

“一带一路”区域未来气候变化预估



通信作者简介:周波涛,教授/博士生导师。国家“万人计划”青年拔尖人才,南京信息工程大学大气科学学院副院长,气象灾害预报预警与评估协同创新中心副主任。现为IPCC第六次评估报告主要作者、中国气象学会气候变化与低碳发展委员会副主任委员、全国气候与气候变化标准化技术委员会副秘书长。主要从事气候和极端气候变化机理与预测预估等方面的研究。迄今发表学术论文100余篇,其中SCI论文60余篇;参与编著10多部气候变化评估报告和书籍。曾荣获涂长望青年气象科技奖、邹竞蒙气象科技奖、十佳全国优秀青年气象科技工作者等多项荣誉。

周波涛^{①*},徐影^{②**},韩振宇^②,石英^②,吴佳^②,李柔珂^②

① 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室,江苏 南京 210044;

② 国家气候中心,北京 100081

摘要 利用耦合模式比较计划第5阶段(CMIP5)提供的18个全球气候模式的模拟结果,预估了3种典型浓度路径(RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5)下“一带一路”地区平均气候和极端气候的未来变化趋势。结果表明:在温室气体持续排放情景下,“一带一路”地区年平均气温在未来将会持续上升,升温幅度随温室气体浓度的增加而加大。在高温温室气体排放情景(RCP8.5)下,到21世纪末期,平均气温将普遍升高5℃以上,其中北亚地区升幅最大,南亚和东南亚地区升幅最小。对于降水的变化,预估该区域大部分地区的年降水量将增加,其中西亚和北亚增加最为明显,而且在21世纪中期,RCP2.6情景下的增幅要比RCP4.5和RCP8.5情景下的偏大,而在21世纪后期,RCP8.5情景下降水的增幅比RCP2.6和RCP4.5情景下的偏大。未来极端温度也将呈升高的趋势,增温幅度高纬度地区大于低纬度地区、高排放情景大于低排放情景。而且在高纬度区域,极端低温的增暖幅度要大于极端高温的增幅。连续干旱日数在北亚和东亚总体呈现减少趋势,而在其他地区则呈增加趋势。极端强降水在“一带一路”区域总体上将增强,增强最明显的地区位于南亚、东南亚和东亚。

关键词 “一带一路”;气候变化预估;极端气候;CMIP5

最近几十年,气候变化给自然生态系统和人类社会造成了广泛而深刻的影响(IPCC,2014)。预计到20世纪末,温室气体持续排放将会使全球地表平均温度增加0.3~4.8℃(相对于1986—2005年),并将导致气候系统发生显著变化(IPCC,2013),从而引发更大的气候风险(IPCC,2014)。

2013年,中国提出“一带一路”倡议,即丝绸之路经济带与海上丝绸之路,旨在促进共同发展,实现共同繁荣,共建未来共同体。“一带一路”地区涉及热带、亚热带、干旱和半干旱地区的许多国家,其中大多数为发展中国家,其环境、政治、宗教、文化以及发展水平有着显著差异。由于农村人口众多、基础设施脆弱、适应能力差等因素,“一带一路”地区的国家极易受到气候变化的影响。而且,在气候变化背景下,因极端气候频繁发生而引发的气象灾害往往会带来更严重的破坏。例如,近几十年来,干旱和强降雨频繁袭击中亚,非洲中东部春季和夏季干旱变得愈加频繁(IPCC,2014)。进入21世纪后,欧亚大陆

* 联系人,E-mail:zhoubt@nuist.edu.cn

** 联系人,E-mail:xuying@cma.gov.cn

2019-11-25 收稿,2019-12-30 接受

全球变化重点研发项目(2017YFA0603703;

2017YFA0605004);国家自然科学基金委重大

项目(41991285)

引用格式:周波涛,徐影,韩振宇,等,2020.“一带一路”区域未来气候变化预估[J].大气科学学报,43(1):255-264.

Zhou B T, Xu Y, Han Z Y, et al., 2020. CMIP5 projected changes in mean and extreme climate in the Belt and Road region[J]. Trans Atmos Sci, 43(1): 255-264. doi: 10. 13878/j. cnki. dqkxxb. 20191125009. (in Chinese).

也经常发生极端天气气候事件,造成巨大的经济损失和人员伤亡(Coumou and Rahmstorf, 2012)。在高温温室气体排放情景下,干旱和半干旱地区的扩张趋于加速,加剧了荒漠化的风险(Huang et al., 2016)。东南亚地区的一些国家和城市还面临着海平面上升的风险(IPCC, 2014)。如果不采取有力措施,到2050年,海上丝绸之路沿线地区将会有14个国家跻身于因海平面上升造成经济损失最大的20个国家之列。因此,为加强灾害风险管理,减少气候变化风险,决策者迫切需要有关“一带一路”沿线气候以及相关极端事件未来变化的全面信息。

气候模式是进行未来气候变化预估的主要工具。到目前为止,基于全球和区域气候模式,不少研究对不同典型浓度路径(RCP)(Moss et al., 2010; Taylor et al., 2012)下的全球和区域气候与极端气候的未来变化进行了预估(Wang et al., 2012; 陈活泼, 2013; IPCC, 2013; Sillmann et al., 2013a, 2013b; Yao et al., 2013; Chen et al., 2014; Sui et al., 2014; Zhou et al., 2014; Jiang et al., 2015, 2016; Andrys et

al., 2017; Chen and Sun, 2017; Gao et al., 2017; Han et al., 2017; Wang et al., 2017; Xu et al., 2017), 揭示出未来变暖背景下,极端暖事件增加,极端冷事件减少,极端强降水事件增强,但存在明显区域差异。不过,关于“一带一路”地区气候和极端气候的预估研究相对较少。因此,本研究旨在预估“一带一路”丝绸之路经济带沿线地区平均气候和极端气候在21世纪近期,中期和末期的变化趋势,以期“一带一路”的发展提供更全面的气候信息支撑。

1 数据与方法

使用的资料为18个CMIP5全球气候模式(见表1)的历史模拟试验数据(1861—2005年)和三种RCP情景下(RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5)的未来预估数据(2006—2100年)。历史模拟试验表征过去的气候,RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5模拟分别代表低、中和高温温室气体排放情景下的未来变化。更进一步的信息可参考CMIP5网页(<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>)。

