

# 气候变化影响下的流域水循环：以长江和黄河典型流域为例

徐宗学<sup>1</sup> 刘浏<sup>2</sup>

(1 北京师范大学水科学研究院, 全球变化研究协同创新中心, 北京 100875;

2 中国农业大学水利与土木工程学院, 中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

**摘要:** 在对IPCC提供的多种大气环流模式(GCMs)适用性评估的基础上, 采用SDSM和ASD统计降尺度模型生成未来气候变化情景, 驱动分布式水文模型VIC和SWAT, 分别对长江和黄河典型流域进行分布式水文模拟, 定量探讨气候变化对流域水循环的影响。结果表明, 适应性评估可以有效降低GCMs选择的不确定性, 统计降尺度方法能够明显改善全球气候模式降水和气温输出结果。与基准期(1961—1990年)相比, 未来时期(2046—2065年和2081—2100年)长江下游太湖流域径流量呈现微弱减少趋势, 但汛期东南部径流量增加显著, 而黄河上游流域径流量则呈下降趋势。研究结果可为开展我国各大流域适应气候变化研究提供一定的参考依据。

**关键词:** 气候变化, 水循环, 降尺度, 水文模型, 大气环流模式

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.017

## Impact of Climate Change on Hydrological Cycle: Case Studies in the Yangtze River and Yellow River Basins

Xu Zongxue<sup>1</sup>, Liu Liu<sup>2</sup>

(1 College of Water Sciences, Beijing Normal University, Joint Center for Global Change Studies (JCGCS), Beijing

100875 2 College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Center for Agricultural Water Research in China, Beijing 100083)

**Abstract:** Based upon adaptive assessment of different GCMs recommended by IPCC, the future climate change scenarios were generated by using SDSM and ASD, respectively, and were used to drive the distributed hydrological model VIC and SWAT. The VIC was applied for simulating hydrological processes in the Taihu basin, which is selected as the typical watershed of the Yangtze River basin. The SWAT model was run for simulating hydrology in the upper reaches of the Yellow River basin. Then, the impact of climate change on hydrological cycle was quantitatively investigated. Results show that the methods adopted in this study for GCMs adaptive assessment and downscaling could reduce uncertainties effectively. It was detected that a decreasing trend in the upper reaches of the Yellow River basin; a slightly decreasing trend in the lower reaches, of the Yangtze River Basin, but with a significant increasing trend in the southeast of the Taihu basin during flood seasons for the future periods (2046–2065 and 2081–2100), comparing with the runoff in the baseline period (1961–1990). These results are of greatly significance for adapting climate change in different river basins for the future.

**Keywords:** climate change, hydrological cycle, downscaling, hydrological model, General Circulation Model (GCM)

### 0 引言

政府间气候变化委员会(IPCC)第五次评估报告<sup>[1]</sup>指出: 全球气候变化已是不争的事实, 将对全球和区域水资源安全构成严重威胁。我国气候变化趋势

与全球基本一致<sup>[2-3]</sup>。气候变化对人类、生态、环境产生的多尺度、全方位、多层次的影响<sup>[4-11]</sup>, 已使其成为威胁全球可持续性发展的危险因素之一。水循环作为人类—生态—环境的纽带, 预估其对未来气候变化的响应, 已成为各国科学家、公众和决策者共同关心的课题。

在全球变暖背景下, 中国的高温、低温、强降水、干旱等极端天气气候事件的频率和强度存在不同的变化趋势, 并有区域差异<sup>[12-13]</sup>。在过去100年中, 我国主要流域水文气候要素发生了明显的变化, 主要表

收稿日期: 2015年8月10日; 修回日期: 2016年4月1日

第一作者: 徐宗学(1962—), Email: zxxu@bnu.edu.cn

资助信息: 国家重点基础研究发展计划(2010CB428402);

国家自然科学基金项目(51509247); 高等学校博士学科点专项科研基金(20130008120005)

现为大部分地区气温显著升高,近50年东部季风区域降水存在“南涝北旱”的趋势变化<sup>[14-17]</sup>,北方多数外流河流域径流减少,加剧了北方水资源的供需矛盾和南方防洪抗灾的压力<sup>[18-20]</sup>;全国大部分地区潜在蒸发能力(水面蒸发)明显下降<sup>[21-24]</sup>;未来的气候变化可能对中国水资源产生较大影响<sup>[25-28]</sup>,北方部分江河径流量可能减少、南方江河径流量可能增加<sup>[29]</sup>,各流域年平均蒸发量可能增大<sup>[30]</sup>,旱涝等灾害的出现频率可能增加,进一步加剧水资源的脆弱性与供需矛盾<sup>[29]</sup>。

针对我国大江大河流域水循环及水资源格局变化以及南方洪涝灾害与北方水资源短缺等重大水问题,开展气候变化背景下陆地水循环响应机理研究,对于科学认识全球气候变化背景下我国陆地水循环时空演变规律,评估气候变化对流域水循环的影响,具有重要科学意义与应用价值。

本文选取长江和黄河典型流域分别作为我国南方、北方流域的代表,采用秩打分法对IPCC提供的多种大气环流模式(GCMs)进行适应性评估,并对筛选出的GCMs输出结果进行降尺度处理,分别构建适合长江流域和黄河流域的未来气候变化情景,进而驱动分布式水文模型,模拟研究区水循环要素的时空演变规律,评估流域水循环对未来气候变化的响应。

## 1 GCM适应性评估

### 1.1 评估方法

将GCMs输出统计特征值与实测数据统计特征值的拟合程度作为目标函数,根据各个目标函数的表现进行评分,进而综合评价气候模式的整体表现。

以均值、变异系数(=标准差/均值)和归一化的均方根误差(NRMSE)表征GCMs输出与实测变量均值和方差的吻合程度。NRMSE定义为均方根误差与相应标准差的比值。

以时间序列(多年平均月序列)的Pearson相关系数和空间序列(各个站点气候要素均值)的Pearson相关系数表征GCMs模拟值与实测值之间的吻合程度,可以分别用于评估模式模拟变量的年内变化能力和空间拟合程度。

利用Mann-Kendall方法检测各个变量的长期变化趋势(MK Zc)及其变化幅度(MK Slope),如果GCM输出变量的长期变化趋势(MK Zc)与实测值一致的区域没有达到95%,则趋势变化幅度(MK Slope)不参与评分。

利用经验正交函数(EOF)反映变量时空综合变异的特点,前期分析得知近20个变量的EOF第一和第二特征向量可以解释其绝大部分的方差,因此,选用

前两个EOF的特征向量进行秩评分。

利用概率密度函数的两个统计量BS(Brier score)和Sscore(Skill score)来评价GCMs对概率密度函数的模拟效果,BS是概率预测的均方差,Sscore用以描述模拟概率分布与实测值的重叠程度。

以上包括了均值、变异系数、NRMSE、时间序列相关系数、空间序列相关系数、趋势分析秩统计量、趋势分析变化幅度、EOF第一特征向量、EOF第二特征向量、BS和Sscore共11个统计量,每个统计量的表现均作为目标函数之一。对每个目标函数分别进行秩评分,根据GCMs表现的差异赋以0~10不同的值,计算公式如下:

$$RS_i = \text{Int} \left[ \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \times 10 \right], x_i < x_{\max} \quad (1)$$

其中, $x_i$ 为模拟结果与实测数据对应的待评估统计量之间的相对误差,误差小则给的分数也小。对于特定GCM输出变量,最后总评分由所有统计量对应的分数求平均值得到,模拟效果越好,评分越小。该评分结果代表了GCMs输出结果与“实测”值之间的统计特征拟合程度,适用于不同GCMs之间的对比分析,并不代表某一GCM的实际模拟精度。

