高冬冬, 丹利, 范广洲, 等. 2019 地球系统模式中植被净初级生产力百年尺度时空变化及其与气候的关系 [J]. 气候与环境研究, 24(6): 663–677. GAO Dongdong, DAN Li, FAN Guangzhou, et al. 2019. Spatial and Temporal Variations of Net Primary Productivity at Century Scale in Earth System Models and Its Relationship with Climate [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(6): 663–677. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18052

地球系统模式中植被净初级生产力百年尺度时空变化及其与气候的关系

高冬冬[1,2] 丹利[2] 范广洲[1] 彭静[2] 杨秀静[2,3] 杨富强[2,3] 李悦悦[3,4]

1 成都信息工程大学大气科学学院，成都 610225
2 中国科学院东亚区域气候—环境重点实验室，中国科学院大气物理研究所，北京 100029
3 中国科学院大学，北京 100049
4 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室，中国科学院地理科学与资源研究所，北京 100101

摘　要　利用6个地球系统模式模拟的植被净初级生产力（NPP）对1901～2005年NPP时空变化进行了研究，并结合气候因子分析了NPP的变化与气温和降水的关系。结果表明：（1）近百年来全球NPP呈现上升趋势，模式集合平均的趋势系数为0.88，通过了99.9%的信度检验；北半球的趋势比南半球明显。（3）近百年来800 g(C) m^{-2} a^{-1}以上的NPP高值区主要分布在南美洲赤道地区、非洲赤道地区、中南半岛和印度尼西亚一带的热带雨林区；低值区主要分布在北半球高纬度地区、非洲北部地区、亚洲大陆干旱半干旱区以及青藏高原西北部地区。（3）全球NPP与气温百年演变在大部分地区主要为正相关关系，仅在赤道附近的南美洲、非洲以及印度地区为负相关关系，主要由于这些地区辐射是NPP的限制因子。全球NPP与降水的百年变化在大部分地区也主要是正相关关系，在非洲北部到西亚中亚的干旱半干旱地区为负相关关系。（4）6个地球系统模式在全球21个区域的大部分地区的NPP和气温降水的变化关系较为一致，西非地区不同模式变化不一致，NPP模拟的不确定性较大，其次是地中海地区。（5）东亚地区NPP与气候的百年演变同步并且相关性高，反映了强烈的植被大气相互作用过程。

关键词　净初级生产力（NPP）　气温　降水　地球系统模式　百年尺度
文章编号　1006-9585(2019)06-0663-15　　**中图分类号**　P461+.8　　**文献标识码**　A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18052

Spatial and Temporal Variations of Net Primary Productivity at Century Scale in Earth System Models and Its Relationship with Climate

GAO Dongdong[1,2], DAN Li[2], FAN Guangzhou[1], PENG Jing[2], YANG Xiujing[2,3], YANG Fuqiang[2,3], and Li Yueyue[3,4]

1 *School of Atmospheric Sciences*, *Chengdu University of Information Science and Technology*, *Chengdu* 610225
2 *Chinese Academy of Sciences Key Laboratory of Regional Climate–Environment for East Asia*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
3 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049
4 *Key Laboratory of Terrestrial Water Cycle and Earth Surface Processes*, *Chinese Academy of Sciences/Institute of Geographic*

收稿日期　2018-04-06；**网络预出版日期**　2019-05-24
作者简介　高冬冬，女，1992年出生，硕士，主要从事陆气相互作用与气候模拟研究。E-mail: gaodd@tea.ac.cn
通讯作者　丹利，E-mail: danli@tea.ac.cn
资助项目　国家重点研发计划课题2016YFA0602501，国家自然科学基金项目41630532,41575093
Funded by　National Key Research and Development Project (Grant 2016YFA0602501), National Natural Science Foundation of China (Grants 41630532 and 41575093)

Sciences and Natural Resources Research, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100101

Abstract The spatial and temporal changes in net primary productivity (NPP) during 1901−2005 were studied using six earth system models. The relationship between NPP changes and the climatic factors of air temperature and precipitation was analyzed. The results show that: (1) In the past 100 years, the global NPP has shown an upward trend. The trend coefficient of the ensemble model average is 0.88, which passes the 99.9% confidence test. The trend in the Northern Hemisphere is more pronounced than in the Southern Hemisphere. (2) In the past 100 years, high NPP values of 800 g(C) $m^{-2}a^{-1}$ or higher are mainly distributed in tropical rainforest areas in the equatorial regions of South America, Equatorial Africa, the Indochina Peninsula, and Indonesia. Low NPP values are mainly distributed in the high latitudes of the Northern Hemisphere, Northern Africa, the arid and semi-arid regions of the Asian continent, and the northwestern Tibetan Plateau. (3) The global NPP had a positive correlation with temperature in most of the regions during this century period. This correlation only becomes negative for South America, Africa, and India near the equator, mainly because radiation in these areas is a limiting factor of NPP. The 100-year changes in the global NPP and precipitation are also primarily positively correlated in most regions, but are negatively correlated in the arid and semi-arid regions of Northern Africa and Western Asia. (4) The six earth system models yield relatively consistent NPP and temperature/precipitation changes in most of the 21 regions of the world. In West Africa, the pattern changes are inconsistent where the uncertainty of the NPP simulation is greater, followed by the Mediterranean region. (5) In particular, the evolution of the NPP in the East Asia region and climate is synchronized and highly correlated, which reflects the strong process of atmospheric interaction with vegetation.

Keywords Net primary production (NPP), Temperature, Precipitation, Earth system models, Centennial scale

1 引言

自工业革命以来，由于化石燃料的燃烧和土地利用变化等，大气中CO_2的浓度持续升高，近年来已达390 ppm（10^{-7}）以上（Peng and Dan，2015）。联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第五次评估报告指出，人类活动导致的大气CO_2浓度上升是过去100年来气候变暖的主要驱动因子（IPCC，2013）。与气候变暖同步，全球降水格局也发生了改变（Dore，2005；Min et al.，2011）。这些全球变化现象已经对陆地生态系统的结构和功能产生了重大影响（Walther et al.，2002；Thomas et al.，2004；Maclean and Wilson，2011；Yu et al.，2014；朱再春等，2018）。

植被净初级生产力（Net Primary Productivity，NPP）是指单位时间、单位面积上植被所积累的有机物质的总量，是光合作用所吸收的碳和呼吸作用所释放的碳之间的差值（Field et al.，1998；Cramer et al.，1999；Matsushita and Tamura，2002）。NPP不仅可以表征生态系统的质量状况和生产能力，也是判定生态系统的碳源/汇功能和评价陆地生态系统可持续发展的重要因子（Imhoff et al.，2004；Haberl et al.，2007）。因此，国际生物圈计划（International Biology Plans，IBP）、世界气候研究计划（World Climate Research Programme，WCRP）、国际地圈—生物圈计划（International Geosphere Biosphere Program，IGBP）等均将其作为核心研究内容（IGBP，1998）。

气候因子与生态系统NPP的关系在学术界存在不同认识。已有研究表明，过去几十年的气候变化导致自然植被NPP呈增加趋势（Running et al.，2004；del Grosso et al.，2008）。Nemani et al.（2003）通过对全球陆地植被NPP与气候数据的综合分析，认为气候变化使气候胁迫因子得到缓解，全球陆地植被NPP总量增加了6%。增温对植被生理和生态方面的影响较为复杂，增温影响叶片气孔导度，对植被蒸腾作用和光合作用产生双重影响，在降雨不变的情况下产生水分胁迫，影响植被碳吸收（Xia et al.，2014）；另一方面，增温导致呼吸速率加快，进而导致树木向大气中释放CO_2增加（Melillo et al.，2002），森林碳汇功能减弱（王秋凤等，2004）。此外，由于热带地区温度更接近树木光合的理想温度（Corlett，2011），因而增温会降低光合速率，增加生态系统呼吸，从而影响生态

系统碳水交换（Wang et al.，2013）。对许多陆地生态系统而言，降雨量增加会提高生态系统生产力。我国学者研究发现降雨量及其季节分配格局变化显著影响温带陆地生态系统的生产力（Fang et al.，2005；Dan et al.，2007；彭静与丹利，2016）。刚成诚等（2016）从全球尺度研究，降水是影响草地NPP的主要气候因子，尽管草地NPP呈现增加的趋势，但暖湿化的气候变化对草地生态系统的结构和空间分布产生了不利的影响。