表1 18个CMIP5全球气候模式基本信息

Table 1 Basic information of the 18 CMIP5 GCMs used in this study

模式名称	单位及所属国家	分辨率(纬度×经度)
BCC-CSM1.1	Beijing Climate Center, China	128×64
BNU-ESM	Beijing Normal University, China	128×64
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis, Canada	128×64
CCSM4	National Center for Atmosphere Research, United States	288×192
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques—Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique, France	256×128
CSIRO-Mk3-6-0	Queensland Climate Change Centre of Excellence and Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia	192×96
GFDL-ESM2G	National Oceanic and Atmospheric Administration Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, United States	144×90
GFDL-ESM2M	National Oceanic and Atmospheric Administration Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, United States	144×90
HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre, United Kingdom	192×145
IPSL-CM5A-LR	Institute Pierre-Simon Laplace, France	96×96
IPSL-CM5A-MR	Institute Pierre-Simon Laplace, France	144×143
MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan	256×128
MIROC-ESM	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan	128×64
MIROC-ESM-CHEM	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan	128×64
MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	192×96
MPI-ESM-MR	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	192×96
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute, Japan	320×160
NorESM1-M	Norwegian Climate Centre, Norway	144×96

文中分析的极端气候事件指数采用的是国际上气候变化检测和指标专家组(ETCCDI)定义的指数(Klein et al., 2009; Zhang et al., 2011),包括极端高温(TXx)、极端低温(TNn)、最大连续无降雨日数(CDD)和连续5日最大降水量(RX5day)。TXx和TNn分别定义为每年日最高温度的最大值和日最低温度的最小值,用于表征极端温度。CDD定义为每年最长连续无降雨(降水量小于1 mm)的日数,用于表征干旱的变化。RX5day定义为每年最大的连续5 d降水量,用于表征极端强降水。

由于CMIP5模式具有不同的空间分辨率,为了便于分析,所有模式的模拟结果都使用双线性插值方法插值到 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格上。未来预估分析使用多模式集合平均结果(MME),即18个CMIP5模式的算术平均值。定义1986—2005年为未来预估变化分析的参考期;2016—2035年,2046—2065年和2080—2099年则分别代表21世纪近期,中期和末期。由于气候变化存在地区差异,为了更好地了解不同地区的未来气候变化,我们将“一带一路”丝绸之路经济带划分为八个子区域:东亚(EAS),南亚(SAS),东南亚(SEAS),中亚(CAS),西亚(WAS),北亚(NAS),中东欧(CEU)和独联体(INS)。

2 结果分析

2.1 平均温度和平均降水的未来变化

图1为MME预估的2016—2100年3种RCP情景下“一带一路”地区冬季、夏季和年平均气温的变化趋势。在RCP2.6情景下,平均气温的变化趋势没有明显的季节性差异;在RCP4.5情景下,冬季的变暖趋势比夏季和年平均的更为明显,尤其是在高纬度地区;在RCP8.5情景下,平均气温的升温趋势最明显,尤其北亚地区(NAS)的冬季变暖趋势最为显著,平均每10 a的升温趋势超过 0.8°C 。其余地区的升温趋势从 $0.6^\circ\text{C}/(10\text{ a}) \sim 0.8^\circ\text{C}/(10\text{ a})$ 。夏季气温升温趋势的空间分布较为一致,变化幅度为 $0.5^\circ\text{C}/(10\text{ a}) \sim 0.7^\circ\text{C}/(10\text{ a})$ 。年平均气温的变化趋势类似于冬季气温的变化趋势,意味着冬季气温的升高在年平均气温升高中占着主导地位。

图2进一步给出了3种RCP情景下21世近期、中期和末期年平均气温相对于1986—2005年变化的空间分布。很明显,整个“一带一路”地区的年平均气温在21世纪的3个时期都呈升高的趋势。从21世纪近期到末期,气候变暖趋势逐渐加剧,而且温室气体排放越多,气候变暖的幅度越大,高纬度

