

基于模式优选的21世纪中国气候变化情景集合预估

张学珍¹, 李侠祥², 徐新创³, 张丽娟²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 哈尔滨师范大学 黑龙江省普通高等学校地理环境遥感监测重点实验室, 哈尔滨 150025;

3. 湖北科技学院资源环境科学与工程学院, 咸宁 437100)

摘要: 未来气候变化情景预估是制定气候变化应对和适应策略的科学基础。本文利用参与耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)的30个气候模式的模拟数据,通过评估各模式对历史气候变化的模拟能力,筛选出模拟区域气候变化的最优模式组合,进而建立偏最小二乘回归(PLS)集合预估模型,据此利用最优模式模拟结果预估区域温度和降水变化情景。通过与历史数据的对比,研究发现本文基于最优模式建立的PLS集合预估模型不仅优于传统的多模式集合平均,而且也优于利用全部模式建立的PLS集合预估模型,体现了模式优选过程的重要性。本文基于优选模式的PLS集合预估模型预估结果表明:① 21世纪各区域温度将持续上升,且冬半年升温速率总体大于夏半年,北方地区升温速率总体高于南方地区;RCP 4.5排放情景下温度上升先快后慢,转折点出现在21世纪中期,RCP 8.5排放情景下,呈持续增加趋势,至21世纪末的升温幅度约为RCP 4.5情景的2倍。② 21世纪各区域降水变化均呈显著增加趋势,并表现出高排放情景大于低排放情景,少雨区大于多雨区的特征,但是降水增加过程伴有明显的年代际波动。对比发现,传统的等权重集合平均全部模式(EMC)方法预估的中国夏季变暖速率高于冬季,且降水基本呈线性增加,有悖于全球变暖的基本特征及中国降水具有鲜明的年代际变化特征的基本认识。因而,本文预估的温度和降水变化特征均更符合中国气候变化的基本规律。

关键词: CMIP5; 中国气候变化; 模式优选; 多模式集合; 情景预估

DOI: 10.11821/dlxb201709002

1 前言

全球气候变化深刻影响人类赖以生存的水土资源、粮食安全、环境质量等诸多方面,是当前乃至今后一个时期内人类生存和发展面临的重大挑战。据IPCC第五次评估报告^[1], 1880-2012年全球表面平均气温升幅约为0.85℃,与此同时,全球冰川面积逐渐减少,海平面上升,极端高温和强降水事件频率和强度明显增加,由此给人类福祉造成极大的损失。因而,预测分析未来气候变化情景,为有针对性地制定减缓和适应气候变化的策略提供科学依据,成为科学界的当务之急。

收稿日期: 2017-05-10; 修订日期: 2016-07-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFA0605303); 国家自然科学基金项目(91325302, 41471171); 中国科学院地理科学与资源研究所杰出青年人才基金项目(2015RC101); 中国科学院青年创新促进会(2015038); 湖北省教育厅人文社科重点基金项目(16D094) [Foundation: National Key Research and Development Program of China, No.2017YFA0605303; National Natural Science Foundation of China, No.91325302, No.41471171; Outstanding Young Scholars from IGSNRR, No.2015RC101; Youth Innovation Promotion Association of CAS, No.2015038; Key Fund of Humanities and Social Science of Hubei Provincial Education Department, No.16D094]

作者简介: 张学珍(1981-), 博士, 副研究员, 主要从事地—气相互作用研究。E-mail: xzzhang@igsnr.ac.cn

通讯作者: 徐新创(1976-), 博士, 副教授, 主要从事全球气候变化研究。E-mail: xxch8009@163.com

气候系统模式是预估未来气候变化的主要工具。世界气候研究计划（World Climate Research Programme, WCRP）推动发起并组织的耦合模式比较计划（Coupled Model Intercomparison Project, CMIP）极大地促进了气候模式的发展^[2]，并为认识气候变化机理，预估未来气候变化提供了重要基础数据。CMIP 创立于 1995 年，目前已执行至第五阶段，即 CMIP5。与前几个阶段相比，CMIP5 模式的分辨率和物理过程参数化方案等方面都有了很大改进^[3]，模拟能力明显提高，是 IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change）第五次评估报告的重要数据源。鉴于参与 CMIP5 的各个模式在基本结构、参数化方案等方面有较大差异，其模拟结果不尽相同，甚至相差甚远。因此，在未来气候变化预估中通常采用多模式集合平均（Multi-Model Ensemble Mean）结果，以力求最大程度的消除单一模式“噪音”，提炼高可信度的气候变化信号^[4-17]。

多模式集合平均技术可概括分为两类，即等权集合平均和加权集合平均。其中，大多数研究使用的是等权集合平均^[7, 12]，仅少数研究使用了加权集合平均^[18-19]。相比而言，加权集合平均较等权集合平均更为合理，因为加权集合平均考虑了各模式模拟性能的差异，有选择性的吸收各模式的“可信”成分。具体而言，加权集合平均为各模式配置权重系数，以体现模式性能的差异，性能较好的模式一般具有较高的权重系数。因而，如何配置各个模式的权重系数成为加权集合平均的关键环节。当前，学术界尚无公认的权重系数计算方法，但现有大多数方法的共同之处是计算得到的权重系数均为正值，即认为所有模式均有“正向的可信”信号，而实际上模式模拟的区域气候变化可能严重偏离观测事实，甚至与观测事实完全相反。因此，在区域气候变化的多模式集合平均预估中应用这类模式结果无异于人为的引入了噪音，增加了预估结果的不确定性。所以，在多模式集合平均之前有必要根据模拟能力对模式进行筛选^[20]，只将具有一定区域气候模拟能力的模式应用于多模式集合平均预估之中。一些学者在筛选模式的基础上再进行 MME 预测分析，有效降低了预估结果的不确定性^[21-28]。

目前，筛选模式的主要依据是模式对区域气候的空间异质性和 20 世纪气候变化的线性趋势的模拟能力，而较少考虑对气候波动变化特征，如年际—年代际变化的模拟能力。区域气候的空间异质性和 20 世纪气候变化的线性趋势主要源于气候系统的外强迫^[29]，其中前者主要由太阳辐射随纬度分布变化及地形和距海远近所致，后者则主要是由人为排放温室气体导致其浓度逐渐增加所致。目前的气候系统模式一般均能较好的响应外强迫的变化。区域气候的波动变化特征，尤其是年代际的气候变化，一般源于气候系统内部变率^[30]。较好地再现区域气候波动变化特征是该模式比较全面地描述了区域气候动力过程的重要证据，这不仅是对模式模拟能力的“更高”要求，而且是未来区域气候变化预估的重要基础。

因而，基于上述研究进展，本文拟首先从参与 CMIP5 的模式中筛选出对中国气候变化具有较强模拟能力的模式，进而利用加权集合平均方法预估 21 世纪中国分区域的气候变化。其中，筛选 CMIP5 模式的主要依据是各模式对中国区域气候变化波动特征的模拟能力；加权集合平均的具体实现途径是偏最小二乘回归。以期提供较高可信度的 21 世纪中国区域气候变化情景预估结果。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

本文采用了 CMIP5 涵盖的 30 个气候（地球）系统模式（表 1）的模拟资料，包括历

史模拟试验数据（1850-2005年）和未来气候变化情景预估数据（2006-2100年）。其中，情景预估数据包括4种不同“典型浓度路径”（Representative Concentration Pathways, RCPs）情景下的模拟数据^[31-32]，分别为低排放情景（人为排放温室气体至21世纪末产生的辐射强迫为2.6 W/m²，RCP 2.6，以下类同）、中排放情景（RCP 4.5）、中高排放情景（RCP 6.0）和高排放情景（RCP 8.5）。考虑到模拟数据的完整性，本文采用了表1所示30个模式的历史模拟及RCP 4.5和RCP 8.5情景模拟的资料。并且，为避免模式对不同初始场的敏感性差异，本文仅采用了每个模式的run1输出结果，即r1i1p1。模式及试验的详细设置参见<http://pcmdi9.llnl.gov/>。