### 1.2 数据

#### 1) GCMs输出数据

为尽可能多地纳入全球不同国家的GCM,以及保证各GCM输出数据的完整性和可靠性,本文选用了IPCC第四次评估报告推荐的GCMs(表1),要素包括500,700,850hPa等压面的平均气温、相对湿度、纬向风速、经向风速和位势高度共15个气象变量,以及气温和降水两个地面气候要素,时间尺度为月,所有数据均来自于IPCC数据中心,各GCM驱动场等详细信息可参见网站<http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk>。所有GCMs输出数据统一插值到 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的网格分辨率,数据序列为1960—1999/2000年。

#### 2) ERA-40/NCEP再分析资料

选取ERA-40和NCEP再分析资料作为各等压面气象变量的“实际”值,用来评估GCMs输出结果的适用性。

#### 3) 地面观测资料

利用中国气象局提供的地表月平均气温和月降水格点数据(<http://ncc.cma.gov.cn>),重采样成 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 网格分辨率,用来评估GCMs地面输出成果。

### 1.3 长江流域评估结果

本研究选取的长江流域GCM网格如图1所示。综合评价结果表明,FGOALS、ECHAM4、ECHAM5、HadCM3、HadGEM1和MRI在长江流域的表现较其他

表1 气候模式简介  
Table 1 Introduction of GCMs

气候模式	缩写	开发研究机构	国家	分辨率	研究年限
BCCR:BCM20	BCCR	Bjerknes气候研究中心	挪威	1.9°×1.9°	1961—2000
PCM	PCM	国家大气研究中心	美国	2.8°×2.8°	1961—1999
CCSM3	CCSM3	国家大气研究中心	美国	1.4°×1.4°	1961—2000
CGCM2.3.2	MRI	气象研究中心	日本	2.8°×2.8°	1961—2000
CGCM3.1_T47	CGCM47	加拿大气候模拟与分析中心	加拿大	2.8°×2.8°	1961—2000
CGCM3.1_T63	CGCM63			1.9°×1.9°	
CNRM:CM3	CNRM	国家气象研究中心	法国	1.9°×1.9°	1961—1999
CSIRO:MK30	CSIRO30	澳大利亚联邦科工组织大气研究所	澳大利亚	1.9°×1.9°	1961—2000
CSIRO:MK35	CSIRO35			1.9°×1.9°	
ECHAM4	ECHAM4	气候研究中心	德国	2.8°×2.8°	1961—2000
ECHAM5	ECHAM5	马普气象研究所		1.9°×1.9°	
FGOALS:g10	FGOALS	大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG) / 大气物理研究所	中国	2.8°×2.8°	1961—1999
GFDL:CM20	GFDL20	美国商业部/国家海洋大气局 (NOAA) / 地球物理流体动力学实验室 (GFDL)	美国	2.0°×2.5°	1961—2000
GFDL:CM21	GFDL21			2.0°×2.5°	
GISS:AOM	GISSAOM	航空航天局 (NASA) / Goddard空间研究中心 (GISS)	美国	3°×4°	1961—2000
GISS:EH	GISSEH			4°×5°	
GISS:ER	GISSEH			4°×5°	
HadCM3	HadCM3	英国气象局哈得莱中心	英国	2.5°×3.75°	1961—1999
HadGEM1	HadGEM1			1.3°×1.9°	
INM:CM30	INM	计算数学学院	俄罗斯	4°×5°	1961—2000
IPSL:CM4	IPSL	皮埃尔·西蒙·拉普拉斯学院	法国	2.5°×3.75°	1961—2000
MIROC3.2_hires	MIROC-h	东京大学气候系统研究中心, 国家环境研究所, Frontier全球变化研究中心 (JAMSTEC)	日本	1.1°×1.1°	1961—2000
MIROC3.2_medres	MIROC-m			2.8°×2.8°	

气候模式要好一些 (图2)。

张增信等<sup>[31]</sup>在研究长江流域水汽收支的时空变化与环流特征时指出, 源自孟加拉湾的经向水汽输送对流域相对湿度起到重要影响, 大气纬向风速和经向风速的模拟效果很大程度上影响流域内相对湿度的时空分布。本研究中, 相对湿度模拟较好的几个GCM (ECHAM4、FGOALS、HadCM3和HadGEM1) 对纬向风速和经向风速的模拟同样都较好, 这与上述得出的结论一致。而对气温模拟明显要好于相对湿度等其他变量, 多数研究也都表明GCM对气温的模拟较好。徐影等<sup>[32]</sup>指出, ECHAM4和HadCM2模式对中国地区

气候模拟最好, 这两种模式及其在其基础上发展的模式在本研究中也表现出良好的模拟能力。但Maxino等<sup>[33]</sup>评估澳大利亚Murray-Darling流域GCM适用性时, 发现绝大多数气候模式的气温模拟值较实测值偏大。曹颖等<sup>[34]</sup>评价黄河流域GCM时, 气温模拟值均偏小。

本文选取太湖流域作为典型区域开展气候变化对长江流域水循环的影响研究, 并开展GCMs的适应性评估。图3为RS评分排序, 评分分数越低, 表明模式模拟气候的能力越强。可以看出, BCCR模式表现最好。因此, 选取BCCR模式进行气候变化影响评估, 其模拟的日尺度气候数据是在A1B情景下输出的, 分

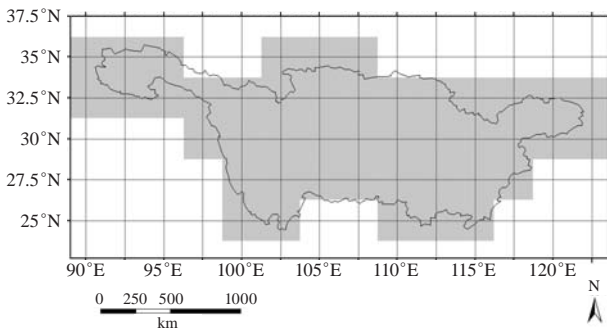


图1 长江流域及选取网格图

Fig. 1 Location of the Yangtze River Basin and selected GCM grids

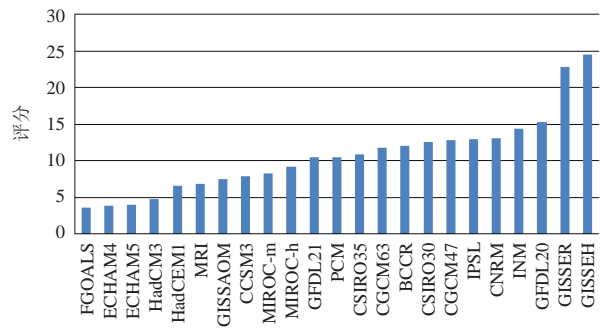


图2 长江流域GCMs综合评分图

Fig. 2 Rank Score (RS) values of GCMs for the Yangtze River Basin

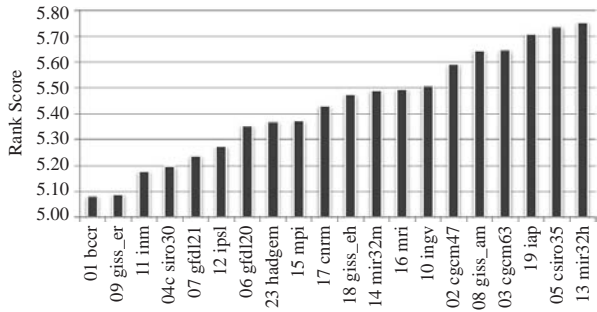


图3 太湖流域GCMs综合评分  
Fig. 3 RS values of GCMs for the Taihu Basin

为两个部分：当前时期1961—2000年（20C3M情景）和未来时期（2046—2065年和2081—2100年）。该情景是一种在经济发展与温室气体排放之间保持平衡的发展情景，较其他情景可能更为符合太湖流域未来水—经济—环境协调发展规划。

### 1.4 黄河流域评估结果

本文选用了覆盖黄河流域的25个网格GCMs数据（图4），并将所有气候模式数据以线性插值的方法统一插值到 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 分辨率的网格上。综合评估结果（图5）表明，最好的10个气候模式为MRI、HadGEM1、INM、CSIRO30、MIROC-M、