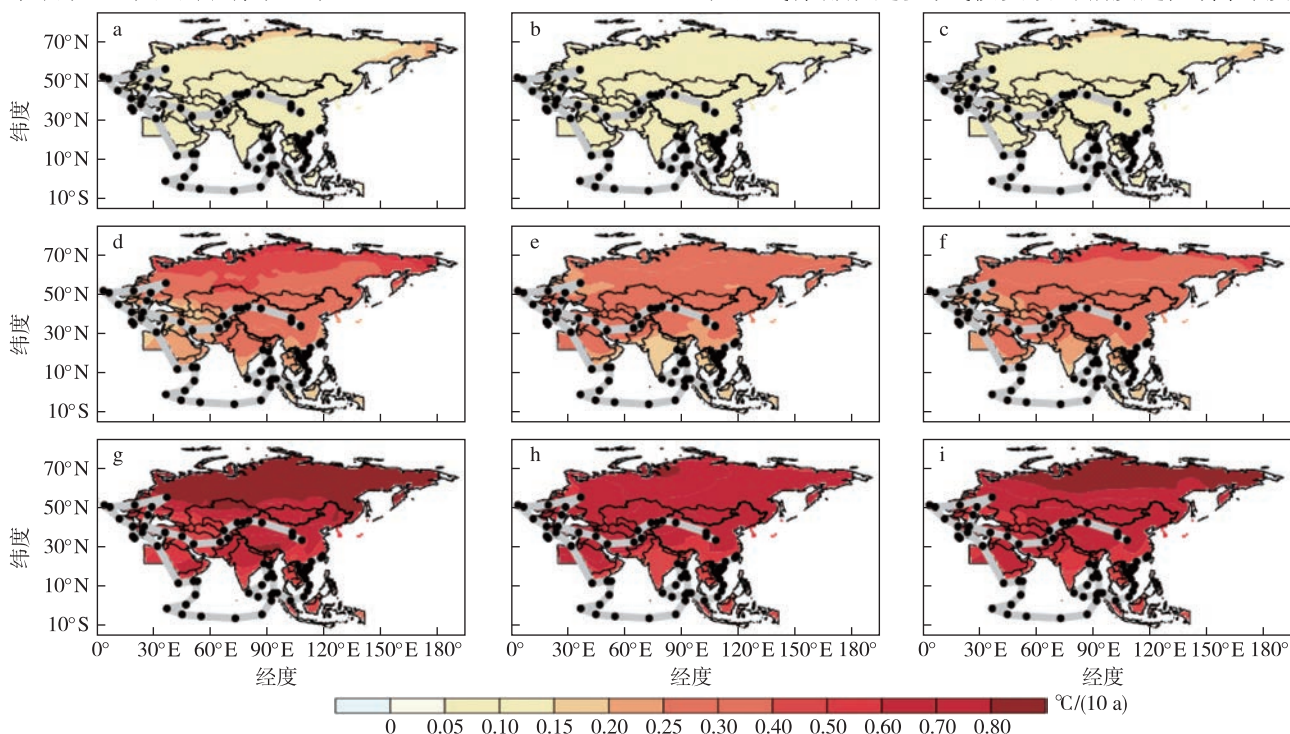


图1 多模式集合预估的“一带一路”区域RCP2.6(a—c)、RCP4.5(d—f)和RCP8.5(g—i)情景下2006—2100年冬季(a, d, g)、夏季(b, e, h)和年平均(c, f, i)温度变化趋势(单位: $^\circ\text{C}/(10\text{ a})$)

Fig.1 The MME projected temperature trends (unit: $^\circ\text{C}/(10\text{ a})$) during 2006—2100 under (a—c) RCP2.6, (d—f) RCP4.5, and (g—i) RCP8.5 for (a, d, g) the winter season, (b, e, h) summer season and (c, f, i) annual mean

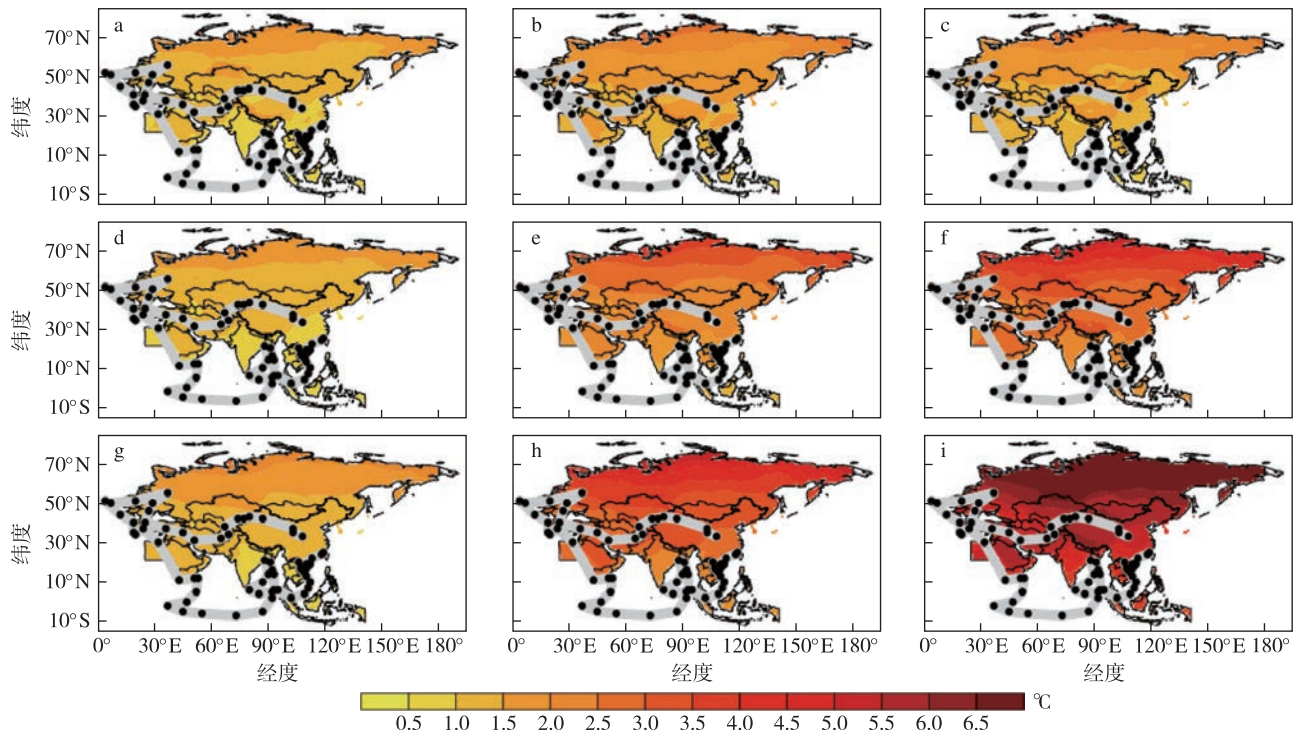


图2 多模式集合预估的“一带一路”区域 RCP2.6 (a—c)、RCP4.5 (d—f) 和 RCP8.5 (g—i) 情景下 2016—2035 年 (a, d, g)、2046—2065 年 (b, e, h) 和 2080—2099 年 (c, f, i) 的年平均温度变化 (单位: $^{\circ}\text{C}$; 相对于 1986—2005 年)

Fig.2 The MME projected annual temperature change (unit: $^{\circ}\text{C}$) over the periods of (a—c) 2016—2035, (d—f) 2046—2065 and (g—i) 2080—2099 relative to the reference period 1986—2005 under (a, d, g) RCP2.6, (b, e, h) RCP4.5 and (c, f, i) RCP8.5

地区增暖幅度要大于低纬度地区的增暖幅度。相对于 1986—2005 年,在 RCP2.6 情景下(图 2a—c),预计 21 世纪近期温度将升高 0.5~2 $^{\circ}\text{C}$,到 21 世纪末将进一步升高至 1~3 $^{\circ}\text{C}$ 。在 RCP8.5 情景下,平均气温到 21 世纪末期将普遍升高 5 $^{\circ}\text{C}$ 以上(图 2i)。其中,北亚(NAS)地区的变暖幅度最大(达到 6.5 $^{\circ}\text{C}$ 以上),南亚(SAS)和东南亚(SEAS)地区的变暖幅度最小。