本文用于模式验证的历史温度和降水资料均来源于东英吉利大学气候研究机构

表1 30个CMIP5模式的空间分辨率和所属机构
Tab. 1 Horizontal resolution and hosts of 30 CMIP5 models used in this study

编号	模式名称	分辨率	所属国家、研究中心
1	CCSM4	1.250°×0.942°	美国国家大气研究中心
2	CESM1-BGC	1.250°×0.942°	美国国家大气研究中心
3	CESM1-CAM5	1.250°×0.942°	美国国家大气研究中心
4	CMCC-CM	0.750°×0.750°	意大利欧洲-地中海气候中心
5	CMCC-CMS	1.875°×1.875°	意大利地中海气候中心
6	CNRM-CM5	1.406°×1.401°	法国气象研究中心
7	CSIRO-Mk3-6-0	1.875°×1.875°	澳大利亚联邦科学与工业研究组织
8	CanESM2	2.813°×2.791°	加拿大气候模拟与分析中心
9	FGOALS-g2	2.813°×3.000°	中国科学院大气物理研究所
10	GFDL-CM3	2.500°×2.000°	美国地球物理流体动力学实验室
11	GFDL-ESM2G	2.500°×2.000°	美国地球物理流体动力学实验室
12	GFDL-ESM2M	2.500°×2.000°	美国地球物理流体动力学实验室
13	GISS-E2-H	2.500°×2.000°	美国国家航空与太空总署
14	GISS-E2-H-CC	2.500°×2.000°	美国国家航空与太空总署
15	GISS-E2-R	2.500°×2.000°	美国地球物理流体动力学实验室
16	GISS-E2-R-CC	2.500°×2.000°	美国国家航空与太空总署
17	IPSL-CM5A-LR	2.500°×1.268°	法国 Pierre-Simon 物理学研究所
18	IPSL-CM5A-MR	3.750°×1.895°	法国 Pierre-Simon 物理学研究所
19	IPSL-CM5B-LR	3.750°×1.895°	法国 Pierre-Simon 物理学研究所
20	MIROC-ESM	2.813°×2.790°	日本海洋地球科学与技术局、大气海洋研究所和国家环境变化研究所
21	MIROC-ESM-CHEM	2.813°×2.790°	日本海洋地球科学与技术局、大气海洋研究所和国家环境变化研究所
22	MIROC5	1.406°×1.400°	日本气候系统研究中心、国家环境研究所和全球变化研究中心
23	MPI-ESM-LR	1.875°×1.865°	德国普朗克气象研究所
24	MPI-ESM-MR	1.875°×1.865°	德国普朗克气象研究所
25	MRI-CGCM3	1.125°×1.121°	日本气象研究所
26	NorESM1-M	2.500°×1.895°	挪威气候中心
27	NorESM1-ME	2.500°×1.895°	挪威气候中心
28	bcc-csm1-1	1.250°×1.250°	中国气象局，北京气候中心
29	bcc-csm1-1-m	2.800°×2.800°	中国气象局，北京气候中心
30	inmcm4	2.000°×1.500°	俄罗斯数值模拟研究所

(Climatic Research Unit, CRU) 2015年发布的数据集(TS v3.23), 空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。与地面气象台站观测数据相比, CRU数据集融合了地面台站观测和其他辅助性数据源, 因而其时间跨度较大, 超过百年, 为评估模式长期的模拟性能奠定了基础。另外, CRU数据集采用了空间插值技术, 是一个标准的网格化数据集, 便于与模式网格数据直接对比分析。

2.2 分析方法

中国国土辽阔, 气候类型复杂多样, 不同地区的气候变化过程与机理也不尽相同, 因此本文将分区进行气候变化情景预估研究。其中, 温度分区参照中国气候区划^[33], 将中国划分为7个区, 分别是: 东北、农牧交错带、西北、华北、江淮、长江中下游和华南, 分别对应于气候区划中的中温带湿润—半湿润区、中温带半干旱区、中温带干旱区、暖温带、北亚热带、中亚热带和南亚热带。降水分区, 以800 mm等降水量分界线将中国划分为多雨、少雨两个区, 分别对应于湿润区和半湿润—干旱区(图1)。同时, 考虑到温度变化的季节差异, 分别进行冬半年(10月-次年4月)和夏半年(5-9月)温度预估。在区域和季节划分基础上, 本文的分析思路如下: 首先, 遴选出能够较好模拟气候变化波动特征的若干个模式, 以下称为“最佳模式”; 然后, 将历史观测数据作为因变量, 最佳模式模拟数据作为自变量, 构建单因素偏最小二乘(PLS)回归模型, 并分析了PLS回归模型不确定性的空间差异特征; 进而, 以此模型为工具, 利用最佳模式的情景模拟数据预估各区的气候变化情景; 最后, 将本文的预估结果(称为“PLS预估”)与等权重集合平均CMIP5全部模式的预估结果(称为“EMC预估”)进行对比分析。

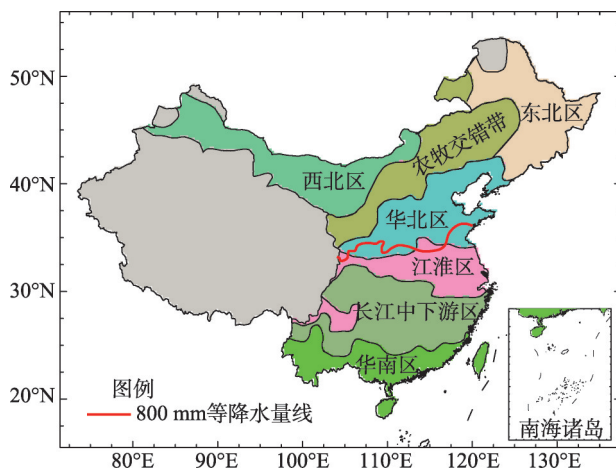


图1 中国温度与降水分区图

Fig. 1 Partition of temperature and precipitation in China

(1) 最佳模式遴选

① 初步遴选。计算区域历史模拟与观测数据(1931-2005年)之间的相关系数, 以二者呈正相关为标准, 初步遴选出部分模式。需要说明, 历史时段的选择依据同时考虑了历史观测数据的“真实性”和PLS建模所需要的样本量。具体而言, 越往早期观测站点越稀少, CRU数据中的插补成分越大; 同时, 为分段建立PLS回归模型, 以评估模型的稳定性, 又需要足够长度的时间序列(样本量)。综合考虑这两重因素, 本文采用的历史时段为1931-2005年。

② 二次精选。以历史观测为因变量, 以初步遴选模式的历史模拟为自变量, 通过分段建立PLS模型, 并进行交叉有效性检验, 评估模型的稳定性, 进而逐步剔除性能最差的模式, 保留性能较好的模式, 遴选出若干最佳模式。具体而言, 取1931-2005年的首(1931-1960年)、尾(1976-2005年)各30年, 分别建立PLS模型, 以下分别称为F30模型和L30模型, 然后采用F30和L30模型分别对其余时段进行预测, 即, 利用F30模型预测1961-2005年, 利用L30预测1931-1975年, 并将两套“预测”数据分别与各自对应时段观测资料进行相关性分析, 当两个模型预测数据与观测数据均呈显著正相关($p < 0.10$)时, 则认为PLS模型具备稳定的外推能力, 此时PLS模型中用作为自变量的模式

