

曹丽娟, 董文杰, 张勇. 2013. 未来气候变化对黄河和长江流域极端径流影响的预估研究 [J]. 大气科学, 37 (3): 634–644, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12023. Cao Lijuan, Dong Wenjie, Zhang Yong. 2013. Estimation of the effect of climate change on extreme streamflow over the Yellow River and Yangtze River basins [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (3): 634–644.

未来气候变化对黄河和长江流域极端径流影响的预估研究

曹丽娟¹ 董文杰² 张勇³

¹ 国家气象信息中心, 北京 100081

² 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

³ 国家气候中心, 北京 100081

摘 要 使用 NASA-NCAR 全球环流模式 FvGCM 结果驱动高分辨率区域气候模式 RegCM3 (20 km), 进行 1961~1990 年当代气候模拟 (控制试验) 和 2071~2100 年 IPCC A2 排放情景下未来气候情景模拟 (A2 情景模拟试验)。将 RegCM3 同高分辨率大尺度汇流模型 LRM (分辨率 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$) 连接, 分析水文极端事件在 A2 情景下相对于当代气候的变化, 预估未来气候变化对我国黄河和长江流域水文极端事件的影响。结果表明: (1) 未来黄河流域径流年变率增大, 月变率减小, 日变率在头道拐站以上流域减小, 以下流域增大。未来兰州以上半湿润地区, 流域东南部湿润区出现径流量峰值的可能性增大, 而流域西北部干旱半干旱区出现径流量百分位极值的可能性减小。未来黄河流域中游地区发生流域洪水的风险在夏季月份减少, 其余月份均增大。(2) 未来长江干流径流年变率增大, 上中游地区径流日和月变率减小, 下游地区略有增大; 未来汉江流域径流量的年、月和日变率均增大。未来长江干流发生流域洪水的风险在夏季明显降低, 而汉江流域各月发生流域洪水的可能性均增大。

关键词 气候变化 极端径流 黄河流域 长江流域

文章编号 1006-9895(2013)03-0634-11

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12023

Estimation of the Effect of Climate Change on Extreme Streamflow over the Yellow River and Yangtze River Basins

CAO Lijuan¹, DONG Wenjie², and ZHANG Yong³

¹ National Meteorological Information Center, Beijing 100081

² State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875

³ National Climate Center, Beijing 100081

Abstract A regional climate model (RegCM3) nested in one-way mode within a NASA/NCAR finite volume element AGCM (FvGCM) is used in this study. Two sets of multi-decadal simulations are conducted at 20-km grid spacing for present day (1961–1990) and future climates (2071–2100, A2 scenario). The runoff outputs are used to drive a large-scale routing model (resolution, $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$), to project the effect of future climate change on hydrological extreme events over the Yellow River and Yangtze River basins. The results show that the annual variability of the streamflow over the Yellow River will increase, and the monthly variability will decrease. The diurnal variability will decrease upstream and increase downstream of Toudaoguai station. A greater possibility of the largest streamflow percentile will exist in the

收稿日期 2012-02-17, 2012-11-12 收修定稿

项目资助 国家高技术研究发展计划项目 2010AA012305, 科技部国家重点基础研究发展计划项目 2010CB950501, 国家自然科学基金资助项目 40805060

作者简介 曹丽娟, 女, 1980 年出生, 博士, 主要从事气候变化影响及资料均一化研究。E-mail: caolj@cma.gov.cn.

upper reaches of Lanzhou station in sub-humid areas and southeast of the Yellow River basin in humid areas, whereas the possibility is less in the arid and semi-arid areas of the northwestern basin. The flood disaster risk will increase in future over the middle reaches of the Yellow River except in the summer season. The annual variability of the Yangtze River may increase, and the diurnal and monthly variability may decrease in the upper and middle reaches and rise slightly in the lower reaches in future. The annual, monthly, and diurnal variability of the streamflows all increase in future over the Hanjiang River basin. The flood disaster risk may decrease over the Yangtze River, especially in summer, and the probability of flooding in the Hanjiang River basin will increase in each month.

Keywords Climate change, Extreme streamflow, Yellow River basin, Yangtze River basin

1 引言

我国地处东亚季风区,降水量的年内分配和年际变化较大,且空间分配极不均匀,极端气候异常事件频繁,使我国成为世界上干旱与洪涝灾害多发的国家之一。受气候变化的影响,北方干旱缺水与南方洪涝灾害同时成为制约我国经济社会可持续发展的主要因素之一。人类活动排放的温室气体等引起的气候变化,包括气候平均态变化和极端事件的变化。相对于平均态,极端事件的变化经常会对经济、社会和自然生态系统等造成更大影响。全球气候变化可能对水文极端事件的频率、大小、位置、历时等产生影响。而水文极端事件的改变对于未来水利工程、洪水治理及水资源管理都有重要意义。气候变化对水文极端事件的可能影响在过去 10 多年间得到了很大的重视。许多研究表明,全球增暖将增加水文极端事件发生的频率和大小(Kite, 1993; Boorman and Sefton, 1997; Panagoulia and Dimou, 1997; Gellens and Roulin, 1998; Mirza et al., 1998; Prudhomme and Svensson, 2003; Meehl and Tebaldi, 2004),同时,气候变化可能改变极端径流发生的时间。通常认为径流平均值增加,也意味着极端径流增加,但是两者之间可能存在着程度上的差异。目前中国地区未来极端事件变化的预估工作相对较少,已有研究主要集中在气温和降水极端事件方面,对水文径流极端事件的研究也不多。

由于区域气候模式比全球气候模式有更高精度的空间分辨率,能够更加细致地描述地形和海陆分布以及地表植被分布特征,更好地刻画气候的区域特征,使得区域气候模式的模拟能够更加接近于观测。21 世纪末期,A2 情景下的全球增暖在黄河和长江流域均表现出强烈的区域响应,无论黄河流域还是长江流域,这种变化趋势存在很大的空间分布的不均匀性(曹丽娟, 2007)。黄河流域由于大的流域面积,高含沙量,频发的洪水,独特的下游