植被NPP估算的方法很多，主要以野外观测，模式估算和卫星遥感反演这3种方式为主。在全球或区域的大尺度研究中，采用模式计算结果与相关气候和生态资料进行对比分析是目前常用的一种研究方法，而且此种方法表现出其他方法不能比拟的优点，以至成为植被大尺度研究的一种重要方法（Dan and Ji，2007；Beer et al.，2010；Piao et al，2011；Rogers et al.，2017）。近年来，耦合植被生态系统—气候模式已经发展起来，可以反映生物圈与大气之间的相互作用，并且陆地碳循环与气候变化的关系在耦合模式中进行了研究（Dan and Ji，2007；於琍和朴世龙，2014）。

为了更好地理解在百年尺度上NPP时空动态变化及其与气温和降水的关系，本研究使用6个地球系统模式的NPP模拟结果，分析了近百年来NPP的时空变化特征，探讨了地球系统模式中NPP与气温和降水在全球和区域尺度上的关系。

2 资料与方法

2.1 研究区域与数据

为了分析区域降水与气温的特征，本文参考了Giorgi and Francisco（2000）的分类方法，将全球陆地生态系统划分为21个区域（图1和表1）（Giorgi and Francisco，2000；Peng et al.，2013；彭静和丹利，2016）。利用这种方法，从区域角度探讨陆地生态系统碳通量与气温和降水变化的关系。

表1 全球21个陆地生态系统分区详细情况

Table 1 Details of the 21 regional terrestrial ecosystems in the world

序号	区域名称	区域简称
1	澳大利亚（Australia）	AUS
2	亚马逊流域（Amazon Basin）	AMZ
3	南美洲南部（Southern South America）	SSA
4	中美洲（Central America）	CAM
5	北美洲西部（Western North America）	WNA
6	北美洲中部（Central North America）	CNA
7	北美洲东部（Eastern North America）	ENA
8	阿拉斯加（Alaska）	ALA
9	格林兰岛（Greenland）	GRL
10	地中海（Mediterranean Basin）	MED
11	北欧（Northern Europe）	NEU
12	西非（Western Africa）	WAF
13	东非（Eastern Africa）	EAF
14	南非（Southern Africa）	SAF
15	撒哈拉沙漠（Sahara）	SAH
16	东南亚（Southeast Asia）	SEA
17	东亚（Eastern Asia）	EAS
18	南亚（Southern Asia）	SAS
19	中亚（Central Asia）	CAS
20	西藏（Tibet）	TIB
21	北亚（Northern Asia）	NAS

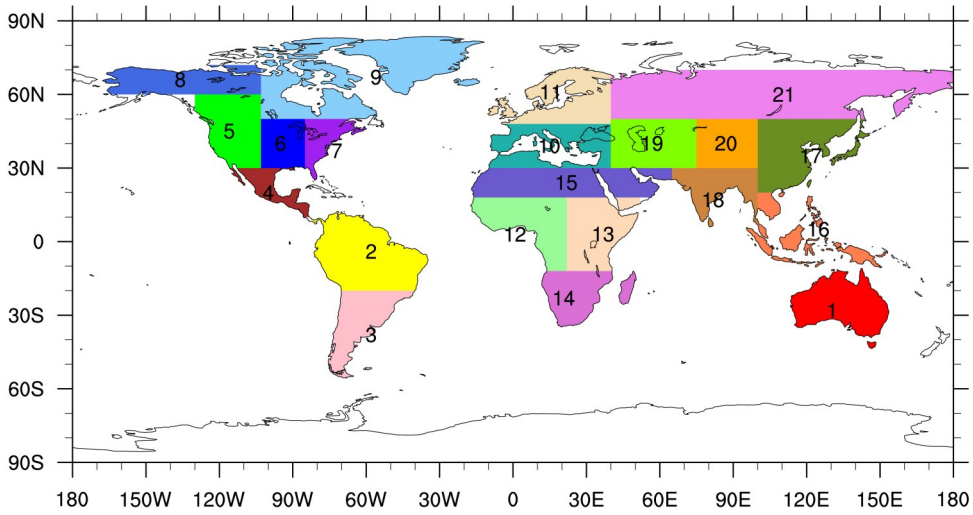

图1 全球21个区域的位置分布

Fig. 1 Distribution of 21 locations worldwide

本文选用了参与耦合模式比较计划CMIP5中6个地球系统模式模拟的NPP数据。经过筛选，在历史试验选取了以下6个模式（表2）。此外，本文还使用了东英吉利大学（University of East Anglia）气候研究中心（CRU）气温和降水资料，用于研究NPP与气温和降水的关系。

2.2 研究方法

2.2.1 气候倾向率

气候倾向率计算公式如下：

$$y_i = b + ax_i, \tag{1}$$

其中，i=1, 2, ..., n，y表示样本数为n的某一物理量，x表示y所对应的时间样本个数，a为回归系数，b为回归常数（魏凤英，2007）。

2.2.2 趋势系数

本研究根据前人的研究方法（施能等，1995, 2003；传博等，2019），计算了气候趋势系数r_{xt}。该趋势系数定义为样本数为n的物理量序列与自然数列1, 2, …, n的相关系数，r_{xt}的计算公式为

$$r_{xt} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(i - \bar{t})^2}}, \tag{2}$$

其中，x_i是第i个样本值，$\bar{x}$为样本均值，$\bar{t}=(n+1)/2$。从中可知，r_{xt}值为正（负）时，表示该物理量在n个样本内有增（降）的趋势。$r_{xt}\sqrt{n-1}/\sqrt{1-r_{xt}^2}$符合自由度$n$-2的$t$分布。

3 结果与讨论

3.1 净初级生产力（NPP）的空间分布

1901～2005年的多年平均NPP的空间分布上，各个模式存在一定的差异，但是总体呈现出以南美亚马逊地区、赤道非洲地区、中南半岛和印度尼西亚一带为高值区的的特征；北半球的高纬度地区、非洲北部地区、西亚到中亚干旱半干旱地区以及青

表2 本文选用的6个地球系统模式的基本信息

Table 2 Basic informations of the six earth system models used in the article

模式名称	来源国家	水平分辨率(经度×纬度)
CanESM2	加拿大	2.8°×2.8°
CCSM4	美国	1.25°×0.94°
MIROC-ESM	日本	2.8°×2.8°
MPI-ESM-P	德国	1.875°×1.875°
MRI-ESM1	日本	1.125°×1.125°
NorESM1-ME	挪威	2.5°×1.875°

藏高原地区为低值区的的特征；南北半球大部分地区 NPP 在 600～800 g(C) m^{-2} a^{-1}（图 2）。赤道附近水分热量非常充足，植被类型主要为常绿阔叶林，且大部分为热带雨林，植被立体空间层次梯度明显，林内物种类型众多，植被的生产力比较高；低值地区植被类型主要以沙漠、戈壁、荒漠、苔原为主，还有部分草地及开放灌丛，由于气候干旱或气温较低，因而限制了其光合生产能力，植被的生产力较低；北方森林地区、温带气候区以及亚热带气候区，这些地区水热条件较好，主要包括常绿针叶林、针阔混交林、落叶针叶林区和落叶阔叶林区，中部的灌丛和萌生矮林和农业植被区，因而植被生