被称为最佳模式; 否则, 根据“初步筛选”步骤中各历史模拟与观测资料的相关系数剔除相关系数最小的模式, 再重复交叉有效性检验步骤, 循环往复, 直到F30模型与L30模型的“预测”数据与观测数据均呈显著正相关为止。

(2) 偏最小二乘法回归模型建立

由于CIMP5气候模式均是动力学模式, 建立于相同的物理学原理之上, 且均采用了IPCC指定的同一外强迫数据, 因此, 最佳模式模拟结果之间可能存在高度相关性。数据分析发现, 各模式模拟结果之间的确存在高度相关性。其中, 东北区、农牧交错带、西北区、长江中下游的冬半年和华南区的冬半年, 最佳模式集两两间的相关系数超过半数达到0.1的信度水平。由于存在高度相关关系, 直接以最优模式模拟结果作为自变量构建的多元回归模型的稳定性将比较差, 不宜用于外推预估。

偏最小二乘法是一种多元统计方法^[34], 集主成分分析、典型相关分析和多元回归分析于一体, 较好的解决了因自变量之间的多重相关性而导致结果误差大、稳定性低的问题^[35-37]。因此, 本文基于该方法建立了以各区最佳模式集为自变量, 以CRU历史数据为因变量的PLS模型。模型建立的过程可概括为4步^[38-39]: ① 矩阵标准化。将自变量(X)与因变量(Y)分别标准化(减去平均值除以标准差)得标准化矩阵 X_0 、 Y_0 。② 成分提取。分别提取 X_0 、 Y_0 的第1成分 u_1 、 v_1 (u_1 、 v_1 分别为 X_0 与 Y_0 的线性组合), 为满足回归分析的需求, u_1 和 v_1 的相关系数需达到最强, 且应尽可能多的包含变量中的变异信息。此后, 建立 X_0 和 Y_0 对 u_1 的回归方程:

$$\begin{cases} X_0 = u_1 p_1^T + X_1 \\ Y_0 = u_1 r_1^T + Y_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: X_1 、 Y_1 分别为 X_0 和 Y_0 的残差矩阵; p_1^T 、 r_1^T 为回归系数。在此基础上, 将 X_1 和 Y_1 分别取代 X_0 和 Y_0 , 提取第2个成分 u_2 , 同理提取第 r 个成分 u_r 。成分 u 的具体数量可根据交叉有效性检验判断。③ 建立回归方程。建立 Y_0 对成分 u_1, u_2, \dots, u_r 的回归方程, 并进一步将方程表示为 Y_0 对 X_0 的回归方程。④ 逆标准化。将 Y_0 对 X_0 的回归方程按照逆标准化的过程还原为 Y 对 X 的回归方程, 即偏最小二乘回归模型。有关利用交叉有效性检验提取成分个数的介绍参见文献[40]。

(3) 未来气候变化情景预估

利用上述过程以历史观测数据(1931-2005年)为因变量, 以最佳模式的同期模拟为自变量, 针对每个区域每个季节逐一建立了PLS模型。进而利用该模型及最佳模式的未来气候变化模拟结果, 预估了各区未来气候变化情景。需要说明的是, 对于少雨区而言, 达到本文遴选标准的最佳模式仅有一个, 即模式16, 不宜采用PLS建模。因此, 下文分析中直接采用了模式16的模拟结果。在研究区域方面, 鉴于青藏高原和塔里木盆地的历史资料短缺, 难以客观定量评估各模式的性能, 因而未被纳入本文的研究区域范畴。

3 结果分析

3.1 最佳模式集与全模式的模拟性能对比

图2展示了经过遴选之后不同区域、不同“季节”温度变化模拟的最佳模式及其历史模拟(1931-2005年)与观测数据的相关系数。从季节对比来看, 冬半年温度变化模拟的最佳模式数量与夏半年大致相当, 分别总计有50个(次)和51个(次)。然而, 夏半年区域之间最佳模式数量之差大于冬半年, 且存在鲜明的区域差异。具体而言, 在夏半年, 东北、农牧交错带和西北地区的最佳模式数量分别高达15个、12个和9个, 而华南

地区为6个,其余3个地区分别仅有3个;在冬半年,南方地区最佳模式数量略多于北方地区,江淮、长江中下游和华南地区的最佳模式数量分别为10个、9个和9个,东北和农牧交错带地区的最佳模式数量分别为8个和6个,其余两个地区均有4个。这说明CMIP5中的模式对冬半年南、北方温度变化的模拟能力基本相当,而对夏半年温度变化而言,对北方温度变化的模拟能力强于南方。但是,无论是冬半年还是夏半年,位于中部过渡地区的华北平原的最佳模式总是最少的,这反映了大多数模式对气候过渡地区的温度变化模拟能力较弱。就模式间的差异来看,对夏半年温度变化模拟能力相对较高的模式是模式17,出现在5个区域,其次是模式1、2、3、7、8、10、18、22、29,均出现在3个区域。对冬半年温度变化模拟能力相对较高的模式是24,出现在6个区域,其次是模式12,出现在5个区域。

对降水而言,最佳模式相对较少,少雨区仅有模式16,多雨区只有两个模式,即模式5和模式21。这说明大多数模式都不能较好的再现历史观测的降水变化,由此突显模式对中国降水变化的模拟能力普遍偏弱。

表2展示了不同气候模式组合和不同集合平均方法对历史观测数据的预估能力。如表所示,最佳模式等权重集合平均的模拟结果与观测资料的相关系数普遍高于全部模式等权重集合平均的结果,在降水数据方面尤为明显。全部模式等权重集合平均模拟的降水与观测数据不存在显著正相关关系,甚至在多雨区呈负相关关系,而最佳模式等权重集合平均模拟的降水与观测数据呈正相关,且均通过99%的信度检验。这表明,通过遴选建立的“最佳模式组合”较好的捕捉到了区域气候变化信息;而全部模式的等权集合平均可能造成模式间变化信号的相互抵消,从而使得集合平均序列的变率较小,与观测序列没有显著相关关系。由此印证最佳模式集的预估能力强于全部模式。

同时,与等权重最佳模式的预估相比,基于最佳模式建立PLS模型的预估结果与观测数据的相关性在各区域、季节普遍偏高。因此,相比等权重集合平均,基于偏最小二乘法的加权平均更为合理,展示了更强的模拟能力。此外,通过交叉有效性检验可知,基于最佳模式建立的PLS模型也具有较稳定的稳定性,具备稳定的外推“预估”能力。如表2所示,基于最佳模式及偏最小二乘法建立的F30模型与L30模型的外推“预估”序列与同期观测数据的相关性至少通过了90%的显著性检验,且绝大多数的显著水平超过了95%,展示了稳定的外推能力。因此,基于最佳模式集建立的偏最小二乘回归模型,相比等权重集合平均具备较强的模拟能力,同时也具备稳定的外推预估能力,可用于多模式集合预估。

由此可见,通过筛选而得的“最佳模式组合”对区域气候变化具有较强的模拟能

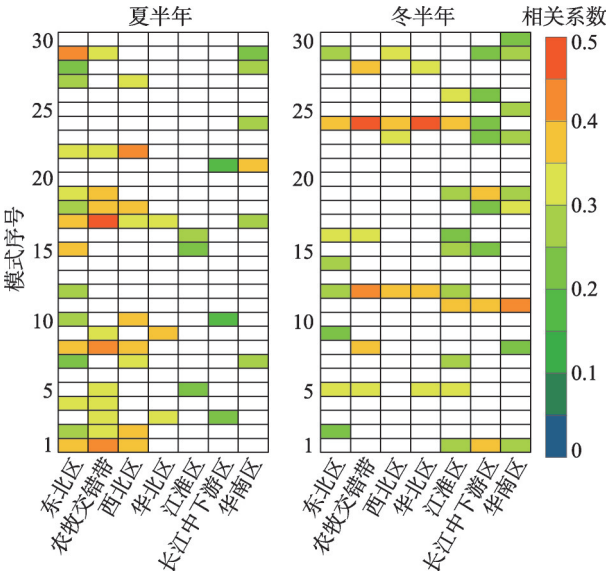


图2 各区域最佳模式及其历史模拟与观测数据的相关系数(模式序号见表1)