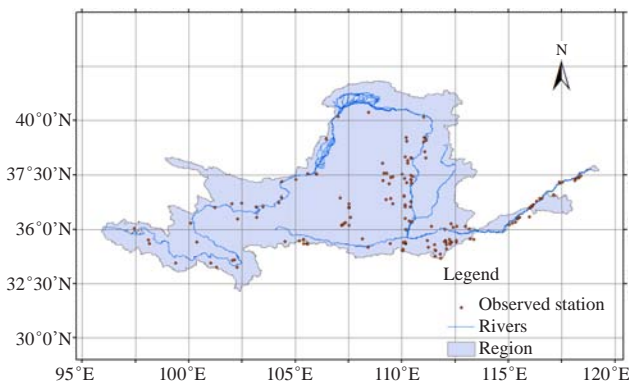


图4 黄河流域及选取网格图  
Fig. 4 Location of the Yellow River Basin and selected GCM grids

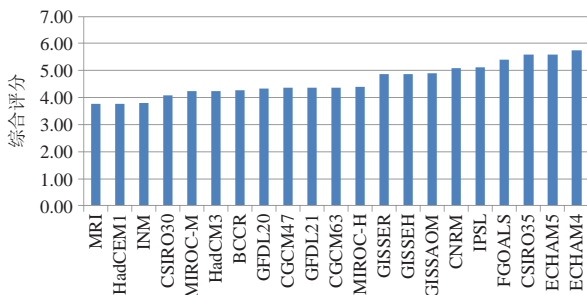


图5 黄河流域GCMs综合评分图  
Fig. 5 RS values of GCMs for the Yellow River Basin

HadCM3、BCCR、GFDL20、CGCM47和GFDL21。

周晓霞等<sup>[35]</sup>在研究夏季亚洲季风区的水汽输送及其对中国降水的影响时指出，印度季风带来的纬向水汽输送和经向水汽输送对流域相对湿度起到重要影响，大气纬向风速和经向风速的模拟效果很大程度上影响流域内相对湿度的时空分布。本研究中，相对湿度模拟较好的几个气候模式（MRI、HadGEM1和GFDL20）等对纬向风速和经向风速的模拟同样都较好，这与上述结论是一致的。

为探讨气候变化影响研究中由多模式及不同情景造成的不确定性，综合考虑各模式情景数据的一致性和完整性，本研究选取MRI、CSIRO30和INM三种在黄河流域表现最优的模式输出的A2和B1情景下的数据进行对比研究。

## 2 气候变化对长江典型流域水循环的影响

### 2.1 未来气候变化情景构建

本文作者已针对太湖流域开展了统计降尺度模型对比分析研究<sup>[36]</sup>，即采用SDSM和ASD分别构建太湖流域未来气候变化情景，对比分析表明ASD对太湖流域未来气候的模拟优于SDSM。因此，本文采取ASD模型构建的气候变化情景开展研究。

ASD降尺度结果显示，与未来气温的变化相比（图6），未来降水的变化更为复杂。

### 2.2 长江典型流域水循环对气候变化的响应

#### 1) 分布式水文模型构建

太湖流域地势平坦、河网复杂、圩区众多，没有明确流域出口，并且基于掌握的90m DEM难以提取太湖流域河网，难以进行全流域产汇流模拟，因此本研究选取基于网格的分布式VIC-3L模型<sup>[37-42]</sup>，直接获取太湖流域网格化径流深。作者已成功构建太湖流域VIC模型<sup>[43]</sup>，可供本研究开展气候变化影响研究。

#### 2) 气候变化影响定量评估

采用ASD模型生成的A1B情景下基准期以及未来时期日降水、日最高气温和最低气温的气象数据系列，通过泰森多边形法插值到太湖流域 $5\text{km} \times 5\text{km}$ 网格，从而建立气候强迫数据；根据已建立的太湖流域VIC模型土壤和植被参数文件<sup>[43]</sup>，使VIC模型在太湖流域的1452个网格上连续运行，独立输出每个网格不同时期的日径流深数据系列。

太湖流域2046—2065年各网格相对基准期的多年平均月径流深变化的情况如图7所示。由图可见，太湖流域大部分地区未来时期年内平均月径流深呈现减少趋势，而各月的减少幅度不一。较基准期流域径流深减少幅度最大的地区是浙西区与杭嘉湖区；而其

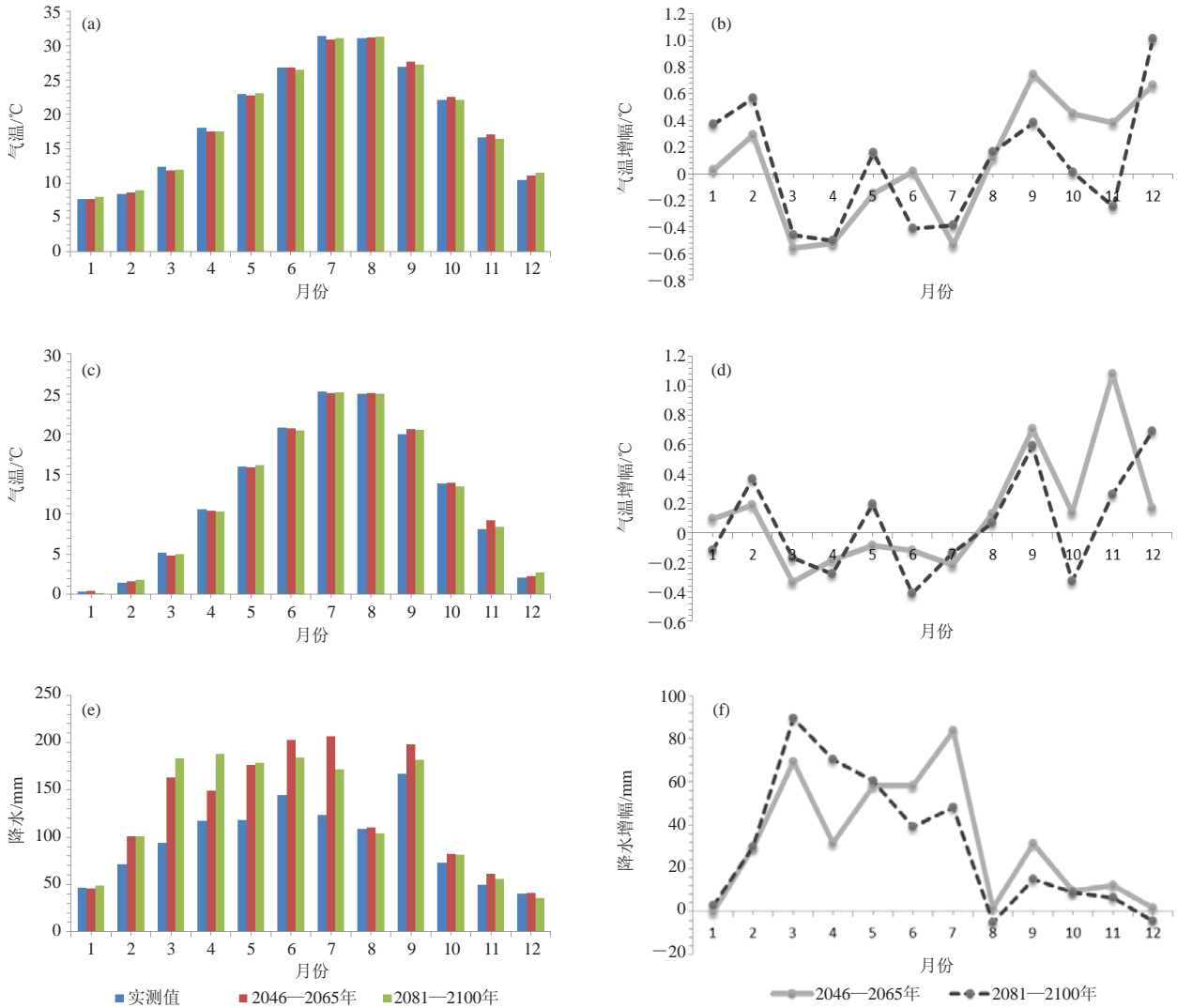


图6 ASD降尺度模型模拟太湖流域未来两个时段的日最高气温 (a—b)、日最低气温 (c—d) 和降水 (e—f) 及其变化情况 (a、c、e为3个要素与实测值的对比, b、d、f为年内各月要素相对基准期的变化)

