

引用格式:刘兆飞,王蕊,姚治君. 蒙古高原气温与降水变化特征及CMIP5气候模式评估[J]. 资源科学, 2016, 38(5): 956-969.  
[Liu Z F, Wang R, Yao Z J. Air temperature and precipitation over the Mongolian Plateau and assessment of CMIP 5 climate models  
[J]. *Resources Science*, 2016, 38(5): 956-969]. DOI: 10.18402/resci.2016.05.15

# 蒙古高原气温与降水变化特征及CMIP5气候模式评估

刘兆飞,王蕊,姚治君

(中国科学院地理科学与资源研究所资源利用与环境修复重点实验室 北京 100101)

**摘要:**蒙古高原受自然与人为因素影响,生态环境面临严峻压力,研究气候变化特征及气候模式评估对该地区气候及生态环境等相关研究具有重要的参考意义。本研究以整个蒙古高原为研究区,研究蒙古高原气温与降水要素的变化趋势,对比研究中国内蒙古自治区与蒙古国地区气候变化特征,并评价了全球耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)模式输出的气温与降水序列在研究区的表现,利用一种改进的秩评分方法对CMIP5模式的模拟能力进行了综合评价。结果表明,蒙古高原过去几十年整体呈增温减湿的趋势,最低气温升温幅度明显大于最高气温升温幅度,中国内蒙古地区变暖趋势强于蒙古国地区;CMIP5模式模拟的平均气温普遍偏低,且低估了该区域的增温趋势,而模拟的降水量普遍偏高。不同要素间,CMIP5模式对平均气温的模拟能力最强,最高与最低气温次之,降水相对较差。模式评价结果对评价指标有较大的依赖性,因此,评估气候模式的区域效果时,建议使用多指标进行综合评价。

**关键词:**气候模式;GCM;综合评价;变化趋势;概率密度分布;蒙古高原

DOI: 10.18402/resci.2016.05.15

## 1 引言

蒙古高原位于干旱半干旱内陆区,由于气候干燥,雨量少且降雨集中,受大风、暴风和沙尘暴等灾害性气候影响,区域自然环境条件差,植被稀疏,陆地生态系统十分脆弱和敏感。近几十年来,在全球变化环境影响下,蒙古高原气候不可避免受到扰动,加之当地盲目开垦、过度放牧、保护不力等人为因素的影响,区域土壤退化和沙漠化严重,生态环境面临严峻压力。

近些年来,国内外许多学者对蒙古高原气候变化特征进行了诸多研究。例如, Lu等利用线性趋势方法分析了内蒙古自治区气温与降水的变化趋势,结果表明内蒙古地区整体呈增温减湿的趋势<sup>[1]</sup>。闫慧敏等分析了内蒙古自治区极端气候事件时空格局特征,结果表明该地区极端温度事件的发生频率与持续时间迅速变化发生于20世纪90年代<sup>[2]</sup>。

Nandintsetseg等与Sternberg等分别研究了蒙古国北部和中部气温与降水的变化趋势,结果表明研究区表现出增温增湿的趋势<sup>[3,4]</sup>。王菱等分析了蒙古高原中部气候变化及影响因素,结果表明,对于气温发生突变的时间来说,高纬度地区早于低纬度地区,大城市早于中小城市<sup>[5]</sup>。也有学者研究了蒙古气候变化对农作物<sup>[6]</sup>、草原生态系统<sup>[7]</sup>、植物物候<sup>[8]</sup>及植被覆盖<sup>[9]</sup>等方面的影响。但是,这些研究仅从内蒙古自治区、蒙古国地区或蒙古高原局部地区单独分析气候变化及其影响,以蒙古高原为整体开展的研究相对较少。

目前,气候变化已经超越了国界,成为全人类共同关注的焦点问题。气候变化影响问题十分复杂,当前,基于三维数值模拟的大气环流模式(General Circulation Models,简称GCMs),也称为气候模式,已经成为研究气候变化及构建未来气候变

收稿日期:2015-12-10;修订日期:2016-04-21

基金项目:科技部国家国际科技合作专项项目(2013DFA91700);科技部基础工作专项项目(2012FY111400)。

作者简介:刘兆飞,男,河南郑州人,博士,副研究员,主要从事气候变化及其对水文水资源的影响研究工作。E-mail: zfliu@igsrr.ac.cn

通讯作者:姚治君, E-mail: yaozj@igsrr.ac.cn

2016年5月

化情景最主要的工具<sup>[10]</sup>。但是,在应用气候模式研究气候变化问题的过程中存在诸多的不确定性,尤其是在区域尺度应用过程中<sup>[11-13]</sup>。应用气候模式研究的不确定性包括<sup>[14]</sup>:①不同模式输出的不确定性;②不同排放情景的不确定性;③特定排放情景和特定模式组合时的不确定性;④降尺度过程中的不确定性等。其中,不同模式输出的不确定性在区域气候变化研究中占主导地位<sup>[14-16]</sup>。因此,在区域范围内应用气候模式前,需要对其模拟区域气候变量的能力进行评估<sup>[17]</sup>。

评估不同气候模式输出的不确定性主要通过比较各个模式在区域尺度范围内的模拟效果来实现<sup>[15-19]</sup>。国际上已有专门的研究计划比较了不同气候模式在全球范围内模拟的效果,Harvey等对这些计划进行了总结,结果表明如果模式对当前气候要素的时空变化特征模拟的越好,说明其对大气环流的物理过程解释的越全面,其模型输出也更为可信<sup>[20]</sup>。也有许多专家对不同模式在区域尺度范围内的表现进行了比较和评价<sup>[16-19,21-25]</sup>,结果表明不同模式在不同地区的表现差异明显。

目前,全球范围内有28个研究组的61个气候模式参与了第五阶段的全球耦合模式比较计划(CMIP5),这一阶段的模式较之前更为复杂,增加了碳循环模型、交互预报式的气溶胶模块及动态植被模块等,且具有更高的分辨率<sup>[26]</sup>。国内许多学者基于观测资料评估了CMIP5气候模式对中国地区平均气温<sup>[27]</sup>和降水<sup>[28]</sup>的模拟能力,在长江流域<sup>[29]</sup>和青藏高原地区<sup>[30]</sup>评估了CMIP5模式对降水与气温的模拟能力,此外,也有学者利用观测与再分析资料对CMIP5模式模拟全球能量平衡<sup>[31]</sup>及中亚平均气温<sup>[32]</sup>的能力进行了评估,结果表明CMIP各个模式模拟区域气候变量有明显的差异。总的来看,评价标准的选择对模式评估至关重要,其直接影响评估结果。评估气候模式对区域气候变量的模拟能力,首先应该评价其模拟气候均态的能力,如均值和标准差等;其次,Taylor等认为模式需要能够模拟实际气候的时间和空间变化特征<sup>[26]</sup>。此外,也需要考虑气候变化趋势与极端气候等特征。

本研究以整个蒙古高原为研究区,分析整个蒙古高原的气温与降水变化趋势,并对研究区中国境

内部分与蒙古国地区气候变化开展对比研究。此外,从模型效率系数、气候均态、时间与空间序列相关性、概率密度分布特征及变化趋势等方面,分别评价各个CMIP5气候模式模拟蒙古高原地区平均、最高与最低气温及降水量等要素的能力,并利用一种改进的秩打分评价方法对各个气候模式在蒙古高原气温和降水的应用进行了综合评估。改进的秩评分方法简单有效,可以对多评价指标及多要素综合评估气候模式在区域尺度的适用性,在进行区域气候变化影响评估时,此方法可以较容易地推广应用到不同地区。该研究对应用气候模式开展的蒙古高原区域气候变化相关研究,及气候模式在区域尺度的评估研究具有一定的参考价值。

## 2 研究区气候特征、数据来源与研究方法

### 2.1 研究区气候特征

蒙古高原位置如图1所示,其包括蒙古国全境、中国的内蒙古全区以及甘肃、宁夏和陕西部分地区。蒙古高原位于干旱半干旱地区,为大陆性气候,多年平均气温为3.3℃,高原冬冷夏热,年内月平均气温最低和最高为1月和7月,分别为-15.2℃和21.6℃,其中11月至次年3月的月平均气温在0℃以下。冬季三月份(12月,1月与2月)的月最高气温甚至低于0℃。蒙古高原降水量远小于潜在蒸散发量,降水主要发生于5月至10月,其降水量占到了年降水量的90%以上。降水量从东部向西部呈