Fig. 2 The selected model for each region and the correlation coefficients between historical simulation and observation

表2 不同模式组合、不同集合方法的性能对比

Tab. 2 Comparisons among the performance of model group and ensemble method

变量	区域	季节	最佳模式PLS模型外 推序列与同期 CRU序列相关性		全部模式PLS模型外 推序列与同期 CRU序列相关性		等权集合平均序列 与CRU序列相关性, 1931-2005年		最佳模式PLS 模拟与CRU 相关性
			F30 ≥ L45	L30 ≥ F45	F30 ≥ L45	L30 ≥ F45	最佳模式	全模式	1931-2005年
温度	东北区	夏	0.64****	0.52****	0.45***	0.28*	0.60****	0.51****	0.64****
		冬	0.43***	0.34**	0.21	0.08	0.58****	0.48****	0.59****
	农牧 交错带	夏	0.65****	0.37**	0.22	0.12	0.64****	0.52****	0.67****
		冬	0.64****	0.31**	0.34**	0.22	0.66****	0.56****	0.67****
	西北区	夏	0.58****	0.30**	-0.06	0.07	0.52****	0.46****	0.54****
		冬	0.50****	0.32**	0.33**	0.22	0.55****	0.46****	0.56****
	华北区	夏	0.63****	0.28*	-0.03	0.15	0.47****	0.37****	0.49****
		冬	0.68****	0.30*	0.53****	0.19	0.62****	0.56****	0.65****
	江淮区	夏	0.40***	0.35**	0.28*	0.12	0.40****	0.25**	0.42****
		冬	0.71****	0.55****	0.44***	0.37**	0.70****	0.50****	0.71****
	长江中 下游区	夏	0.30*	0.35**	0.18	0.05	0.32**	0.03	0.35***
		冬	0.55****	0.42***	0.48****	0.36**	0.54****	0.35***	0.57****
	华南区	夏	0.35**	0.35**	-0.04;	0.21;	0.56****	0.34***	0.51****
		冬	0.48***	0.35**	0.24	0.21	0.53****	0.33***	0.54****
降水	少雨	年	-	-	-	-	0.27**	0.05	-
	多雨	年	0.43**	0.44**	0.32**	0.27*	0.40****	-0.12	0.43****

注：*：p < 0.1；**：p < 0.05；***：p < 0.01；****：p < 0.001；F30、L45、L30、F45分别为1931-1960年、1961-2005年、1976-2005年、1931-1975年，例如F30 ≥ L45表示以1931-1960年为“训练期”，外推（“预测”）1961-2005年；因少雨区“最佳集”仅包括一个模式，即只有一个自变量，不宜建立PLS模型；阴影仅为便于查看。

力，基于此建立的偏最小二乘回归模型的模拟能力强于等权集合平均方法，且具备稳定的外推预估能力，可用于多模式集合预测。

但是，即使基于最佳模式建立的PLS模型相较于等权重集合平均方法具有上述优点，但是PLS模型仍旧有一定的不确定性，模拟结果对观测数据的方差解释量最大为50%，并且PLS模拟结果的不确定性呈现出一定的季节和空间分异规律。夏半年，PLS模型对中国南北气候过渡区模拟结果的不确定性相对较大，在其它区域不确定性相对较小；而在冬半年却基本呈现出相反的空间相位。具体而言，在夏半年，PLS模型在中国东北、西北和农牧交错带的模拟能力较强，方差解释量约为38%，华南地区次之，中国华北—江淮—长江中下游一带最弱，方差解释量约为18%；在冬半年，PLS模型在农牧交错带—江淮—华北一带模拟能力最强，方差解释量约为46%，东北地区次之，西北，长江中下游—华南区较弱，方差解释量约为31%，呈现出与夏半年大致相反的空间格局。上述特征在基于全部模式建立的PLS模型与等权重集合平均结果中均有所体现，这可能属于CMIP5模式的“共同信号”，而与多模式集合方法关系甚微。

3.2 21世纪中国气候变化预估

3.2.1 温度变化预估 图3展示了不同排放情景下21世纪分区域的温度变化。在两种排放情景下21世纪期间各区温度均呈上升趋势，但温度上升过程和升高幅度随排放情景、“季节”（冬、夏半年）和地区而异。总体特征是：RCP 8.5情景下的升温速率高于RCP 4.5情景，冬半年升温速率大于夏半年，北方地区升温速率高于南方地区。具体而言，RCP 4.5情景下，冬半年升温速率为0.17~0.37℃/10a，夏半年升温速率为0.08~0.28℃/10a，

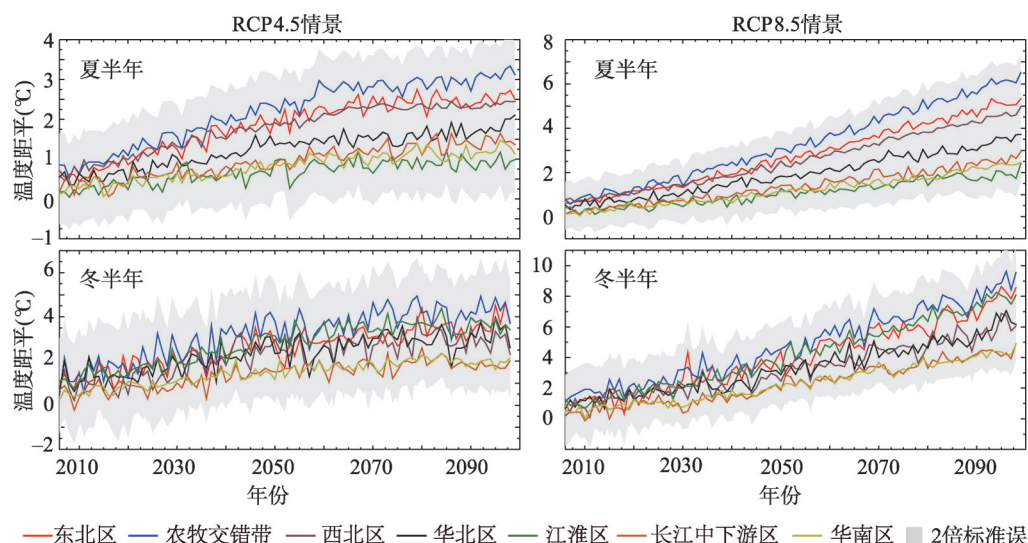


图3 不同排放情景下21世纪中国分区域的温度变化(距平参考:1971-2000年)

Fig. 3 Temperature changes for each region during the 21st century (anomaly refers to mean of 1971-2000)

RCP 8.5 情景下, 冬半年和夏半年的升温速率则分别高达 $0.55\sim 0.83\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.20\sim 0.55\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。且RCP 4.5 情景下的温度上升过程呈现转折特征, 转折点大致出现在21世纪中叶, 此前温度上升明显快于之后。而RCP 8.5 情景下, 温度上升过程呈稳定持续上升态势。

