#### DOI: 10.5846/stxb201504170788

吕哲敏, 李志, 李京京, 代润润.区域气候模式 PRECIS 对黄土高原降水模拟能力的评估.生态学报, 2016, 36(20): - . Lü Z M, Li Zhi, Li J J, Dai R R. Verifying the applicability of PRECIS-simulated precipitation on the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(20): - .

## 区域气候模式 PRECIS 对黄土高原降水模拟能力的 评估

### 吕哲敏,李 志,李京京,代润润

西北农林科技大学资源环境学院,杨凌 712100

**摘要:**黄土高原水资源短缺,严重制约其社会经济发展;全球变暖背景下,需要对该区水资源状况进行详细的影响评估。区域气候模式可提供气候变化情景下的数据,但模式的模拟精度直接影响评估结果。为此利用 ERA40 再分析数据作为边界条件驱动 PRECIS,从降水频率、降水量和极端事件三个方面,评估了 PRECIS 对黄土高原 1960—2000 年降水的模拟能力。结果表明, PRECIS 能够模拟出各要素东南-西北方向变化的空间分布特征,还可模拟出整体的时间变化趋势,其中对非汛期的模拟较好, 而汛期降水日数和降水量等被严重高估;并且涉及干旱的指标普遍偏低;还发现对于极端降水事件模式对强度指标的模拟能力 优于频率指标。因此,还需要进一步探讨订正方法,才能更好的应用于气候变化水文效应评估。 关键词:区域气候模式:PRECIS;黄土高原;降水

# Verifying the applicability of PRECIS-simulated precipitation on the Loess Plateau

LÜ Zhemin, LI Zhi, LI Jingjing, DAI Runrun

College of Natural Resources and Environment, Yangling 712100, China

Abstract: The Loess plateau is primarily a rain-fed agricultural area in China, and water is one of the main factors affecting agricultural production in the region. As a result of global warming, precipitation is a critical variable affecting the water cycle and plant growth. The simulation accuracy of precipitation directly influences climate change projections and impact assessments. The regional climate model, PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies), has been widely used for climate change projection; however, its capability for impact studies has been rarely assessed. Using ERA40 reanalysis data as the boundary conditions, precipitation on the Loess Plateau during 1960—2000 was simulated and its applicability was evaluated through comparison with the observed precipitation frequency, amount, and extreme events. PRECIS simulated the spatial distribution of precipitation changes along the southeast-northwest direction; however, the wet days and precipitation amounts were overestimated by 1.8 times the recorded amounts, and the indices related to the drought index were greatly underestimated. PRECIS simulated the low values more accurately than the high values of each index. The model simulated the temporal changes more accurately in the dry season due to an overestimation of wet days and precipitation in the flood season. For extreme indices, PRECIS simulated intensity-related indices more accurately than those related to frequency. Overall, PRECIS cannot be directly used to assess the impacts of climate change on hydrology, and the model calibration method should be discussed further.

收稿日期:2015-04-17; 网络出版日期:2015-00-00

基金项目:霍英东基金(141016);国家自然科学基金(41101022);中央高校基本科研业务费(2014YQ003, 2452015105)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: lizhibox@126.com

#### Key Words: regional climate model; PRECIS; Loess Plateau; precipitation

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告指出,全球平均地表温度 1880—2012 年升高了 0.85 ℃;同时,极端天气事件显著变化,陆地上强降水事件增多的区域远大于减少的区域<sup>[1]</sup>。中国《第二次气候变 化国家评估报告》也指出中国陆地表面温度、降水等气候事件发生相应变化<sup>[2]</sup>。这些气候变化已经并将继续 对自然生态系统和人类社会产生重要的影响,为此,需要进行气候预测和影响评估。

目前气候预测主要依赖全球气候模式(GCM),但由于计算能力的限制,GCM的水平分辨率是几百公里, 虽能模拟大尺度的气候特性,但在模拟区域气候时误差很大。为此,区域气候模式(RCM)被用来进行 GCM 降尺度,即在 GCM 大网格中嵌套子模式来产生高分辨率气候情景<sup>[34]</sup>。RCM 可细致描述地形、海陆分布和植 被等下垫面特征,能更好模拟气候的区域性特征;特别是提升水平分辨率时,可模拟地形强迫等因素引起的中 小尺度天气系统,因此,已成为研究区域气候变化的重要工具<sup>[5-6]</sup>。