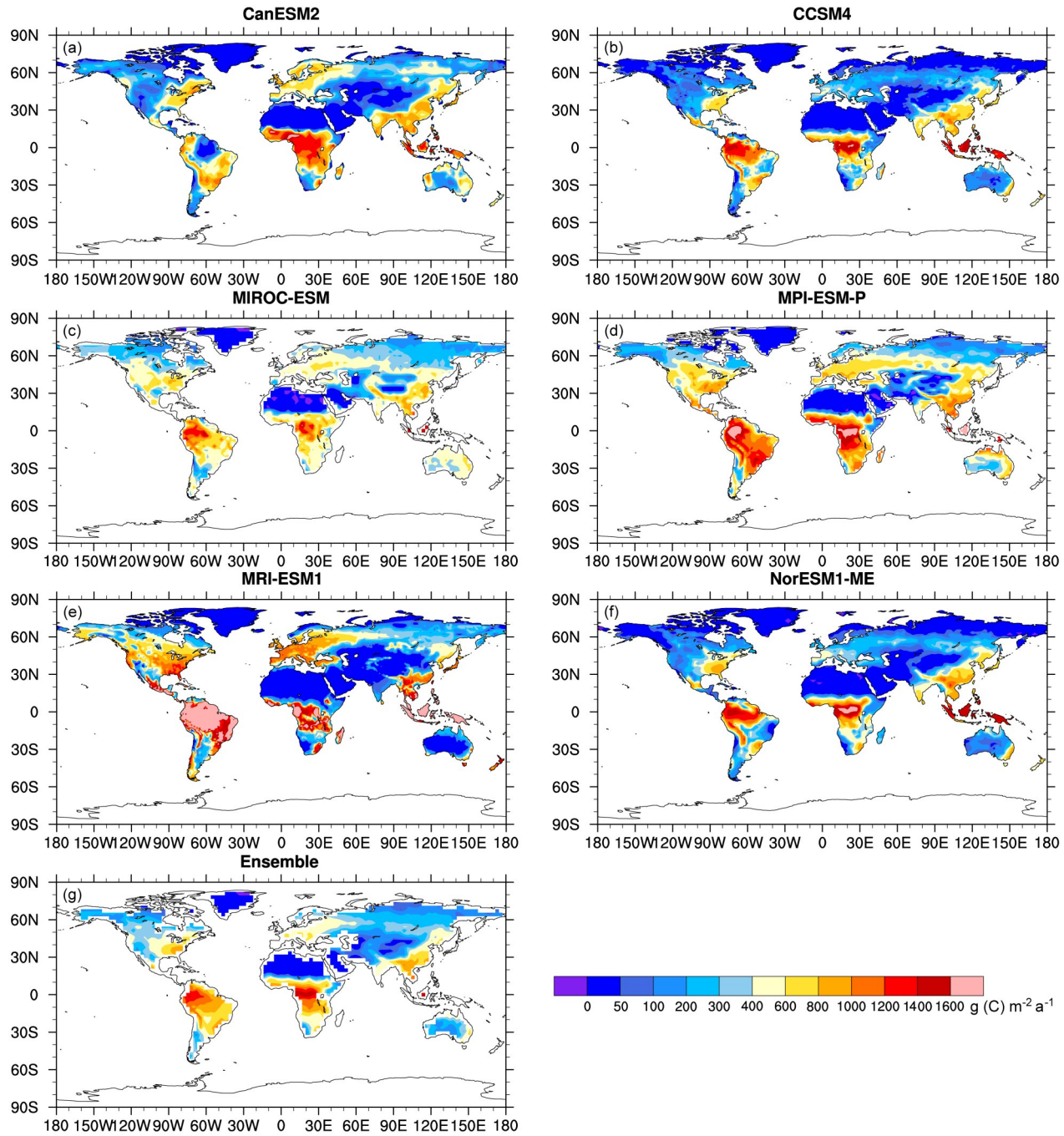

图2 1901～2005年6个地球系统模式与集合平均NPP的年平均值空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the annual NPP (Net Primary Productivity) obtained from the six earth system models and the ensemble mean averaged from 1901 to 2005

产力相对较高。

1901～2005年各个模式NPP标准偏差的空间分布上，总体呈现出和多年平均NPP的空间分布类似的特征（图3）。标准差是基于每个格点逐年资料计算的，反映的是NPP年际变率的大小。高值区主要分布在赤道附近一带；低值区主要在北半球高纬度地区和南半球南美南端，澳大利亚中心部、非洲北部地区、西亚到中亚荒漠半沙漠地区以及青藏高原地区；北半球中纬度大部分地区的分布介于其间。南半球的NPP标准差总体大于北半球，比如就集合平均而言，南半球多数地区标准差在100～200 g(C) $m^{-2}a^{-1}$，北半球主要在50 g(C) $m^{-2}a^{-1}$以下。

3.2 净初级生产力的时间演变

图4给出了1901～2005年NPP距平值分布，各个模式年际变化波动较大，总体长期变化趋势相

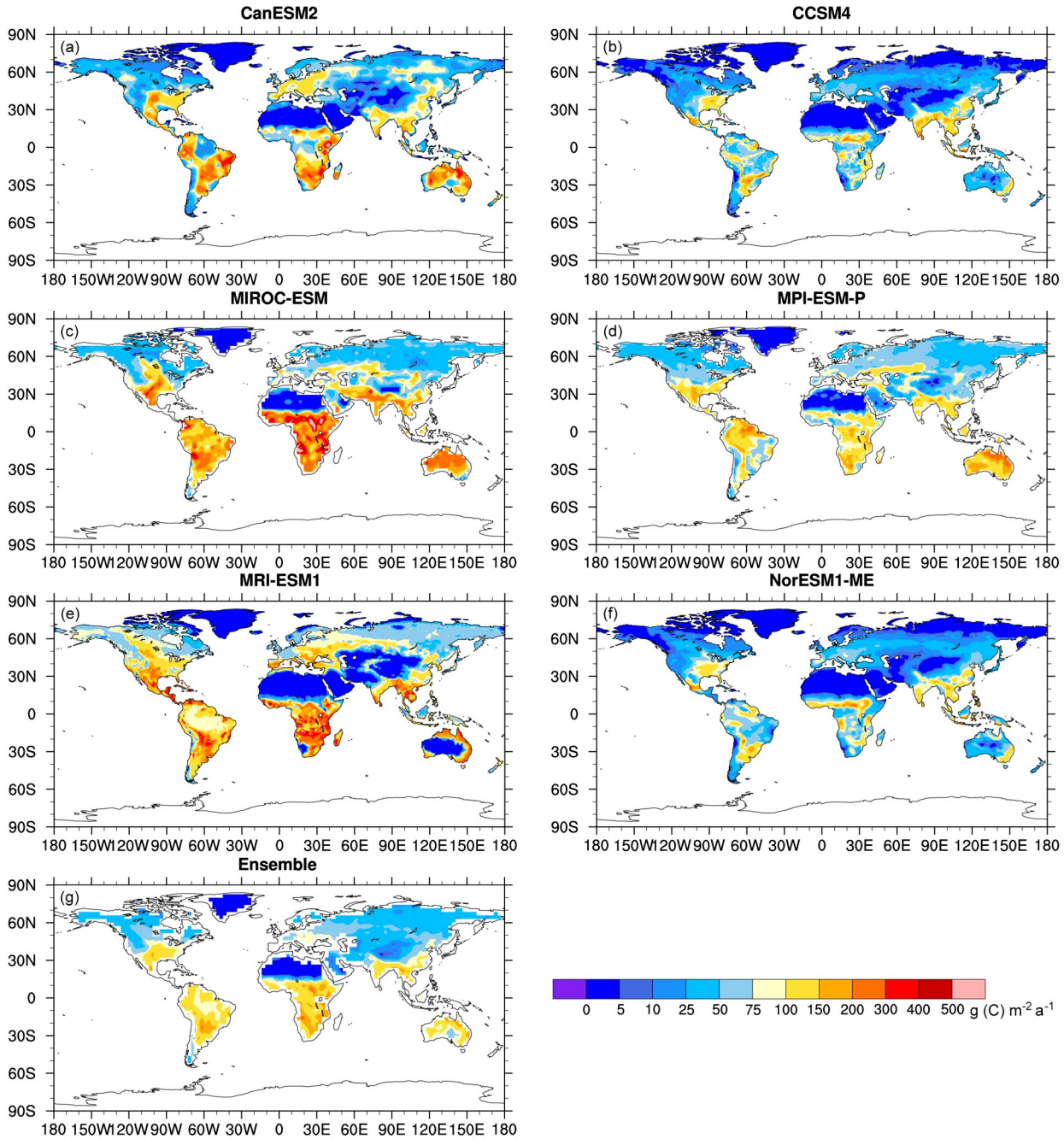

图3 1901～2005年6个地球系统模式与集合平均NPP的标准偏差空间分布

Fig. 3 Standard deviation of the NPP spatial distribution obtained by the six earth system models and ensemble mean from 1901 to 2005