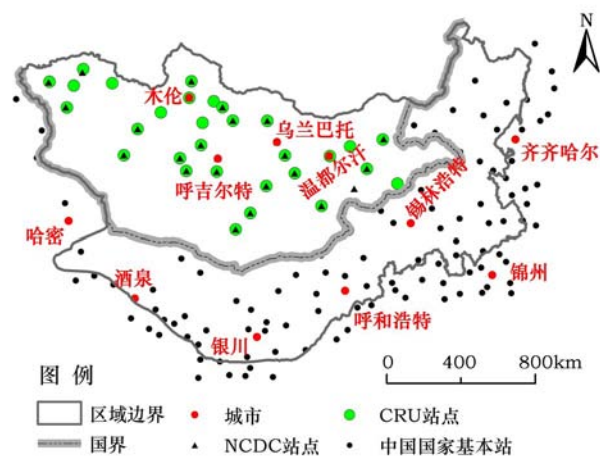


图1 蒙古高原气象站点及气候模式网格分布

Figure 1 Location of the study region, meteorological stations, and the GCM grids

递减趋势,高原中西部为干旱地区,年降水量小于200mm,高原内只有小部分地区降水量超过400mm。

## 2.2 数据来源

(1)实测数据。研究中主要用到气象站点实测的平均、最高与最低气温及降水量1969–2004年的月序列数据,其中,蒙古高原中国境内部分的气象实测数据由中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)获取,共包括121个国家基本气象站点,1961–2013年的连续数据序列,所有数据都通过了质量控制,数据来自中国气象科学数据共享服务网。蒙古国境内部分,27个气温实测站点数据由美国国家海洋大气局(NOAA)的国家气候数据中心(NCDC)获取,其数据序列年限为1969–2013年;此外,31个降水实测站点数据由英国CRU获取,其数据序列年限为1964–2013年。需要说明的是,NCDC降水数据质量较差,因此,本研究选用质量较好的CRU降水数据。站点数据通过反距离权重的插值方法插值到 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的格网上面。各个实测站点的空间分布见图1。

(2)气候模式输出数据。研究中用到的气候模式包括CMIP5的34个气候模式输出的平均气温和降水量数据,33个模式输出的最高与最低气温数据,选用1969–2004年的月序列,气候模式列表见表1,数据获取来自CMIP5。气候模式输出数据统一插值到 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的网格分辨率上。

## 2.3 研究方法

本研究利用非参数Mann-Kendall检验方法中的两个统计量 $Z_c$ 和 $Slope$ ,检测蒙古高原各个气候变量长期变化趋势及其变化幅度,详见文献[33]。从气候均态、时间与空间特征、概率密度分布特征及变化趋势等多方面,分别评价各个CMIP5气候模式模拟蒙古高原气温与降水的能力。首先,利用均值和标准差两个统计量对比各模式模拟要素均态的能力。然后,使用相关系数从时间及空间变化特征上,评价模式模拟要素与实测值之间的相关程度,空间特征的评价通过计算空间上各个网格的模式输出与观测值组成序列之间的空间相关系数实现,其中,空间相关系数的样本长度即是网格数,本文为56。用纳西效率系数(NSE)比较模式输出与

实测的时间序列之间的吻合程度,其计算如下:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{mi} - X_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{oi} - \bar{X}_o)^2} \quad (1)$$

式中 $X_{oi}$ 和 $X_{mi}$ 分别为实测与模拟的时间序列值; $\bar{X}_o$ 为实测序列均值。

用基于概率密度函数的统计量 $S_{score}$ (Skill score)评价模式对各个要素概率密度分布特征的模拟效果,其计算如下:

$$S_{score} = \sum_{i=1}^n \text{Minimum}(P_{mi}, P_{oi}) \quad (2)$$

式中 $P_{mi}$ 和 $P_{oi}$ 分别为第 $i$ 个数据段(bin)内模拟及实测值出现的概率; $n$ 为概率序列长度(bin的个数)。这里 $n$ 统一取为100,即根据要素序列原始值的大小,分为100等份,然后分别计算每一等份里原始值出现的频次作为相应概率值。 $S_{score}$ 实际描述的是模拟概率分布与实测值的重叠程度<sup>[24]</sup>。

最后,对基于秩打分的RS(Rank Score)评价方法<sup>[34, 35]</sup>进行改进,使其评价结果更为直观。对原方法的改进主要是区分了相对误差指标与非误差指标。因为原方法不区分这些指标,易导致评价结果不统一,例如,对于NSE等非相对误差指标,RS值越大越好,而对均值的相对误差来说,RS值越小越优,这不利于综合评价。改进的RS方法特点是可以对不同评价标准及不同气候要素,综合评估气候模式在区域尺度上的表现。对于每个要素和评价指标对应的统计量,分别给予秩评分,计算如下:

$$RS_i = \begin{cases} 1 - \frac{T_i - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}, & T \text{ 为相对误差评价指标} \\ \frac{T_i - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}, & T \text{ 为非相对误差评价指标} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $RS_i$ 为第 $i$ 个模式的评分值; $T_i$ 为第 $i$ 个模式根据特定评价指标的计算值; $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 为相应的最大与最小值;其中相对误差评价指标包括均值、标准差、 $Z_c$ 和 $Slope$ ,非相对误差评价指标则指NSE、相关系数与 $S_{score}$ 。对于相对误差评价指标,分别计算各模式输出序列的统计量与观测序列统计量之间的相对误差,然后根据其相对误差的绝对值计算RS值。RS取值范围是0~1,值越大,模式表现越好。对于特定气候要素,各个模式的总分数由所有评价



2016年5月

表1 CMIP5气候模式

Table 1 CMIP5 climate models description

序号	模式	分辨率		研究机构	国家
		纬向	经向		
1	BCC-CSM1.1	2.79	2.81	Beijing Climate Center	中国
2	BNU-ESM	2.79	2.81	Beijing Normal University	中国
3	FIO-ESM	2.79	2.81	The First Institute of Oceanography, SOA	中国
4	FGOALS-g2	2.79	2.81	Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences	中国
5	INMCM4.0	1.50	2.00	Russian Academy of Sciences, Institute of Numerical Mathematics	俄罗斯
6	CSIRO-Mk3.6.0	1.87	1.88	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization/Queensland Climate Change Centre of Excellence	澳大利亚
7	ACCESS1.0	1.25	1.88	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization/Bureau of Meteorology	澳大利亚
8	ACCESS1.3	1.25	1.88		澳大利亚
9	IPSL-CM5A-LR	1.89	3.75	Institut Pierre Simon Laplace	法国
10	IPSL-CM5A-MR	2.54	2.50		法国
11	IPSL-CM5B-LR	1.89	3.75		法国
12	CNRM-CM5	1.40	1.41	Centre National de Recherches Météorologiques, Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique	法国
13	MPI-ESM-LR	1.87	1.88	Max Planck Institute for Meteorology	德国
14	MPI-ESM-MR	1.87	1.88		德国
15	EC-EARTH	1.12	1.13	EC-EARTH consortium published at Irish Centre for High-End Computing	荷兰/爱尔兰
16	CMCC-CMS	3.71	3.75	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici	意大利
17	CanESM2	2.79	2.81	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	加拿大
18	MIROC-ESM	2.79	2.81	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	日本
19	MIROC5	1.40	1.41		日本
20	MRI-CGCM3	1.12	1.13	Meteorological Research Institute	日本
21	NorESM1-M	1.89	2.50	Bjerknes Centre for Climate Research, Norwegian Meteorological Institute	挪威
22	NorESM1-ME	1.89	2.50		挪威
23	HadGEM2-A	1.25	1.88	Met Office Hadley Centre	英国
24	HadGEM2-CC	1.25	1.88		英国
25	HadGEM2-ES	1.25	1.88		英国
26	CCSM4	0.94	1.25	National Center for Atmospheric Research	美国
27	CESM1(BGC)	0.94	1.25		美国
28	CESM1(CAM5)	0.94	1.25		美国
29	CESM1(WACCM)	1.88	2.50		美国
30	GISS-E2-H	2.00	2.50	NASA/GISS (Goddard Institute for Space Studies)	美国
31	GISS-E2-R	2.00	2.50		美国
32	GFDL-CM3	2.00	2.50	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	美国
33	GFDL-ESM2G	2.02	2.00		美国
34	GFDL-ESM2M	2.02	2.50		美国