目前,在中国运用较为广泛的 RCM 有英国气象局 Hadley 中心开发的 PRECIS(Providing Regional Climates for Impacts Studies)以及由意大利国际理论物理中心发展的 RegCM4 (Regional Climate Model Version 4)模式, 这两种模式均能够较好地模拟出中国降水的年、季地理分布和季节变化特征<sup>[4,7]</sup>。本文所运用的 PRECIS 模 型目前已在印度<sup>[8]</sup>、巴基斯坦<sup>[9]</sup>、南美洲<sup>[10]</sup>、地中海<sup>[11]</sup>等地区进行气候预测,而且在作物产量<sup>[12]</sup>、水资 源<sup>[13-14]</sup>、能源<sup>[13,15]</sup>等领域利用模型输入与相关生态模型相耦合进行影响评估。由于模型的模拟能力决定了 气候预测和影响评估的准确性,因此检验模型的适用性是模型应用的前提。需要进一步通过设计更全面的指 标评估 PRECIS 的降水模拟能力,为其区域气候模拟能力进一步验证,也可为模式是否适用于气候变化影响 评估提供依据。

黄土高原地处半湿润向半干旱和干旱的过渡带,多年平均降水 421.7 mm,降水集中且暴雨多是导致土壤 侵蚀严重的主要原因之一,如土壤侵蚀主要由少数大暴雨引起,90%以上的降雨不产生地表径流,一次大暴雨 产生的侵蚀量占年总量的 60%甚至 90%<sup>[16-17]</sup>。此外,黄土高原的降水还具有年内分配不均匀、多集中在夏季 风盛行期间、年际变化大等鲜明的特征。因此,要在该区域应用 PRECIS 的模拟数据进行水文模拟,需对其降 水模拟能力进行详尽评估。为此,基于 PRECIS 与黄土高原 50 个气象站点的观测降水,对 PRCIES 模拟降水 量、频率和极端事件的能力进行了评估,以期为 PRECIS 在该区的水文应用提供参考。

#### 1 数据与方法

#### 1.1 模式介绍

PRECIS 是由英国气象局 Hadley 气候预测与研究中心基于 GCM-HadCM3 发展的区域气候模拟系统,水 平分辨率为 50 km 或 25 km<sup>[18]</sup>。采用了规则的经纬网格和混合垂直坐标系。模式方程采用旋转球坐标,网格 点经过旋转后赤道位于研究区域内,从而获得近似均匀的水平网格,旋转坐标下水平分辨率为 0.44°×0.44°, 在赤道地区分辨率约为 50 km。由于分辨率较高,因此模式的时间步长设为 5 分钟,以保证模式的稳定性。 对流采用 Gregory 和 Rowntree<sup>[19]</sup>提出的穿透性对流参数化方案。在大气中取垂直气柱,假设在此气柱中有小 的空气块,从下层向上迸层检查看它是否有上升的可能,即是否受到浮力的作用。侧边界采用松弛边界条件, 缓冲区大小采用 4 个格点。陆面过程使用了 MOSES(Met Office Surface Exchange Scheme)参数化方案<sup>[20]</sup>,土 壤模式使用 4 层方案来计算地表面的热量和水分交换、土壤中热量和水分的传输过程,还考虑了土壤水分相 变以及水和冰对土壤热力和动力特征的影响。

#### 1.2 数据来源

PRECIS 在黄土高原适用性评估中,主要需要模式模拟和站点观测两部分数据。模拟数据是由本实验室 将欧洲数值预报中心(ECMWF)的 ERA40 再分析数据作为边界条件驱动 PRECIS 模型产生,模拟区域包括黄 土高原及周边地区,网格分辨率为 50 km×50 km,资料时段为 1960.1.1—2000.12.31,并且使用日平均模拟数