就区域差异而言, RCP 4.5 情景下区域之间夏季温度上升速率相对大小与RCP 8.5 情景下的基本一致, 农牧交错带的升温速率总是最大, 其次是东北和西北地区, 再次是华北平原地区, 南方3个地区升温速率较小, 其中江淮地区升温速率最小。冬半年升温速率, 也是农牧交错带最大, 南方地区较小, 其中长江中下游和华南地区最小。与夏季不同的是, 冬季江淮地区升温速率较大, 稍低于农牧交错带, 与东北地区大致相当, 位居第二位; 而西北地区升温速率相对较低, 与华北平原大致相当, 处于第三位。北方快速升温, 南方升温相对较慢, 致使在未来气候变化情景下, 中国东部南、北方的温度梯度逐步缩小, 且冬半年表现尤为明显, 这与过去几十年全球变暖背景下, 中国区域的温度变化特征是一致的。

3.2.2 降水变化预估 图4展示了不同排放情景下21世纪分区域降水变化。21世纪中国降水变化总体呈显著增加趋势, 增加速率因排放情景和区域而异。总体特征是: RCP 8.5 情景下的降水增加速率大于RCP 4.5 情景, 少雨区的降水增加速率大于多雨区。具体而言, RCP 4.5 排放情景下, 少雨区与多雨区的增加趋势分别为 $0.57\%/10\text{a}$ ($p < 0.1$) 和 $0.22\%/10\text{a}$ ($p < 0.01$); RCP 8.5 排放情景下分别为 $1.04\%/10\text{a}$ ($p < 0.01$) 和 $0.31\%/10\text{a}$ ($p < 0.01$)。但是, 与温度的变化特征不同, 降水变化并非是“准线性”的增加趋势, 而是呈现出较为明显的年代际波动, 其中RCP 8.5 情景下的年代际变率大于RCP 4.5 情景下的, 少雨区的年代际变率大于多雨区的。具体而言, 在RCP 4.5 情景下, 多雨区和少雨区的降水年代际变化呈现出几乎相似的特征, 21世纪20年代和60年代降水相对偏少, 40年代相对偏多。RCP 8.5 情景下, 多雨区和少雨区的降水年代际变化特征出现较大差异。多雨区的降水在21世纪20-50年代维持较低水平, 此后呈现明显上升趋势, 并在70年代达到峰值, 而后呈现下降趋势。少雨区的降水则是在21世纪10-40年代持续上升, 40-60年代趋于下降, 并在60年代达到谷底, 而后再次呈现上升趋势。

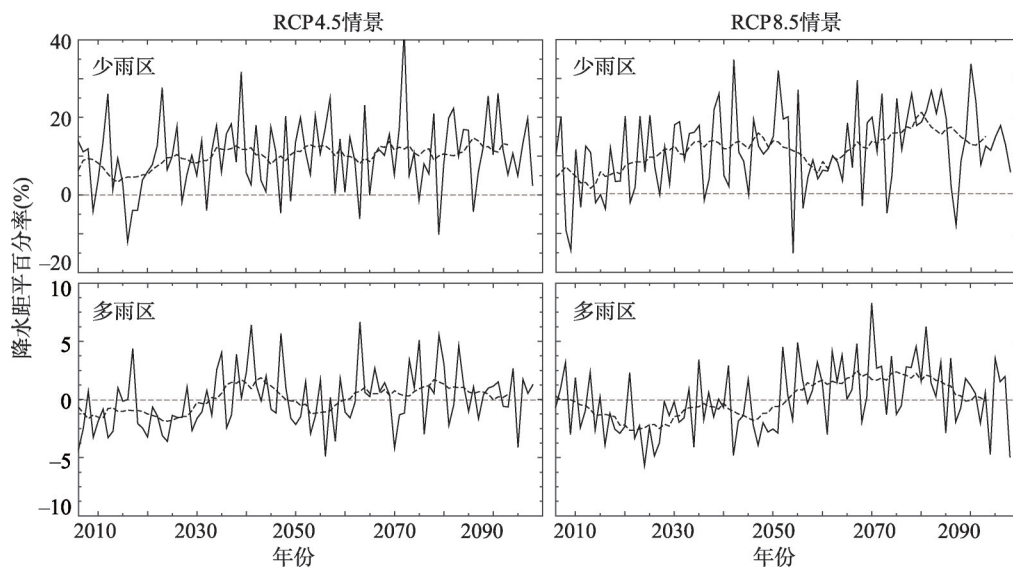


图4 不同排放情景下21世纪中国分区域降水变化(虚线为11年滑动平均)

Fig. 4 Precipitation changes for each region during the 21st century (The dotted line is 11-year moving average)

3.3 与EMC预估结果的对比

3.3.1 温度变化 图5展示了EMC方法与本文预估的温度变化之差。其差异性因季节、区域和排放情景表现各异。就冬半年温度变化而言, EMC方法预估北方升温速率略低于本文预估结果, 其中以农牧交错带和江淮地区的升温速率低估最为明显, 以RCP 4.5情景为例, 本文预估的农牧交错带和江淮地区升温速率分别为 $0.37\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 而MME预估仅为 $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。对于南方长江中下游和华南地区来说, EMC预估的升温速率则略低于本文结果。就夏半年温度变化而言, EMC预估的升温速率较本文偏高, 且二者之差呈现明显的地域分异规律, 具体表现为自北向南EMC方法的高估幅度逐渐增加, 且RCP 8.5情景下的高估幅度大于RCP 4.5情景。由于EMC方法高估了夏季升温速率, 且低估了北方大部分地区的冬季升温速率, 这导致EMC方法预估的中国夏季变暖速率高于冬季, 例如, 农牧交错带RCP 4.5排放情景下EMC方法预估的冬、夏半年温度升高速率分别为 $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, RCP 8.5排放情景下分别为 $0.60\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.59\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$; 本文预估该地区RCP 4.5情景下冬、夏半年升温速率分别为 $0.37\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.28\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, RCP 8.5情景下分别为 $0.83\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.62/10\text{a}$ 。这有悖于近几十年观测到的全球变暖基本特征——冬季升温速率大于夏季, 而本文的预估结果则与此特征一致。

3.3.2 EMC对降水变化的预估 图6展示了EMC方法与本文预估的降水变化之差, EMC方法与本文预估的21世纪降水变化共同呈现增加的趋势, 且少雨区增速大于多雨区, RCP 8.5情景增速大于RCP 4.5情景。同时, EMC方法与本文的预估结果也有明显的差异, 主要表现为两点: ① EMC方法预估的降水增加速率大于PLS; ② EMC方法预估的降水变化更接近于线性变化, 年代际变率信号较弱。具体而言, EMC方法预估的RCP 4.5情景下多雨区和少雨区的降水增加速率分别为 $0.70\%/10\text{a}$, $1.14\%/10\text{a}$, RCP 8.5情景下多雨区和少雨区的降水增加速率则分别为 $0.90\%/10\text{a}$, $0.19\%/10\text{a}$, 均高于PLS的预估结果。更为重要的是, 由于模式之间正、负距平的抵消效应, EMC预估的降水变化过程基本是“线性”增加, 年代际波动极其微弱。然而, 历史气候变化表明中国降水具有鲜明的年代际变化特征。因此EMC预估的降水准线性变化有悖于历史降水变化事实特征。