“悬河”以及有限的水资源而受到科学家的广泛关注(Fu et al., 2004; 赵芳芳和徐宗学, 2009)。许多研究集中于分析观测数据或者降尺度气候模式变量,以及使用大尺度水文模型(VIC)等来研究长期气候变化及其它原因引起的水文气候趋势(Liu and Zheng, 2004; Xia et al., 2004; Xu, 2005; Xu et al., 2007; 郑红星和刘昌明, 2003)。长江流域洪水灾害是我国频率高、为患严重的自然灾害之一(施雅风等, 2004)。已有大量研究集中于历史资料分析及对洪水事件的模拟上(如 Xiong et al., 2003; 施雅风等, 2004; 姜彤等, 2005; Zhang et al., 2005)。本研究使用高分辨率区域气候模式 RegCM3 与大尺度汇流模型 LRM 对中国区域进行长时段数值模拟积分,长时间的积分使得模拟结果具有真正的气候学意义、高分辨率的特点,在提供各地气候要素更详细分布、更好分布型模拟基础上,使得模拟得到的中国未来气候变化信息更加细化和更加可靠。本研究以水文流域为研究单元,关注中国两个重要大尺度流域——黄河和长江流域,通过分析未来 A2 情景试验相对于控制试验中黄河和长江流域水文径流极端事件的变化,预估未来两个流域在年内、连续多年及各月流域洪水发生的可能性变化,研究结论能够对评估气候变暖背景下的极端水文灾害事件的变化具有一定的理论意义。

2 试验设计与极端事件指标选取

本研究采用全球气候模式模拟试验两个时间段,一是从 1961 年 1 月 1 日至 1990 年 12 月 31 日,即控制试验(RF 试验);另一段是 21 世纪末从 2071 年 1 月 1 日至 2100 年 12 月 31 日,在 IPCC SRES A2 温室气体和气溶胶排放情景下的试验(A2 试验)。其中 A2 排放情景是 IPCC 提供的 SRES 排放情景中区域经济发展引起温室气体浓度高排放的情景,其结果作为区域气候模式 RegCM3 的驱动场。区域气候模式的中心点取(35°N、107°E),南北方向的格

点数为 275, 东西方向为 360, 水平分辨率取为 20 km, 范围覆盖包括整个中国大陆及周边地区。模式垂直方向分 18 层, 顶层高度为 100 hPa。模式中的辐射过程采用 NCAR CCM3 方案, 海表通量参数化方案使用 Zeng 方案、行星边界层使用 Holtslag 方案、积云对流参数化方案选择基于 Fritsch & Chappell 闭合假设的 Grell 方案、大尺度降水采用 SUBEX 方案。陆面过程模式采用生物圈—大气圈输送方案 (BATS1e) (Dickinson et al., 1993), BATS 考虑了降水、雪融化、叶冠滴水、蒸散发、地表径流、根区下渗透和土壤层间水的扩散性交换, 能够计算表层和次表层径流。模式使用的地形由美国地质勘探局 (USGS) 制作的 $10' \times 10'$ (经度 $\times$ 纬度) 地形资料插值得到, 植被覆盖资料在中国区域内, 使用中国农科院遥感中心提供的实测资料, 中国区域外使用 USGS 基于卫星观测反演的 GLCC 资料。初始场和侧边界值均由全球环流模式 FvGCM 得到。侧边界场采用指数松弛边界方案, 每 6 小时输入模式一次。详细试验设计及模式使用参见文献 (石英和高学杰, 2008)。

首先对控制试验结果进行分析验证, 用于验证模式模拟能力的地面气温资料采用 CRU 资料 (New et al., 2002), 降水资料采用 Xie 资料 (Xie et al., 2007), 这两套资料的空间分辨率均为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (经度 $\times$ 纬度), 采用同期 (1961~1990 年) 气温、降水资料进行模式验证。模拟结果表明高分辨率的 RegCM3 (20 km) 能够更好地模拟黄河和长江流域的气温和降水分布, 反映更小尺度的信息 (曹丽娟, 2007), 特别是对我国东部地区气温和降水分布及雨带位置的模拟更加合理 (石英和高学杰, 2008)。随后应用 RegCM3 模拟的控制试验和 A2 情景模拟试验的日地表径流和次表层径流结果驱动大尺度汇流模型 LRM, 为与 RegCM3 的分辨率 (20 km) 相匹配, 本研究使用的大尺度汇流模型的水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (经度 $\times$ 纬度), 来自于美国亚利桑那州大学水文水资源系, 在黄河流域的使用显示了较好的模拟径流的能力 (Zhang et al., 2003; Cao et al., 2007)。本研究将 RegCM3 模拟结果中日平均地表和次表层径流插值到 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 网格来驱动 LRM。汇流模型使用的 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 流向数据是采用中国 1:100 万 DEM 高程数据提取得到。已有研究表明, 区域气候模式 RegCM3 同大尺度汇流模型 LRM 连接能够较好地再现黄河流域与长江流域不同台站的月径流过程, 模拟的径流量同实测径流量

在时间分布上较为一致, 模拟的河川径流的年变化和季节变化同观测值比较接近。模式对黄河和长江流域水文台站径流量的模拟效果较好, 表明该汇流模型适用于对黄河流域和长江流域进行径流模拟 (曹丽娟, 2007; 曹丽娟等, 2008)。

通常认为气候异常事件的频率分布可能会发生三种类型的变动: 其一, 均值不变但方差及概率分布发生变化, 此时气候变异性表现为丰枯振幅将增大或减小; 其二, 均值改变, 方差及概率分布不变, 均值的增减将导致概率分布位置的偏移, 从而增大或减小极端事件发生的频率; 其三, 均值和方差同时都有变动或概率分布形式改变, 此时气候自然波动周期与振幅及极端事件发生的频次都将随着气候均值的变化而加剧或减少, 从而带来最为不利或趋于有利的影响。

Milly et al. (2002) 认为, 大洪水 (来自流域面积大于 20 万平方公里的河流流域的排水量超过 100 年一遇水平的洪水) 的发生频率在 20 世纪有很大增加, 而且这一趋势很可能将继续下去。Milly 采用了频率分析法和 100 年一遇的概念, 但通常认为频率流量不具有空间上和时间上的可比性。国际上气象和水文学极值研究通常采用的指标有 AM (Annual Max, 国内很多人在用, 但不具有科学上定量意义和可比性), POT (高于阈值的洪峰流量) (戴昌军等, 2006), Percentile (分位数) 等。POT 和 Percentile 是国际上极端值研究中最常见的选取标准, 它们具有时间和空间的可比性。此外, 气候序列分布的方差变化对于极值频率的影响要比平均值的影响大得多 (Katz and Browns, 1992)。因此, 本研究中首先进行了方差分析, 以年、月、日平均径流量在 A2 排放情景下相对于当代气候条件下的方差变化来反映径流量不同时间变率的变化。此外, 参照极端气候事件研究及国际上水文极端事件的研究方法, 选取如下几个水文极端事件指标来反映极端径流的变化: 最大连续 1 日、3 日、5 日径流量 (RoX1d、RoX3d、RoX5d) 定义为一年中最大的连续 1 日、3 日、5 日径流量之和; 90%、95%、99% 分位数径流量 (Q90、Q95、Q99) 分别代表日平均径流量序列中有 10%、5% 和 1% 的径流量超过该值, 体现丰水极值径流的变化, 相应以 10%、5%、1% 分位数径流量 (Q10、Q5、Q1) 代表日平均径流量序列中有 90%、95% 和 99% 的径流量超过该值, 代表枯水极值径流的变化。本文重点分析各个极端事件指标在未来 A2 情景下相