与平均温度变化相比,“一带一路”地区平均降水的变化相对较为复杂。从图 3 可以看到,尽管相对于 1986—2005 年,“一带一路”大多数地区的年平均降水在 2016—2035 年、2046—2065 年和 2080—2099 年整体都将呈增加的趋势,但不同时期和不同 RCP 情景下存在明显区域差异。例如 21 世纪近期,RCP8.5 情景下西亚(WAS)和北亚(NAS)地区的年平均降水量增加幅度最为明显,相比 1986—2005 年分别增加 18%和 10%;东亚(EAS)年平均降水量总体上也将增加,但在长江流域南部却减少约 5%(图 3g)。在 21 世纪中期,RCP2.6 情景下西亚(WAS)地区的降水将增加 22.5%,北亚(NAS)地区将增加 19%,中国西部的年降水量也将

增加 10%(图 3b),且增加的幅度略大于 RCP4.5 (图 3e)和 RCP8.5(图 3h)情景下的增幅。在 21 世纪后期,情况则相反,RCP8.5 情景下年平均降水的增加幅度(图 3i)要大于 RCP2.6(图 3c)和 RCP4.5 情景(图 3f)下的增幅。

2.2 极端温度和极端降水的未来变化

图 4a 和图 4b 分别为 3 种 RCP 情景下极端高温(TXx)和极端低温(TNn)随时间的变化。结果显示,在“一带一路”区域,未来 TXx 和 TNn 均呈明显的上升趋势,尤其是 RCP8.5 情景下极端温度的上升趋势最为显著。在 RCP8.5 情景下,到 21 世纪末, TXx 增加最大的区域位于中东欧(CEU, 7.8 $^{\circ}\text{C}$)和独联体(INS, 7.2 $^{\circ}\text{C}$),其次是中亚(CAS, 6.5 $^{\circ}\text{C}$)、北亚(NAS, 6.1 $^{\circ}\text{C}$)、西亚(WAS, 6.1 $^{\circ}\text{C}$)和东亚(EAS, 6.0 $^{\circ}\text{C}$)(图 4a)。南亚(SAS)和东南亚(SEAS)区域, TXx 的上升趋势相对较小。相比于 TXx 而言, TNn 在“一带一路”北部地区的升温幅度要更大(图 4b),这也可以从 RCP8.5 情景下 2016—2035 年, 2046—2065 年和 2080—2099 年 TXx 和 TNn 变化的空间分布图(图 5)上得到证实。相对于 1986—2005 年, 21 世纪近期“一带一路”大

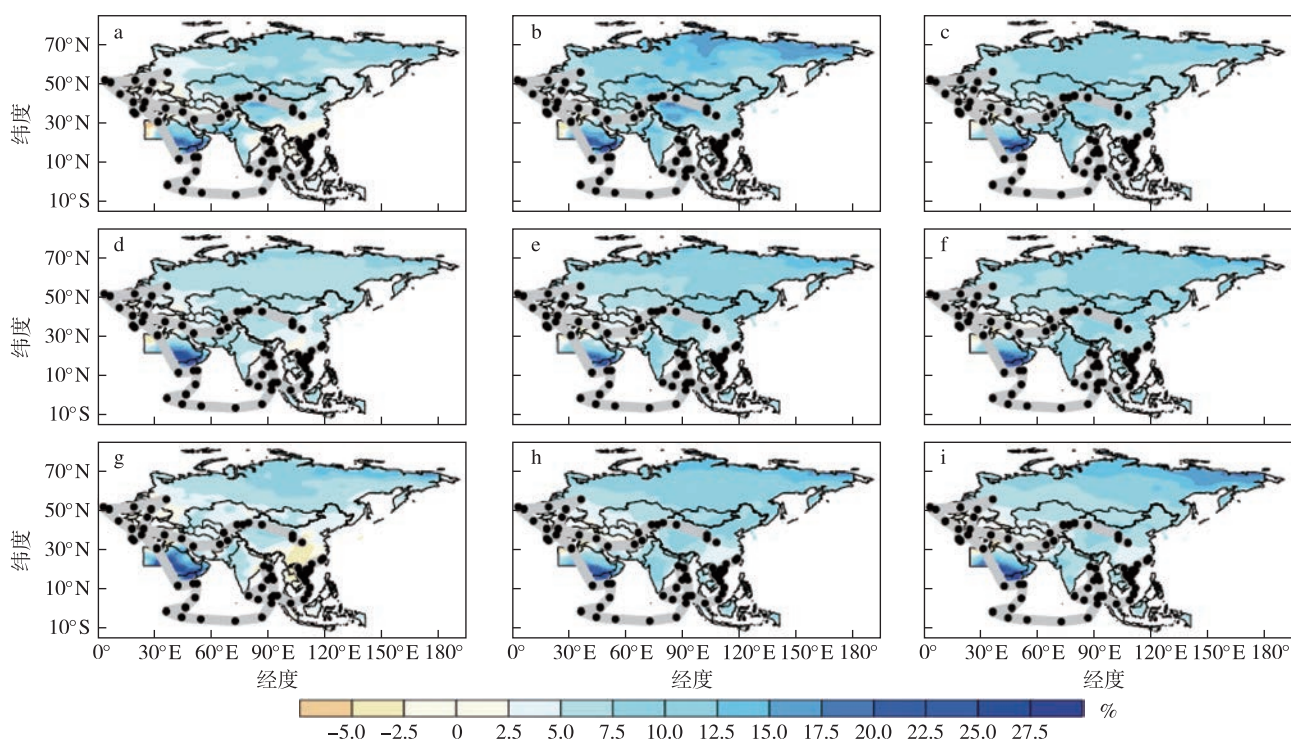


图3 多模式集合预估的“一带一路”区域 RCP2.6 (a—c)、RCP4.5 (d—f) 和 RCP8.5 (g—i) 情景下 2016—2035 年 (a,d,g)、2046—2065 年 (b,e,h) 和 2080—2099 年 (c,f,i) 的年平均降水变化 (单位:%) (相对于 1986—2005 年)

Fig.3 The MME projected annual precipitation change (unit:%) over the periods of (a—c) 2016—2035, (d—f) 2046—2065 and (g—i) 2080—2099 relative to the reference period 1986—2005 under (a, d, g) RCP2.6, (b, e, h) RCP4.5 and (c, f, i) RCP8.5