指标对应的分数加权相加得到。对表示同一特征但有2个评价指标的情况,如均态特征中的均值和标准差,及趋势分析中的 $Z_c$ 和 $Slope$ ,为了与其它同一特征单一指标一致,分别赋予权重0.5,其它同一

特征单一指标的统计量赋予权重1。

### 3 结果分析

#### 3.1 主要气候要素变化趋势分析

本文分析了蒙古高原1969–2013年,平均气温、

最高气温、最低气温、降水量及潜在蒸散发量的年序列变化趋势,各个站点的 Man-Kendall 统计检验结果见图2,其显著性水平为0.05。从图2中可以看出,蒙古高原各个站点的平均气温都呈升高趋势,除了蒙古国的乌兰巴托和温都尔汗两个站点外,所有站点的升高趋势都显著。研究区所有站点的最高气温也都为上升趋势,除了蒙古国有4个站外,其它站点都呈显著上升趋势。蒙古国的乌兰巴托和温都尔汗两个站点的最低气温表现出了降低的趋势,最低气温升高趋势显著的站点个数明显少于平均和最高气温。降水量呈降低趋势的站点数超过了六成,且有6个站点的减少趋势显著。潜在蒸散发量呈上升趋势的站点数超过了七成,且有超过六成的站点呈显著上升趋势。从降水变化的空间分布上看,对于蒙古国来说,西北部降水量呈增加趋势,其它地区降水量都呈减少趋势,且部分站点变化趋势显著。中国境内区域,东部地区大多站点降水量减少,而西部多数站点降水量增加。

表2分别给出了蒙古国、中国境内地区及整个蒙古高原的区域平均其后要素变化趋势的 Man-Kendall 统计检验结果,结果表明蒙古高原不同区域气温要素都呈显著的上升趋势,蒙古高原平均、最高及最低气温升温幅度分别为 0.49℃/10a、0.46℃/10a 与 0.55℃/10a。不同区域之间,中国境内地区增温幅度高于蒙古国,不同要素之间,最低气温升温幅度最高,而最高气温升温幅度相对最小。蒙古高原不同区域降水量都呈下降趋势,不同区域潜在蒸散发量则都为上升趋势,蒙古国降水减少幅度大于中国境内地区,蒙古国潜在蒸散发量的升高幅度远远大于中国境内地区地区。

表2 蒙古高原区域主要气候要素变化趋势检验结果

变化幅度	蒙古国	中国境内地区	蒙古高原
最高气温/(℃/10a)	0.45▲	0.45▲	0.46▲
最低气温/(℃/10a)	0.36▲	0.64▲	0.55▲
平均气温/(℃/10a)	0.40▲	0.54▲	0.49▲
降水量/(mm/10a)	-0.55▽	-0.35▽	-0.45▽
潜在蒸散发量/(mm/10a)	3.38▲	0.38△	1.33▲

注:“△”、“▲”与“▽”分别表示上升、显著上升、降低及显著降低趋势。

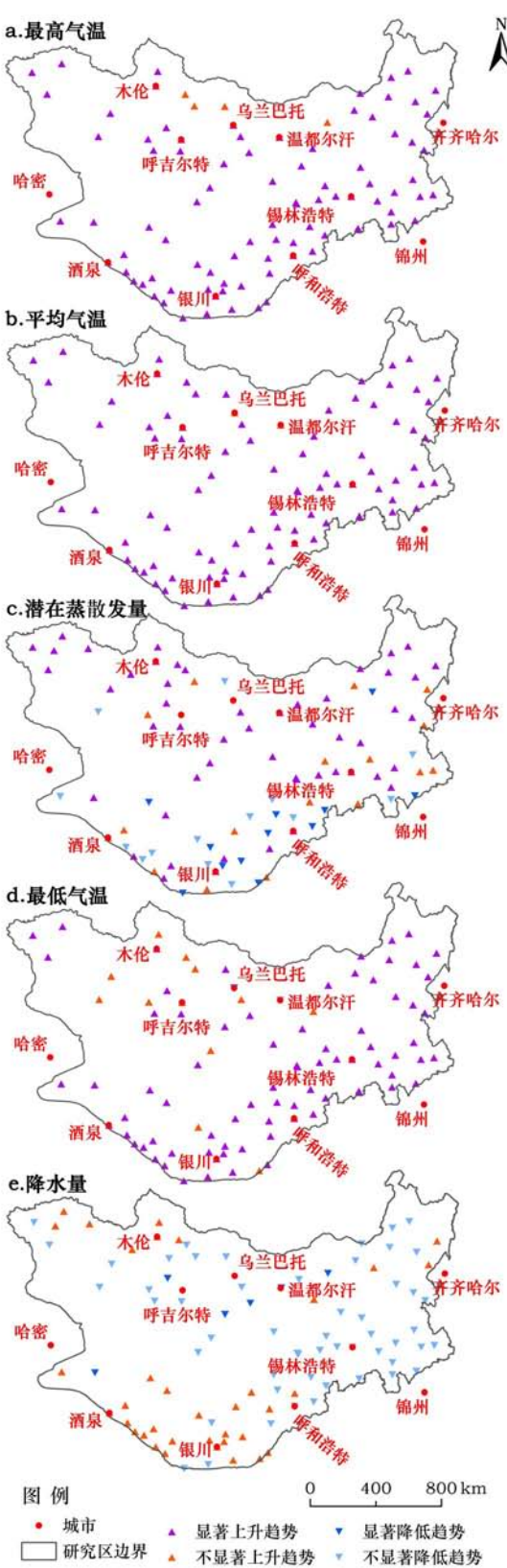


图2 各个站点主要气候要素 Man-Kendall 统计检验结果 (显著性水平为0.05)

Figure 2 Trends of climate variables for each observed station by the Man-Kendall method

2016年5月

### 3.2 气候模式模拟区域气温能力的评价

基于不同指标对CMIP5共34个模式输出的蒙古高原平均气温月序列的评价结果见图3,包括了8个统计量,分别为均值、标准差、月序列相关系数、空间相关系数、 $NSE$ 、 $S_{score}$ 、 $Zc$ 以及 $Slope$ (下同)。区域平均气温均态特征的评价结果显示,蒙古高原实测多年平均气温为 $3.3^{\circ}\text{C}$ ,但气候模式模拟值则在 $-2.1\sim 4.8^{\circ}\text{C}$ 之间变化,其中位数和均值分别为 $1.6^{\circ}\text{C}$ 和 $1.7^{\circ}\text{C}$ 。这说明在该地区,用所有气候模式的中位

数或是均值来进行气候变化研究并不合适。其中,绝大多数模式模拟的平均气温较实测值低,有8个模式输出的平均气温的区域均值与实测值误差小于 $0.4^{\circ}\text{C}$ ,大部分模式(29个)平均气温的标准差与实测值之间的相对误差都小于10%;ACCESS1.3、CanESM2与MIROC-ESM 3个模式对于蒙古高原平均气温的均态特征模拟能力相对较好。