对于当代气候的变化。

3 黄河流域径流极端事件分析

3.1 年、月、日平均径流量的方差变化

图 1 为黄河流域循化、兰州、石嘴山、头道拐、三门峡、花园口站在 A2 排放情景下（2071~2100 年）相对于当代气候（1961~1990 年）年、月、日平均径流量的方差变化。由图中可以看出六个台站年平均径流量的方差均增加，月平均径流量的方差均减小，而日平均径流量的方差在头道拐以上台站减少，以下台站增加。表明未来气候变化将引起黄河流域年平均径流量的波动增大，并且越向下游变率越大，预示着未来黄河流域径流年际间变率的增大；月平均径流量的波动将减小，预示着未来黄河流域径流月际间变率减小；日平均径流量在上游头道拐以上台站的变率将减小，而头道拐以下台站日平均径流量的变率略有增大。

3.2 最大连续 1、3、5 日径流量变化

表 1 为 A2 排放情景下（2071~2100 年），30 年平均黄河流域各水文站最大连续 1、3、5 日径流量（RoX1d、RoX3d、RoX5d）相对于当代气候（1961~1990 年）的变化率。可以看出，未来 A2 情景下，黄河流域 RoX1d、RoX3d、RoX5d 的正负变化趋势对于同一个台站而言是一致的，但量值有所不同。如头道拐站均为减小趋势，RoX3d 的减小幅度最大（-8.1%），RoX5d 的减小幅度最小（-6.8%）。图 2 给出黄河流域最大连续 3 日径流量变化的空间分布，可以看出，接近流域源区的循化站和兰州站以及中游三门峡站和花园口站为增加趋势，而石嘴山和头道拐站为减少趋势，表明未来黄河流域兰州以上地区及中游地区出现径流极端事件的可能性增大，而位于干旱半干旱的流域西北部上游地区，未来出现极大径流的可能性有所减少。

表 1 黄河流域最大连续 1、3、5 日径流量变化
Table 1 Change of the maximum continuous 1-, 3-, 5-day streamflow in the Yellow River basin

	RoX1d	RoX3d	RoX5d
循化	1.8%	3.1%	3.7%
兰州	5.1%	4.3%	4.1%
石嘴山	-7.7%	-8.0%	-6.8%
头道拐	-8.0%	-8.1%	-6.8%
三门峡	3.4%	4.0%	4.9%
花园口	4.0%	4.7%	5.3%

3.3 分位数（Percentile）径流量变化

将 RF 和 A2 试验连续各 30 年日径流量序列排序，求出各个分位数径流量，表 2 为 A2 排放情景下（2071~2100 年），黄河流域各个台站分位数径流量相对于 RF 试验（1961~1990 年）的变化；通常认为 95%分位数和 5%分位数径流量更能够反映极端径流的变化，图 3 给出黄河流域分位数径流量 Q95 和 Q5 变化的空间分布。由表 2 中可以看出，位于上游的循化、兰州、石嘴山站在未来 A2 情景下，反映峰值极端径流的 Q90、Q95、Q99 分位数径流量为减少趋势，而代表枯水极端径流的 Q10、Q5、Q1 分位数径流量为增加趋势，表明未来 A2 排放情景下，黄河流域上游峰值径流会有所减少，而枯水径流量会有所增加（图 3）。由头道拐站进入黄河中游，头道拐站 Q90 和 Q95 为增加趋势，而 Q99 为减少趋势，反映枯水径流的 Q10、Q5、Q1 分位数径流量均减少。三门峡站和花园口站 Q95 和 Q90 以及 Q10、Q5 都为增加趋势，而最为极端的 Q99 和 Q1 分位数径流量为减少趋势，减少幅度小于 3%。未来黄河流域在头道拐站以下台站最为极端的峰值径流量有所减少，预示着未来黄河流域头道拐以下台站最极端的流域洪水会有所减少，而仍然有洪涝发生的风险存在（次极端的极端径流量会有所增加）。

表 2 黄河流域分位数径流量变化
Table 2 Percentile streamflow change in the Yellow River basin

	循化	兰州	石嘴山	头道拐	三门峡	花园口
Q90	-12.4%	-15.9%	-14.7%	18.9%	2.9%	2.7%
Q95	-14.2%	-12.6%	-10.9%	9.1%	2.1%	2.0%
Q99	-4.3%	-3.7%	-2.1%	-12.2%	-2.9%	-1.6%
Q10	7.7%	19.7%	13.8%	-7.7%	2.0%	4.7%
Q5	2.7%	7.8%	7.5%	-2.7%	8.9%	8.0%
Q1	0.0%	0.0%	-1.2%	-1.4%	-0.2%	-0.3%

由于黄河流域河川径流的变化主要受降水变化的影响，年内各月峰值径流量的变化较之枯水径流量的变化显得尤其重要，因此，将 RF 和 A2 试验各 30 年同月的日径流量序列排序，计算年内各月反映峰值径流的分位数径流量的变化，预估未来黄河流域逐月丰水径流量的变化。图 4 为黄河流域上、中、下游代表台站兰州、头道拐、花园口站年内各月份分位数径流量的变化。可以看出，反映峰值径流量的 Q90、Q95 和 Q99 对于不同台站在相同月份的变化趋势基本一致，总体特征为夏半年月