部分地区 TXx 将增加 1~2 °C, 变暖幅度随时间逐渐增加, 到 21 世纪末将超过 5 °C (图 5a—c)。与 TXx 变化相比, TNn 的增暖幅度在空间上表现为更不均匀的分布特征, 高纬度地区的变暖幅度要明显大于低纬度地区的变暖幅度。到 21 世纪末期, 高纬度地区 TNn 的增加幅度将会超过 8 °C (图 5f), 这可能对人类健康造成严重损害。此外, 由图 4 还可以发现, 与其他区域相比, 中东欧 (CEU), 独联体 (INS) 和中亚 (CAS) 地区的极端温度未来变化的预估不确定范围相对较大。

图 6 给出了三种 RCP 情景下“一带一路”区域连续干旱日数 (CDD) 和连续 5 d 最大降雨量 (RX5day) 随时间的变化。由图 6a 可见, CDD 在北亚 (NAS) 和东亚 (EAS) 呈现减少的趋势, 而在其他地区总体呈增多的趋势。预估不确定性在西亚 (WAS) 和南亚 (SAS) 地区相对较大。与 CDD 变化不同, Rx5day 在“一带一路”所有子区域上总体上均呈增加的趋势, 增加最明显的地区位于南亚 (SAS)、东南亚 (SEAS) 和东亚 (EAS) 区域, 这些区域平均的 RX5day 在 RCP8.5 情景下到 21 世纪末相比于 1986—2005 年将分别增加约 35%、33% 和

20%, 表明未来这些地区的极端强降水事件将增强。不过, RX5day 预估不确定性在西亚 (WAS) 和南亚 (SAS) 地区较大。

图 7 进一步给出了 RCP8.5 情景下 CDD 和 RX5day 在 2016—2035 年, 2046—2065 年和 2080—2099 年的空间分布图。由图 7a—c 可见, 无论近期、中期还是末期, CDD 变化的空间差异性都体现得非常清楚。到 21 世纪末, 相对于 1986—2005 年, CDD 在北亚和东亚的北部地区明显减少, 减少幅度在 10 d 以上。相反, 在西亚、中亚、南亚、东南亚以及中国南方地区, CDD 将增加, 增加幅度在 5 d 以上, 这种增加可能会加速干旱地区的扩张或加重干旱程度, 并进一步加剧水资源压力, 特别是在干旱和半干旱地区。如中亚 (CAS) 原本就是缺水的地区, 未来干旱的增加将加剧该地区水资源短缺和分配不平衡的问题。对 RX5day 而言, 其在近期、中期和末期都展现出一致性增加的变化特征 (图 7d—f)。南亚、东南亚和中国南方地区在极端强降水增加的同时, 连续干旱日数也将增加, 意味着这些地区将同时遭受严重的干旱和洪涝风险。

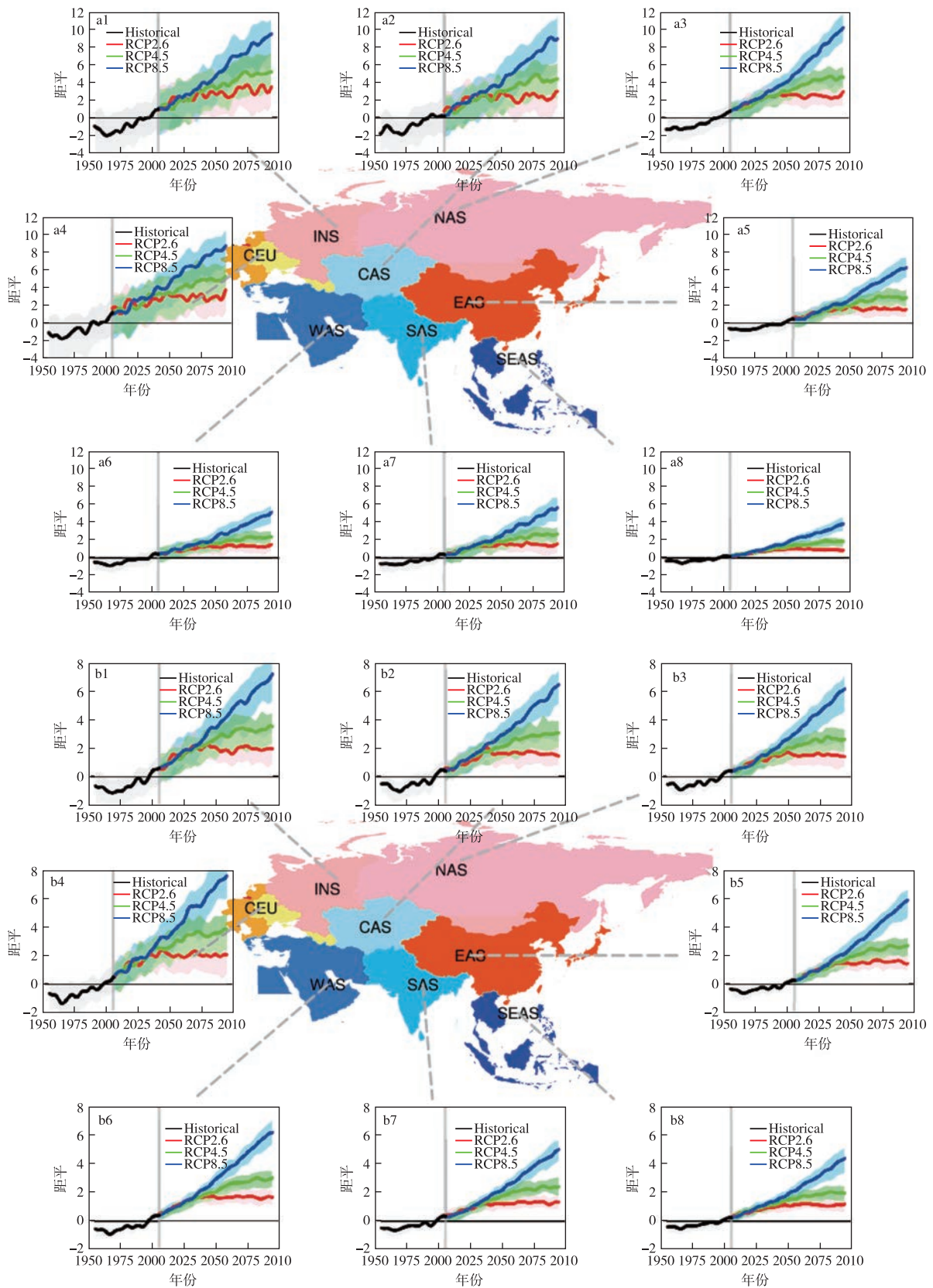


图4 3种RCP情景下“一带一路”区域极端高温(TX_x, a)和极端低温(TN_n, b)变化的时间序列(单位:℃;相对于1986—2005年)