Fig. 6 The ASD model simulated daily maximum air temperature (a—b), minimum air temperature (c—d), precipitation (e—f), and monthly changing patterns for the future two periods (a, c, e: comparisons between simulations and observations, b, d, f: monthly changes for two future periods comparing with that in the baseline period)

他地区相对较小, 尤其是上海地区在多数月 (1—4和9—12月) 都呈现径流深增加的趋势。不过, 浙西区在汛期呈现略微增加的趋势。

2081—2100年, 太湖流域大部分地区未来时期年内平均月径流深呈现减少趋势, 而各月的减少幅度不一 (图略)。较基准期而言, 浙西区的径流深虽有减少的趋势, 不过相比2046—2065年, 减少幅度有所减少。相比之下, 3—5月, 流域内径流深减少幅度最大的是阳澄淀区; 而在冬季杭嘉湖区的径流减少幅度较大; 与前一时期相似的是上海地区在多数月 (1—4和10—12月) 都呈现径流深增加的趋势。

### 3 气候变化对黄河典型流域水循环的影响

#### 3.1 未来气候变化情景构建

基于GCMs适应性评估结果, 本研究共选取A2和B1两种情景下的三种GCM (MRI、CSIRO30、INM) 输出结果, 数据按照 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的网格进行插值处理, 模拟时段为基准期1961—1990年、未来时期2046—2065年和2081—2100年。采用SDSM模型进行降尺度处理, 选取12个日预报因子, 覆盖了黄河流域的25个网格。观测数据包含1961—2000年间黄河流域79个测站的日降水量、平均气温、最高及最低气温的日观测值。

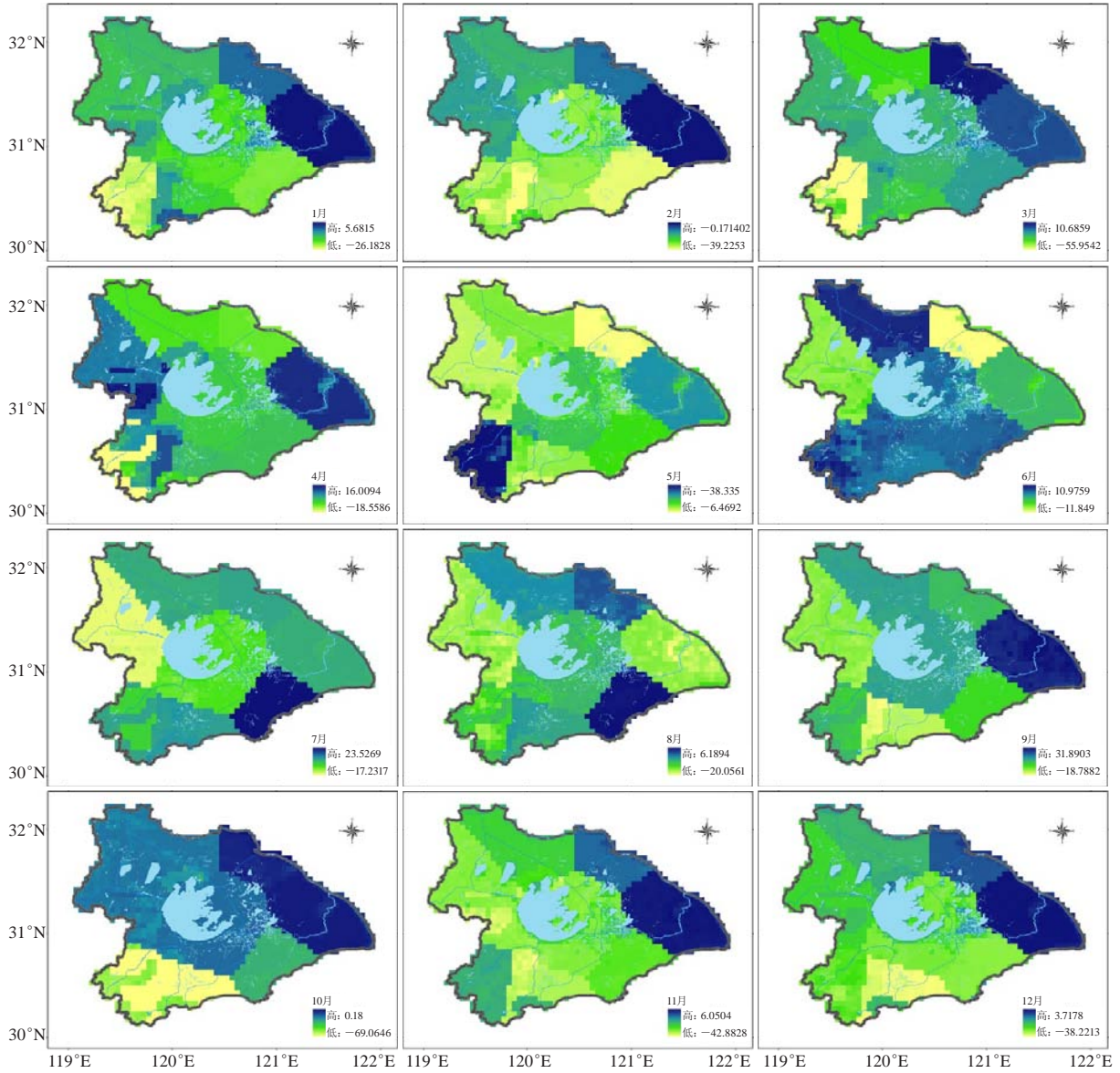


图7 研究区A1B情景下2046—2065年多年平均月径流深变化的空间分布  
Fig. 7 Spatial distribution of monthly runoff changes under A1B scenario for 2046—2065

图8显示了三种GCMs在不同情景(A2、B1)和未来时期共六种情形下月最高气温、月最低气温的模拟结果。可以看出,月最高、最低气温在六种情形下的大部分月份里,都显示出增长趋势。

不同情景下,降水量的变化差异较大(图9)。总的来说,CSIRO30模拟的降水量减少幅度是三种模式中最低的,月变化降低不到25%。MRI模拟的降水量变化在三个模式中增幅最大。

### 3.2 黄河典型流域水循环对气候变化的响应

#### 1) 分布式水文模型构建

本研究选取黄河上游流域(图10)作为典型区开

展气候变化对黄河流域水循环影响研究。

黄河上游流域地势起伏明显,河网较易提取,流域出口水文站数据丰富,因此选用SWAT模型<sup>[44-45]</sup>进行分布式模拟,生成流域出口流量过程。采用模型自带敏感性分析模块对SWAT模型进行了参数敏感性分析,然后基于此对参数进行率定和验证。以1971—1985年为率定期对模型参数进行率定,1986—2000年为模型验证期对模型进行验证。