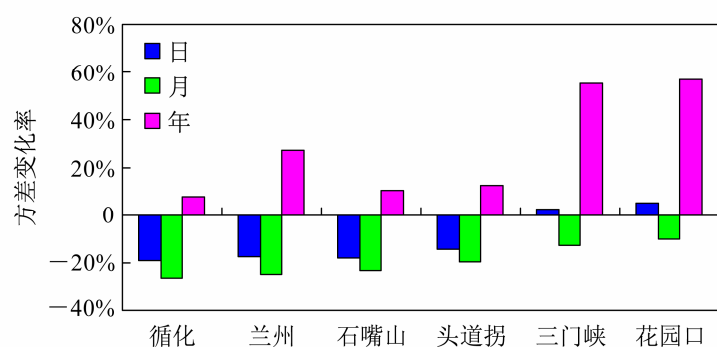


图1 黄河流域平均径流量的方差变化

Fig. 1 Streamflow variance change in the Yellow River basin

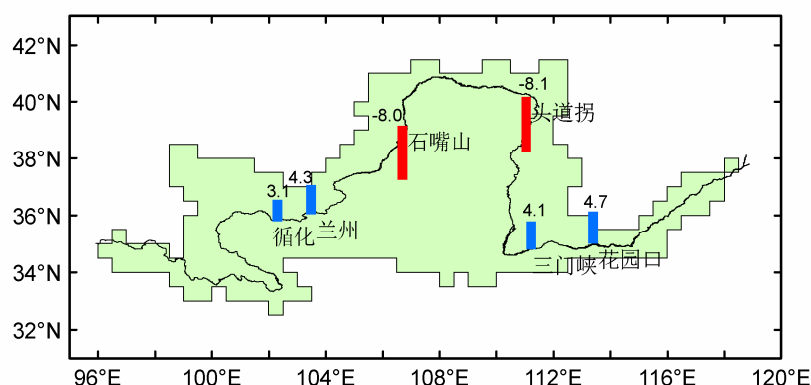


图2 黄河流域最大连续3日径流量变化(单位: %)

Fig. 2 Change of the maximum continuous 3-day streamflow in the Yellow River basin (unit: %)

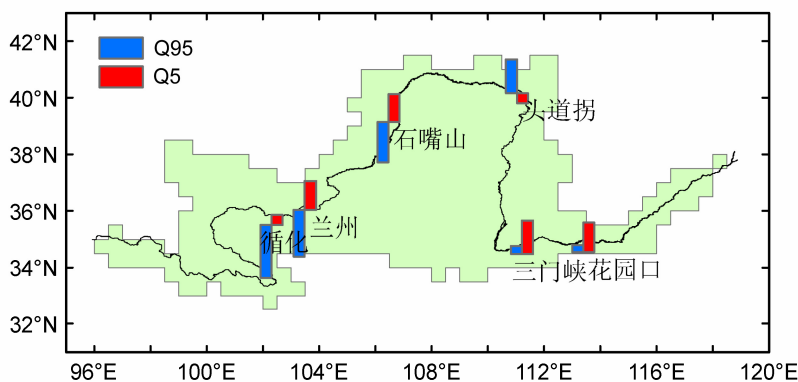


图3 黄河流域分位数径流量Q95和Q5的变化(单位: %)

Fig. 3 Q95 and Q5 percentile streamflow change in the Yellow River basin (Unit: %)

份的减少和其余月份的增加,预示着未来夏季极端洪涝事件减少,而其余季节可能出现流域洪水。黄河流域极端径流量的变化趋势同径流量平均值的变化趋势基本一致。注意到兰州站年内分位数径流量在11月至次年4月增加幅度较大,表明未来A2排放情景下,兰州以上地区发生春汛的风险增加。

4 长江流域径流极端事件分析

4.1 年、月、日平均径流量的方差变化

图5为长江干流宜昌、汉口、大通站和汉江支

流石泉、白河、丹江口站在A2排放情景下(2071~2100年)相对于当代气候条件下(1961~1990年)年、月、日平均径流量的方差变化。由图中可以看出未来长江干流年平均径流量的方差均增加,位于长江干流上中游地区的宜昌和汉口站日和月平均径流量的方差均减小,下游大通站日和月平均径流量的方差均增加,但幅度较小。表明未来气候变化将引起长江干流年平均径流量的波动增大,预示着未来长江干流径流年际变率增大,上中游地区径流量的日和月际变率减小,而下游地区径流量的日和

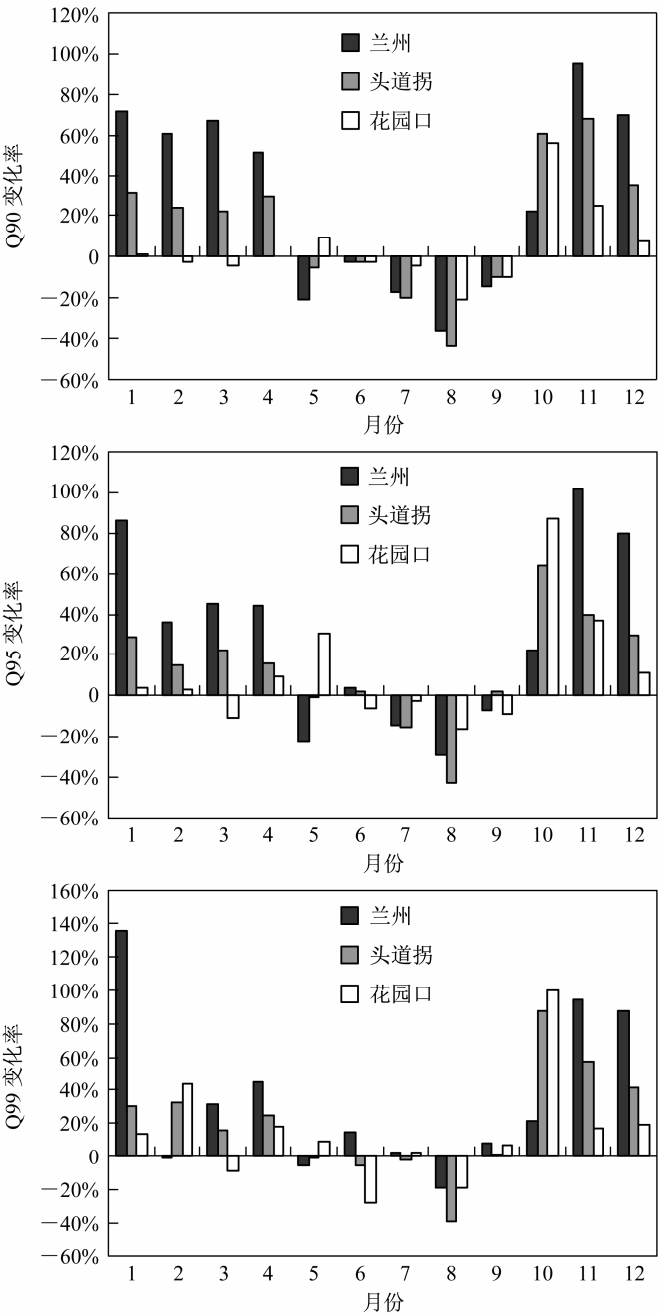


图4 黄河流域年内分位数径流量的变化
Fig. 4 Interannual percentile streamflow change in the Yellow River basin