各模式的月序列相关系数都超过了0.96,各模式的 $NSE$ 都超过了0.7,且绝大多数大于0.8,这些说

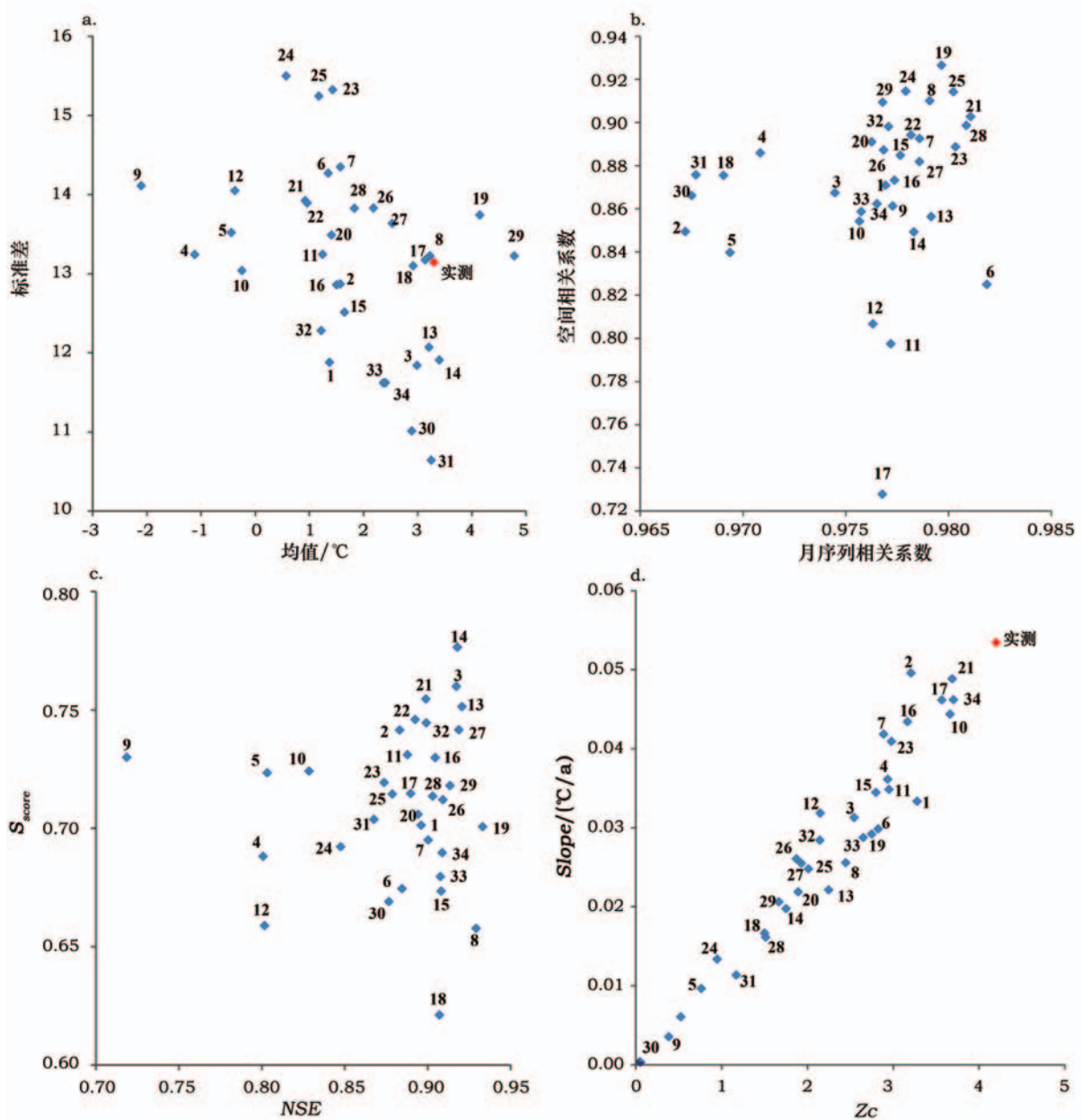


图3 CMIP5模式模拟区域平均气温的各个评价指标的散点分布

Figure 3 Scatter plots of evaluation indexes for the ability of CMIP 5 GCMs modeling regional mean air temperature



明CMIP5模式对于蒙古高原平均气温的时间序列特征具有较好的模拟能力。各模式的空间相关系数都超过了0.72,且大多数模式大于0.8,表明CMIP5模式对于平均气温的空间分布特征也有较高的模拟能力。各个模式之间,IPSL-CM5A-LR的NSE值相对较低,而CanESM2的空间相关系数相对较低。各模式的 $S_{score}$ 值在0.6~0.8之间,说明CMIP5模式对区域平均气温的概率密度分布特征也具有一定的模拟能力,其中,MPI-ESM-MR模拟概率密度分布特征的能力相对最好,而MIROC-ESM能力相对较差。总的来看,虽然CanESM2与MIROC-ESM在模拟平均气温的均态特征时,效果好于其它模式,但其分别在空间与概率密度分布特征上模拟能力相对较差。

各模式输出的年平均气温序列在1969–2004年内都呈上升趋势,这与实测数据相符,但其置信水平与变化幅度都低于实测值。实测序列的 $Z_c$ 统计量值为4.2,其置信水平高于99.9%, $Z_c$ 统计量与实测序列相对接近的模式有GFDL\_ESM2M、NorESM1\_M、IPSL\_CM5A\_LR与CanESM2,相应的置信水平都高于99.9%。实测平均气温上升幅度超过了0.5℃/10a,最接近这一升幅的模式是BNU\_ESM,此外,NorESM1\_M、GFDL\_ESM2M与CanESM2也相对接近实测序列的升幅。

图4为最高气温月序列的评价结果。蒙古高原实测多年月最高气温均值为10.3℃,模式模拟值在4.0~13.9℃之间变化,其中,有19个模式的误差在3℃以内,CESM1(WACCM)和CanESM2最接近实测值,误差小于1℃;绝大多数模式(30个)模拟值都较实测值偏低,平均低了3.0℃。大部分模式(27个)平均气温的标准差与实测值之间的相对误差都小于10%。从最高气温均态特征的模拟能力看,CESM1(WACCM)优于其它模式。

各模式的NSE都超过了0.6,且绝大多数高于0.75,而各模式的月序列相关系数都超过了0.95,这些说明CMIP5模式对于蒙古高原最高气温的时间序列特征也具有较好的模拟能力。所有模式的空间相关系数都超过了0.75,且绝大多数大于0.8,表明CMIP5模式对于最高气温的空间分布特征也有较好的模拟能力。与平均气温类似,CanESM2在最

高气温空间分布特征的模拟能力相对较弱。CESM1(WACCM)和MIROC5的空间相关系数与NSE都较其它模式高,说明其在区域最高气温空间与时间序列分布特征的模拟能力相对较高。各模式的 $S_{score}$ 值在0.67~0.77之间,说明CMIP5模式对区域最高气温的概率密度分布特征具有一定的模拟能力,与平均气温一样,MPI-ESM-MR模式模拟概率密度分布特征的能力相对最好。总的来看,对最高气温均态、空间分布及时间序列等特征的模拟能力,CESM1(WACCM)都优于其它模式。

蒙古高原最高气温在1969–2004年内呈上升趋势,绝大多数模式输出的最高气温都与实测值一致。实测序列的 $Z_c$ 统计量值为3.6,其置信水平高于99.9%,与平均气温类似,GFDL\_ESM2M和NorESM1\_M输出最高气温序列的 $Z_c$ 统计量与实测序列最为接近,相应的置信水平都高于99.9%。实测序列上升幅度接近0.5℃/10a,NorESM1\_M与ACCESS1.0输出最高气温的升幅与实测序列误差最小,此外,IPSL\_CM5A\_LR、GFDL\_ESM2M与BNU\_ESM模式输出与实测序列间的误差也相对较小。对蒙古高原最高气温变化趋势特征的模拟能力,NorESM1-M与GFDL-ESM2M要优于其它模式,这与平均气温评价结果相同。

最低气温月序列的评价结果如图5所示。蒙古高原实测多年月最低气温均值为-3.2℃,模式模拟值在-14.9~0.1℃之间,其中,大多数模式(24个)的误差在2℃以内,CCSM4、CESM1(CAM5)和CanESM2模式输出最接近实测值,误差小于0.3℃。大部分模式(25个)的标准差与实测值之间的相对误差都小于10%。总的来看,BNU-ESM和CanESM2对蒙古高原最低气温的均态特征模拟能力优于其它模式。

各模式月序列相关系数都超过了0.94,有28个模式的NSE超过0.8,这些说明大多数模式对蒙古高原最低气温的时间序列特征具有较好的模拟能力。但是IPSL的3个模式的NSE较低,小于0.5。所有模式的空间相关系数都超过了0.6,且有28个模式大于0.8,表明CMIP5模式对于最低气温的空间分布特征也有较好的模拟能力。与平均和最高气温相同,CanESM2在最低气温空间分布特征的模拟

