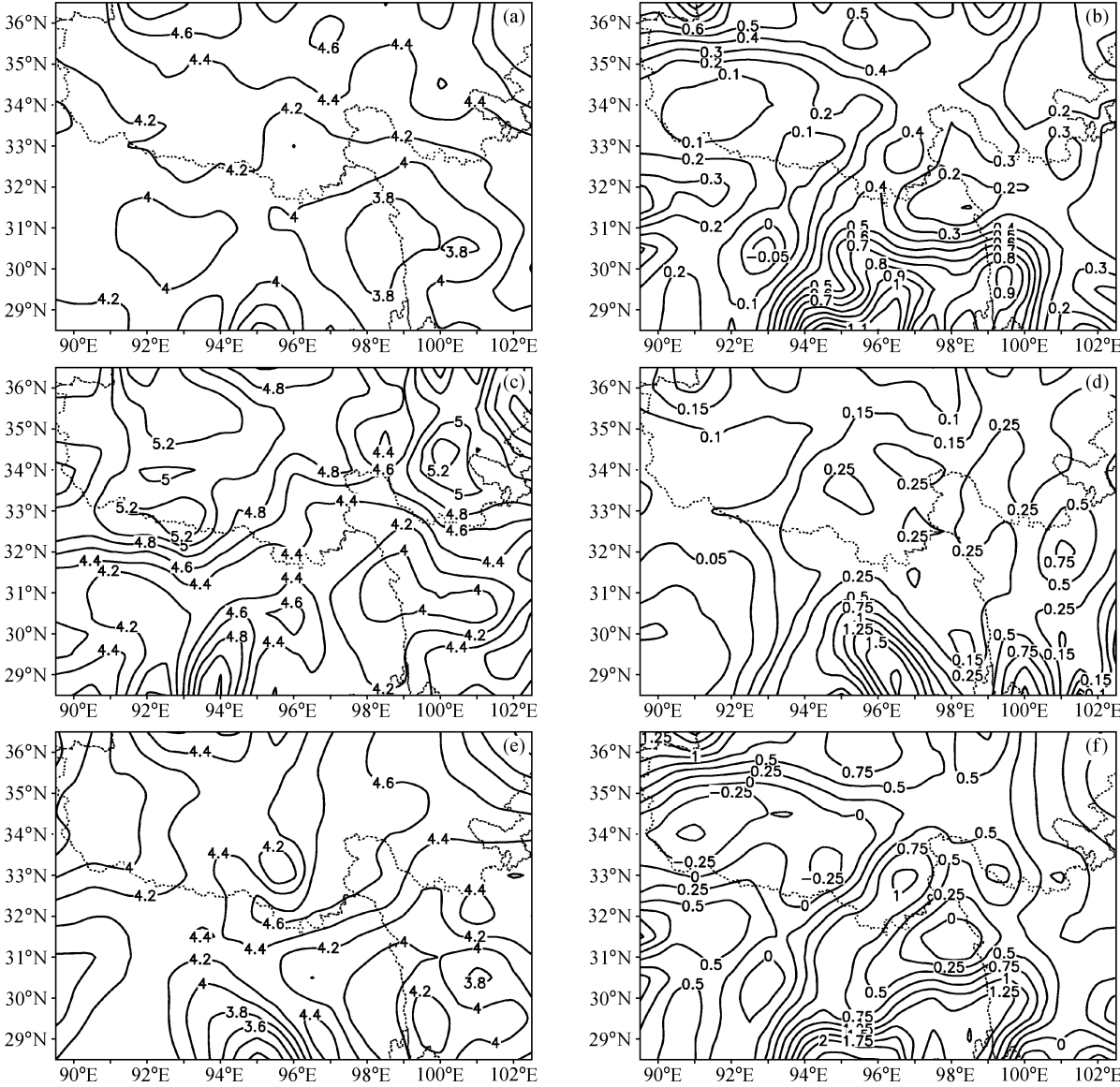


图 5 SRRES A2 情景下“三江源”地区 2080s 平均气温(单位:℃)和降水量(单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)的变化:(a) 年平均气温;(b) 年平均降水;(c) 冬季气温;(d) 冬季降水;(e) 夏季气温;(f) 夏季降水