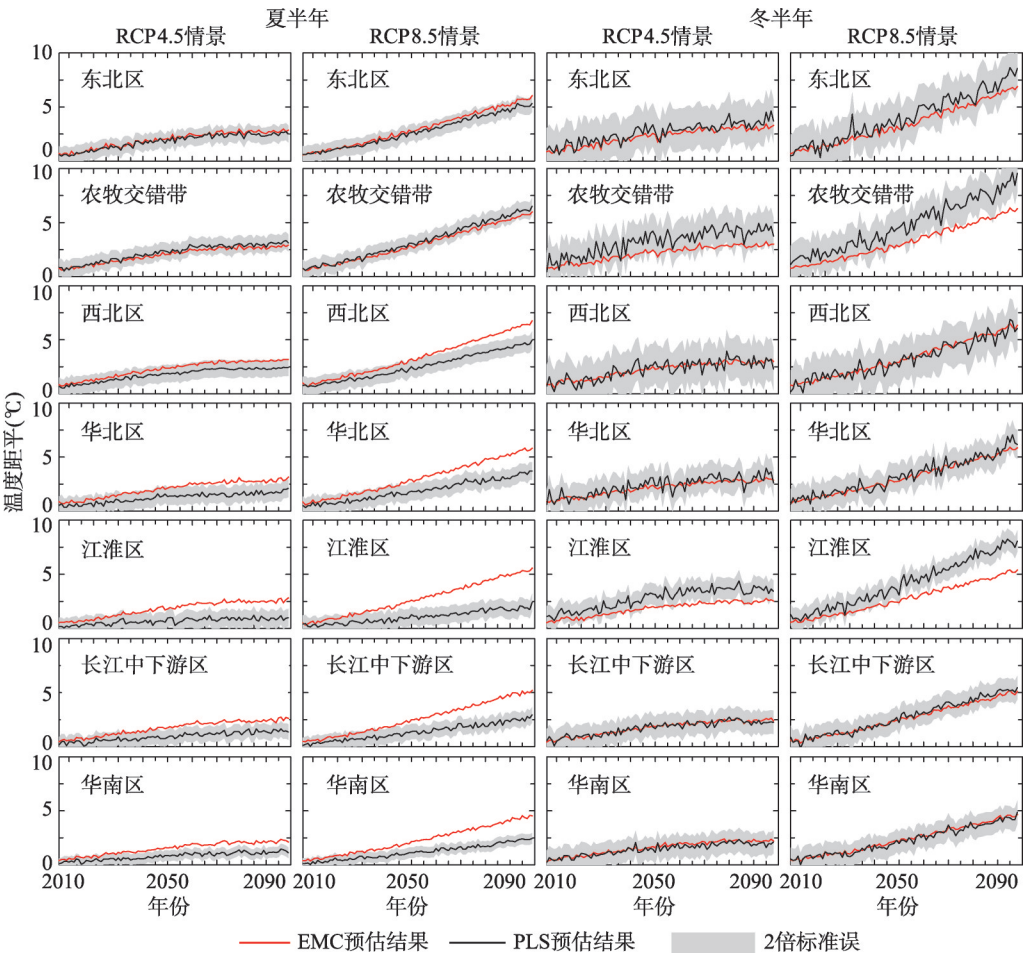


图5 EMC方法与PLS方法预估的温度变化之差(虚线为11点滑动平均)

Fig. 5 Comparisons of temperature changes projected by EMC method and PLS method

4 结论与讨论

4.1 结论

本文通过评估CMIP5模式对中国区域气候的模拟能力遴选出最佳模式，进而以最佳模式模拟结果为自变量，以区域温度和降水为因变量，建立PLS模型，并利用该模型对21世纪中国（青藏高原和塔克拉玛干沙漠地区除外）区域气候变化进行了多模式集合预估。基于历史观测数据的验证表明，通过上述过程建立的区域温度和降水PLS多模式集合预估模型相较于传统等权重集合平均多模式预估的性能有所提高，且模型更为稳定。PLS多模式集合预估结果显示：① 21世纪各区域温度将持续上升，且冬半年升温速率总体大于夏半年，北方地区升温速率总体高于南方地区，与郅俊岭等^[41]、杨绚等^[42]的研究结果基本一致；RCP 4.5排放情景下温度上升先快后慢，转折点出现在21世纪中期，RCP 8.5排放情景下，呈持续增加趋势，至21世纪末的升温幅度约为RCP 4.5情景的2倍，与张艳武等^[27]的研究结果基本一致。② 21世纪各区降水变化均呈显著增加趋势，并表现出高排放情景大于低排放情景，少雨区大于多雨区的特征，这与江志红等^[43]研究结果基本一致；但是降水上升过程伴有明显的年代际波动。

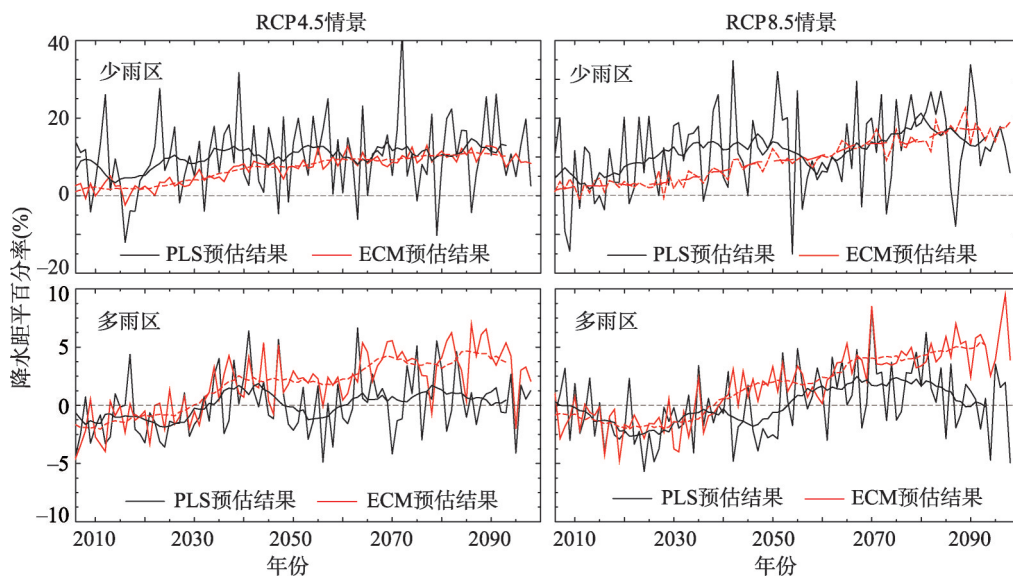


图6 EMC方法与PLS方法预估的降水变化之差(虚线为11点滑动平均)

Fig. 6 Comparisons of precipitation changes projected by EMC method and PLS method
(The dotted line is 11-year moving average)

与本文预估结果相比,传统的全部模式等权重集合平均(EMC)的温度和降水预估结果均在一定程度上有悖于历史观测事实的基本特征。① EMC方法高估了夏季升温速率,低估了北方大部分地区的冬季升温速率,这导致预估的中国夏季变暖速率高于冬季,有悖于近几十年观测到的全球变暖基本特征——冬季升温速率大于夏季。② EMC方法预估的降水基本是“线性增加,年代际波动极其微弱,这有悖于中国降水具有鲜明的年代际变化特征的基本认识。这进一步印证了遴选高性能的模式进而构建基于PLS的多模式集合预估模型有助于提高预估准确性。

4.2 讨论

如引言所述,加权集合平均的核心环节在于权重的定义,目前国内外尚没有统一的权重计算方法,除了本文尝试使用的PLS模型以外,当前尚有一些其他方法,比如贝叶斯模型集合。在后续研究中值得对不同的权重方案进行对比分析。除了本文涉及的统计降尺度以外,基于区域气候模式的动力降尺度也是进行区域气候变化情景预估的有效手段。目前,统计、动力相结合的区域气候情景预估研究逐渐成为一个新的区域气候预估手段。另外,由于新疆和西藏地区的历史观测站点较少,资料不确定性较大,影响了本文对CMIP5模式在该地区模拟性能的评估,因此未将两地纳入本文研究范围。再就是本文评估发现多数CMIP5模式均不能较好的模拟中国区域降水,导致在降水预估方面遴选出的最佳模式严重偏少。虽然其在历史降水模拟方面具有相对较强的模拟能力,但由于数量较少,在一定程度上增加了预估结果的不确定性。