2016年5月

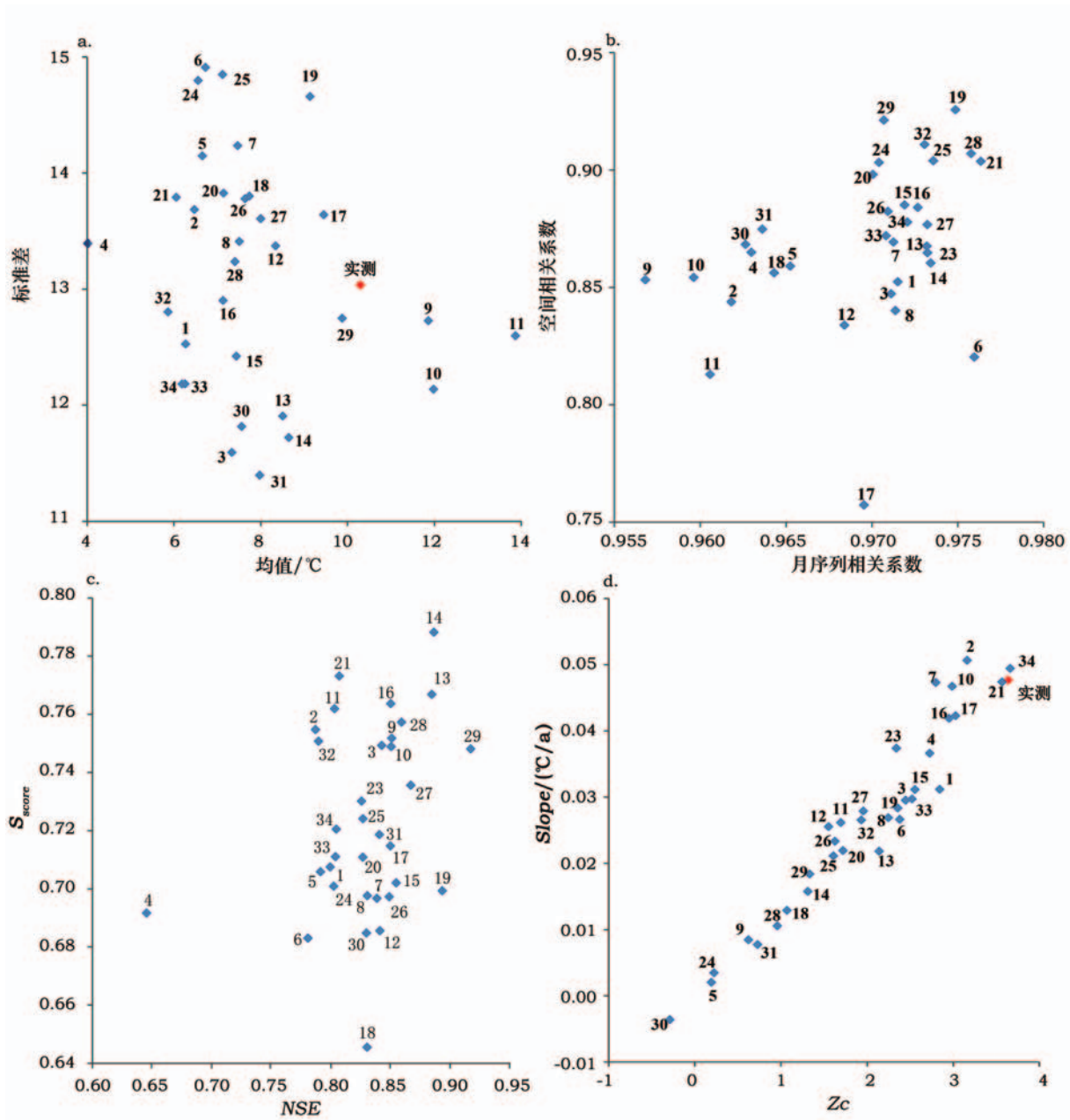


图4 CMIP5模式模拟区域最高气温的各个评价指标的散点分布

Figure 4 Scatter plots of evaluation indexes for the ability of CMIP 5 GCMs modeling regional maximum air temperature

能力也相对最弱。各个模式的  $S_{score}$  值在 0.67~0.77 之间,说明CMIP5模式对最低气温的概率密度分布特征具有一定的模拟能力,CCSM4表现相对最好。

蒙古高原最低气温在1969–2004年内呈上升趋势,绝大多数模式输出的最高气温都与实测值一致,但其置信水平与变化幅度都低于实测值。实测序列的  $Z_c$  统计量值为4.3,置信水平高于99.9%, CanESM2、GFDL\_ESM2M、NorESM1\_M与BCC\_CSM 1.1的  $Z_c$  统计量与实测序列相对接近,相应的置信

水平都高于99.9%。实测序列上升幅度接近  $0.6^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,最接近这一升幅的模式是BNU\_ESM,其次, CanESM2与NorESM1\_M也相对接近,相应的升幅都超过  $0.5^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。CanESM2与NorESM1\_M在最低气温变化趋势的模拟能力上,要优于其它模式。总的来看,在模拟蒙古高原平均、最高与最低气温变化趋势时,NorESM1\_M都表现出相对较优的能力。

### 3.3 气候模式模拟区域降水能力的评价

图6给出了利用不同评价指标对34个模式降



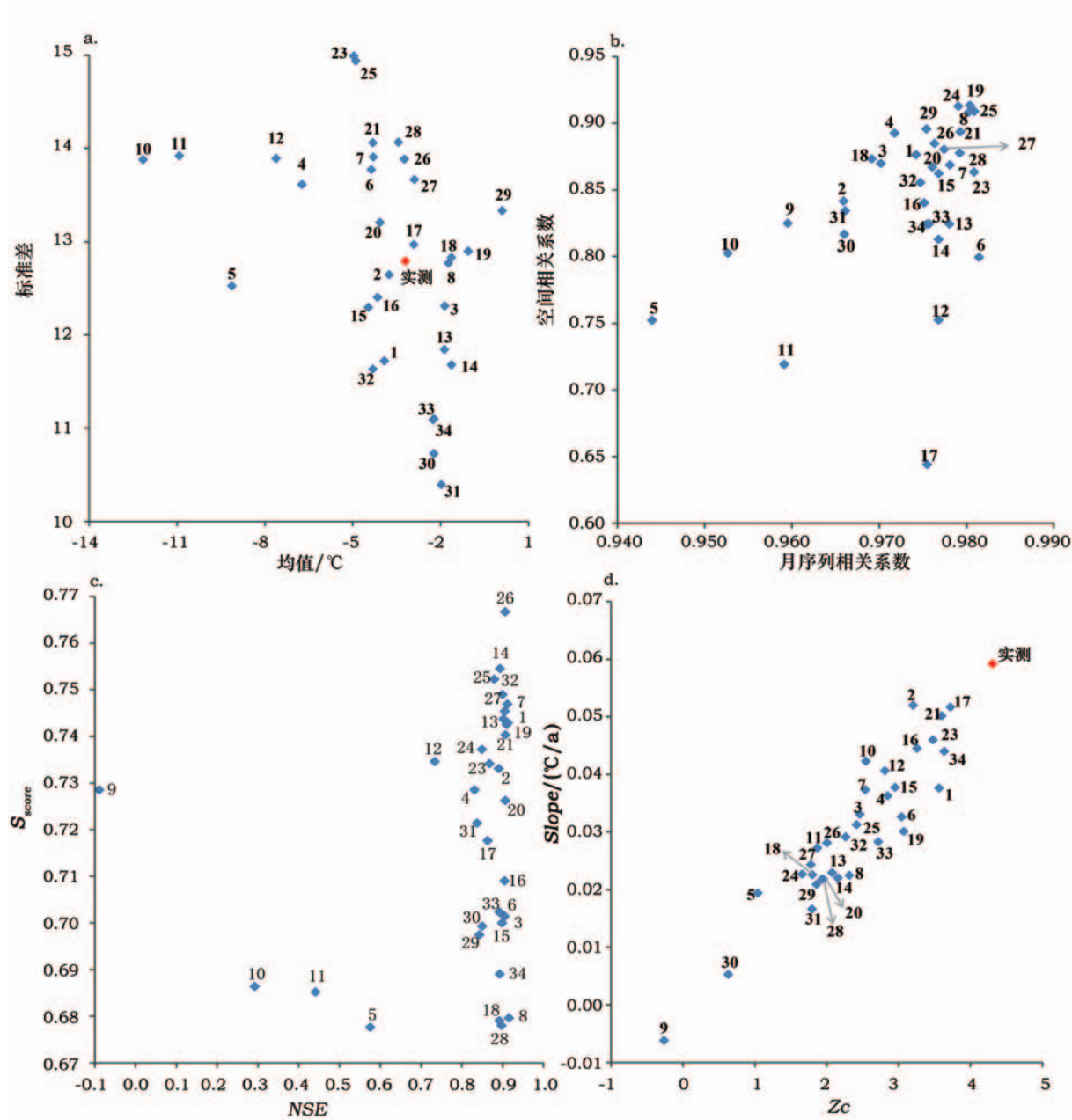


图5 CMIP5模式模拟区域最低气温的各个评价指标的散点分布

Figure 5 Scatter plots of evaluation indexes for the ability of CMIP 5 GCMs modeling regional minimum air temperature