Fig. 5 Changes of mean temperature (units: $^{\circ}\text{C}$) and precipitation (units: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$) in 2080s over the Three Rivers' Headstream Region under SRES A2 relative to baseline: (a) annual temperature; (b) annual precipitation; (c) winter temperature; (d) winter precipitation; (e) summer temperature; (f) summer precipitation

古拉山的高海拔地区有可能达到 $0.25 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$; 夏季“三江源”有些区域降水减少, A2 情景下降水量减少可达 $0.25 \sim 0.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, B2 情景下亦达 $0.25 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。由于“三江源”地区的降水补给大部分在夏季, 降水量的减少和气温的升高会加剧“三江源”地区气候变干的趋势。

从表 1 可以看出, A2、B2 情景下 2080s 时

段“三江源”整个区域平均的年均气温升高可达 4.3°C 和 3.1°C , 降水量增加 9% 和 7%; 冬季升温幅度最大, 降水增加比例也最大, 但夏季整体降水增加比例仅为 5% 和 2%。由于降水的增加对源区水源的补充很可能不抵升温引起的水分的蒸发, 从而导致三江源地区的水源补给不足。

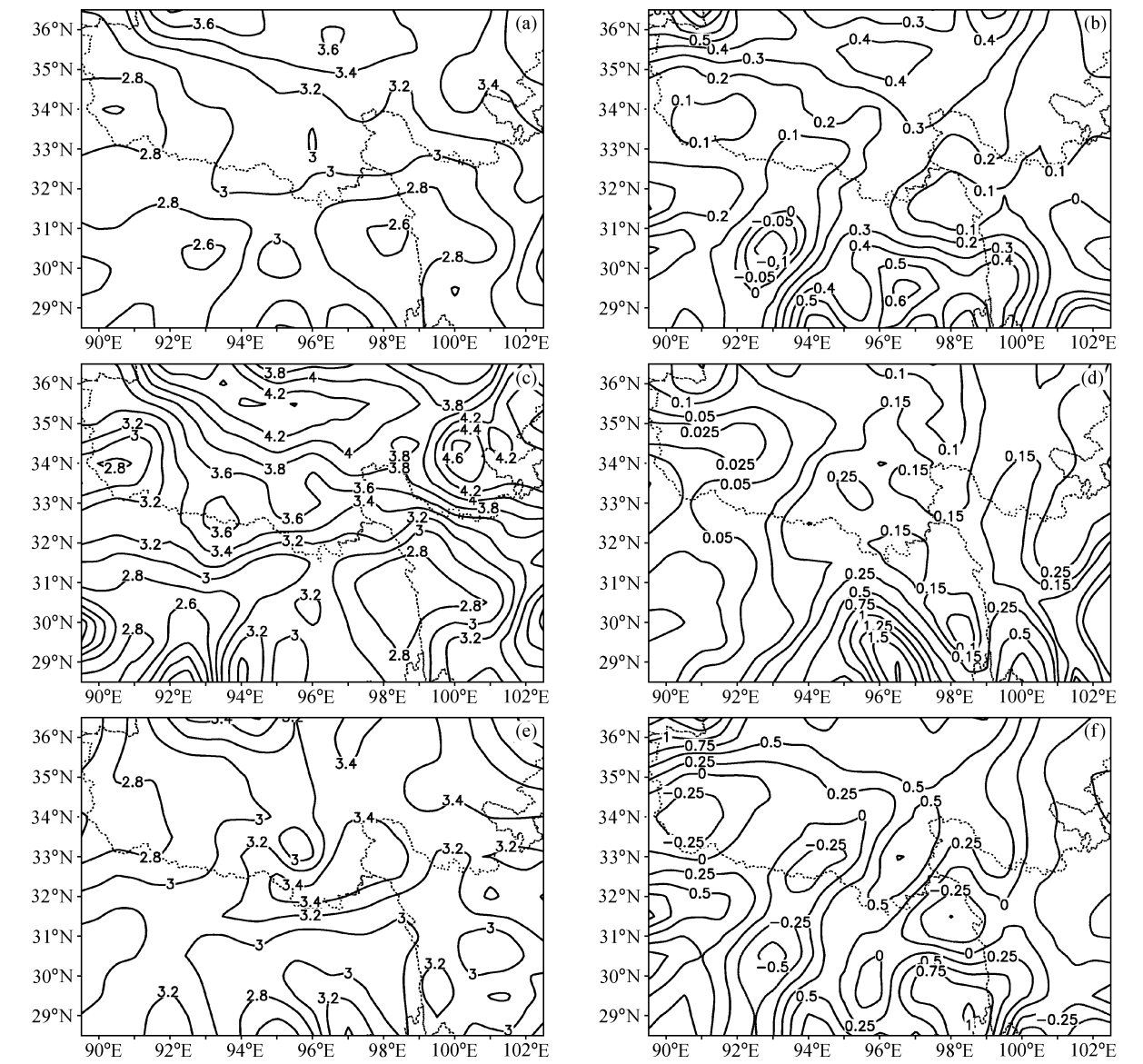


图6 SRRES B2 情景下“三江源”地区2080s平均气温(单位:℃)和降水量(单位: mm · d⁻¹)的变化:(a)年平均气温;(b)年平均降水;(c)冬季气温;(d)冬季降水;(e)夏季气温;(f)夏季降水

Fig. 6 Changes of mean temperature (units;℃) and precipitation (units; mm · d⁻¹) in 2080s over the Three Rivers' Headstream Region under SRES B2 scenario relative to baseline: (a) annual temperature; (b) annual precipitation; (c) winter temperature; (d) winter precipitation; (e) summer temperature; (f) summer precipitation