兰州水文站在率定期和验证期的径流模拟值与实测值的对比如图11,总体来说,模型的评价指标较为令人满意。率定期纳西效率系数为0.667,确定性系数

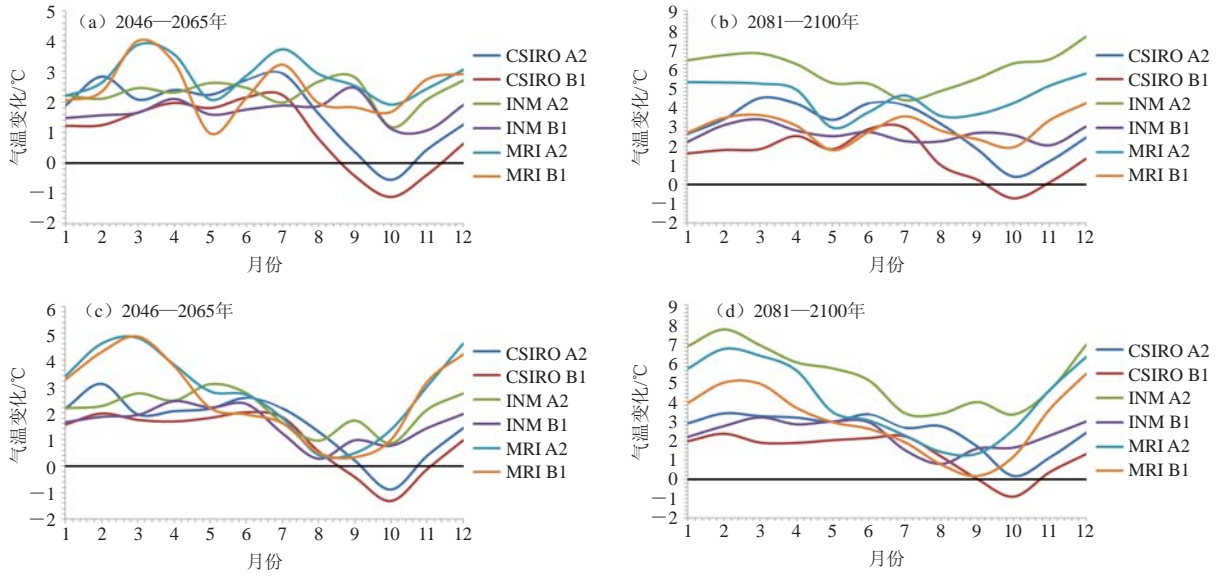


图8 不同情景 (A2、B1) 月最高气温 (a, b)、月最低气温 (c, d) 的模拟结果  
 Fig. 8 Simulated monthly maximum (a, b) /minimum (c, d) air temperature under A2 and B1 scenarios

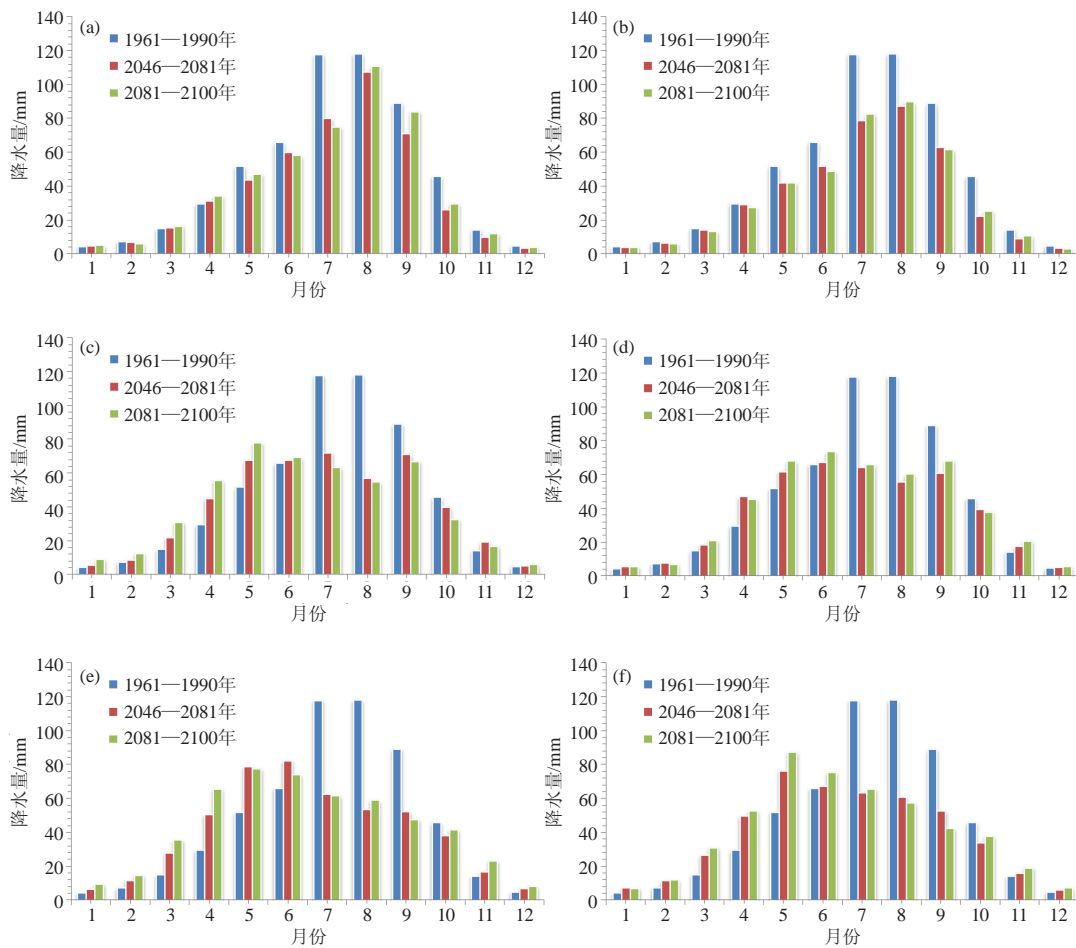


图9 三种GCMs (a—b: CSIRO30, c—d: INM, e—f: MRI) 在不同情景 (a, c, e: A2情景, b, d, f: B1情景) 的降水量模拟值

Fig. 9 Simulated monthly precipitation from three different GCMs (a—b: CSIRO30, c—d: INM, e—f: MRI) under two different scenarios (a, c, e: A2 scenario, b, d, f: B1 scenario)

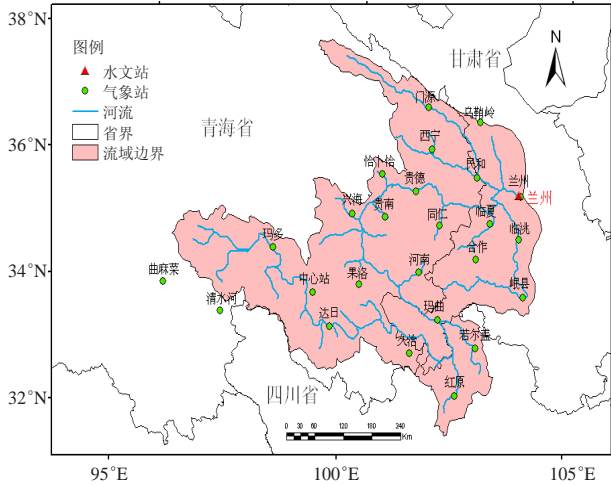


图10 黄河上游位置图

Fig. 10 Location of the Upper Yellow River Basin

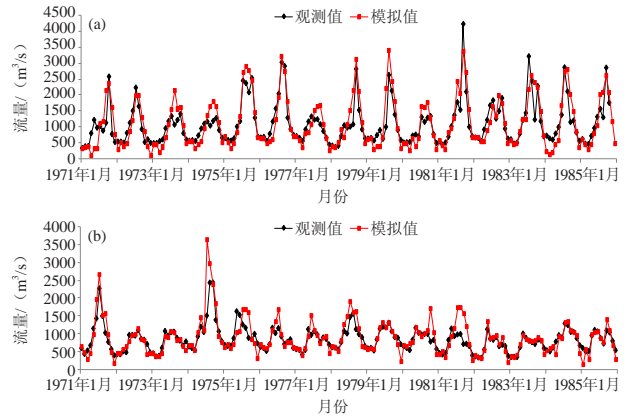


图11 兰州水文站月径流实测值与模拟值拟合曲线 (a为率定期; b为验证期)

Fig. 11 Comparison of monthly discharge between observed and simulated values at the Lanzhou hydrological station (a: calibration period, b: validation period)