水量月序列的评价结果。蒙古高原实测多年平均降水量为 315.6mm, 气候模式模拟年降水量在 296.2~704.6mm 之间。除了 MRI-CGCM3 外, 所有模式输出的多年平均降水量都高于实测值, 最高的 BNU\_ESM 模拟降水量超过了实测值的一倍之多。表明 CMIP5 模式输出的蒙古高原区域降水量偏高, 这与塔里木河流域的评价结果相似<sup>[25]</sup>。多数模式 (18 个) 输出降水量的标准差与实测值之间的相对误差都小于 20%, 有 15 个模式小于 10%。EC-

EARTH 与 MRI-CGCM3 对蒙古高原降水量均态特征的模式能力相对最好。

整体看, CMIP5 模式模拟降水量时、空变化特征的能力明显低于气温要素。多数模式 (22 个) 的效率系数  $NSE$  高于 0.65, 表明 CMIP5 对蒙古高原降水量时间序列的特征具有一定的模拟能力, 其中, MRI-CGCM3 与 EC\_EARTH 模式的效率系数相对最高, 这与均态特征评价结果相同。但是, 只有 CESM1(WACCM)、CESM1(CAM5)、NorESM1\_M 及

2016年5月

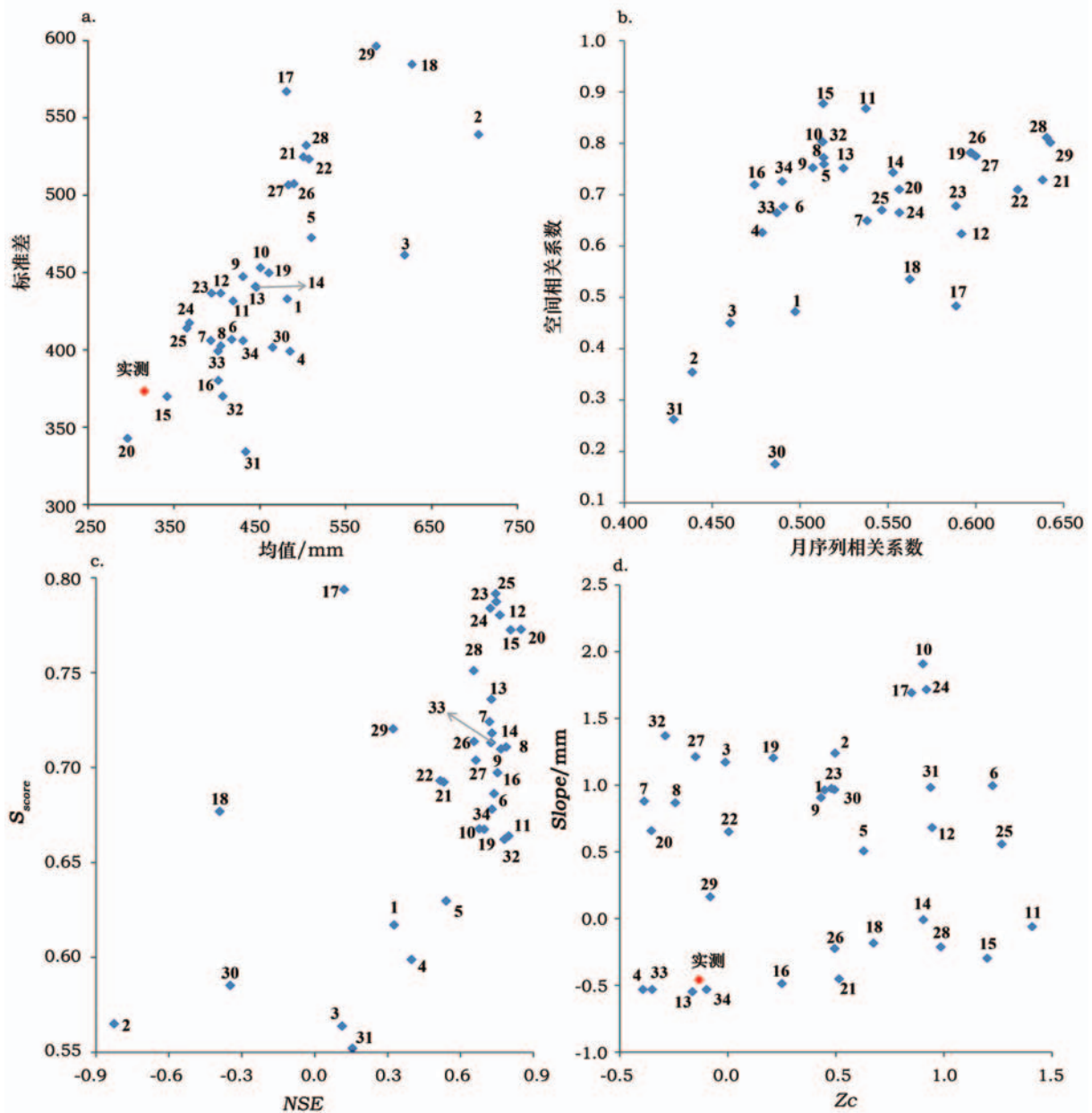


图6 CMIP5模式模拟区域降水量的各个评价指标的散点分布

Figure 6 Scatter plots of evaluation indexes for the ability of CMIP 5 GCMs modeling regional precipitation

NorESM1\_ME 四个模式的相关系数大于0.60。大多数模式(27个)的空间相关系数大于0.60,其中19个模式高于0.70,表明CMIP5模式对于降水量的空间分布特征也有一定的模拟能力。EC\_EARTH、IPSL\_CM5A\_MR与CESM1(CAM5)在降水量空间特征上的模拟能力强于其它模式。绝大多数模式(29个)的 $S_{score}$ 值都高于0.60,说明CMIP5模式对区域降水量的概率密度分布特征也具有一定的模拟能力。从散点图看,CESM1(CAM5)与CESM1

(WACCM)模式对降水量空间和月序列相关性的模拟能力强于其它模式,而MRI\_CGCM3和EC\_EARTH模式效率系数与概率密度分布特征的模拟能力优于其它模式。

蒙古高原年降水量在1969–2004年内呈略微的下降趋势,其置信水平低于10%,降幅约为5mm/10a,从变化趋势评价结果的散点分布看,MPI-ESM-LR与GFDL-ESM2M对降水量变化趋势的模拟能力相对优于其它模式。

3.4 气温与降水综合评价结果

基于RS方法对CMIP5模式输出的气温与降水综合评价结果见表3。结果表明:

(1)总的来看,来自挪威气象学院Bjerknes气候研究中心的NorESM1-M输出的气温与降水数据在

表3 基于改进RS方法的CMIP5模式综合评价结果

Table 3 Overall evaluation results for CMIP5 climate models by the revised RS method