Fig.4 Temporal change in (a) TX_x and (b) TN_n under the three RCP scenarios (relative to the reference period 1986—2005; unit: °C)

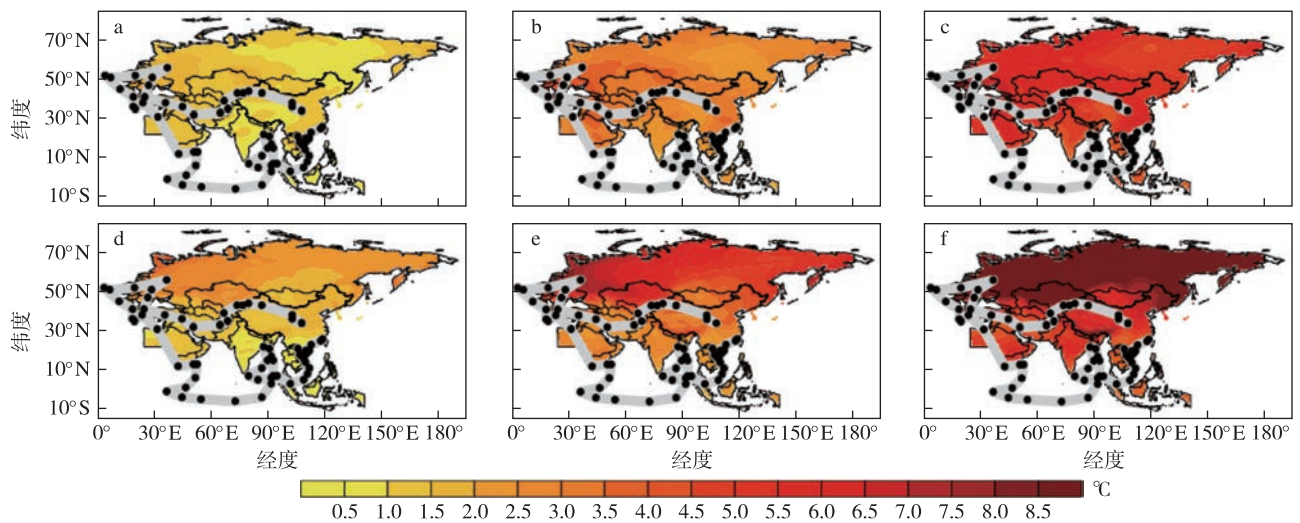


图5 多模式集合预估的“一带一路”区域 RCP8.5 情景下极端高温(TXx,a—c)和极端低温(TNn,d—f)在2016—2035年、2046—2065年和2080—2099年的空间分布(单位:℃;相对于1986—2005年)

Fig.5 Spatial distributions of the projected changes in (a—c) TXx and (d—f) TNn under the RCP8.5 scenario during 2016—2035, 2046—2065 and 2080—2099 (relative to the reference period 1986—2005; unit: °C)

3 结论

基于CMIP5提供的18个全球气候模式模拟结果,预估了RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5情景下“一带一路”地区平均温度和降水以及极端温度和降水的未来变化趋势。主要结论如下:

1) 未来“一带一路”地区年平均气温将持续上升,增温幅度在高纬度地区大于低纬度地区、高排放情景大于低排放情景。在RCP8.5情景下,冬季北亚地区(NAS)的变暖幅度最大,升温趋势介于超过 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$;其余地区的升温趋势介于 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})\sim 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ 之间。到21世纪末,年平均气温的升温幅度将普遍升高 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,其中北亚(NAS)地区升幅最大,而南亚(SAS)和东南亚(SEAS)的升幅最小。

2) 未来“一带一路”大部分地区年降水量将增加,但具有明显的区域差异和情景依赖性。21世纪近期,三种RCP情景下西亚(WAS)和北亚(NAS)

地区的降水均将明显增加,而长江流域南部的年降水量在RCP8.5情景下却呈减少趋势。在21世纪中期,RCP2.6情景下西亚(WAS)和北亚(NAS)将分别增加22.5%和19%,大于RCP4.5和RCP8.5情景下降水的增幅,而在21世纪后期,RCP8.5情景下降水的增幅要比RCP2.6和RCP4.5情景下的要大。

3) 未来“一带一路”地区TXx和TNn都将呈现升高的趋势,温室气体排放越多,升温趋势越大。在高纬度区域,TNn的增暖幅度要大于TXx的增暖幅度。到21世纪末,RCP8.5情景下高纬度的地区TXx将比1986—2005年时期增加 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,而TNn的增加幅度将会超过 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

4) 未来“一带一路”地区的CDD在北亚(NAS)和东亚(EAS)总体呈现减少趋势,而在其他地区则呈总体增加趋势。“一带一路”区域的RX5day都将增加,增加最明显的地区出现在南亚(SAS)、东南亚(SEAS)和东亚(EAS)区域。与其他区域相比,西亚(WAS)和南亚(SAS)地区的预估不确定性最大。

参考文献(References)

- Andrys J, Kala J, Lyons T J, 2017. Regional climate projections of mean and extreme climate for the southwest of western Australia (1970—1999 compared to 2030—2059) [J]. *Clim Dyn*, 48(5/6): 1723-1747.
- 陈活泼, 2013. CMIP5 模式对 21 世纪末中国极端降水事件变化的预估 [J]. *科学通报*, 58(8): 743-752. Chen H P, 2013. Projected change in extreme rainfall events in China by the end of the 21st century using CMIP5 models [J]. *Chin Sci Bull*, 58(8): 743-752. (in Chinese).
- Chen H P, Sun J Q, 2017. Anthropogenic warming has caused hot droughts more frequently in China [J]. *J Hydrol*, 544: 306-318.
- Chen H P, Sun J Q, Chen X L, 2014. Projection and uncertainty analysis of global precipitation-related extremes using CMIP5 models [J]. *Int J Climatol*, 34(8): 2730-2748.
- Coumou D, Rahmstorf S, 2012. A decade of weather extremes [J]. *Nature Clim Change*, 2(7): 491-496.