月际变率略有增大。未来汉江流域年、月、日平均径流量的方差均增大，表明未来汉江流域径流量的年际变率，日和月际变率均增大。

4.2 最大连续1、3、5日径流量变化

表3为A2排放情景下(2071~2100年)，30年平均长江流域各个台站最大连续1、3、5日径流量(RoX1d、RoX3d、RoX5d)相对于当代气候(1961~1990年)的变化率。可以看出，未来A2情景下，长江流域RoX1d、RoX3d、RoX5d的正负

变化趋势对于同一个台站而言基本一致，图6给出长江流域最大连续3日径流量变化的空间分布。宜昌站和汉口站RoX1d、RoX3d、RoX5d的变化幅度均呈现出减少趋势，且RoX5d变化率最大，其中宜昌站RoX5d将可能减少7.1%，汉口站RoX5d减少1.1%。汉江流域各个台站RoX1d、RoX3d、RoX5d的变化以增加趋势为主，增加的百分率远高于干流台站的变化率(图6)，最大为43.6%。径流极端事件的变化极大地受降水的影响，年平均而言汉江流

域大部分地区在未来 A2 排放情景下降水量增加较大, 增加幅度超过 10%, 由于降水量的增加, 将会引起该流域极端径流的增加幅度较大。

表 3 长江流域最大连续 1、3、5 日径流量变化
Table 3 Change of the maximum continuous 1-, 3-, 5-day streamflow in the Yangtze River basin

	RoX1d	RoX3d	RoX5d
宜昌	−6.6%	−6.9%	−7.1%
汉口	−0.2%	−0.6%	−1.1%
大通	6.5%	6.0%	5.0%
石泉	21.0%	20.0%	19.5%
白河	27.9%	28.0%	25.5%
丹江口	43.6%	41.1%	38.6%

4.3 分位数 (Percentile) 径流量变化

表 4 为 A2 排放情景下 (2071~2100 年), 长江干流及汉江支流各个台站分位数径流量相对于 RF 试验 (1961~1990 年) 的变化。由表中可以看出, 长江干流台站在未来 A2 情景下, 反映峰值极端径流和枯水极端径流的分位数径流量均出现减少趋势, 表明未来长江流域干流峰值极端径流将有所减小, 位于下游的大通站减少百分比最大, 其中 Q99 的减少幅度达到 −92%。至 21 世纪末期, 长江干流年平均径流峰值流量将大幅度减少, 预示着未来长江流域发生极端洪涝事件的可能性将有所降低。同时反映极端低水径流的分位数径流量也有所减少, 说明未来长江流域年平均低水径流量也会有所减少, 预示着未来长江流域干流枯水季节水资源的短缺。汉江流域作为长江中下游最大的支流, 其变化趋势同干流台站的变化有所不同, 反映极端径流峰值的分位数径流量 Q90、Q95、Q99 在未来 A2 排放情景下都将会增加, 预示着未来汉江流域发生流域洪水的可能性增大。汉江流域 Q10、Q5、Q1

表 4 长江流域分位数径流量变化
Table 4 Percentile streamflow change in the Yangtze River basin

	宜昌	汉口	大通	石泉	白河	丹江口
Q90	−6.9%	−3.1%	−54.9%	11.7%	16.3%	21.9%
Q95	−5.7%	−1.4%	−75.9%	17.7%	21.5%	24.8%
Q99	−5.8%	−0.5%	−92.0%	24.9%	29.5%	26.2%
Q10	−4.0%	−2.6%	−34.5%	−6.4%	−4.3%	1.9%
Q5	−11.2%	−7.9%	−29.0%	−11.4%	−8.5%	−0.3%
Q1	−11.7%	−8.4%	−28.4%	−8.7%	−5.9%	−0.5%

分位数径流量在未来会有所减少, 但减少的幅度较小。图 7 为长江流域分位数径流量 Q95 和 Q5 变化的空间分布, 可以看出, 虽然汉江流域峰值径流量在未来增加幅度较大, 但其对干流峰值流量的影响并不大。

图 8 为长江干流台站年内分位数径流量的变化。可以看出, 代表不同极端程度的 Q90、Q95、Q99 的变化幅度各不相同。Q90 的变化除 6、8、9 月外均增加, 预示着夏季极端径流事件的减小和其他季节极端径流事件的增加。最为极端的 Q99 在夏季 7 月份对于三个干流台站均增加, 表明夏季极端洪涝发生的风险增大。研究表明长江干流极端径流量的变化趋势同径流量平均值的变化趋势基本一致, 但极端径流的变化幅度远大于平均值的变化幅度。图 9 为汉江支流台站年内分位数径流量的变化。Q90、Q95、Q99 的变化趋势比较一致, 除 1~3 月及 8 月部分出现减少外, 其余月份均增加, 表明未来汉江流域各个月份发生不同程度洪涝极端事件的可能性增大。

5 结论和讨论

本文通过分析定义的水文极端事件指标在 A2 情景下 (2071~2100 年) 相对于当代气候 (1961~1990 年) 的变化, 预估未来气候变化对我国黄河和长江流域水文极端事件的影响, 分析了未来黄河和长江流域在年内、连续多年及各个月份流域洪水发生的可能性。

结果表明未来黄河流域径流年际变率增大, 月际变率减小, 逐日变率在头道拐站以上流域减小, 以下流域增大。由最大连续 1、3、5 日径流量变化分析表明未来兰州以上半湿润地区, 流域东南部湿润区出现径流量峰值可能性增大, 而流域西北部干旱半干旱区出现径流量峰值可能性减小。未来 A2 情景下, 头道拐站以上台站 Q90、Q95、Q99 分位数径流量为减少趋势, 其中 Q90 和 Q95 减少幅度均超过 10%, Q10、Q5、Q1 分位数径流量为增加趋势, 头道拐站以下台站最为极端的 Q99 和 Q1 分位数径流量为减少趋势, 减少的幅度小于 3%, 其余均为增加趋势, 表明未来黄河流域头道拐站以上地区, 发生极端最大径流的可能性减少, 头道拐站以下流域, 发生极端最大径流的可能性增大, 预示着未来黄河流域中游地区发生洪涝的风险增大。未来黄河流域头道拐以下流域最极端的流域洪水会有