模式	各评价指标综合RS评分				总评分
	平均 气温	最高 气温	最低 气温	降水量	
BCC-CSM1.1	0.68	0.62	0.83	0.51	0.66
BNU-ESM	0.70	0.63	0.84	0.19	0.59
FIO-ESM	0.72	0.62	0.73	0.40	0.62
FGOALS-g2	0.57	0.47	0.75	0.63	0.60
INMCM4.0	0.41	0.40	0.40	0.56	0.44
CSIRO-Mk3.6.0	0.65	0.50	0.73	0.57	0.61
ACCESS1.0	0.72	0.66	0.80	0.72	0.73
ACCESS1.3	0.76	0.62	0.75	0.73	0.72
IPSL-CM5A-LR	0.35	0.53	0.22	0.65	0.44
IPSL-CM5A-MR	0.70	0.68	0.45	0.54	0.59
IPSL-CM5B-LR	0.70	0.54	0.41	0.65	0.58
CNRM-CM5	0.48	0.59	0.69	0.70	0.61
MPI-ESM-LR	0.73	0.70	0.74	0.78	0.74
MPI-ESM-MR	0.71	0.67	0.73	0.69	0.70
EC-EARTH	0.70	0.68	0.78	0.78	0.73
CMCC-CMS	0.79	0.80	0.80	0.75	0.79
CanESM2	0.74	0.66	0.77	0.49	0.67
MIROC-ESM	0.55	0.45	0.67	0.44	0.53
MIROC5	0.79	0.70	0.87	0.67	0.76
MRI-CGCM3	0.66	0.61	0.75	0.82	0.71
NorESM1-M	0.85	0.80	0.86	0.69	0.80
NorESM1-ME	0.59	-	-	0.67	0.63
HadGEM2-A	0.68	0.60	0.77	0.73	0.70
HadGEM2-CC	0.47	0.42	0.67	0.66	0.55
HadGEM2-ES	0.62	0.57	0.75	0.69	0.66
CCSM4	0.69	0.61	0.81	0.71	0.70
CESM1(BGC)	0.75	0.70	0.78	0.68	0.73
CESM1(CAM5)	0.68	0.70	0.66	0.70	0.68
CESM1(WACCM)	0.71	0.77	0.68	0.66	0.70
GISS-E2-H	0.36	0.37	0.49	0.40	0.40
GISS-E2-R	0.44	0.46	0.56	0.36	0.46
GFDL-CM3	0.70	0.68	0.76	0.70	0.71
GFDL-ESM2G	0.63	0.60	0.66	0.76	0.66
GFDL-ESM2M	0.73	0.70	0.71	0.75	0.72

蒙古高原表现相对最优,其模拟平均、最高与最低气温的能力在模式中都是最强的。CMCC-CMS(意大利)、MIROC5(日本)、MPI-ESM-LR(德国)、EC-EARTH(荷兰/爱尔兰)、ACCESS1.0(澳大利亚)、CESM1(BGC)(美国)、GFDL-ESM2M(美国)及ACCESS1.3(澳大利亚)等模式的整体表现也相对较好。整体表现较好的模式对单个要素也具有较强的模拟能力,特别是MPI-ESM-LR和GFDL-ESM2M。

(2)对于单个要素的综合评价结果看,有些模式虽然在所有要素的整体表现欠佳,但其在单个要素的表现优异,如MRI-CGCM3和MPI-ESM-LR在对区域降水量的模拟能力上表现最优,而BNU-ESM与BCC-CSM1.1对最低气温有较强的模拟能力。

4 结论与讨论

本研究以整个蒙古高原为研究区,基于Man-Kendall方法检验了研究区平均气温、最高气温、最低气温、降水量与潜在蒸散发量的长序列变化趋势,并从模型效率系数、气候均态、时间与空间序列相关性、概率密度分布特征及变化趋势等多个角度综合评估了34个CMIP5气候模式在蒙古高原模拟气温与降水的能力。主要结论如下:

(1)蒙古高原在1969-2013年间整体呈增温减湿的趋势。研究区区域平均、最高及最低气温都呈显著上升趋势,升温幅度分别为0.49℃/10a、0.46℃/10a与0.55℃/10a,绝大多数站点的气温升温趋势也都显著。最低气温升温幅度明显大于最高气温升温幅度。中国境内的气候变暖趋势要强于蒙古国地区。整个高原变暖的大背景下,蒙古国的乌兰巴托和温度尔汗两个站点的平均和最低气温表现出了减少的趋势。研究区超过六成的站点降水量呈减少趋势,且有6个站点的减少趋势显著。从降水变化的空间分布上看,蒙古高原整体呈西部降水量增加,而中东部降水量减少的趋势。

(2)模式评价结果对评价指标有较大的依赖性,不同评价指标,可能得到完全相反的评价结果。例如,从气候均态指标看,ACCESS1.3、CanESM2与MIROC-ESM输出的平均气温表现最优,但若以概率密度分布为指标,ACCESS1.3与



2016年5月

MIROC-ESM 模式表现相对最差,而从空间相关性指标看,CanESM2 表现最差。用标准差和月序列相关系数评价模式模拟降水量的能力,CESM1\_WACCM 得到完全相反的结果,分别为最差与最优。因此,在对气候模式在区域尺度进行应用评估时,评价指标的选择至关重要,建议选用多个指标从不同角度对模式进行综合评价。

(3)蒙古高原平均、最高与最低气温在1969–2004年内都呈上升趋势,且置信水平高于99.9%,绝大多数CMIP5模式输出气温序列的变化趋势与其一致,但其置信水平与变化幅度都较实测值偏低,这说明CMIP5模式低估了该区域的增温趋势。

(4)不同要素气候均态的评价结果显示,CMIP5模式对平均气温的模拟能力最强,多数模式对最高和最低气温也有较强的模拟能力,部分模式对降水亦有一定的模拟能力。CMIP5模式模拟的蒙古高原平均气温偏低,而模拟的降水量偏高。

(5)对气温和降水的综合评价结果显示,NorESM1-M在蒙古高原表现最优,其模拟3个气温要素的能力在所有模式中都是最强的。CMCC-CMS、MIROC5、MPI-ESM-LR、EC-EARTH、ACCESS1.0、CESM1(BGC)、GFDL-ESM2M及ACCESS1.3等几个模式的整体表现也相对较好。整体表现较好的模式对单个要素也具有较强的模拟能力。

(6)有些模式虽然整体表现欠佳,但其在单个要素的表现优异,如MRI-CGCM3和MPI-ESM-LR在对区域降水量的模拟能力上表现最优,而BNU-ESM与BCC-CSM1.1对最低气温有较强的模拟能力。

## 参考文献(References):

- [1] Lu N, Wilske B, Ni J, et al. Climate change in Inner Mongolia from 1955 to 2005—trends at regional, biome and local scales[J]. *Environmental Research Letters*, 2009, 4(4): 045006–6.
- [2] 闫慧明,陈伟娜,杨方兴,等. 过去50年内蒙古极端气候事件时空格局特征[J]. *地理研究*, 2014, 33(1): 13–22. [Yan H M, Chen W N, Yang F X, et al. The spatial and temporal analysis of extreme climatic events in Inner Mongolia during the past 50 years [J]. *Geographical Research*, 2014, 33(1): 13–22.]
- [3] Nandintsetseg B, Greene J S, Goulden C E. Trends in extreme daily precipitation and temperature near Lake Hövsgöl, Mongolia [J]. *International Journal of Climatology*, 2007, 27(3): 341–347.
- [4] Sternberg T, Thomas D, Middleton N. Drought dynamics on the Mongolian steppe, 1970–2006[J]. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(12): 1823–1830.
- [5] 王凌,甄霖,刘雪林,等. 蒙古高原中部气候变化及影响因素比较研究[J]. *地理研究*, 2008, 27(1): 171–180. [Wang L, Zhen L, Liu X L, et al. Comparative studies on climate changes and influencing factors in central Mongolian Plateau Region[J]. *Geographical Research*, 2008, 27(1): 171–180.]
- [6] 侯琼,郭瑞清,杨丽桃. 内蒙古气候变化及其对主要农作物的影响[J]. *中国农业气象*, 2009, 30(4): 560–564. [Hou Q, Guo R Q, Yang L T. Climate change and its impact on main crops in Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(4): 560–564.]
- [7] 尹燕亭,侯向阳,运向军. 气候变化对内蒙古草原生态系统影响的研究进展[J]. *草业科学*, 2011, 28(6): 1132–1139. [Yin Y T, Hou X Y, Yun X J. Advances in the climate change influencing grassland ecosystems in Inner Mongolia[J]. *Pratacultural Science*, 2011, 28(6): 1132–1139.]
- [8] 顾润源,周伟灿,白美兰,等. 气候变化对内蒙古草原典型植物物候的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(3): 767–776. [Gu R Y, Zhou W C, Bai M L, et al. Impacts of climate change on phenological phase of herb in the main grassland in Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(3): 767–776.]
- [9] 周锡钦,师华定,王秀茹. 气候变化和人类活动对蒙古高原植被覆盖变化的影响[J]. *干旱区研究*, 2014, 31(4): 604–610. [Zhou X Y, Shi H D, Wang X R. Impact of climate change and human activities on vegetation coverage in the Mongolian Plateau [J]. *Arid Zone Research*, 2014, 31(4): 604–610.]
- [10] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*[M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007.
- [11] Trenberth K E. The use and abuse of climate models[J]. *Nature*, 1997, 386(6621): 131–133.
- [12] Murphy J M, Sexton D M H, Barnett D N, et al. Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations[J]. *Nature*, 2004, 430(7001): 768–772.
- [13] Dessai S, Lu X F, Hulme M. Limited sensitivity analysis of regional climate change probabilities for the 21st century[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2005, 110(19): 2679–2689.
- [14] Fu G B, Barber M E, Chen S L. The impacts of climate change on regional hydrological regimes in the Spokane River watershed[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2007, 12(5): 452–461.
- [15] Giorgi F, Mearns L O. Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simu-