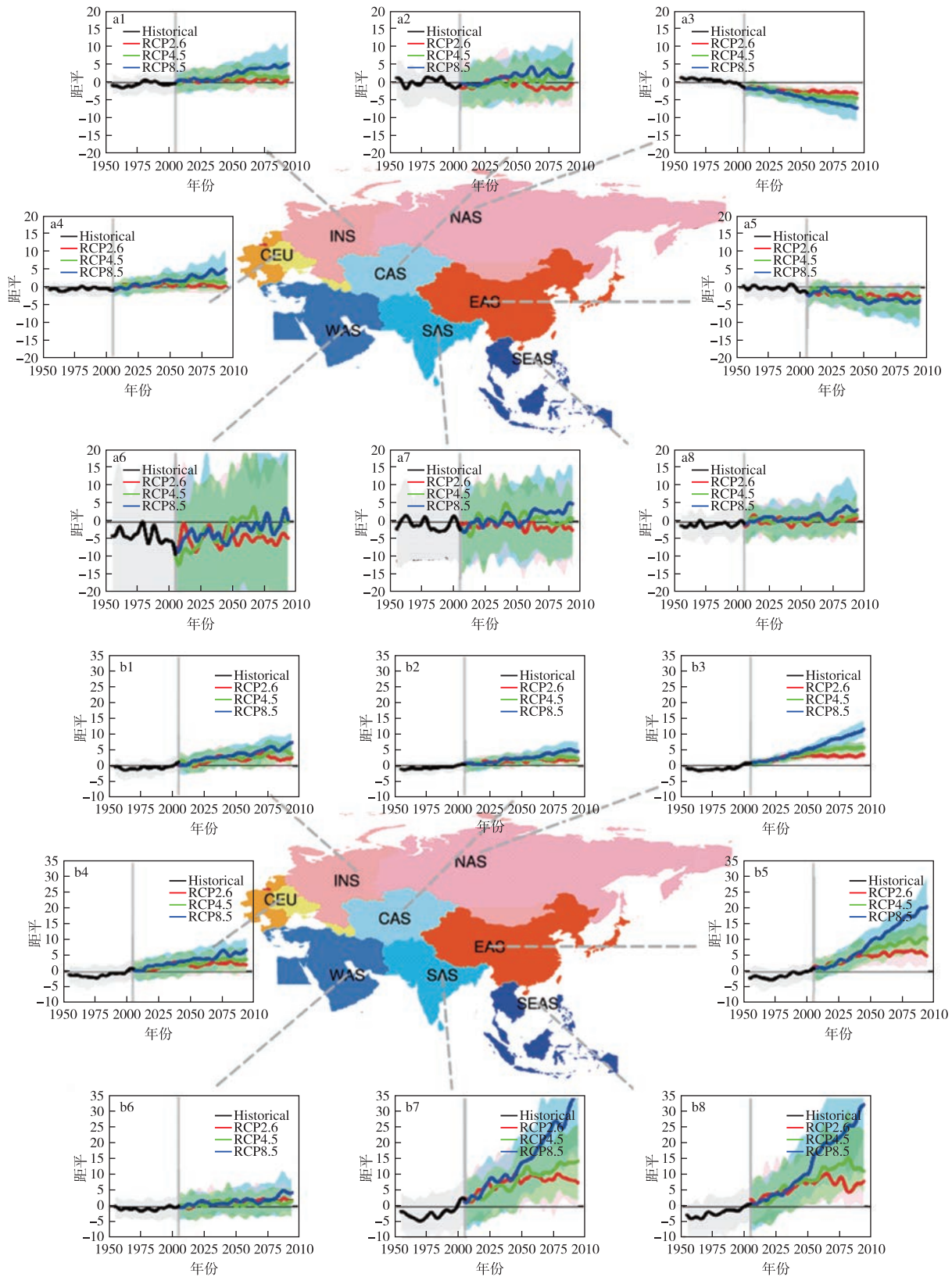


图6 3种RCP情景下“一带一路”区域连续无降雨日数(CDD,a;单位:d)和连续5d最大降雨量(RX5day,b;单位:%)的时间序列(相对于1986—2005年)

Fig.6 Temporal change in (a)CDD (unit:d) and (b)RX5day (unit:%) under the three RCP scenarios(relative to the reference period 1986—2005)