表1 “三江源”地区 SRES A2、B2 情景下 2080s 4 个季节和年平均气温和降水变化

Table 1 Changes of seasonal and annual mean temperature and precipitation over the Three Rivers' Headstream Region in 2080s under SRES A2 and B2 scenarios relative to baseline

季节	A2		B2	
	温度增量/℃	降水变化/%	温度增量/℃	降水变化/%
春季	3.8	13	2.5	10
夏季	4.3	5	3.2	2
秋季	4.2	8	2.6	10
冬季	4.7	53	3.6	38
年均	4.3	9	3.1	7

4 结论与讨论

通过上述分析, 可得以下结论:

(1) 通过 ERA15 再分析数据驱动 PRECIS 获得的模拟结果与气象台站观测数据进行的直接对比表明, PRECIS 模拟的“三江源”地区的降水值比观测值偏大, 但 PRECIS 很好地模拟出了“三江源”地区降水的季节变化特征。

(2) PRECIS 基准时段的模拟结果与观测数据的比较分析表明, 模拟值较观测值偏大且表现出了更多的局地分布特征, 这可能是由于“三江源”地区复杂的地形所致, 但 PRECIS 能够模拟出“三江源”地区降水的空间分布特征和季节差异, 这为利用 PRECIS 进行“三江源”地区未来气候变化的情景预估奠定了基础。

(3) PRECIS 模拟结果表明, 相对于基准时段, SRES A2、B2 情景下 2080s “三江源”地区气温显著增加, 年均增温分别可达 4°C 和 2.8°C 以上; 冬季增温明显, 两种情景下分别可达 4.4°C 和 3.2°C , 夏季不及冬季明显, 但大部分的区域亦可达到 4.2°C 和 3°C 以上。年均降水增加不明显, 冬季降水增加比例较大, 而夏季“三江源”部分区域降水减少, 升温 and 降水减少的综合效应会加剧“三江源”地区的干旱化趋势, 从而造成江河源区的水源补给不足。

从以上分析可以看出, 由于温室气体排放增加引起的全球变暖会加剧未来“三江源”地区的干旱化趋势, 因此, 应当采取切实可行的措施保护江河源区的自然生态系统, 避免源区气候环境的进一步恶化。另外, 本文分析只考虑温室气体效应的 SRES A2、B2 情景下“三江源”区的气候变化情景, 未来的工作应同时考虑气溶胶的作用, 且本文基准时段和 2080s 都只有一个模拟试验的结果, 应同时分析多个模拟试验结果以认识模式模拟的不确定性。本文工作是初步的尝试, 还有很多的工作要做。