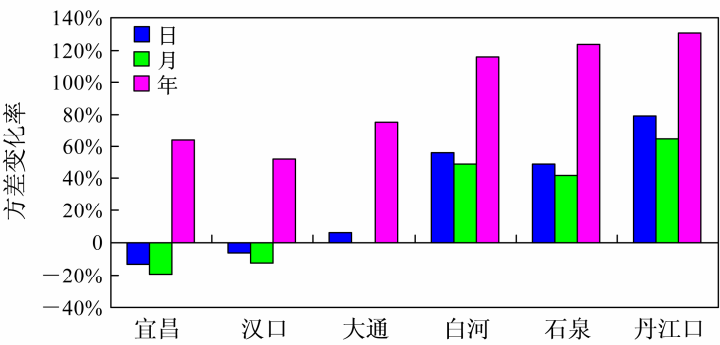


图 5 长江流域平均径流量的方差变化
Fig. 5 Streamflow variance change in the Yangtze River basin

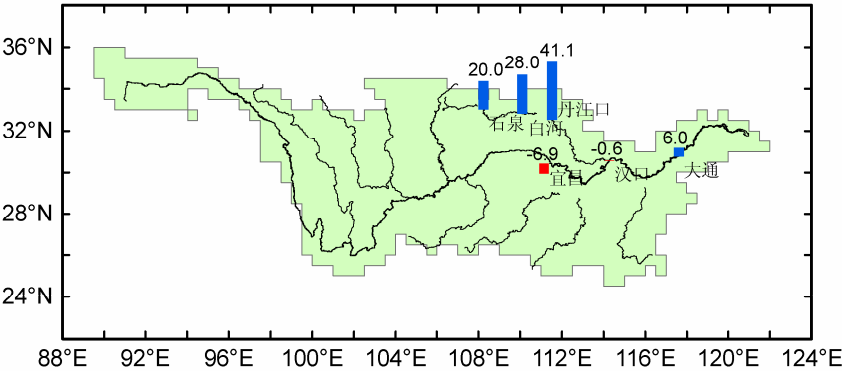


图 6 长江流域最大连续 3 日径流量变化 (单位: %)
Fig. 6 Change of the maximum continuous 3-day streamflow in the Yangtze River basin (unit: %)

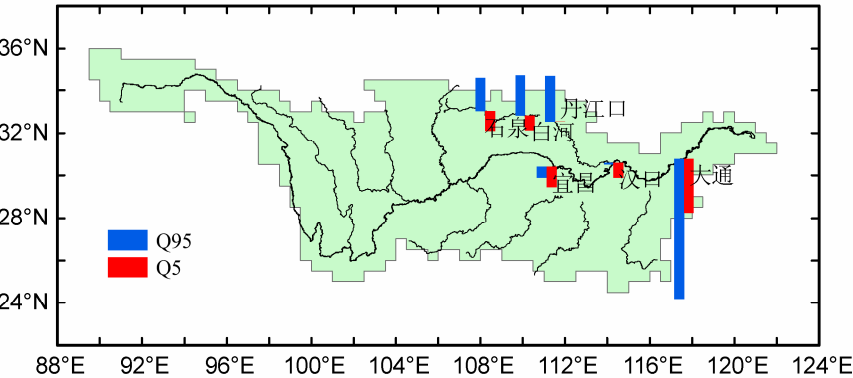


图 7 长江流域分位数径流量 Q95 和 Q5 的变化 (单位: %)
Fig. 7 Q95 and Q5 percentile streamflow change in the Yangtze River basin (Unit: %)

所减少，而次极端的径流量会有所增加。年内各月分位数径流量变化分析表明：未来黄河流域夏半年峰值径流量可能减少而其余季节增加，预示着未来夏季月份极端洪涝事件减少，而其余月份出现极端流域洪水的风险增大。

未来气候变化可能引起长江干流径流量的年际变率增大，上中游地区径流日和月际变率减小，而下游地区径流日和月际变率略有增大，汉江流域

径流量的年、月和日际间变率均增大。未来长江流域上中游宜昌、汉口站 RoX1d、RoX3d、RoX5d 的变化为递减的趋势，其中宜昌站减少幅度较大，如 RoX3d 将减少 6.9%，位于下游的大通站则为增加趋势；汉江流域增加幅度较大，丹江口站最大连续 1、3、5 日径流量增加幅度达到 40%左右，预示着未来长江干流发生流域洪水的风险降低，而汉江流域发生洪涝的可能性增大。长江干流宜昌、汉口、