据资料。实测数据来自中国国家气象局在黄土高原地 42°18N 区 50 个气象站点的日降水数据,选取的时段与模拟数 41°24 据保持一致。由于 PRECIS 的气候数据是按照格点输 <sup>40°30</sup> 出,所以在进行对比研究时,模拟数据的提取是按照观 <sup>39°36</sup> <sup>38°42</sup> 测数据来源的 50 个气象监测点所在位置的经纬度,提 <sup>37°48</sup>

1.3 评估方法

针对降水量、降水频率和极端事件三个方面对 PRECIS 的模拟能力进行评估。降水量从日、月和年尺 度上进行对比;降水频率主要评估降水日数和干湿持续 时间(dry/wet spells);极端事件使用的指标参照 Frich<sup>[21]</sup>等对极端降水指标的定义(表1),这5个指标 是 IPCC 分析极端降水事件使用的指标,包含了频率和 强度两方面的内容。对于降水发生的判定,以0.1 mm 为阈值。

取最为相近的模式网格点数据(图1)。







表1 极端降水指标的定义

	Table 1 Definition of extreme precipitation indices	
名称 Name	定义 Define	单位 Unit
CDD 最长无雨期	最长连续干旱天数(日降水量 < 1 mm)	天
CWD 最长有雨期	最长连续降水天数(日降水量≥1mm)	天
R10大雨日数	日降水量超过 10 mm 的天数	天
R5d 最大连续 5 天降水量	连续5天降水量之和的最大值	毫米
R95t极端降水贡献率	极端降水量(日降水量超过 1961—1990 年 95%百分位 数)/年降水量	%

对于上述 3 种要素,主要从空间分布和时间变化方面进行评估。空间分布,利用 GIS 中的 Kriging(克里 金插值方法)分析 PRECIS 模拟能力的区域差异;Kriging 是一种求最优、线形、无偏的空间内插方法,在充分考虑观测资料之间的相互关系后,对每一个观测资料赋予一定的权重系数,加权平均得到估计值<sup>[22]</sup>。时间变化,一方面直接对比变化趋势,另一方面使用秩和检验、平方秩检验和 KS (Kolmogorov-Smirnov)检验等非参数检验,分别用来检验 2 组数据是否具有相同的均值、总体方差是否有差异以及数据是否服从相同数据分布。

#### 2 结果与分析

#### 2.1 降水量

#### 2.1.1 降水量的空间分布

PRECIS 基本模拟出了黄土高原降水东南多西北少的特征(图 2a&b),但在绝对数量和空间分布上与观测值存在一定差异。1960—2000 年模拟年均降水量为 792.6 mm,为观测值的 1.8 倍(表 2),这种高估是普遍存在的,由秩和检验的结果表明仅有 3 个站点/网格具有相似的均值,而偏差存在区域差异(图 2c)。西北部是降水量低值区,其部分区域误差小于 300 mm;降水量高值区的误差偏大,特别是东部和西部的部分区域误差大于 450 mm。并且模拟降水量的变异系数(0.47)大于观测值(0.42),这也表明模拟值导致区域差异变大。2.1.2 降水量的时间变化

从对各雨量的日降水事件的发生频率进行统计,可知 PRECIS 高估了小雨(日降水量<10mm)日数而低估 了日降水量>20mm的大雨日数,且没有站点/网格通过各检验,说明其不能模拟出实际日降水量,并导致年降



图 2 年降水量的空间分布(mm/a) Fig.2 Spatial distribution of annual mean precipitation

水量也被普遍高估(图 3b),而通过降水量的年内分布来看,对降水量的高估主要来自 5—9月(图 3a)。

整体而言,模式可以模拟出月和年降水量的时间变化。以 1981—1990 年的月均降水为例(图 3a),模式可以模拟月降水的时间变化,特别是非汛期的模拟值与观测值非常相似;但汛期的降水量被严重高估。如 7 月误差最大达到 57 mm,是观测值的 61.3%;12 月误差最小仅为 2.7 mm。PRECIS 可以较好模拟黄土高原整个区域的年降水变化趋势,如模拟和观测年降水量的倾向率分别为-0.63 mm a<sup>-1</sup>和-1.80 mm a<sup>-1</sup>。尽管平方 秩检验表明 22 个站点/网格具有相似的方差,但仅 3 个站点/网格通过了 KS 检验,说明模式没有模拟出多数 站点年降水的分布。