- lations via the ‘‘reliability ensemble averaging’’ (REA) method [J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(10): 1141–1158.
- [16] Giorgi F, Francisco R. Evaluating uncertainties in the prediction of regional climate change[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(9): 1295–1298.
- [17] Bader D C, Covey C, Gutowski W J, et al. Climate Models: An Assessment of Strengths and Limitations[R]. Washington: Department of Energy, Office of Biological and Environmental Research, 2008.
- [18] Hulme M, Brown O. Portraying climate scenario uncertainties in relation to tolerable regional climate change[J]. *Climatic Research*, 1998, 10(1): 1–14.
- [19] Kittel T G F, Giorgi F, Meehl G A. Intercomparison of regional biases and doubled CO<sub>2</sub>-sensitivity of coupled atmosphere-ocean general circulation model experiments[J]. *Climate Dynamics*, 1998, 14(1): 1–15.
- [20] Harvey L D D, Wigley T M L. Charactering and comparing control-run variability of eight coupled AOGCMs and of observations Part 1: Temperature[J]. *Climate Dynamics*, 2003, 21(7): 619–646.
- [21] Cubasch U, von Storch H, Waszkewitz J, et al. Estimates of climate change in Southern Europe derived from dynamical climate model output[J]. *Climate Research*, 1996, 7(2): 129–149.
- [22] Whetton P H, England M H, O’Farrell S P, et al. Global comparison of the regional rainfall results of enhanced greenhouse coupled and mixed layer ocean experiments: Implications for climate change scenario development[J]. *Climatic Change*, 1995, 33(4): 497–519.
- [23] Nieto S, Puebla C R. Comparison of precipitation from observed data and general circulation models over the Iberian Peninsula[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(17): 4254–4275.
- [24] Perkins S E, Pitman A J, Holbrook N J, et al. Evaluation of the AR4 climate models’ simulated daily maximum temperature, minimum temperature, and precipitation over Australia using probability density functions[J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(17): 4356–4376.
- [25] Maxino C C, McAvaney B J, Pitman A J, et al. Ranking the AR4 climate models over the Murray–Darling basin using simulate maximum temperature, minimum temperature and precipitation [J]. *International Journal of Climatology*, 2008, 28(8): 1097–1112.
- [26] Taylor K, Stouffer R, Meehl G. An overview of CMIP5 and the experiment design[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(4): 485–498.
- [27] 郭彦,董文杰,任福民,等. CMIP5模式对中国年平均气温模拟及其与CMIP3模式的比较[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(3): 181–186. [Guo Y, Dong W J, Ren F M, et al. Assessment of CMIP5 simulations for China annual average surface temperature and its comparison with CMIP3 simulations[J]. *Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis*, 2013, 9(2): 181–186.]
- [28] 陈晓晨,徐影,许崇海,等. CMIP5全球气候模式对中国地区降水模拟能力的评估[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(3): 217–225. [Chen X C, Xu Y, Xu C H, et al. Assessment of precipitation simulations in China by CMIP5 multi-models[J]. *Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis*, 2014, 10(3): 217–225.]
- [29] 初祁,徐宗学,刘文丰,等. 24个CMIP5模式对长江流域模拟能力评估[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(1): 81–89. [Chu Q, Xu Z X, Liu W F, et al. Assessment on 24 global climate models in the CMIP5 over the Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(1): 81–89.]
- [30] 胡琴,姜大膀,范广洲. CMIP5全球气候模式对青藏高原地区气候模拟能力评估[J]. 大气科学, 2014, 38(5): 924–938. [Hu Q, Jiang D B, Fan G Z. Evaluation of CMIP5 models over the Qinghai–Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 38(5): 924–938.]
- [31] 赵宗慈,罗勇,黄建斌. 评估43个CMIP5模式模拟全球能量平衡能力[J]. 气候变化研究进展, 2015, 11(3): 227–230. [Zhao Z C, Luo Y, Huang J B. Assessment of global energy balance as simulated by 43 CMIP5 climate models[J]. *Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis*, 2015, 11(3): 227–230.]
- [32] 姜燕敏,吴昊旻. 20个CMIP5模式对中亚地区年平均气温模拟能力评估[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(2): 110–116. [Jiang Y M, Wu H W. Simulation capabilities of 20 CMIP5 models for annual mean air temperatures in central Asia[J]. *Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis*, 2013, 9(2): 110–116.]
- [33] Xu Z X, Liu Z F, Fu G B, et al. Trends of major hydroclimatic variables in the Tarim River Basin during the past 50 Years[J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(2): 256–267.
- [34] 刘兆飞. 气候变化对塔里木河流域源区主要水文要素的影响研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2010. [Liu Z F. Impact of Climate Change on Major Hydrological Processes in the Headwater Catchment of the Tarim River Basin[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2010.]
- [35] Fu G B, Liu Z F, Charles S P, et al. A score-based method for assessing the performance of GCMs: A case study of southeastern Australia[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(10): 4154–4167.

## Air temperature and precipitation over the Mongolian Plateau and assessment of CMIP 5 climate models

LIU Zhaofei, WANG Rui, YAO Zhijun

*(Key Lab for Resources Use & Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)*

**Abstract:** Trends in air temperature and precipitation for the Mongolian Plateau were detected and changes between the Inner Mongolian region and Mongolian region were analyzed. Based on multi-evaluation indexes, Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) climate models were assessed using observed station data for air temperature and precipitation over the Plateau. The overall performance of CMIP5 models for all six variables was evaluated by a revised rank score evaluation method. We found that NorESM1-M were the relative best models for overall performance over the region and had better ability modeling each variable. Although some models were not good enough for overall performance, they showed better ability when modeling some individual variables. CMIP5 modes tended to underestimate mean values and trends in mean air temperature and overestimate precipitation. For different variables, CMIP5 models showed the best model performance for mean air temperature over the region. The models also showed better model performance for maximum air temperature and minimum air temperature. Some models showed ability in modeling precipitation amount over the region. The assessment results were too dependent on evaluation indexes and when different evaluation indexes were used, completely opposite results were often obtained. In other words, selection of evaluation indexes was very important to assessment. For example, as for mean characteristic indexes, ACCESS1.3, CanESM2 and MIROC-ESM models showed the best model performance for mean air temperature over the region, but ACCESS1.3 and MIROC-ESM showed the worst model performance using the probability density function index, and CanESM2 showed the worst performance when using the spatial correlation coefficient index. Therefore, in the assessment of climate models at a regional scale, multi-evaluation indexes representing different characteristic are suggested for overall evaluations.

**Key words:** climate model; GCM; overall evaluation; trend; probability density function; Mongolian Plateau