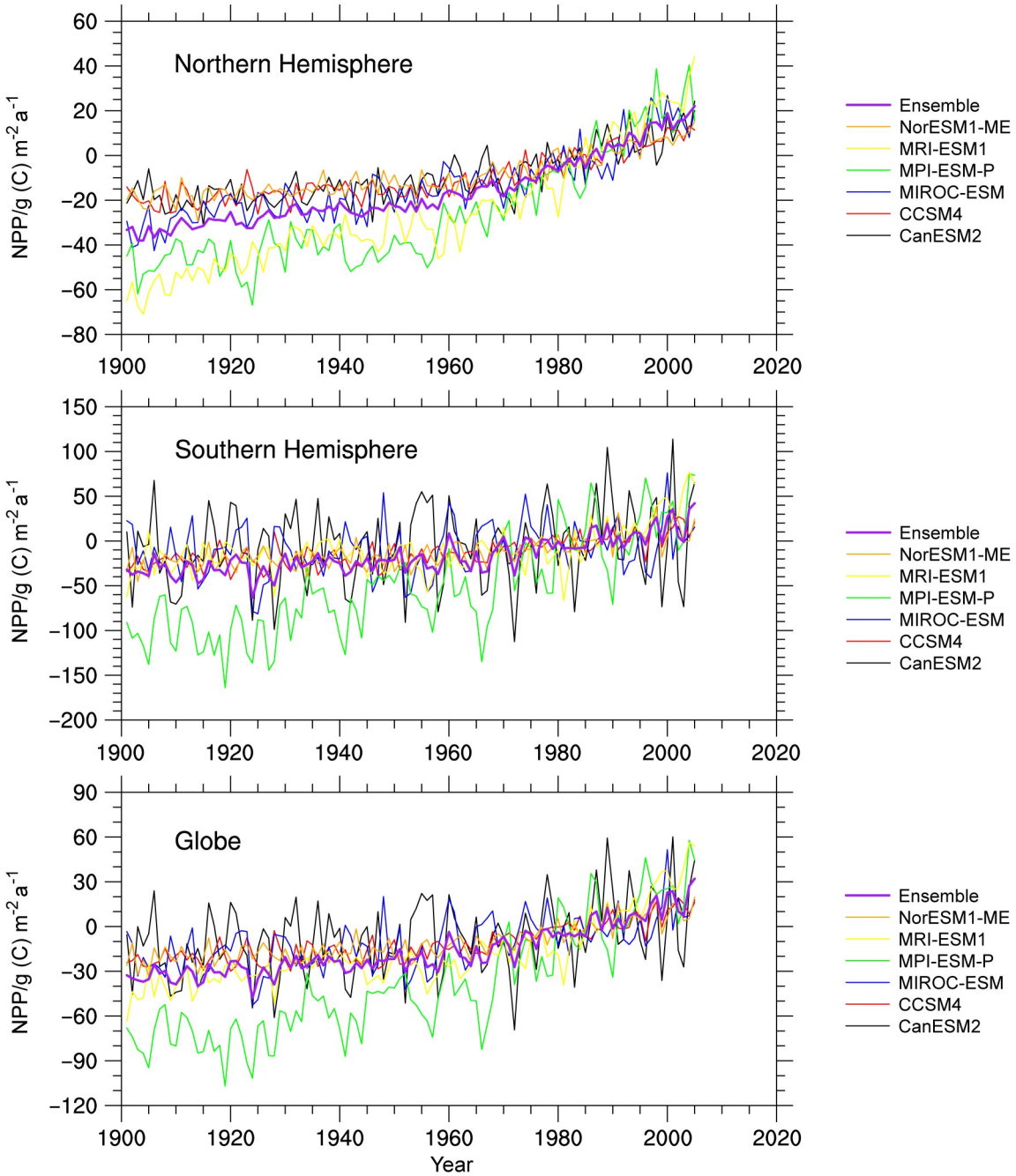

图4　1901～2005年6个地球系统模式与集合平均NPP距平值的（a）北半球、（b）南半球和（c）全球平均的长期变化趋势

Fig. 4　Long-term trends in the (a) Northen Hemisphere, (b) Southern Hemisphere, and (c) global averages of NPP anomalies from the six earth system models and ensemble mean from 1901 to 2005

同。北半球近百年来距平值总体上呈逐年增加的趋势，尤其是在20世纪80年代开始增加尤为明显；南半球近百年来距平值总体上也是呈逐年增加的趋势，增加趋势较北半球弱，这与北半球陆地面积大，植被分布较广，季节变化和年际变化的信号比南半球强有关（Dan and Ji，2007）；全球近百年来NPP距平值变化总体上和北半球趋势一样，呈现增加的趋势，在20世纪80年代以来增加明显，表明全球NPP的上升趋势主要是北半球的贡献。

表3给出了近百年来NPP的气候倾向率，北半球百年尺度各个模式的气候倾向率均超过了0.27，且通过99.9%的信度检验；南半球气候倾向率和北半球相比较低，但是均超过了0.21，且通过99.9%的信度检验；全球的气候倾向率均超过了0.28，且

表3 1901～2005年6个地球系统模式与集合平均NPP气候倾向率与统计检验

Table 3 NPP climate trend rate from the six earth system models and ensemble mean from 1901 to 2005, and statistical test

	NPP气候倾向率/a						
	CanESM2	CCSM4	MIROC-ESM	MPI-ESM-P	MRI-ESM1	NorESM1-ME	集合平均
北半球	0.30	0.29	0.43	0.70	0.79	0.27	0.47
南半球	0.26	0.36	0.21	1.44	0.46	0.36	0.51
全球	0.28	0.32	0.32	1.07	0.63	0.31	0.49

**代表没有通过99.9%的信度检验。

表4 1901～2005年6个地球系统模式与集合平均NPP变化趋势系数与统计检验

Table 4 NPP trend coefficient from the six earth system models and ensmeble mean from 1901 to 2005, and statistical test

	NPP变化趋势系数						
	CanESM2	CCSM4	MIROC-ESM	MPI-ESM-P	MRI-ESM1	NorESM1-ME	集合平均
北半球	0.76	0.85	0.85	0.87	0.93	0.86	0.93
南半球	0.18**	0.69	0.23	0.80	0.55	0.67	0.78
全球	0.34	0.81	0.57	0.86	0.89	0.79	0.88

**代表没有通过99.9%的信度检验。

通过99.9%的信度检验。这表明南北半球以及全球近百年来的NPP随着时间增加而增加。

表4给出了近百年来NPP的变化趋势，北半球百年尺度各个模式的趋势系数均超过了0.76且通过99.9%的信度检验，上升趋势较为明显；南半球的趋势系数比北半球低，总体上为较弱的上升趋势，其中加拿大的地球系统模式CanESM2趋势系数为0.18，也没有通过信度检验；全球的趋势系数均超过了0.34，且通过99.9%的信度检验。

3.3 NPP与气温和降水的关系

从各个地球系统模式NPP和气温的相关系数空间分布（图5）中可以发现，北半球NPP与气温主要呈现正相关关系，除了非洲撒哈拉沙漠地区，大部分地区相关系数都通过了95%的信度检验；赤道附近的南美洲、非洲以及印度地区的NPP与气温为较弱的负相关关系，NPP与气温在热带地区呈显著性负相关关系性，说明气温升高会导致NPP下降，是因为在热带地区气温太高会加剧植物的呼吸作用和蒸腾速率，造成植株失水及气孔关闭，进而导致光合速率下降而不利于NPP的形成。而南美洲南部，非洲南部以及澳大利亚一带的NPP与气温为正相关关系。欧亚大陆和北美洲正相关系数非常高，达到0.8以上。主要因为这些地区主要位于北半球的中高纬度，气温是限制光合作用的主要因素之一。从表4的NPP与降水和气温的相关系数表中可以看到，全球总体NPP与气温关系为显著的正相关关系，其中集合平均的相关系数为0.91，通过了95%的信度检验。

从各个模式NPP和降水的相关系数空间分布（图6）中可以发现，全球大部分地区NPP与降水呈现较好的正相关关系，除了北美西海岸、非洲撒哈拉沙漠地区、西亚干旱半干旱地区，大部分地区相关系数都通过了95%的信度检验。在北美西海岸、非洲撒哈拉沙漠地区、西亚干旱半干旱地区NPP与降水呈显著性负相关关系性，在北美西海岸是地中海式气候的特点，是高温时期少雨，低温时期多雨；这种不协调的配合，对植物十分不利；在非洲撒哈拉沙漠地区、西亚干旱半干旱地区干旱少雨，气温升高的同时，潜在蒸散量也在增加，土壤水分散失加剧干旱程度加剧，植被生长受到胁迫因而是负相关关系，因此即使降水增加，NPP也会出现减少（Chen et al.，2013）。从表4中可以发现，模式的全球总体NPP与降水关系为正相关关系，其中集合平均的相关系数为0.75，且通过了95%的信度检验。