本文对PLS模型不确定性的分析发现,其不确定性存在明显的季节差异和地域分异规律。具体来说,夏半年,PLS模型预估结果的不确定性在中国南北气候过渡区相对较大,在其他地区相对较小,而在冬半年大致呈现反相位。这种时间和空间分异规律不仅出现在PLS集合预估中,也普遍存在于多种集合预估中。集合预估的这种“共同”不确定性可能意味着这是来自于CMIP5模式的共性信号。换言之,这意味着CMIP5模式模拟结果的不确定性本身就存在明显的时间和空间差异,这为今后模式改进提供了线索。

参考文献(References)

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis//Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Final Draft Underlying Scientific-Technical Assessment. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2012: 5.
- [2] Wang Chenghai, Wu Yongping, Cui Yang. Evaluating the progress of the CMIP and its application prospect in China. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(5): 461-468. [王澄海, 吴永萍, 崔洋. CMIP 研究计划的进展及其在中国地区的检验和应用前景. *地球科学进展*, 2009, 24(5): 461-468.]
- [3] Guo Y, Dong W J, Ren F M, et al. Surface air temperature simulations over China with CMIP5 and CMIP3. *Advances in Climate Change Research*, 2013, 4(3): 145-152.
- [4] Qu X, Huang G, Zhou W. Consistent responses of East Asian summer mean rainfall to global warming in CMIP5 simulations. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, 117(1): 123-131.
- [5] Zhu Xian, Dong Wenjie. Evaluation and projection of northern hemisphere March-April snow covered area simulated by CMIP5 coupled climate models. *Advances in Climate Change Research*, 2013, 9(3): 173-180. [朱献, 董文杰. CMIP5 耦合模式对北半球 3-4 月积雪面积的历史模拟和未来预估. *气候变化研究进展*, 2013, 9(3): 173-180.]
- [6] Elguindi N, Grundstein A, Bernardes S, et al. Assessment of CMIP5 global model simulations and climate change projections for the 21st century using a modified Thornthwaite climate classification. *Climatic Change*, 2014, 122(4): 523-538.
- [7] Zhou Xiuhua, Xiao Ziniu. Climate projection over Yunnan province and the surrounding regions based on CMIP5 data. *Climatic and Environmental Research*, 2014, 19(5): 601-613. [周秀华, 肖子牛. 基于 CMIP5 资料的云南及周边地区未来 50 年气候预估. *气候与环境研究*, 2014, 19(5): 601-613.]
- [8] Wu Jia, Zhou Botao, Xu Ying. Response of precipitation and its extremes over China to warming: CMIP5 simulation and projection. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(9): 3048-3060. [吴佳, 周波涛, 徐影. 中国平均降水和极端降水对气候变暖的响应: CMIP5 模式模拟评估和预估. *地球物理学报*, 2015, 58(9): 3048-3060.]
- [9] Li Kailin, Zhi Hai, Bai Wenrong. Evaluation and projection of the climatic characteristics of Aleutian low based on CMIP5 models. *Climatic and Environmental Research*, 2016, 21(5): 533-546. [李恺霖, 智海, 白文蓉. CMIP5 多模式对阿留申低压气候特征的模拟检验与预估. *气候与环境研究*, 2016, 21(5): 533-546.]
- [10] Chen L, Frauenfeld O W. Surface air temperature changes over the twentieth and twenty-first centuries in China Simulated by 20 CMIP5 models. *Journal of Climate*, 2014, 27(11): 3920-3937.
- [11] Liu Caihong, Yu Jinhua, Li Hongmei. Projected climate change under the RCPs scenario in the Qinghai Plateau. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(5): 1353-1361. [刘彩红, 余锦华, 李红梅. RCPs 情景下未来青海高原气候变化趋势预估. *中国沙漠*, 2015, 35(5): 1353-1361.]
- [12] Yao Yao, Luo Yong, Huang Jianbin. Evaluation and projection of temperature extremes over China based on 8 modeling data from CMIP5. *Advances in Climate Change Research*, 2012, 8(4): 250-256. [姚遥, 罗勇, 黄建斌. 8 个 CMIP5 模式对中国极端气温的模拟和预估. *气候变化研究进展*, 2012, 8(4): 250-256.]
- [13] Liu Y, Feng J, Zhuguo M A. An analysis of historical and future temperature fluctuations over China based on CMIP5 simulations. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, 31(2): 457-467.
- [14] Zhi Xiefei, Wang Jing, Lin Chunze, et al. Bayesian model average prediction on temperature by CMIP5 data. *Journal of Meteorological Sciences*, 2015, 35(4): 405-412. [智协飞, 王晶, 林春泽, 等. CMIP5 多模式资料中气温的 BMA 预测方法研究. *气象科学*, 2015, 35(4): 405-412.]
- [15] Liu Ke, Xu Yinlong, Tao Shengcai, et al. Validation of multi-model ensemble to air temperature of China and projection of air temperature change in China for the next three decades. *Plateau Meteorology*, 2011, 30(2): 363-370. [刘珂, 许吟隆, 陶生才, 等. 多模式集合对中国气温的模拟效果及未来 30 年中国气温变化预估. *高原气象*, 2011, 30(2): 363-370.]
- [16] Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, et al. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Encyclopedia of Language & Linguistics*, 2007, 12(1): 171-175.
- [17] Jiang D B, Zhang Y, Sun J Q. Ensemble projection of 1-3 degrees C warming in China. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(18): 3326-3334.
- [18] Huang P, Ying J. A multi-model ensemble pattern regression method to correct the tropical Pacific SST change patterns under global warming. *Journal of Climate*, 2015, 28(12): 4706-4723.
- [19] Zhang X, Yan X. A new statistical precipitation downscaling method with Bayesian model averaging: A case study in China. *Climate Dynamics*, 2015, 45(9): 1-15.
- [20] Chen Hong. Validation of the CMIP5 climate models in simulating decadal variations of summer rainfall in eastern China. *Climatic and Environmental Research*, 2014, 19(6): 773-786. [陈红. CMIP5 气候模式对中国东部夏季降水年代际变化的模拟性能评估. *气候与环境研究*, 2014, 19(6): 773-786.]
- [21] Hu Qin, Jiang Dabang, Fan Guangzhou. Climate change projection on the Tibetan Plateau: Results of CMIP5 models.

- Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(2): 260-270. [胡琴, 姜大膀, 范广洲. 青藏高原未来气候变化预估: CMIP5 模式结果. 大气科学, 2015, 39(2): 260-270.]
- [22] Tao Chunwei, Jiang Chao, Sun Jianxin. Projection of future changes in climate in Northeast China using a CMIP5 multi-model ensemble. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(10): 3580-3591. [陶纯苇, 姜超, 孙建新. CMIP5 多模式集合对东北三省未来气候变化的预估研究. 地球物理学报, 2016, 59(10): 3580-3591.]
- [23] Jiang Jiang, Jiang Dabang, Lin Yihua. Projection of monsoon area and precipitation in China under the RCP4.5 scenario. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(5): 901-910. [姜江, 姜大膀, 林一骅. RCP4.5 情景下中国季风区及降水变化预估. 大气科学, 2015, 39(5): 901-910.]
- [24] Zhang Wulong, Zhang Jingyong, Fan Guangzhou. Evaluation and projection of dry-and wet-season precipitation in southwestern China using CMIP5 models. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(3): 559-570. [张武龙, 张井勇, 范广洲. CMIP5 模式对我国西南地区干湿季降水的模拟和预估. 大气科学, 2015, 39(3): 559-570.]
- [25] Song Chunyang, Zhang Shouwen, Jiang Hua, et al. Evaluation and projection of SST in the China seas from CMIP5. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 38(10): 1-11. [宋春阳, 张守文, 姜华, 等. CMIP5 模式对中国近海海表温度的模拟及预估. 海洋学报, 2016, 38(10): 1-11.]
- [26] He Jinhai, Zhan Fengxing, Qi Li, et al. Evolution of surface temperature during global warming hiatus based on observations and CMIP5 simulations. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2016, 40(1): 33-45. [何金海, 詹丰兴, 祁莉, 等. 全球变暖减缓期陆地地表气温变化特征和 CMIP5 多模式的未来情景预估. 大气科学, 2016, 40(1): 33-45.]
- [27] Zhang Yanwu, Zhang Li, Xu Ying. Simulations and projections of the surface air temperature in China by CMIP5 models. Advances in Climate Change Research, 2016, 12(1): 10-19. [张艳武, 张莉, 徐影. CMIP5 模式对中国地区气温模拟能力评估与预估. 气候变化研究进展, 2016, 12(1): 10-19.]
- [28] Wu Haomin, Huang Anning, He Qing, et al. Projection of the spatial and temporal variation characteristics of precipitation over Central Asia of 10 CMIP5 models in the next 50 years. Arid Land Geography, 2013, 36(4): 669-679. [吴昊旻, 黄安宁, 何清, 等. 10 个 CMIP5 模式预估中亚地区未来 50a 降水时空变化特征. 干旱区地理, 2013, 36(4): 669-679.]
- [29] Zhou Tianjun, Zhao Zongci. Attribution of the climate warming in China for the 20th century. Advances in Climate Change Research, 2006, 2(1): 82-86. [周天军, 赵宗慈. 20 世纪中国气候变暖的归因分析. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 82-86.]
- [30] Latif M, Grötzner A, Münnich M, et al. A mechanism for decadal climate variability//Decadal Climate Variability. Berlin and Heidelberg: Springer, 1996: 263-292.
- [31] van Vuuren D P, Edmonds J, Kainuma M, et al. The representative concentration pathways: An overview. Climatic Change, 2011, 109: 5-31.
- [32] Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. An overview of CMIP5 and the experiment design. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(4): 485-498.
- [33] Zheng Jingyun, Bian Juanjuan, Ge Quansheng, et al. The climate regionalization in China for 1981-2010. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(30): 3088-3099. [郑景云, 卞娟娟, 葛全胜, 等. 1981-2010 年中国气候区划. 科学通报, 2013, 58(30): 3088-3099.]
- [34] Wold S, Albano C, Dunn M, et al. Pattern regression finding and using regularities in multivariate data//Martens J. Proc. IUFOST Conf. "Food Research and Data". London: Analysis Applied Science Publication, 1983.
- [35] Wold S, Trygg J, Berglund A, et al. Some recent developments in PLS modeling. Chemometrics & Intelligent Laboratory Systems, 2001, 58(2): 131-150.
- [36] Höskuldsson A. PLS regression methods. Journal of Chemometrics, 1988, 2(3): 211-228.
- [37] Geladi P, Kowalski B R. Partial least-squares regression: A tutorial. Analytica Chimica Acta, 1986, 185(86): 1-17.
- [38] Deng Nianwu, Xu Hui. Model of simple partial least squares regression and its application. Engineering Journal of Wuhan University, 2001, 34(2): 14-16. [邓念武, 徐晖. 单因变量的偏最小二乘回归模型及其应用. 武汉大学学报工学版, 2001, 34(2): 14-16.]
- [39] Zhao Zhongjun, Liu Shanliang, You Daming, et al. Application of partial least square regression on precipitation prediction during the flood season in Liaoning province. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(6): 1038-1044. [赵中军, 刘善亮, 游大明, 等. 偏最小二乘回归模型在辽宁汛期降水预测中的应用. 干旱气象, 2015, 33(6): 1038-1044.]
- [40] Ma Mingde, Ma Xuejuan, Xie Yingzhong, et al. Analysis the relationship between ecological footprint (EF) of Ningxia and influencing factors: Partial Least-Squares Regression. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(3): 682-689. [马明德, 马学娟, 谢应忠, 等. 宁夏生态足迹影响因子的偏最小二乘回归分析. 生态学报, 2014, 34(3): 682-689.]
- [41] Tan Junling, Jiang Zhihong, Ma Tingting. Projections of future surface air temperature change and uncertainty over China based on the Bayesian Model Averaging. Acta Meteorologica Sinica, 2016, 74(4): 583-597. [郝俊岭, 江志红, 马婷婷. 基于贝叶斯模型的中国未来气温变化预估及不确定性分析. 气象学报, 2016, 74(4): 583-597.]

- [42] Yang Xuan, Li Dongliang, Tang Xu. Probability assessment of temperature and precipitation over China by CMIP5 multi-model ensemble. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(3): 795-804. [杨绚, 李栋梁, 汤绪. 基于CMIP5多模式集合资料的中国气温和降水预估及概率分析. *中国沙漠*, 2014, 34(3): 795-804.]
- [43] Jiang Zhihong, Zhang Xia, Wang Ji. Projection of climate change in China in the 21st century by IPCC-AR4 models. *Geographical Research*, 2008, 27(4): 787-799. [江志红, 张霞, 王冀. IPCC-AR4模式对中国21世纪气候变化的情景预估. *地理研究*, 2008, 27(4): 787-799.]

Ensemble projection of climate change scenarios of China in the 21st century based on the preferred climate models

ZHANG Xuezhen¹, LI Xiexiang², XU Xinchuang³, ZHANG Lijuan²

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Key Laboratory of Remote Sensing Monitoring of Geographic Environment, College of Heilongjiang Province, Harbin Normal University, Harbin 150025, China; 3. The School of Resources Environment Science and Technology, Hubei University of Science and Technology, Xianning 437100, Hubei, China)

Abstract: Projection of future climate change scenarios provides the scientific basis for addressing climate change and for proposing strategies of adapting climate change. This study used the simulation data of 30 climate models, which were evolved in the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5). Through evaluating the performance of each model on simulating the historical climate change, the preferred climate models were selected. Then, using the outputs of preferred climate models as independent variables and using ground measurements as dependent variables, the partial least squares regression (PLS) models were constructed for temperature and precipitation, respectively, of each region of China. By analyzing the ensemble predictions of regional temperature and precipitation changes, we found that the PLS ensemble mean of preferred climate models is closer to the ground measurements than the PLS ensemble mean of all of the climate models and the traditionally arithmetic average-based ensemble mean. The PLS ensemble projections of preferred climate model showed that climate warming would generally continue during the 21st century, which would be stronger in the cold half-year and in the northern regions than that in the warm half-year and in the southern regions. Under the scenario of RCP 4.5, the climate warming would be stronger in the first half of the 21st century and weaker in the second half. Under the scenario of RCP 8.5, the climate warming would keep nearly constant rate and, by the end of 21st century, the temperature would rise by two folds of that under the scenario of RCP 4.5. The increasing trend of precipitation would be stronger under the scenario of RCP 8.5 than that under the scenario of RCP 4.5 and would be stronger in the dry regions than that in the rainy regions with decadal oscillations. Finally, the equal weighting ensemble projections of all of the climate models exhibit that climate warming would be stronger in summer than in winter and that precipitation would increase linearly without decadal oscillations. These findings are opposite to the primary characters of climate changes that climate warming is stronger in winter than in summer and precipitation has strong inter-decadal variability. Thereby, the PLS-based ensemble mean of preferred climate model may provide reasonable projections of future temperature and precipitation changes.

Keywords: CMIP5; climate change; preferred models; scenario; China