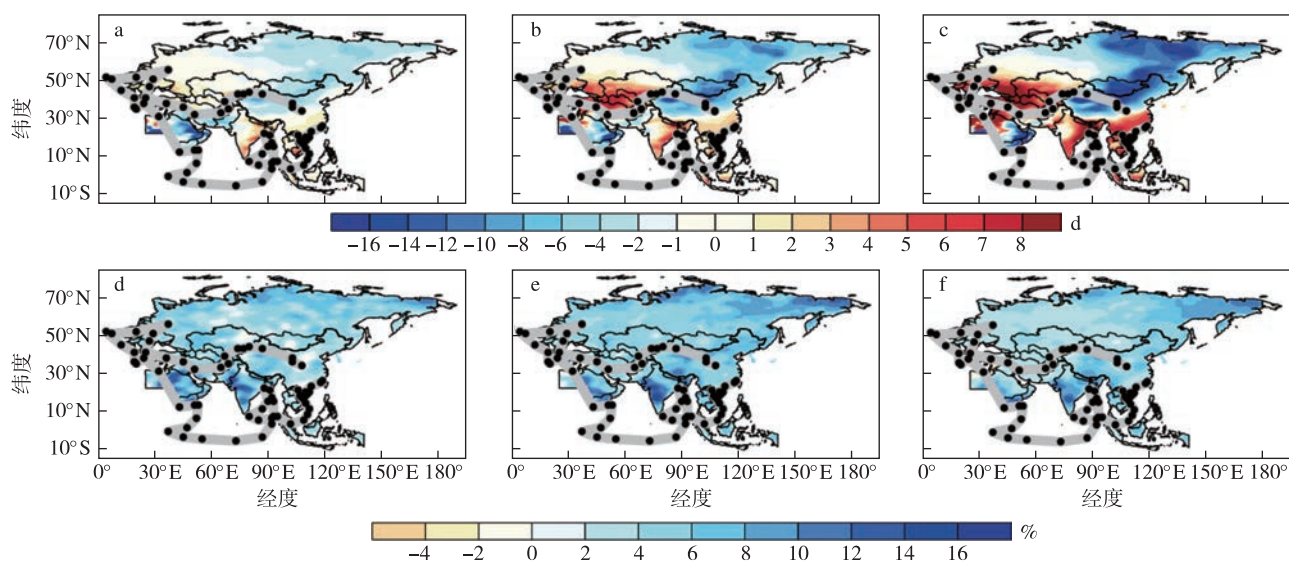


图7 多模式集合预估的“一带一路”区域 RCP8.5 情景下连续干旱日数(CDD, a—c; 单位:d)和连续5 d最大降雨量(RX5day)距平百分率(d—f; 单位:%)在2016—2035年、2046—2065年和2080—2099年的空间分布(相对于1986—2005年)

Fig.7 Spatial distributions of the projected changes in (a—c) CDD (unit:d) and (d—f) percentage changes in RX5day (unit:%) under the RCP8.5 scenario during 2016—2035, 2046—2065 and 2080—2099 (relative to the reference period 1986—2005)

- Gao X J, Shi Y, Han Z Y, et al., 2017. Performance of RegCM4 over major river basins in China[J]. *Adv Atmos Sci*, 34(4): 441-455.
- Han Z Y, Zhou B T, Xu Y, et al., 2017. Projected changes in haze pollution potential in China: an ensemble of regional climate model simulations[J]. *Atmos Chem Phys*, 17(16): 10109-10123.
- Huang J P, Yu H P, Guan X D, et al., 2016. Accelerated dryland expansion under climate change[J]. *Nature Clim Change*, 6(2): 166-171.
- IPCC, 2013. *Climate Change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge and New York: Cambridge University Press.
- IPCC, 2014. *Climate Change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge and New York, Cambridge University Press.
- Jiang Z H, Li W, Xu J J, et al., 2015. Extreme precipitation indices over China in CMIP5 models. part I: model evaluation[J]. *J Climate*, 28(21): 8603-8619.
- Jiang D B, Tian Z P, Lang X M, 2016. Reliability of climate models for China through the IPCC Third to Fifth Assessment Reports[J]. *Int J Climatol*, 36(3): 1114-1133.
- Klein Tank A M G, Zwiers F W, Zhang X, 2009. Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. WCDMP-No.72, WMO-TD No.1500, 56.
- Moss R H, Edmonds J A, Hibbard K A, et al., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment[J]. *Nature*, 463(7282): 747-756.
- Sillmann J, Kharin V V, Zhang X, et al., 2013a. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble; Part 1. Model evaluation in the present climate[J]. *J Geophys Res Atmos*, 118(4): 1716-1733.
- Sillmann J, Kharin V V, Zwiers F W, et al., 2013b. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble; Part 2. Future climate projections[J]. *J Geophys Res Atmos*, 118(6): 2473-2493.
- Sui Y, Lang X M, Jiang D B, 2014. Time of emergence of climate signals over China under the RCP4.5 scenario[J]. *Clim Chang*, 125(2): 265-276.
- Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A, 2012. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 93(4): 485-498.
- Wang H J, Sun J Q, Chen H P, et al., 2012. Extreme climate in China: facts, simulation and projection[J]. *Metz*, 21(3): 279-304.
- Wang Y J, Zhou B T, Qin D H, et al., 2017. Changes in mean and extreme temperature and precipitation over the arid region of Northwestern China: Observation and projection[J]. *Adv Atmos Sci*, 34(3): 289-305.
- Xu Y, Zhou B T, Wu J, et al., 2017. Asian climate change under 1.5–4 °C warming targets[J]. *Adv Clim Chang Res*, 8(2): 99-107.
- Yao Y, Luo Y, Huang J B, et al., 2013. Comparison of monthly temperature extremes simulated by CMIP3 and CMIP5 models[J]. *J Climate*, 26(19): 7692-7707.
- Zhang X B, Alexander L, Hegerl G C, et al., 2011. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data[J].

WIREs Clim Change, 2(6):851-870.

Zhou B T, Wen Q H, Xu Y, et al., 2014. Projected changes in temperature and precipitation extremes in China by the CMIP5 multimodel ensembles[J].

J Climate, 27(17):6591-6611.

CMIP5 projected changes in mean and extreme climate in the Belt and Road region

ZHOU Botao¹, XU Ying², HAN Zhenyu², SHI Ying², WU Jia², LI Rouke²

¹ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

² National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

In this study, based on the simulation results from 18 CMIP5 models, the future changes of the mean and extreme climate in the Belt and Road under three representative concentration pathways (RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5) are projected. The results show that the annual temperature in the Belt and Road would continue to rise in the future as a response to the continuous emission of greenhouse gases, and in addition the rising amplitude tends to increase with the enhancement of greenhouse gas emission. Under the high emission (RCP8.5) scenario, the increase of annual temperature would generally exceed 5 °C by the end of the 21st century, with the greatest warming occurring in West Asia and North Asia, and the smallest in South Asia and Southeast Asia. The annual precipitation is projected to increase over most of the region, particularly in West Asia and North Asia, where the projected increases under the RCP2.6 scenario is greater than that under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios by the middle of the 21st century, while the case is reversed with larger increase in the RCP8.5 scenario than in the RCP2.6 and RCP4.5 scenarios by the end of the 21st century. Extreme temperature is also projected to increase in the future, with the warming amplitude in the high latitudes being greater than in the low latitudes, and that under the high emission scenario greater than under the low emission scenario. Moreover, the increase in the extreme low temperature is greater than that of the extreme high temperature over the high latitudes. The number of consecutive dry days is projected to decrease in North Asia and East Asia, while increasing in other regions. The projected extreme precipitation tends to intensify in the Belt and Road, and the greatest intensification appears in South Asia, Southeast Asia and East Asia.

the Belt and Road; climate change projection; climate extremes; CMIP5

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191125009

(责任编辑:袁东敏)