致谢 本文所使用的观测数据由中国气象局气象信息中心气象资料室获得, PRECIS 气候模式系统由 Hadley 气候中心提供, 作者在此一并表示衷心的感谢! 本文工作结合正在执行的中英气候变化农业影响评估项目二期的研

究, 作者衷心地感谢该项目主持人林而达研究员对本文工作的大力支持!

参考文献 (References)

- [1] 董锁成, 周长进, 王海英, 等. “三江源”地区主要生态环境问题与对策. 自然资源学报, 2002, **17** (6): 713~720
Dong Suocheng, Zhou Changjin, Wang Haiying, et al. Ecological crisis and countermeasures of the Three Rivers' Headstream Regions. *Journal of Natural Resources* (in Chinese), 2002, **17** (6): 713~720
- [2] 李锡福, 年光延. 气候变化对青海生态环境的影响及对策研究. 高原地震, 2001, **13** (3): 62~66
Li Xifu, Nian Guangyan. Ecological environment influenced by the climate and countermeasure-ments in Qinhai province. *Earthquake Research in Plateau* (in Chinese), 2001, **13** (3): 62~66
- [3] 谢昌卫, 丁永建, 刘时银. 近 50 年来长江—黄河源区气候及水文环境变化趋势分析. 生态环境, 2004, **13** (4): 520~532
Xie Changwei, Ding Yongjian, Liu Shiyin. Changes of weather and hydrological environment for the last 50 years in the source regions of Yangtze and Yellow Rivers. *Ecology and Environment* (in Chinese), 2004, **13** (4): 520~532
- [4] 罗磊, 彭骏. 青藏高原北部荒漠化加剧的气候因素分析. 高原气象, 2004, **23**: 109~117
Luo Lei, Peng Jun. Analyses on climatic factors of desertification development in Northern Qinghai-Xizang plateau. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23**: 109~117
- [5] 黄玉霞, 王宝鉴, 王鹏祥. 青海高原夏季降水异常及其水汽输送特征分析. 气象, 2006, **32** (1): 18~23
Huang Yuxia, Wang Baojian, Wang Pengxiang. Analyses of summer precipitation anomaly and water vapor transport in Qinghai plateau. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2006, **32** (1): 18~23
- [6] 王可丽, 程国栋, 丁永建, 等. 黄河、长江源区降水变化的水汽输送和环流特征. 冰川冻土, 2006, **28** (1): 8~14
Wang Keli, Cheng Guodong, Ding Yongjian, et al. Characteristics of water vapor transport and atmospheric circulation for precipitation over the source regions of the Yellow and Yangtze Rivers. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 2006, **28** (1): 8~14
- [7] 樊启顺, 曹广超, 唐兴玥, 等. 江河源区近 40 年来气温变化特征的研究. 青海师范大学学报, 2004, **4**: 81~85
Fan Qishun, Cao Guangchao, Tang Xingyue, et al. Analyses on variety characteristics of temperature in Yellow River and Yangtze sources in recent 40 years. *Journal of*