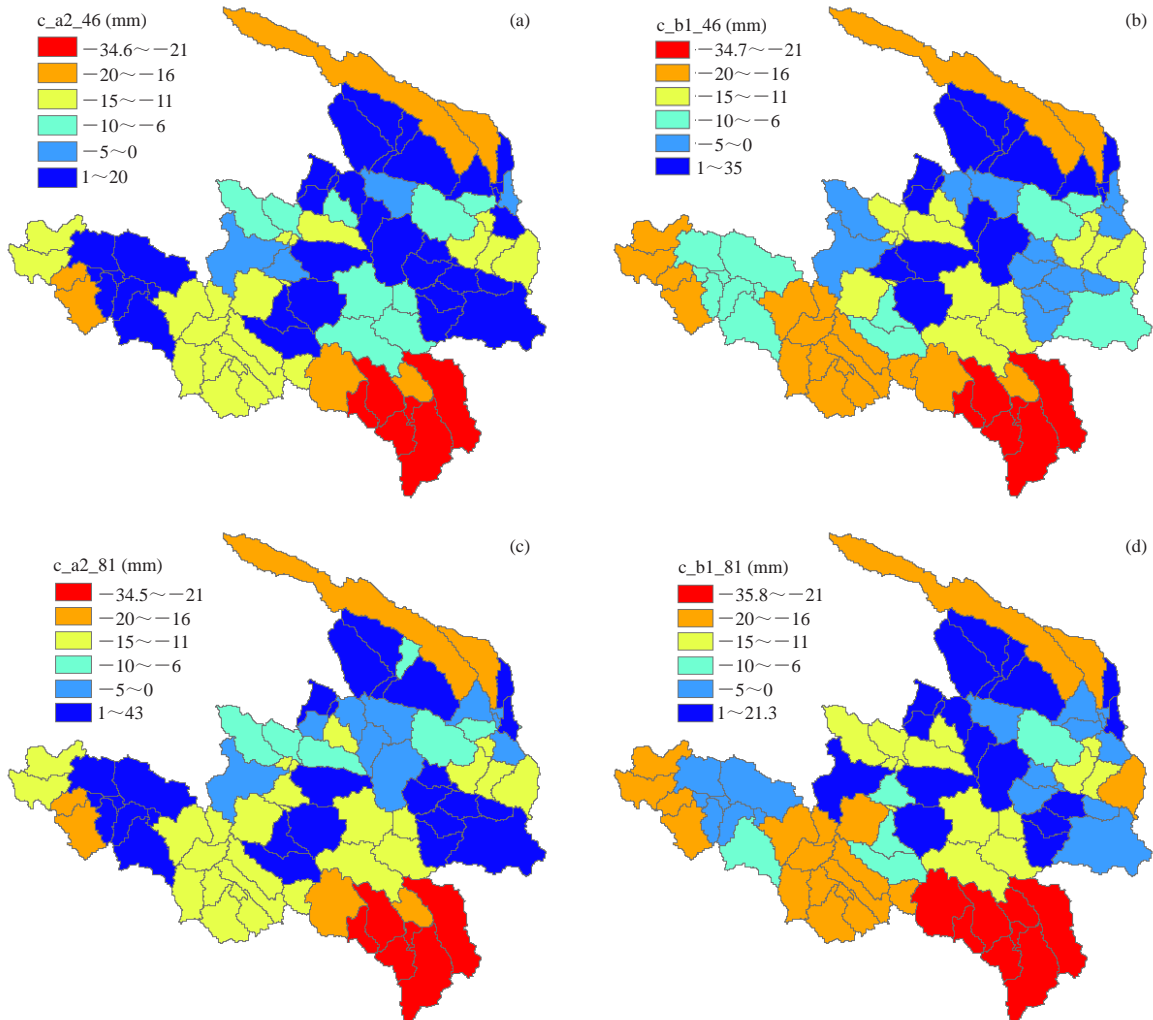


图12 CSIRO模拟的流域各子流域多年平均径流深在2046—2065年 (a, b) 和2081—2100年 (c, d) 较基准期变化的空间分布  
Fig. 12 The CSIRO outputs: changes of averaged annual runoff for 2046—2065 (a, b) and 2081—2100 (c, d) compared with those in the baseline period

为0.773；验证期纳西效率系数为0.626，确定性系数为0.709。因此，模型较好模拟了流域内的水量平衡。

## 2) 黄河上游流域径流量对未来气候变化的响应

图12—14分别给出了三个气候模式降尺度情景下各子流域多年平均径流深在2046—2065年和2081—2100年两个时期内较基准期变化的空间分布。

CSIRO模式相关组合情景下流域径流深的变化幅度在 $-35.8\sim 43\text{mm}$ ，其中流域大多数地区的径流深的变化量在 $-5\sim -20\text{mm}$ 。整体来看，流域径流量在不同组合情景下的变化趋势较为一致，流域内大部分子流域径流量呈减少趋势。还可以看出，两个时期径流深的变化较为相似；对不同情景而言，A2情景下流域径流深呈现减少趋势的面积要大于B1情景。总的来讲，CSIRO气候模式降尺度情景下，流域径流深在大部分子流域呈减少趋势；B1排放情景下，流域径流深

呈减少趋势的子流域面积明显少于A2情景。

INM模式相关组合情景下流域径流深的变化幅度在 $-33.9\sim 61\text{mm}$ ，大部分子流域径流深变化幅度为负值，说明流域大部分子流域径流深呈减少趋势。流域径流深在不同组合情景下的变化趋势较为一致，即都表现为流域南部子流域内径流深呈减少趋势，减少幅度大于 $20\text{mm}$ ，而北部子流域径流深则较基准期有增有减。

MRI模式相关组合情景下流域径流深的变化幅度在 $-32.9\sim 69\text{mm}$ ，其中流域内有将超过一半流域面积的平均径流深都呈减少趋势。在2046—2065年，A2情景呈增加趋势的子流域面积大于B1情景，且A2情景下减少幅度在 $16\sim 20\text{mm}$ 的流域面积大于B1情景；在2081—2100年，B1情景呈增加趋势的子流域面积大于A2情景，且B1情景下减少幅度在 $16\sim 20\text{mm}$ 的流域面