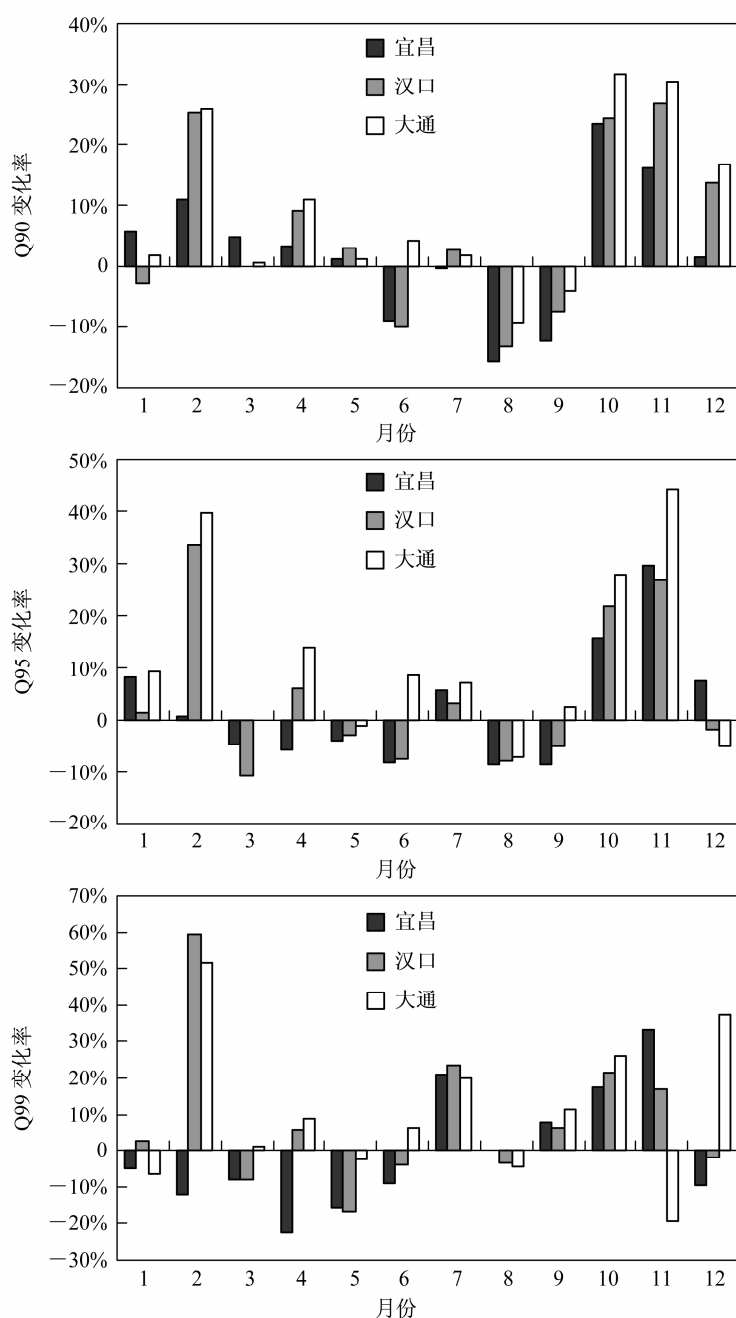


图8 长江干流年内分位数径流量的变化

Fig. 8 Interannual percentile streamflow change in the Yangtze River basin

大通站在未来 A2 情景下, 极端高值和低值分位数径流量均出现减少趋势, 大通站减少幅度最大, 其 Q99 将减少 92%; 而汉江支流 Q90、Q95、Q99 分位数径流量增加, Q10、Q5、Q1 分位数径流量减少, 预示着未来长江干流发生极端洪涝事件的可能性将有所降低, 而汉江流域发生流域洪水的可能性增大。年内各月分位数径流量的变化表明: 长江干流夏季极端径流事件出现的可能性减小, 其他季节极

端径流事件出现的可能性增大。最为极端的 Q99 夏季 7 月份在干流三个台站均增加, 表明夏季月份极端洪涝发生的风险增大, 未来汉江流域各月发生不同程度洪涝极端事件的可能性均增大。

根据对未来情景下径流极端事件的预估, 表明气候变化对黄河和长江流域水文径流极端事件的影响在连续多年及年内各月情况下各不相同, 这种改变既有利的一面, 也有不利的一面, 因此有效进

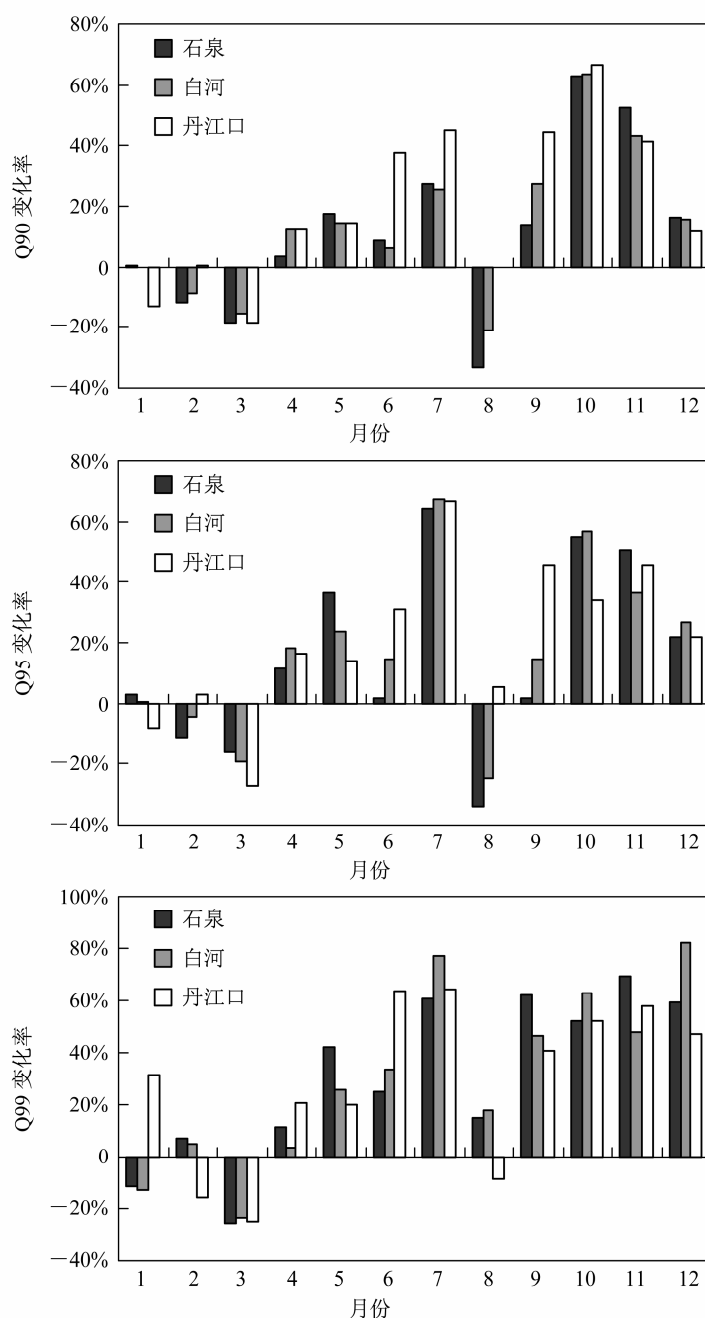


图9 汉江支流年内分位数径流量的变化

Fig. 9 Interannual percentile streamflow change in the Haniang River basin

行水资源管理, 趋利避害将有益于水资源可持续发展。

由于未来的气候情景是根据历史信息人为制定出来的, 而气候系统本身包含了多尺度模态、多天气系统相互作用, 加上两种模式(GCM, RCM)的分辨率和物理过程不同, 因此在模式传输信息和积分过程中, 在未来气候情景、气候系统和模式三方面增添了很多不确定性 (Ekström et al., 2005), 为了减少上述气候模拟过程中模式的不确定性, 未来

需采用集合预报的方法或通过进一步提高模式分辨率及优化物理参数方案, 以进一步减小模式模拟的不确定性。本研究中区域气候模式同大尺度汇流模型仍然采用单向连接的方法, 未能实现气候模式同水文模型的双向耦合, 未来研究中应广泛采用分布式水文模型, 完善径流模拟机制, 应该考虑将水文模型作为气候模式的下边界, 真正做到水文模型同气候模式耦合, 同时给出降水、气温以及径流的预测。