从各个模式NPP和CRU观测气温的相关系数

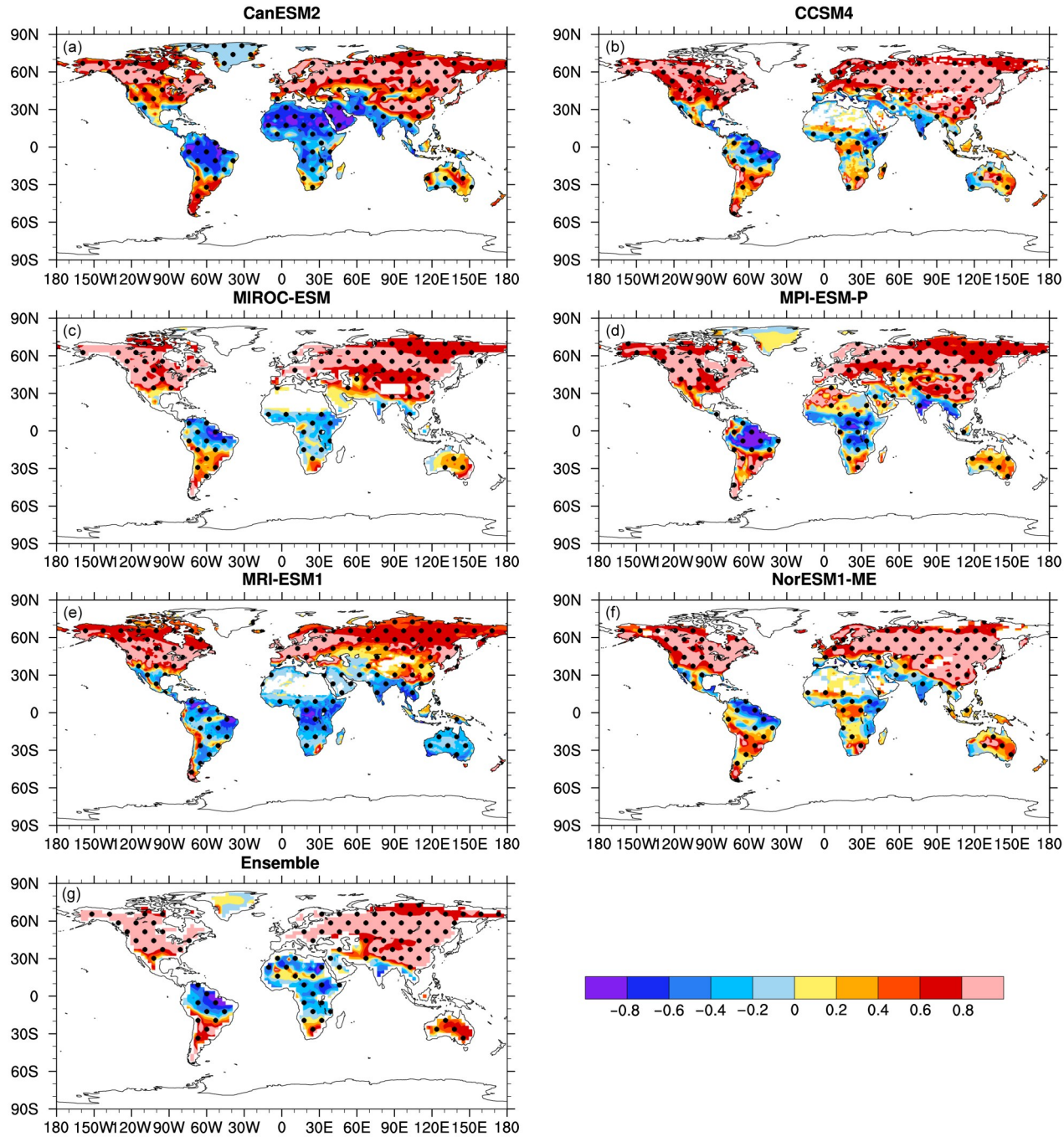

图5　6个地球系统模式与集合平均NPP与气温的相关系数分布，黑点区域代表通过95%的信度检验

Fig. 5　Distributions of correlation coefficients between NPP and temperature from the six earth system models and ensemble mean. The black dot area indicates 95% confidence level

空间分布（图7）中可以发现，和各个模式NPP和模拟气温的相关系数空间分布大体一致。从表4的NPP与降水和气温的相关系数表中可以看到，全球总体NPP与CRU气温关系为显著的正相关关系，集合平均的相关系数为0.91，通过了95%的信度检验，与各个模式NPP和模式气温相关系数相差不大。从各个模式NPP和CRU降水的相关系数空间分布（图8）中可以发现，和各个模式NPP和模式降水的相关系数空间分布大体一致。从表4的NPP与降水和气温的相关系数表中可以看到，全球总体NPP与CRU降水关系为显著的正相关关系，集合平均的相关系数为0.88，通过了95%的信度检验，

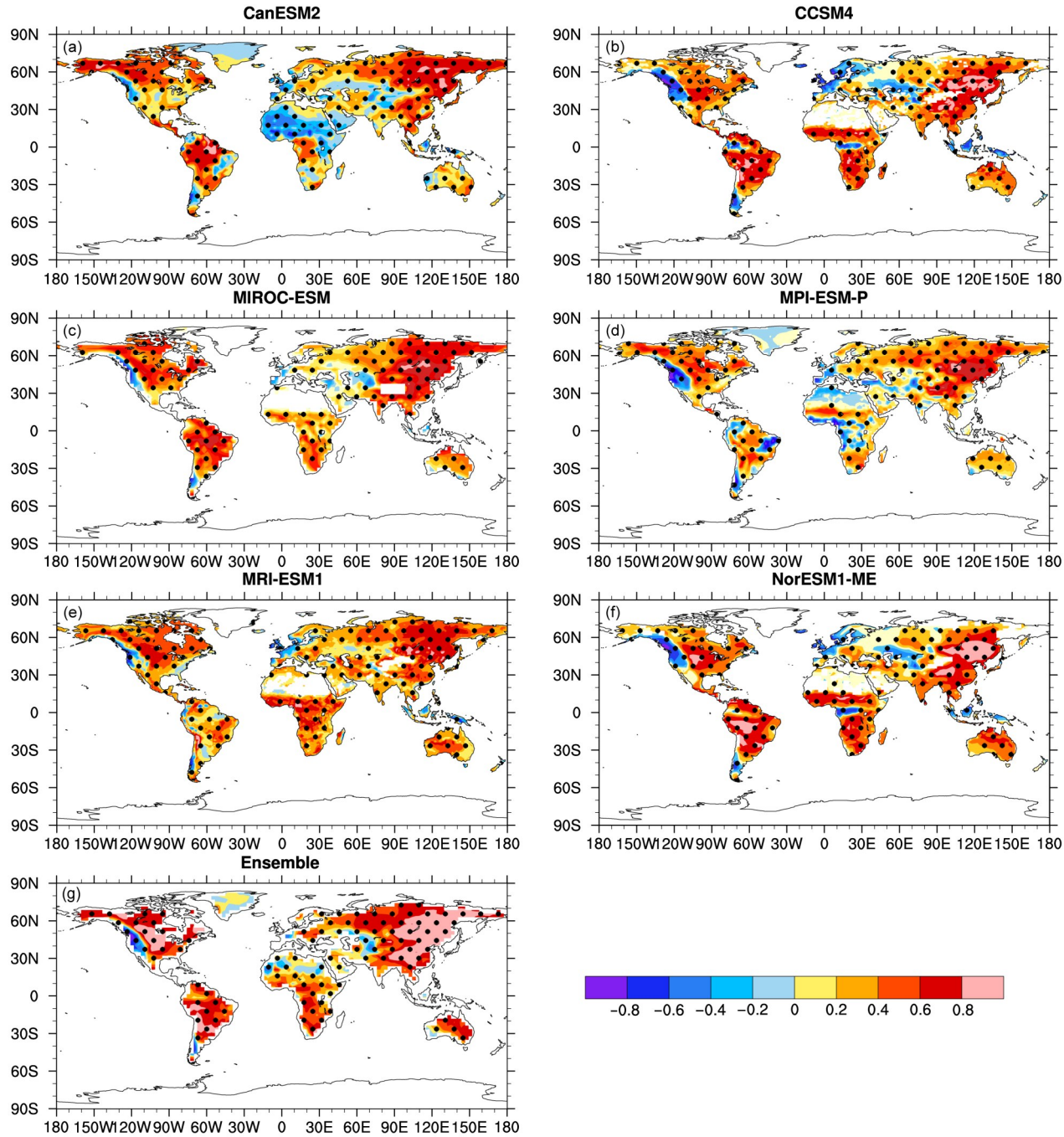

图6 6个地球系统模式与集合平均NPP与降水的相关系数分布图，黑点区域代表通过95%的信度检验

Fig. 6 Distributions of correlation coefficients between NPP and precipitation from the six earth system models and ensemble mean. The black dot area indicates 95% confidence level