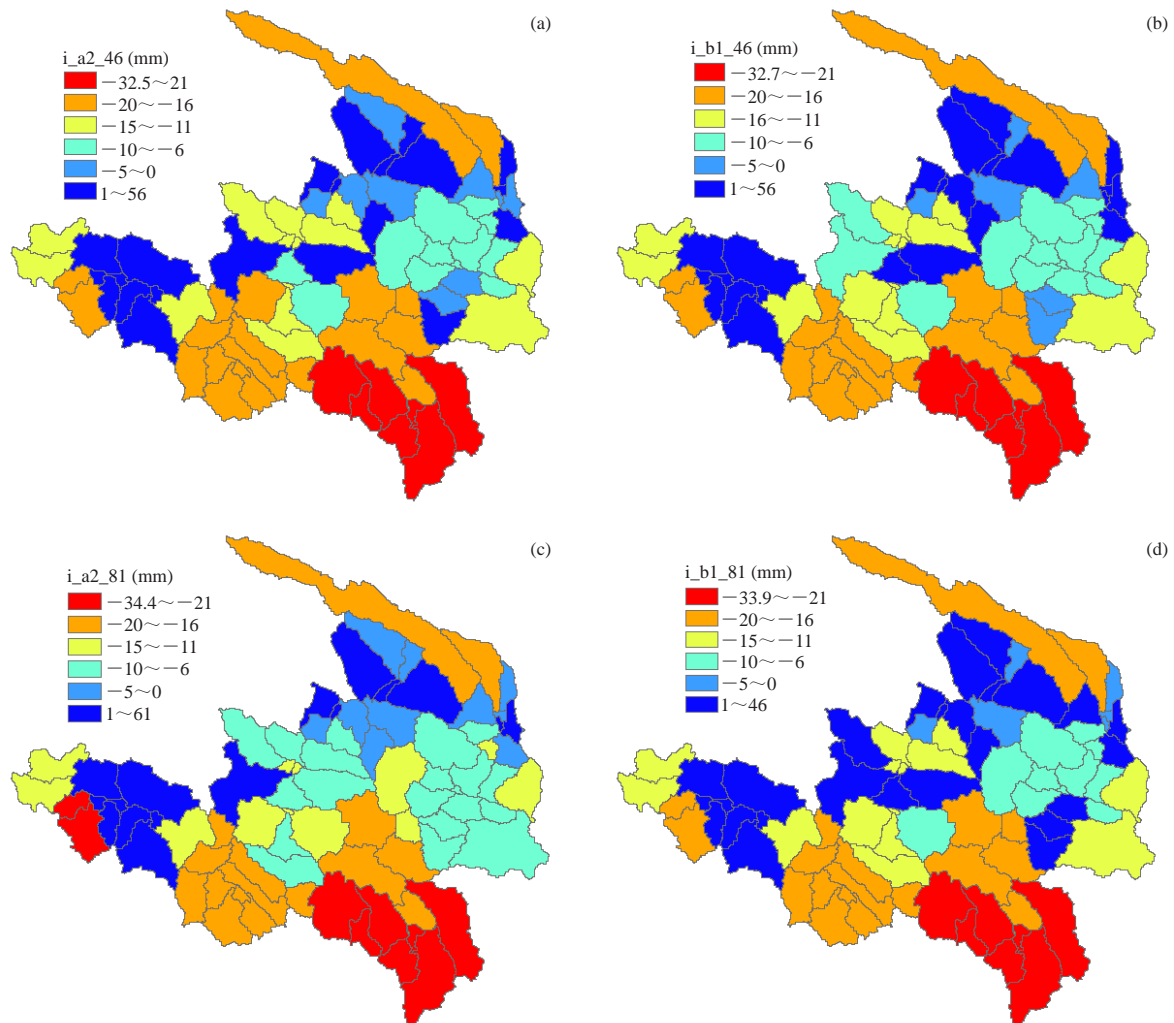


图13 INM模拟的流域各子流域多年平均径流深在2046—2065年 (a, b) 和2081—2100年 (c, d) 较基准期变化的空间分布  
Fig. 13 The INM outputs: changes of averaged annual runoff for 2046-2065 (a, b) and 2081-2100 (c, d) compared with those in the baseline period

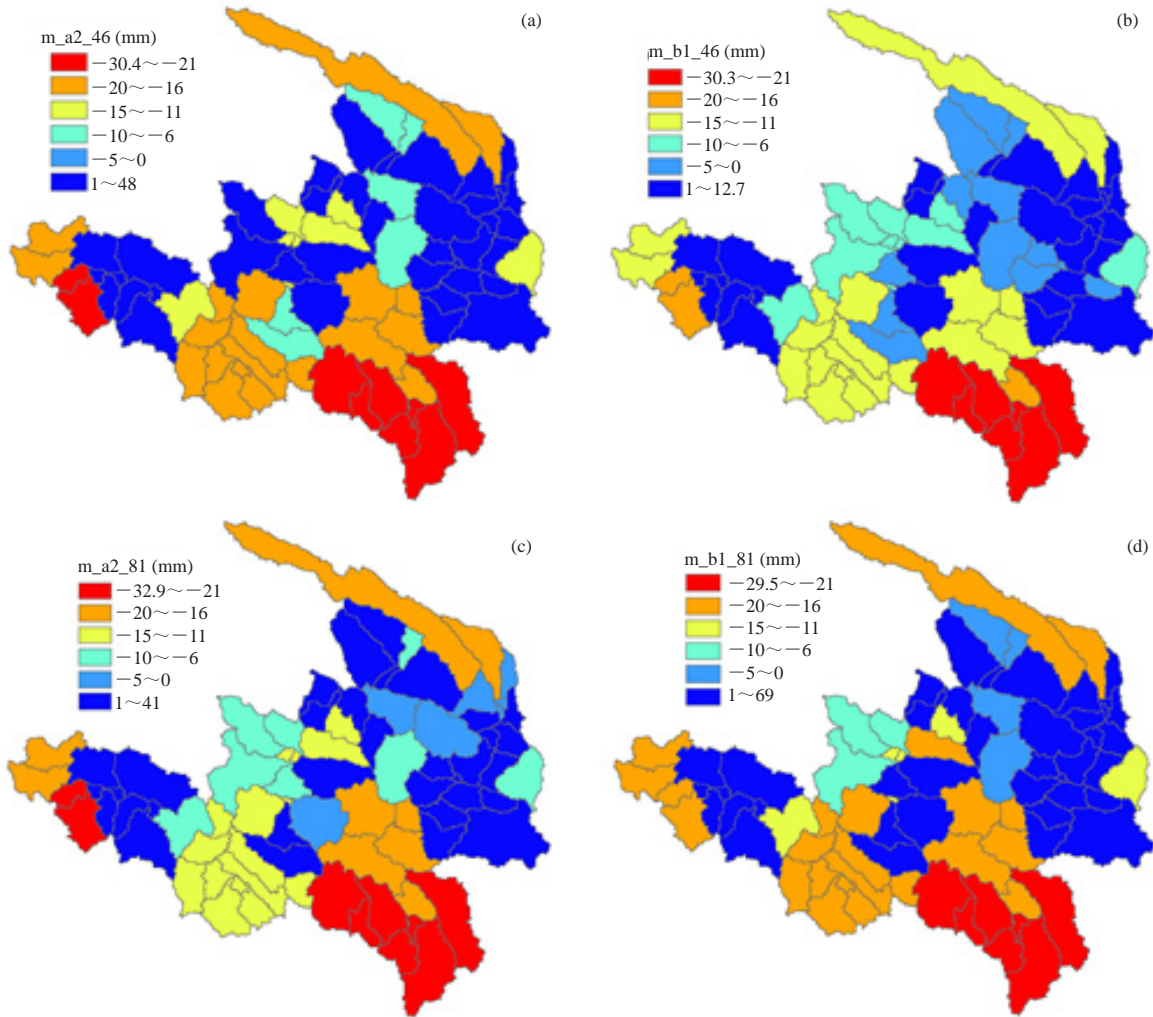


图14 MRI模拟的流域各子流域多年平均径流深在2046—2065年 ( a, b ) 和2081—2100年 ( c, d ) 较基准期变化的空间分布  
Fig. 14 The MRI outputs: changes of averaged annual runoff for 2046–2065 (a, b) and 2081–2100 (c, d) compared with those in the baseline period

积大于A2情景。总的来说，MRI模式降尺度情景下流域超过一半面积的径流深都呈减少趋势。

#### 4 结论

水循环作为气候系统的重要组成部分，其对气候变化的反应尤为敏感。探讨气候变化对流域水循环和水资源的影响，已经成为研究工作的热点<sup>[46]</sup>。本研究以长江和黄河典型流域为研究对象，通过对全球气候模式的适应性评估以及降尺度处理，全球气候模式与流域水文模型的耦合，定量探讨了气候变化对流域水循环的影响。结论如下：

1) 黄河流域表现最好的3个气候模式为MRI、HadGEM1和INM；长江流域FGOALS、ECHAM4、ECHAM5的表现最好，进一步表明我国南北区域气候变化影响差异显著。

2) 利用VIC模型，对长江下游太湖流域水文过程进行模拟，发现2046—2065年较基准期径流深减少幅度最大的地区是浙西区与杭嘉湖区；浙西区在汛期呈现略微增加的趋势。2081—2100年较基准期而言，浙西区的径流深虽有减少的趋势，不过相比2046—2065年减少幅度有所缓解。