表 2 年降水量的统计参数与统计检验结果							
	Table 2	Statistics and	results of statist	tical tests for ann	ual precipitation	n	
参 Parar	数 neter	均值/mm Mean	方差/mm Variance	变异系数 Variation coefficient	秩和检验 Rank sum test	平方秩检验 Square rank test	KS 检验 Kolmogorov- Smirnov test
年降水量	观测 Observation	433.9	181.9	0.42	3/50*	22/50	3/50
Annual precipitation	模拟 Simulation	792.6	375.4	0.47	2. 50		

\* 通过检验的站点/总站点





#### 2.2 降水频率

2.2.1 降水日数的空间分布

Table 3

PRECIS 模拟的降水日数与观测值有较大差距(表 3)。观测和模拟的年均降水日数分别为 80 d a<sup>-1</sup>和 148 d a<sup>-1</sup>,模拟值是观测值的 1.9 倍;50 个站点/网格中有 1 个站点/网格通过了秩和检验,表明 PRECIS 不能 很好模拟降水日数的均值。观测和模拟的变异系数分别为 0.37 和 0.31(表 3),说明站点/网格间的变异程 度,模拟值较观测值有所下降,即空间分布上模拟值的变异性更弱。

100	le o building of	momenty and am	iuui wee uuys un	a arg/ wee spens			
参数 Parameter	年降水日数/d Annual precipitation d		年均连续干旱日数/d Annual average days of continuous drought		年均连续降水日数/d Annual average days of continuous precipitation		
	观测 Obs	模拟 Sim	观测 Obs	模拟 Sim	观测 Obs	模拟 Sim	
均值 Mean/mm	80	148	7	4	2	3	
标准偏差 Standard deviatio/mmn	29.7	45.3	2.1	1.4	0.3	0.8	
变异系数 Variation coefficient	0.37	0.31	0.30	0.35	0.15	0.27	
秩和检验 Rank sum test	1/	1/50		1/50		0/50	
平方秩检验 Square rank test	28/	28/50		24/50		16/50	
KS 检验 Kolmogorov-Smirnov test	1/50		1/	50	0/50		

12.5	降小日数、连续   手相降小人数的统计多数
表3	降水日数 连续干里和降水天数的统计参数

模式基本模拟出了降水日数东南多西北少的特点(图 4a&b),但如表 2 所示在绝对数量上远高于观测值。 降水日数最少的分布区域,模拟值和观测值比较吻合,均在内蒙西部;降水日数较多的区域,观测值是黄土高 原东南部,而模拟值的空间范围明显变小,是沿东北-西南方向的一个条带。从绝对值来看(图 4c),误差最小 的区域在陕西南部,差值小于 40 d a<sup>-1</sup>;大部分区域的误差介于 40—60 d a<sup>-1</sup>;误差最大的是黄土高原西部的小 部分区域,集中在青海东部、甘肃和宁夏南部,大于 80 d a<sup>-1</sup>。

#### 2.2.2 降水日数的时间变化

PRECIS 模拟出了降水日数的年内分布,夏季降水频繁而其他季节相对较少(图 5a)。但模式普遍高估了 各个月份的降水日数,特别是 5—9月的误差最大,平均差值 9 d,而 10—4月的平均误差约为 2 d。PRECIS 模 拟的年均降水日数进行平方秩检验,结果表明 28 个站点/网格的观测和模拟数据具有相似的变异程度(表



图 4 观测与模拟的年均降水日数的空间分布(d/a) Fig.4 Spatial distribution of the observed and simulated annual mean wet days

3),并结合图 5b,可知观测和模拟的年均降水日数有相似的波动性。但 PRECIS 没有模拟出其时间变化趋势, 观测和模拟的年均降水日数分别以-0.45 d a<sup>-1</sup>和+0.34 d a<sup>-1</sup>的速度递减和递增;而 KS 检验也表明仅有 1 个站 点/网格的数据具有相似的分布(表 3)。