和各个模式NPP与模式降水相关系数比较起来相对系数相对低一点。

图9是集合模式21个区域NPP与降水和气温的相关系数表，我们可以发现不同区域NPP与降水和气温的关系是不同的，大部分地区与气温和降水是正相关关系。这说明全球大部分地区NPP的变化主要受气温和降水的驱动。6个地球系统模式在全球21个区域的大部分地区的NPP和气温降水的变化关系较为一致，西非地区不同模式变化不一致，NPP模拟的不确定性较大，其次是地中海地区。东亚地区NPP与气候的百年演变同步并且相关性高，反映了强烈的植被大气相互作用过程。

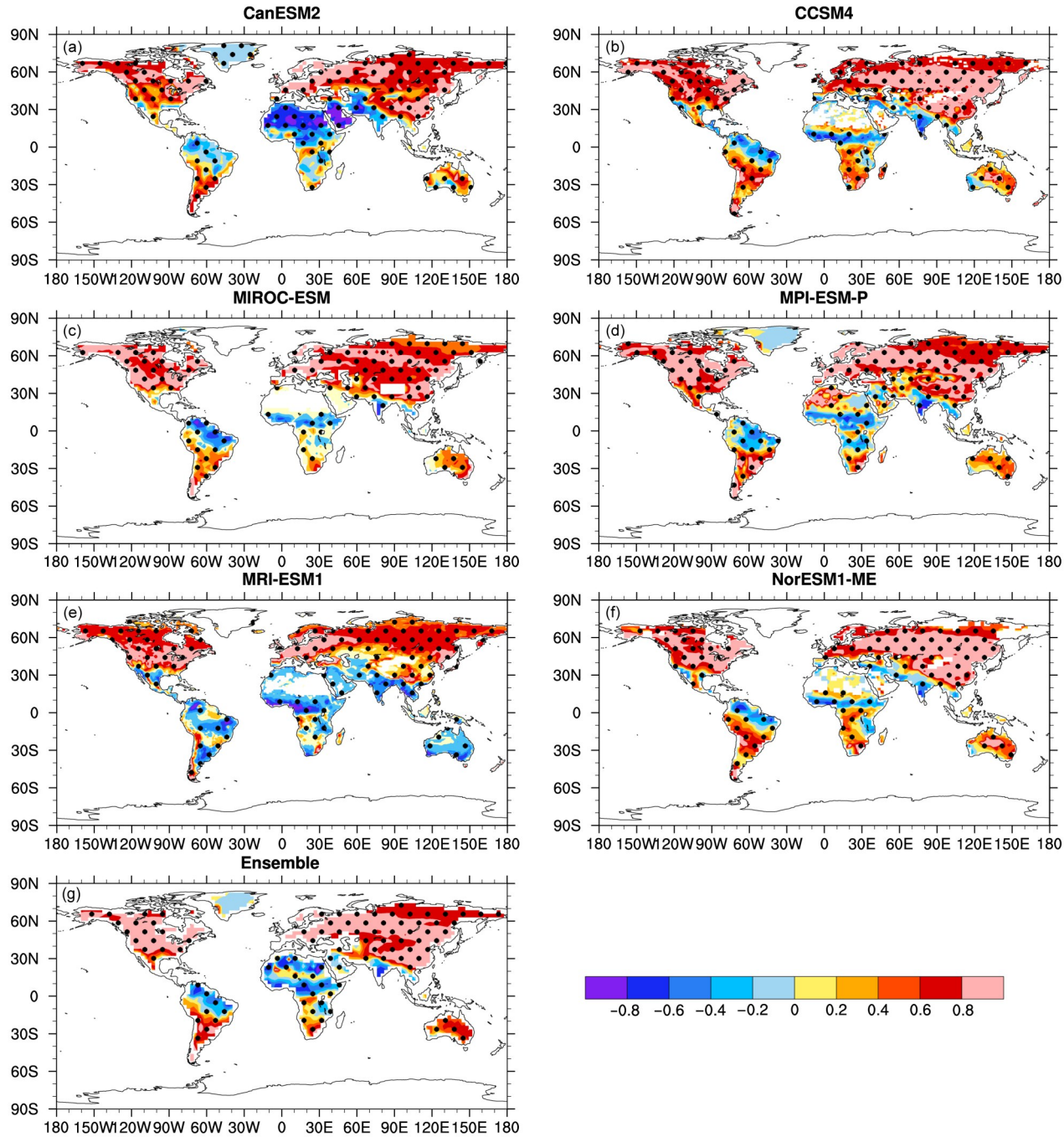

图7　6个地球系统模式与集合平均NPP与CRU气温的相关系数分布，黑点区域代表通过95%的信度检验

Fig. 7　Distributions of the correlation coefficients between NPP and CRU temperature from the six earth system models and ensemble mean. The black dot area indicates 95% confidence level

4　结论

本文利用6个地球系统模式模拟的1901～2005年NPP和气温降水以及CRU的观测气温和降水资料，通过计算气候趋势系数研究了全球NPP的时空变化特征，同时分析了NPP与气温和降水的相关关系。主要结论如下：

（1）近百年来全球NPP呈现上升趋势，各个模式上升趋势都非常明显，其中集合平均结果的趋势系数为0.88，通过了99.9%的信度检验。北半球上升趋势比南半球上升趋势要强，北半球生态系统的碳通量变化比南半球明显。