3) SWAT模型在黄河上游流域应用得到了相对满意结果。A2和B1情景下，黄河上游流域未来径流量整体呈减少趋势，且2081—2100年的减少幅度较2046—2065年大。不同气候变化组合情景下，黄河上游流域径流量的空间变化表现出了一定的一致性，流域大部分区域径流深呈减少趋势，且在红原、久治、若尔盖地区减少幅度最大。

鉴于气候变化以及流域自身水文循环的复杂性和不确定性，未来工作应结合AR5最新研究成果，围

绕以下几方面开展气候变化影响研究：1) 开展陆地水循环多要素时空变化的检测与归因研究，揭示气候变化下水循环的响应机理；2) 研发未来水文情景变化的概率预估理论与方法，定量分析气候变化对水资源影响的不确定性以及水资源风险管理与决策问题；3) 发展新一代大尺度分布式陆地水循环模拟系统，实现陆—气双向耦合，揭示气候变化、人类活动与水文循环相互作用的机理；4) 提出气候变化影响下水资源脆弱性评估理论与方法，为应对气候变化的适应性对策制定奠定基础。

#### 参考文献：

- [1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 秦大河. 气候变化的事实与影响及对策. 中国科学基金, 2003, 17(1): 1-3.
- [3] 秦大河, 陈振林, 罗勇, 等. 气候变化科学的最新认识. 气候变化研究进展, 2007, 3(2): 63-73.
- [4] Hadson D A, Jones R G. Regional climate model simulations of present-day and future climates of southern Africa. Hadley Centre Technical Note 39. London Road, Bracknell, UK, Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met Office, 2002.
- [5] Varis O, Kajander T, Lemmelä, R. Climate and Water: From Climate Models to Water Resources Management and Vice Versa. Climatic Change, 2004, 66(3): 321-344.
- [6] Burn D H, Sharif M, Zhang K. Detection of trends in hydrological extremes for Canadian watersheds. Hydrological Processes, 2010, 24(13): 1781-1790.
- [7] Elfert S, Bormann H. Simulated impact of past and possible future land use changes on the hydrological response of the Northern German lowland "Hunte" catchment. Journal of Hydrology, 2010, 383(3-4): 245-255.
- [8] Karamouz M, Noori N, Moridi A, et al. Evaluation of floodplain variability considering impacts of climate change. Hydrological Processes, 2011, 25(1): 90-103.
- [9] Jung I W, Chang H. Assessment of future runoff trends under multiple climate change scenarios in the Willamette River Basin, Oregon, USA. Hydrological Processes, 2011, 25(2): 258-277.
- [10] Liu Q, McVicar T R. Assessing climate change induced modification of Penman potential evaporation and runoff sensitivity in a large water-limited basin. Journal of Hydrology, 2012, 464: 352-362.
- [11] Marvel K, Bonfils C. Identifying external influences on global precipitation. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS). 2013, 110(48): 19301-19306.
- [12] Piao S, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. Nature, 2010, 467: 43-51.
- [13] 第二次气候变化国家评估报告编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2011.
- [14] 叶笃正, 黄荣辉. 黄河长江流域旱涝规律和成因研究. 济南: 山东科学技术出版社, 1996.
- [15] 符淙斌, 安芷生, 郭维栋. 中国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究(I): 主要研究成果. 地球科学进展, 2005, 20(11): 1168-1175.
- [16] 丁一汇, 任国玉. 中国气候变化科学概论. 北京: 气象出版社, 2008.
- [17] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8.
- [18] 陈志恺. 持续干旱与华北水危机. 中国水利, 2002, 4: 8-11.
- [19] 刘昌明. 黄河流域水循环演变若干问题的研究. 水科学进展, 2004, 15(5): 608-614.
- [20] 钱正英, 沈国舫, 石玉林. 东北地区有关水土资源配置、生态与环境保护和可持续发展的若干战略问题研究(综合卷). 北京: 科学出版社, 2007.
- [21] 邱新法, 刘昌明, 曾燕. 黄河流域近40年蒸发皿蒸发量的气候变化特征. 自然资源学报, 2003, 18(4): 437-442.
- [22] 杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等. 近40a中国北方降水量与蒸发量变化. 干旱区资源与环境, 2003, 17(2): 6-11.
- [23] Liu B H, Xu M, Mark H, et al. A spatial analysis of pan evaporation trends in China, 1955-2000. Journal of Geophysical Research. 2004, 109: 1-9.
- [24] 任国玉, 郭军. 中国水面蒸发量的变化. 自然资源学报, 2006, 21(1): 31-44.
- [25] 王国庆, 王云璋, 康玲玲. 黄河上中游径流对气候变化的敏感性分析. 应用气象学报, 2002, 1: 117-121.
- [26] 刘春葵. 气候变化对江河流量变化趋势影响研究进展. 地球科学进展, 2007, 22(8): 777-783.
- [27] 张建云, 刘九夫. 气候异常对水资源影响评估分析模型. 水科学进展, 2000, 11: 1-9.
- [28] 夏军, Thomas Tanner, 任国玉, 等. 气候变化对中国水资源影响的适应性评估与管理框架. 气候变化研究进展, 2008, 4(4): 215-219.
- [29] 林而达, 许吟隆, 蒋金荷, 等. 气候变化国家评估报告(II): 气候变化的影响与适应. 气候变化研究进展, 2006, 2(2): 51-56.
- [30] 王守荣, 郑水红, 程磊. 气候变化对西北水循环和水资源影响的研究. 气候与环境研究, 2003, 8(1): 43-51.
- [31] 张增信, 姜彤, 张金池, 等. 长江流域水汽收支的时空变化与环流特征. 湖泊科学, 2008(6): 733-740.
- [32] 徐影, 丁一汇, 赵宗慈. 近30年人类活动对东亚地区气候变化影响的检测与评估. 应用气象学报, 2002, 13(5): 513-525.
- [33] Maxino C C, Mcavancy B J, Pitman A J, et al. Ranking the AR4 climate models over the Murray-Darling Basin using simulated maximum temperature, minimum temperature and precipitation. International Journal of Climatology, 2008, 28(8): 1097-1112.
- [34] 曹颖, 张光辉. 大气环流模式在黄河流域的适用性评价. 水文, 2009, 29(05): 1-5.
- [35] 周晓霞, 丁一汇, 王盘兴. 夏季亚洲季风区的水汽输送及其对中国降水的影响. 气象学报, 2008, 66(1): 59-70.
- [36] 初祁, 徐宗学, 蒋昕昊. 两种统计降尺度模型在太湖流域的应用对比. 资源科学, 2012, 34(12): 2323-2336.
- [37] 袁飞, 谢正辉, 任立良, 等. 气候变化对海河流域水文特性的影响. 水利学报, 2005, 36(3): 274-279.
- [38] 刘谦. VIC大尺度陆面水文模型在中国区域的应用. 长沙: 湖南大学, 2004.
- [39] Su F G, Xie Z H. A model for assessing effects of climate change on runoff in China. Progress in Natural Science, 2003, 13(9): 701-707.
- [40] Lohmann D, Raschke E, Nijssen B, et al. Regional scale hydrology: II. Application of the VIC-2L model to the Weser River, Germany. Hydrological Sciences Journal, 1998, 43(1): 143-158.
- [41] Nijssen B, Lettenmaier D P, Liang X, et al. Streamflow simulation for continental-scale river basins. Water Resources Research. 1997, 33: 711-724.
- [42] Abdulla F A, Lettenmaier D P, Wood E F, et al. Application of a macroscale hydrologic model to estimate the water balance of the Arkansas-Red River Basin. Journal of Geophysical Research. 1996, 101(D3): 7449-7459.
- [43] 刘浏, 徐宗学, 黄俊雄. 气候变化对大湖流域径流的影响. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010(3): 371-377.
- [44] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment Part I: Model development. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73-89.
- [45] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2005. Temple, Texas: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 2005.
- [46] 徐宗学, 刘浏, 刘兆飞. 气候变化影响下的流域水循环. 北京: 科学出版社, 2015.