- Qinghai Normal University (Natural Science) (in Chinese), 2004, **4**: 81~85
- [8] 李林, 李凤霞, 郭安红, 等. 近 43 年来“三江源”地区气候变化趋势及其突变研究. 自然资源学报, 2006, **21** (1): 79~85
- Li Lin, Li Fengxia, Guo Anhong, et al. Study on the climate change trend and catastrophe over “Sanjiangyuan” region in recent 43 Years. *Journal of Natural Resources* (in Chinese), 2006, **21** (1): 79~85
- [9] 王根绪, 李琦, 程国栋, 等. 40a 来江河源区的气候变化特征及其生态环境效应. 冰川冻土, 2001, **23** (4): 346~352
- Wang Genxu, Li Qi, Cheng Guodong, et al. Climate change and its impact on the eco-environment in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers in recent 40 Years. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 2001, **23** (4): 346~352
- [10] 王谋, 李勇, 潘胜, 等. 气候变化对青藏高原腹地可持续发展的影响. 中国人口·资源与环境, 2004, **14** (3): 92~95
- Wang Mou, Li Yong, Pan Sheng, et al. Influences of climate change on sustainable development of the hinterland of Qinghai-Tibet Plateau. *China Population, Resources and Environment* (in Chinese), 2004, **14** (3): 92~95
- [11] 刘鸿波, 张大林, 王斌. 区域气候模拟研究及其应用进展. 气候与环境研究, 2006, **11** (5): 649~668
- Liu Hongbo, Zhang Dalin, Wang Bin. Recent advances in regional climate modeling and applications. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11** (5): 649~668
- [12] 高学杰, 赵宗慈, 丁一汇, 等. 温室效应引起的中国区域气候变化的数值模拟 I: 模式对中国气候模拟能力的检验. 气象学报, 2003, **61** (1): 20~28
- Gao Xuejie, Zhao Zongci, Ding Yihui, et al. Climate change due to green-house effects in China as simulated by a regional climate model. Part I: Evaluation of the model simulations. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (1): 20~28
- [13] 高学杰, 赵宗慈, 丁一汇, 等. 温室效应引起的中国区域气候变化的数值模拟 II: 中国区域气候的可能变化. 气象学报, 2003, **61** (1): 29~38
- Gao Xuejie, Zhao Zongci, Ding Yihui, et al. Climate change due to green-house effects in China as simulated by a regional climate model. Part II: Climate change. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (1): 29~38
- [14] Gao Xuejie, Zhao Zongci, Ding Yihui, et al. Climate change due to green-house effects in China as simulated by a regional climate model. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, **18** (6): 1224~1230
- [15] Gao Xuejie, Zhao Zongci, Filippo Giorgi. Changes of extreme events in regional climate simulations over East Asia. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, **19** (5): 927~942
- [16] 张英娟, 高会旺, Gerhard LAMMEL. 区域气候模式 REMO 对东亚季风季节变化的模拟研究. 气候与环境研究, 2005, **10** (1): 41~55
- Zhang Yingjuan, Gao Huiwang, Gerhard LAMMEL. Simulation of monsoon seasonal variation of regional climate model REMO in East Asia. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (1): 41~55
- [17] 许吟隆, Richard Jones. 利用 ECMWF 再分析数据验证 PRECIS 对中国区域气候的模拟能力. 中国农业气象, 2004, **25** (1): 5~9
- Xu Yinlong, Richard J. Validating PRECIS with ECMWF reanalysis Data over China. *Chinese Journal of Agrometeorology* (in Chinese), 2004, **25** (1): 5~9
- [18] Jones R G, Noguer M, Hassell D C, et al. Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS, Met Office Hadley Centre, Exeter, UK, 2004. 35
- [19] Nakićenović N, Alcamo J, Davis G de Vries B, et al. Special report on emissions scenarios. A special report of working group III of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, USA, 2000. 599
- [20] 许吟隆, 黄晓莹, 张勇, 等. 中国 21 世纪气候变化情景的统计分析. 气候变化研究进展, 2005, **1** (2): 80~83
- Xu Yinlong, Huang Xiaoying, Zhang Yong, et al. Statistical analyses of climate change scenarios over China in the 21st century. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 2005, **1** (2): 80~83
- [21] 许吟隆, 张勇, 林一骅, 等. 利用 PRECIS 分析 SRES B2 情景下中国区域的气候变化响应. 科学通报, 2006, **51** (17): 2068~2074
- Xu Yinlong, Zhang Yong, Lin Erda, et al. Analyses on the climate change responses over China under SRES B2 scenario using PRECIS. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2006, **51** (18): 2260~2267
- [22] Gordon C, Cooper C, Senior C A, et al. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dyn.*, 2000, **16** (2-3): 147~168
- [23] New M G, Hulme M, Jones P D. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: Development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate. *J. Climate*, 2000, **13** (13): 2217~2238