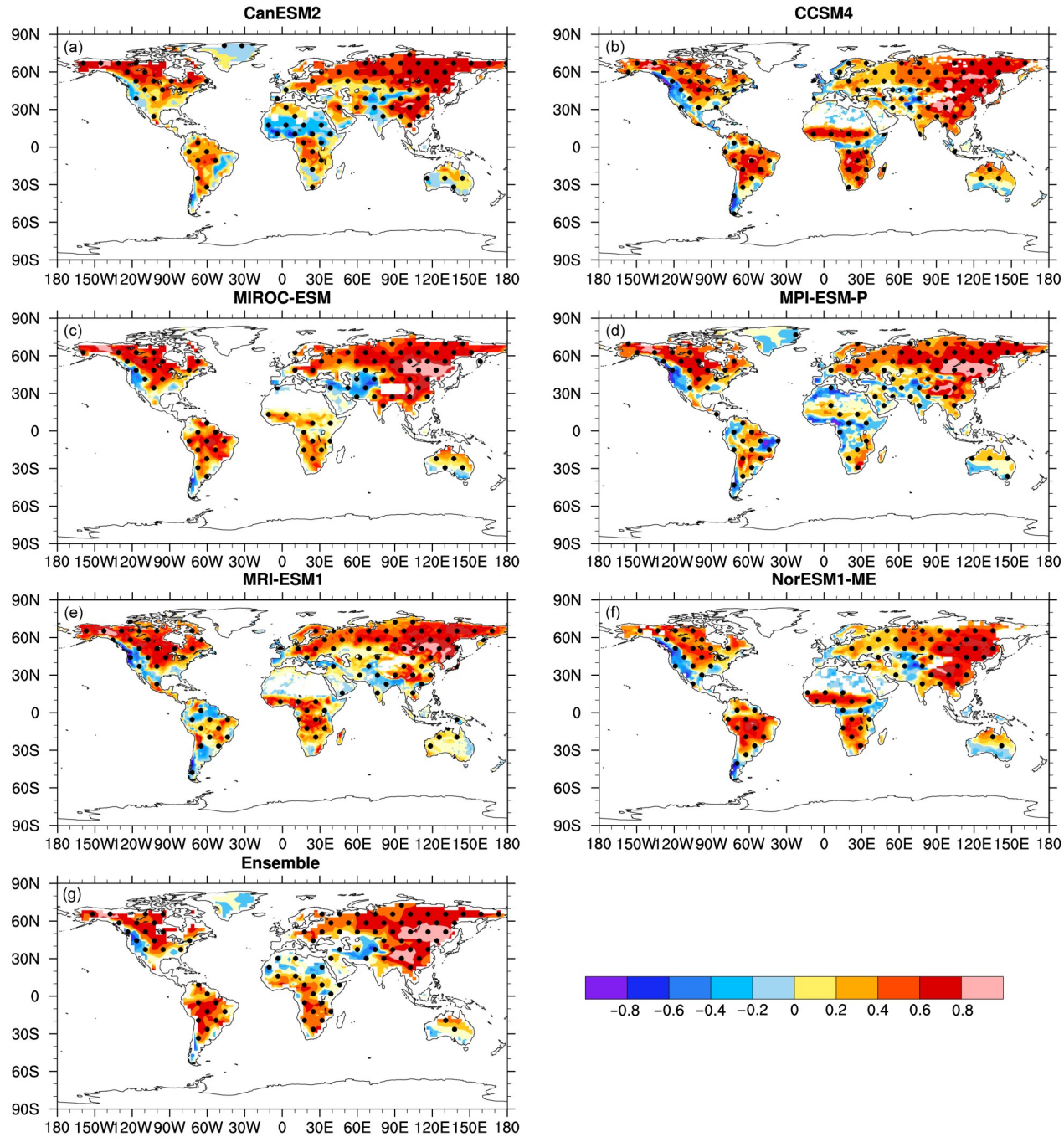

图8 6个地球系统模式与集合平均NPP与CRU降水的相关系数分布，黑点区域代表通过95%的信度检验

Fig. 8 Distributions of the correlation coefficients between NPP and CRU precipitation from the six earth system models and ensemble mean. The black dot area indicates a 95% confidence level

（2）NPP总体呈现出以赤道热带南美洲地区、赤道附近非洲地区、中南半岛和印度尼西亚一带为高值区的的特征；北半球和南半球的高纬度地区、非洲北部地区、西亚中亚干旱半干旱地区以及青藏高原地区为低值区的的特征。

（3）总体上近百年来NPP与气温和降水之间都呈现正相关，这说明气温和降水对植被NPP的影响在全球大部分地区为正反馈效应，只是不同地区强度不同。其中集合平均NPP与集合平均气温和降水的相关系数分别为0.91和0.75，集合平均

表5　6个地球系统模式与集合平均的NPP与降水和气温的相关系数表

Table 5　Correlation coefficients between NPP and precipitation, temperature from the six earth system models and ensemble mean

	NPP与降水相关系数	NPP与温度相关系数	NPP与CRU降水相关系数	NPP与CRU温度相关系数
CanESM2	0.88	0.92	0.88	0.96
CCSM4	0.60	0.87	0.69	0.90
MIROC-ESM	0.86	0.90	0.91	0.86
MPI-ESM-P	0.93	0.91	0.88	0.87
MRI-ESM1	0.57	0.95	0.87	0.89
NorESM1-ME	0.68	0.91	0.74	0.93
集合平均	0.75	0.91	0.88	0.91

注：相关系数均通过了95%的信度检验。

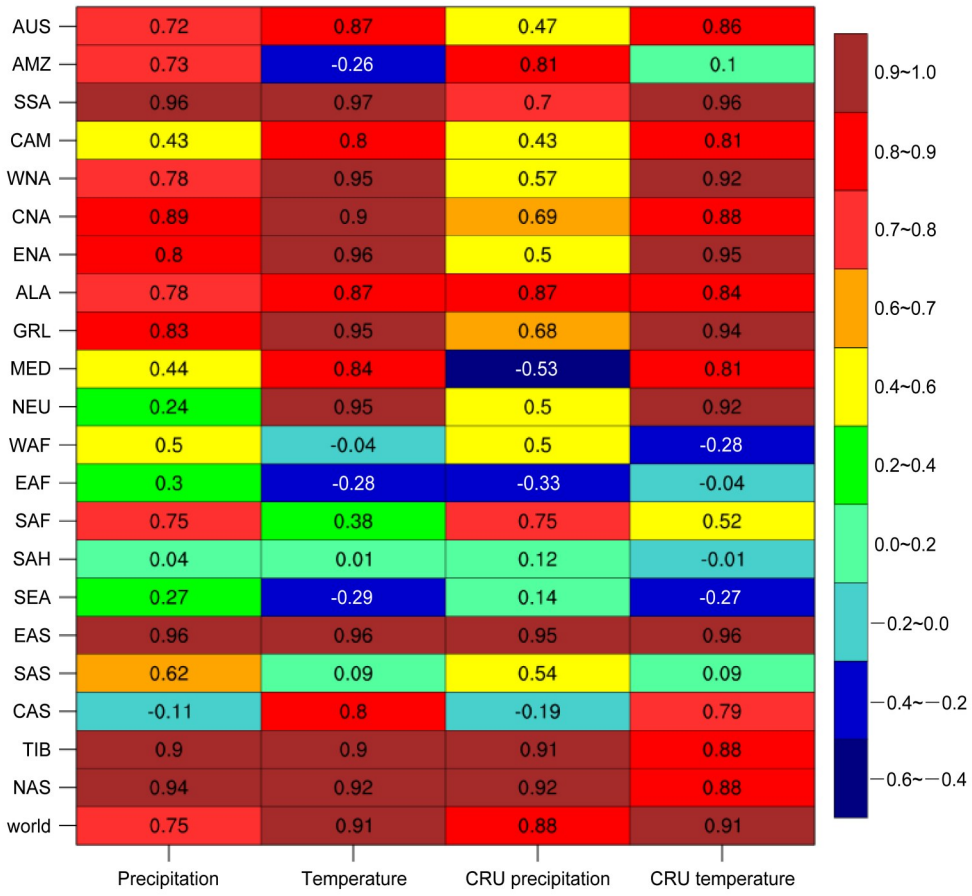

图9　全球21个分区NPP与集合平均降水和气温及CRU降水和气温的相关系数

Fig. 9　Correlation coefficient between NPP and ensemble precipitation, ensemble temperature，CRU precipitation, and CRU temperature in the 21 regions around the world

NPP与CRU观测气温和降水的相关系数分别为0.91和0.88。

（4）6个地球系统模式在全球21个区域的大部分地区的NPP和气温降水的变化关系较为一致，西非地区不同模式变化不一致，NPP模拟的不确定性较大，其次是地中海地区。在以后的研究中，可以对其方案进行修改，达到更好的模拟西非地区和地中海地区的NPP。

参考文献（References）

Beer C, Reichstein M, Tomelleri E, et al. 2010. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate[J]. Science, 329(5993): 834−838. doi:10.1126/science.1184984

Corlett R T. 2011. Impacts of warming on tropical lowland rainforests [J]. Trends in Ecology & Evolution, 26(11): 606−613. doi:10.1016/j.tree.2011.06.015

Chen X, Bai J, Li X, et al. 2013. Changes in land use/land cover and ecosystem services in central Asia during 1990−2009[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 5(1):116−127. doi:10.1016/j.cosust.2012.12.005

Cramer W, Field C B. 1999. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Introduction[J]. Global Change Biology, 5: 3−4. doi:10.1046/j.1365-2486.1999.00001.x

Dan L, Ji J J. 2007. The surface energy, water, carbon flux and their intercorrelated seasonality in a global climate−vegetation coupled model[J]. Tellus B, 59(3), 425−438. doi:10.3402/tellusb.v59i3.17006.