参考文献 (References)

- Boorman D B, Sefton C E M. 1997. Recognizing the uncertainty in the quantification of the effects of climate change on hydrological response [J]. *Climatic Change*, 35: 415–434.
- 曹丽娟. 2007. 气候变化对黄河和长江流域水文过程影响研究 [D]. 中国科学院研究生院博士学位论文. 158pp. Cao Lijuan. 2007. Climate change impacts on the hydrological processes of the Yellow River and the Yangtze River basins [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese). The Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 158pp.
- Cao L J, Dong W J, Xu Y L, et al. 2007. Validating the runoff from the PRECIS model using a large scale routing model [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 24 (5): 855–862.
- 曹丽娟, 张冬峰, 张勇, 等. 2008. 中国当代土地利用变化对黄河流域径流影响 [J]. *大气科学*, 32 (2): 300–308. Cao Lijuan, Zhang Dongfeng, Zhang Yong, et al. 2008. The effects of current land use in China on streamflow in the Yellow River basin [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (2): 300–308.
- 戴昌军, 梁忠民, 栾承梅, 等. 2006. 洪水频率分析中 PDS 模型研究进展 [J]. *水科学进展*, 17 (1): 136–140. Dai Changjun, Liang Zhongmin, Luan Chengmei, et al. 2006. Advance in flood frequency analysis for partial duration series [J]. *Advances in Water Science (in Chinese)*, 17 (1): 136–140.
- Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J. 1993. Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATs) version 1e as coupled to the NCAR community climate model [R]. Technical Report, National Center for Atmospheric Research.
- Ekström M, Fowler H J, Kilsby C G, et al. 2005. New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. 2. Future estimates and use in impact studies [J]. *J. Hydrol.*, 300: 234–251.
- Fu G B, Chen S L, Liu C M, et al. 2004. Hydro-climatic trends of the Yellow River basin for the last 50 years [J]. *Climatic Change*, 65: 149–178.
- Gellens D, Roulin E. 1998. Streamflow response of Belgian catchments to IPCC climate change scenarios [J]. *J. Hydrol.*, 210: 242–258.
- 姜彤, 苏布达, 王艳君, 等. 2005. 四十年来长江流域气温、降水与径流变化趋势 [J]. *气候变化研究进展*, 1 (2): 65–68. Jiang Tong, Su Buda, Wang Yanjun, et al. 2005. Trends of temperature, precipitation and runoff in the Yangtze River basin from 1961 to 2000 [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 1 (2): 65–68.
- Katz R W, Browns B G. 1992. Extreme events in a changing climate: Variability is more important than averages [J]. *Climatic Change*, 21: 289–302.
- Kite G W. 1993. Application of a land class hydrological model to climatic change [J]. *Water Resour. Res.*, 29: 2377–2384.
- Liu C M, Zheng H X. 2004. Changes in components of the hydrological cycle in the Yellow River basin during the second half of the 20th century [J]. *Hydrological Processes*, 18: 2337–2345.
- Meehl G A, Tebaldi C. 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century [J]. *Science*, 305: 994–997.
- 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: 514–517.
- Mirza M Q, Warrick R A, Erickson N J, et al. 1998. Trends and persistence in precipitation in the Ganges, Brahmaputra and Meghna River basins [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 43 (6): 845–858.
- New M, Lister D, Hulme M, et al. 2002. A high-resolution data set of surface climate over global land areas [J]. *Climate Res.*, 21: 1–25.
- Panagoulia D, Dimou G. 1997. Sensitivity of flood events to global climate change [J]. *J. Hydrol.*, 191: 208–222.
- Prudhomme C, Jakob D, Svensson C. 2003. Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK catchments [J]. *J. Hydrol.*, 277: 1–23.
- 施雅风, 姜彤, 苏布达, 等. 2004. 1840 年以来长江大洪水演变与气候变化关系初探 [J]. *湖泊科学*, 16 (4): 289–297. Shi Yafeng, Jiang Tong, Su Buda, et al. 2004. Preliminary analysis on the relation between the evolution of heavy floods in the Yangtze River catchment and the climate changes since 1840 [J]. *Journal of Lake Sciences (in Chinese)*, 16 (4): 289–297.
- 石英, 高学杰. 2008. 温室效应对我国东部地区气候影响的高分辨率数值试验 [J]. *大气科学*, 32 (5): 1006–1018. Shi Ying, Gao Xuejie. 2008. Influence of greenhouse effect on eastern China climate simulated by a high resolution regional climate model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (5): 1006–1018.
- Xia J, Wang Z G, Wang G S, et al. 2004. The renewability of water resources and its quantification in the Yellow River basin, China [J]. *Hydrological Processes*, 18: 2327–2336.
- Xie P P, Chen M Y, Yang S, et al. 2007. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia [J]. *J. Hydrometeor.*, 8: 607–626.
- Xiong Z, Wang S Y, Zeng Z M, et al. 2003. Analysis of simulated heavy rain over the Yangtze River valley during 11–30 June 1998 using RIEMS [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 20: 815–824.
- Xu J X. 2005. Temporal variation of river flow renewability in the middle Yellow River and the influencing factors [J]. *Hydrological Processes*, 19: 1871–1882.
- Xu Z X, Li J Y, Liu C M. 2007. Long-term trend analysis for major climate variables in the Yellow River basin [J]. *Hydrological Processes*, 21 (14): 1935–1948.
- 赵芳芳, 徐宗学. 2009. 黄河源区未来气候变化的水文响应 [J]. *资源科学*, 31 (5): 722–730. Zhao Fangfang, Xu Zongxue. 2009. Hydrological response to climate change in headwater catchment of the Yellow River basin [J]. *Resources Science (in Chinese)*, 31 (5): 722–730.
- Zhang J Y, Dong W J, Fu C B, et al. 2003. Streamflow simulation for the Yellow River basin using RIEMS and LRM [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 20: 415–424.
- Zhang Q, Jiang T, Gemmer M, et al. 2005. Precipitation, temperature and discharge analysis from 1951 to 2002 in the Yangtze Catchment, China [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 50 (1): 65–80.
- 郑红星, 刘昌明. 2003. 黄河源区径流年内分配变化规律分析 [J]. *地理科学进展*, 22(6): 585–590. Zheng Hongxing, Liu Changming. 2003. Changes of annual runoff distribution in the headwater of the Yellow River basin [J]. *Progress in Geography (in Chinese)*, 22 (6): 585–590.