#### 2.2.3 干湿持续时间

由于 PRECIS 模拟了偏多的降水日数,因此,对连续降水日数的模拟也偏高,但对连续干旱日数的模拟偏低(图 6b&d)。观测和模拟的年均连续降水日数分别为2d和3d,相应的年均连续干旱日数分别为7d和4d,而秩和检验的结果也表明几乎没有站点/网格具有相似的均值(表3)。模式模拟的降水干湿持续时间在站点间的差异明显变大,图4a&c中按站点统计的模拟值较观测值起伏更大,且变异系数也明显增大(表3),表明 PRECIS 导致空间变异性增大,不能很好地模拟黄土高原干湿持续时间的空间分布。

连续降水日数的观测值与模拟值具有相似的年际变化,但较观测值更加平缓,线性倾向率分别为-0.007 和-0.002 d a<sup>-1</sup>;观测与模拟的连续干旱日数具有不同的变化趋势,分别以+0.02 和-0.02 d a<sup>-1</sup>的速度递减和 递增。连续降水和干旱日数分别有 16 和 24 个站点/网格数据通过了平方秩检验,表明 PRECIS 模拟出了部 分站点/网格数据的波动程度;但 KS 检验的结果表明近乎没有站点/网格数据具有相似的数据分布(表 3)。



图 5 观测与模拟降水日数的时间变化和季节分布((a)月降水日数、(b)年降水日数)

Fig.5 Temporal changes and seasonal patterns of the observed and simulated wet days((a) monthly wet days, (b) annual wet days)

#### 2.3 极端事件

5个极端降水指标,除了 CDD (最长无雨期)被低估 26%以外,CWD (最长有雨期)、R10 (大雨日数)、 R5d (最大连续 5 天降水量)和 R95t (极端降水贡献率)分别被高估 100%、62%、44%和 8% (表 4),且这些偏 差在变量和站点间存在较大差异(图 7)。秩和检验表明 R95t 一致性较高,其次为 R5d,分别有 30 个和 13 个 站点/网格否定了有显著差异的假设;而其他 3 个指标通过秩和检验的站点/网格数少于 10 个,这表明 PRECIS 对极端降水强度方面的模拟效果好于频率。5 个指标中除了 R95t 以外模拟与观测的变异系数均有 明显差别,说明模拟值明显改变了极端降水指标的空间变异性,这将会影响其模拟空间分布的能力。

对于时间变化,极值指标被高估或低估的趋势基本在各个年份中都有所出现,但 PRECIS 能模拟区域整体年际变化的总体趋势,并且通过秩和检验的站点越多的变量对时间变化的模拟越好,如 R95t 在很多年份与观测值基本一致。但对于各个站点/网格来说,各极值指标的一致性存在很大差异,如 R95t、R5d 和 CDD 分别有 30、13 和 12 个站点/网格通过了 KS 检验,而其他指标仅有几个站点/网格通过 KS 检验,说明对于表示降水强度的极端指标在模拟观测数据的分布时好于表示频率的指标。

	Table 4	Statistics	and results	of statistical	tests for the	e extreme p	recipitation	indices		
- <del>公</del> 粉	CDD ∕d		CWD ∕d		R10 /d		R5d /mm		R95t /%	
≫ xx Parameter	观测 Obs	模拟 Sim	观测 Obs	模拟 Sim	观测 Obs	模拟 Sim	观测 Obs	模拟 Sim	观测 Obs	模拟 Sim
均值 Mean/mm	42	31	7	14	13	21	73.3	105.8	0.26	0.28
标准偏差/mm Standard deviation	17.2	16.1	2.6	6.8	6.3	11.7	36.9	66.9	0.07	0.06
变异系数 Variation coefficient	0.41	0.52	0.37	0.49	0.48	0.56	0.50	0.63	0.27	0.21
秩和检验 Rank sum test	9/50	1/50	7/50	13/50	30/50					
平方秩检验 Square rank test	31/50	6/50	24/50	29/50	35/50					
KS 检验 Kolmogorov-Smirnov test	12/50	2/50	7/50	13/50	26/50					