Dan L, Ji J, He Y. 2007. Use of ISLSCP II data to intercompare and validate the terrestrial net primary production in a land surface model coupled to a general circulation model[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 112(D2): D02S90. doi:10.1029/2006jd007721

Dore M H I. 2005. Climate change and changes in global precipitation patterns: What do we know?[J]. Environ. Int., 31(8): 1167−1181. doi:10.1016/j.envint.2005.03.004

Fang J Y, Piao S L, Zhou L M, et al. 2005. Precipitation patterns alter growth of temperate vegetation[J]. Geophys. Res. Lett., 32(21): L21411. doi:10.1029/2005gl024231

符传博, 丹利, 冯锦明, 等. 2019.1960～2012年中国地区总云量时空变化及其与气温和水汽的关系[J]. 大气科学, 43(1): 87−98. Fu Chuanbo, Dan Li, Feng Jinming, et al. 2019. Temporal and spatial variations of total cloud amount and their possible relationships with temperature and water vapor over China during 1960 to 2012[J]. Chin. J. Atmos. Sci. (in Chinese), 43(1): 87−98. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17235

Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, et al. 1998. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components[J]. Science, 281(5374): 237−240. doi: 10.1126/science.281.5374.237

刚成诚, 王钊齐, 杨悦, 等. 2016. 近百年全球草地生态系统净初级生产力时空动态对气候变化的响应[J]. 草业学报, 25(11): 1−14. Gang Chengcheng , Wang Zhaoqi, Yang Yue, et al. 2016. The NPP spatiotemporal variation of global grassland ecosystems in response to climate change over the past 100 years[J]. Acta Prataculturae Sinica(in Chinese), 25(11): 1−14. doi:10.11686/cyxb2016148

Giorgi F, Francisco R. 2000. Uncertainties in regional climate change prediction: A regional analysis of ensemble simulations with the HADCM2 coupled AOGCM[J]. Clim. Dyn., 16(2−3): 169−182. doi:10.1007/pl00013733

del Grosso S, Parton W, Stohlgren T, et al. 2008. Global potential net primary production predicted from vegetation class, precipitation, and temperature[J]. Ecology, 89(8): 2117−2126. doi: 10.1890/07-0850.1

Haberl H, Erb K H, Krausmann F, et al. 2007. Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems[J]. Proc. Natl. Acad. Sci. U S A, 104 (31): 12942−12947. doi:10.1073/pnas.0704243104

IGBP Terrestrial Carbon Working Group. 1998. The terrestrial carbon cycle: Implications for the Kyoto Protocol[J]. Science, 280(5368): 1393−1394. doi:10.1126/science.280.5368.1393

Imhoff M L, Bounoua L, DeFries R, et al. 2004. The consequences of urban land transformation on net primary productivity in the United States[J]. Remote. Sens. Environ., 89(4): 434−443. doi:10.1016/j.rse.2003.10.015

Maclean I M D, Wilson R J. 2011. Recent ecological responses to climate change support predictions of high extinction risk[J]. Proc. Natl. Acad. Sci. U S A, 108(30): 12337−12342. doi: 10.1073/pnas.1017352108

Matsushita B, Tamura M. 2002. Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate net primary productivity in East Asia [J]. Remote. Sens. Environ., 81(1): 58−66. doi: 10.1016/s0034-4257(01)00331-5

Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, et al. 2002. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system[J]. Science, 298 (5601): 2173−2176. doi:10.1126/science.1074153

Min S K, Zhang X B, Zwiers F W, et al. 2011. Human contribution to more-intense precipitation extremes[J]. Nature, 470(7334): 378−381. doi:10.1038/nature09763

Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. 2003. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. Science, 300(5625): 1560−1563. doi: 10.1126/science.1082750

Peng J, Dan L, Dong W. 2013. Estimate of extended long-term LAI data set derived from AVHRR and MODIS based on the correlations between LAI and key variables of the climate system from 1982 to 2009[J]. Int. J. Remote. Sens., 34(21): 7761−7778. doi: 10.1080/01431161.2013.826840

Peng J, Dan L. 2015. Impacts of CO_2, concentration and climate change on the terrestrial carbon flux using six global climate−carbon coupled models[J]. Ecol. Model., 304: 69−83. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2015.02.016

彭静, 丹利. 2016. 百年尺度地球系统模式模拟的陆地生态系统碳通量对CO_2浓度升高和气候变化的响应[J]. 生态学报, 36(21): 6939−6950. Peng Jing, Dan Li. 2016. The 100-year scale response of terrestrial ecosystem carbon fluxes to climate-carbon cycle caused by increasing atmospheric CO_2 concentration using an earth system model[J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 36(21): 6939−6950. doi:10.5846/stxb201312022862

Piao S, Ciais P, Lomas M, et al. 2011. Contribution of climate change and rising CO_2, to terrestrial carbon balance in East Asia: A multi-model analysis[J]. Global & Planetary Change, 75(3−4): 133−142.

doi:10.1016/j.gloplacha.2010.10.014

Rogers A, Medlyn B E, Dukes J S, et al. 2017. A roadmap for improving the representation of photosynthesis in earth system models[J]. New Phytologist, 213(1): 22−42.

Running S W, Nemani R R, Heinsch FAZhao M S, et al. 2004. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production[J]. Bioscience, 54(6): 547. doi:10.1641/0006-3568(2004)054[0547:acsmog]2.0.co;2

施能, 陈家其, 屠其璞. 1995. 中国近100年来4个年代际的气候变化特征[J]. 气象学报, 53(4): 431−439. Shi Neng, Chen Jiaqi, Tu Qipu. 1995.Four-phase climate change features in the last 100 years over China[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 53(4): 431−439.

施能, 黄先香, 杨扬. 2003. 1948～2000年全球陆地年降水量场趋势变化的时、空特征[J]. 大气科学, 27(6): 971−982. Shi Neng, Huang Xianxiang, Yang Yang. 2003. Spatiotemporal features of the trend variation of global land annual rainfall fields from 1948−2000 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27(6): 971−982.

IPCC. 2013. Technical Summary. InClimate Change2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]//Contribution of Working Group I to the Fourth Assesment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. 2013: 159−254.

Thomas C D, Cameron A, Green R E, et al. 2004. Extinction risk from climate change[J]. Nature, 427(6970): 145−148. doi: 10.1038/nature02121

Walther G R, Post E, Convey P, et al. 2002. Ecological responses to recent climate change[J]. Nature, 416(6879): 389−395. doi:10.1038/416389a

王秋凤, 牛栋, 于贵瑞, 等. 2004. 长白山森林生态系统CO_2和水热通量的模拟研究[J]. 中国科学 (D辑:地球科学), 34(S2): 131−140. Wang Qiufeng, Niu Dong, Yu Guirui, et al. 2004. Simulation of CO_2 and water heat fluxes in the forest ecosystem of Changbai Mountain [J]. Chinese Science Ser D (in Chinese), 34(S2): 131−140.

Wang W, Ciais P, Nemani R R, et al. 2013. Variations in atmospheric CO_2 growth rates coupled with tropical temperature[J]. Proc. Natl. Acad. Sci. U S A, 110(32): 13061−13066. doi:10.1073/pnas.1219683110.

魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术(第2版)[M]. 北京: 气象出版社, 43−44. Wei Fengying. 2007. Climate Statistical Diagnosing and Prediction (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 43−44.

Xia J Y, Chen J Q, Piao S L, et al. 2014. Terrestrial carbon cycle affected by non-uniform climate warming[J]. Nature Geoscience, 7 (3): 173−180. doi:10.1038/ngeo2093

Yu M, Wang G, Parr D, et al. 2014. Future changes of the terrestrial ecosystem based on a dynamic vegetation model driven with RCP8. 5 climate projections from 19 GCMs[J]. Clim. Chang., 127(2): 257−271. doi:10.1007/s10584-014-1249-2

於琍, 朴世龙. 2014. IPCC第五次评估报告对碳循环及其他生物地球化学循环的最新认识[J]. 气候变化研究进展, 10(1): 33−36. Yu Li, Piao Shilong. 2014. Key scientific points on carbon and other biogeochemical cycles from the IPCC fifth assessment report[J]. Progress in Climate Change(in Chinese), 10(1): 33−36. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2014.01.007

朱再春, 刘永稳, 刘祯, 等. 2018. CMIP5模式对未来升温情景下全球陆地生态系统净初级生产力变化的预估[J]. 气候变化研究进展, 14(1): 31−39. Zhu Zaichun, Liu Yongwen, Liu Zhen, et al. 2018. Projection of changes in terrestrial ecosystem net primary productivity under future global warming scenarios based on CMIP5 models[J]. Climate Change Research (in Chinese), 14(1): 31−39. doi: 10.12006/j.issn.1673-1719.2017.042