表 4	各极端降水指标的基本统计与检验
-----	-----------------

5 а

4

° 。

观测

模拟

o

b







#### 3 结论

通过评估 PRECIS 对黄土高原降水频率、降水量和极端事件等方面的模拟情况,发现模式可以模拟出降 水各指标沿东南-西北方向变化的空间分布特征,但模拟值与观测值有较大差距,如降水量和降水日数均约 为观测值的1.8倍;对各指标低值区的模拟效果好于高值区;以及由于模拟降水日数过多,导致持续降水时间 偏高而持续干旱时间偏低。并且,模式也可模拟出各要素的整体时间变化趋势,但存在季节差异,以及对于非 汛期的模拟效果通常优于汛期。普遍高估小雨日数、低估大雨日数,并且对部分指标时间变化模拟效果不好, 如观测和模拟的年降水日数分别以-0.45 d a<sup>-1</sup>和+0.34 d a<sup>-1</sup>的速度变化,模拟与观测的连续干旱日数分别以+ 0.02 d a<sup>-1</sup>和-0.02 d a<sup>-1</sup>的速度变化。极端降水指标中对极端降水贡献率(R95t)的模拟效果最好,其他指标的 情况与降水日数和降水量类似;但整体而言,对降水强度的指标的模拟能力优于频率指标。上述结果与其他 区域的评估结果比较相似<sup>[23-25]</sup>,说明 PRECIS 的误差是普遍存在的,表明模式不能直接用于水文效应评估。

本研究的评估结果也存在一定程度的不确定性。如果对黄土高原观测资料格网化插值后与模式结果比 较<sup>[26]</sup>,可能会对评估结果产生一定影响,但由于误差的普遍存在,可能对结果不会有很大的影响。模式本身 存在一定的不足之处。如黄土高原横跨不同气候带和地貌单元,而 RCM 物理过程尚不完善,不能够很好地刻 画地形复杂和气候差异大的小尺度气候[27];并且由于次网格积云参数化、云-辐射参数化和陆面过程参数化 的不确定性可能造成模式存在系统偏差<sup>[28]</sup>;气候模式分辨率的选择都会影响模式的模拟结果<sup>[29]</sup>。

9



图 7 各极端降水指标的各站点差异及年际变化

Fig.7 Spatiotemporal variations of the observed and simulated extreme precipitation indices

#### 参考文献(References):

- IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5). New York: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 《气候变化国家评估报告》编写委员会编著. 第二次气候变化国家评估报告. 北京:科学出版社, 2011.
- [3] Xu Y, Xu C H. Preliminary assessment of simulations of climate changes over China by CMIP5 multi-models. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2012, 5(6): 489-494.
- [4] Gao X J, Wang M L, Giorgi F. Climate change over China in the 21st century as simulated by BCC\_CSM1.1-RegCM4.0. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2013, 6(5): 381-386.
- [5] 徐宾,许吟隆,张勇,赵秀娟. PRECIS 模拟区域的选择对宁夏区域气候模拟效果的敏感性分析. 中国农业气象, 2007, 28(2): 118-123.
- [6] Yu E T, Wang H J, Sun J Q. A quick report on a dynamical downscaling simulation over China using the nested model. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2010, 3(6): 325-329.
- [7] 王芳栋,李涛,许吟隆,陈书驰. PRECIS 和 RegCM3 对中国区域气候的长期模拟比较. 中国农业气象, 2012, 33(2): 159-165.
- [8] Kumar K K, Patwardhan S K, Kulkarni A, Kamala K, Rao K K, Jones R. Simulated projections for summer monsoon climate over India by a high-resolution regional climate model (PRECIS). Current Science, 2011, 101(3): 312-316.
- [9] Ul Islam S, Rehman N, Sheikh M M. Future change in the frequency of warm and cold spells over Pakistan simulated by the PRECIS regional climate model. Climatic Change, 2009, 94(1/2): 35-45.

- [10] Marengo J, Jones R, Alves L M, Valverde M C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. International Journal of Climatology, 2009, 29(15): 2241-2255.
- [11] Kotroni V, Lykoudis S, Lagouvardos K, Lalas D. A fine resolution regional climate change experiment for the Eastern Mediterranean: Analysis of the present climate simulations. Global and Planetary Change, 2008, 64(1/2): 93-104.
- [12] 马欣,吴绍洪,戴尔阜,张雪艳,康相武,潘韬. 气候变化对我国水稻主产区水资源的影响. 自然资源学报, 2011, 26(6): 1052-1064.
- [13] Piao S L, Ciais P, Huang Y, Shen Z H, Peng S S, Li J S, Zhou L P, Liu H Y, Ma Y C, Ding Y H, Friedlingstein P, Liu C Z, Tan K, Yu Y Q, Zhang T Y, Fang J Y. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. Nature, 2010, 467(7311): 43-51.
- [14] Rao K K, Patwardhan S K, Kulkarni A, Kamala K, Sabade S S, Kumar K K. Projected changes in mean and extreme precipitation indices over India using PRECIS. Global and Planetary Change, 2014, 113: 77-90.
- [15] Bloom A, Kotroni V, Lagouvardos K. Climate change impact of wind energy availability in the Eastern Mediterranean using the regional climate model PRECIS. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2008, 8(6): 1249-1257.
- [16] 李志,赵西宁. 1961-2009 年黄土高原气象要素的时空变化分析. 自然资源学报, 2013, 28(2): 287-299.
- [17] 李志,郑粉莉,刘文兆. 1961—2007 年黄土高原极端降水事件的时空变化分析. 自然资源学报, 2010, 25(2): 291-299.
- [18] Jones R. Generating High Resolution Climate Change Scenarios using PRECIS. Exeter: Met Office Hadley Centre, 2004.
- [19] Gregory D, Rowntree P R. A mass flux convection scheme with representation of cloud ensemble characteristics and stability-dependent closure. Monthly Weather Review, 1990, 118(7): 1483-1506.
- [20] Cox P M, Betts R A, Bunton C B, Essery R L H, Rowntree P R, Smith J. The impact of new land surface physics on the GCM simulation of climate and climate sensitivity. Climate Dynamics, 1999, 15(3): 183-203.
- [21] Frich P, Alexander L V, Della-Marta P, Gleason B, Haylock M, Klein Tank A M G, Peterson T. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. Inter-Research Climate Research, 2002, 19(3): 193-212.
- [22] 尚宗波,高琼,杨奠安.利用中国气候信息系统研究年降水量空间分布规律.生态学报,2001,21(5):689-694.
- [23] 石英,高学杰,Giorgi F,宋瑞艳,吴佳,董文杰.全球变暖背景下中国区域不同强度降水事件变化的高分辨率数值模拟. 气候变化研究 进展,2010,6(3):164-169.
- [24] 王芳栋, 许吟隆, 李涛. 区域气候模式 PRECIS 对中国气候的长期数值模拟试验. 中国农业气象, 2010, 31(3): 327-332.
- [25] 张延伟,姜逢清,魏文寿,王雯雯,刘明哲,韩茜,洪雯,陆恒. 1961 2004 年新疆降水极值概率分布特征. 中国沙漠, 2012, 32(2): 503-508.
- [26] 吴佳,高学杰.一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比.地球物理学报,2013,56(4):1102-1111.
- [27] Pan Z, Christensen J H, Arritt R W, Gutowski W J Jr, Takle E S, Otieno F. Evaluation of uncertainties in regional climate change simulations. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D16): 17735-17751.
- [28] Kato H, Nishizawa K, Hirakuchi H, Kadokura S, Oshima N, Giorgi F. Performance of RegCM2.5/NCAR-CSM nested system for the simulation of climate change in East Asia caused by global warming. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2001, 79(1): 99-121.
- [29] 刘向培,王汉杰,刘金波.区域气候模式分辨率对夏季降水模拟的影响.水科学进展, 2011, 22(5): 615-623.