中国及其屏障区柯本气候分类的RegCM4集合预估

吴婕¹, 韩振宇^{2*}, 石英², 高学杰^{3,4}

1. 赣南师范大学地理与环境工程学院, 赣州 341000;

2. 中国气象局国家气候中心, 北京 100081;

3. 中国科学院大气物理研究所气候变化研究中心, 北京 100029;

4. 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: hanzy@cma.gov.cn

2021-07-29 收稿, 2021-10-10 修回, 2021-10-11 接受, 2021-11-17 网络版发表

国家自然科学基金(41991284, 41805063)资助

摘要 区域气候模式RegCM4分别在CSIRO-Mk3-6-0、EC-EARTH、HadGEM2-ES、MPI-ESM-MR和NorESM1-M五个全球气候模式驱动下, 进行了水平分辨率为25 km的东亚区域气候变化试验. 基于该试验的集合结果, 在对结果进行误差订正的基础上, 本文预估了RCP4.5温室气体排放路径下21世纪末期(2069~2098年)中国及其国家生态安全屏障区的柯本-特里瓦沙气候分类的变化. 结果表明, 相比当代(1981~2010年), 21世纪末期中国的气候型发生变化的面积比例为22%, 其中青藏高原和秦岭-淮河一带变化明显, 青藏高原地区苔原气候(FT)的范围大幅度收缩, 中国半干旱(BS)和冬干温暖气候(Cw)的范围扩展, 其中BS面积较当代扩张近20%; 国家生态安全屏障区的气候型变化更明显一些, 总面积的24%将发生改变, 其中以青藏高原和川滇-黄土高原的变化最大(40%左右), 东北森林带次之, 气候变化将导致这些地区的生态脆弱性加大.

关键词 气候变化, 区域气候模式, 柯本气候分类, 国家生态安全屏障区

中国疆域辽阔, 地形和气候类型多变, 自然生态系统复杂, 生物多样性丰富, 但生态脆弱性明显. 同时, 经济和社会的快速发展对自然生态系统形成了巨大压力, 产生了如东北地区森林退化、内蒙古高原和西北地区土地沙漠化、黄土高原严重水土流失和青藏高原草地退化等问题. 为推进生态文明建设、保障国家生态安全, 中国政府相继提出建立生态功能保护区、保持重点生态功能保护区和自然保护区等的生态功能基本稳定^[1,2]等部署与规划, 提出了青藏高原生态屏障、川滇-黄土高原生态屏障、东北森林带、北方防沙带和南方丘陵山地带构成的“两屏三带”国家生态安全屏障框架^[3].

中国正在经历以变暖为主要特征的气候变化^[4~6].

全球变暖和气候系统的其他变化在20世纪加剧, 可能造成它们对生态系统的威胁增加^[7,8]. 在全球变暖的背景下, 中国气候及生态系统的未来变化受到了越来越多的关注^[4,9]. 在气候变化预估研究中, 除气温、降水等单要素外, 气候类型由于与生态、植被系统的更好联系, 也是非常值得关注的方面^[10~15].

在各种气候分类中, 柯本气候分类法是一个传统且目前应用非常广泛的气候分类方法之一. 它最早由柯本(Köppen)^[16]在20世纪初提出, 基于月和季气温、降水数据并参考植被类型, 将气候划分出若干种基本气候型. 柯本气候分类法分类标准简单、界限明确, 且基本适用于森林、草原、沙漠、苔原等景观带, 因此被广泛应用至今.

引用格式: 吴婕, 韩振宇, 石英, 等. 中国及其屏障区柯本气候分类的RegCM4集合预估. 科学通报, 2022, 67: 99–112

Wu J, Han Z Y, Shi Y, et al. Projected shifts in Köppen climate zones over China and its national ecological security shelter zones (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 99–112, doi: 10.1360/TB-2021-0744

气候模式(包括全球气候模式和区域气候模式)是气候预估的基础工具。基于参加耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)全球模式集合结果,使用柯本气候分类法, Mählstein等人^[17]指出全球气候带随全球气温的升高而线性变化; Feng等人^[18]预估全球的温带、热带和干旱带的面积将扩张,而极地、亚寒带和亚热带的面积将减少; Belda等人^[13]预估到21世纪末,在RCP4.5(RCP8.5)路径下, 14%(22%)的全球陆地面积上将发生气候类型的变化。一些研究者基于CMIP5全球模式集合结果,也预估了中国未来的柯本气候带变化。例如, Chan等人^[14]、程志刚等人^[19]的研究结果显示,中国未来苔原气候和沙漠气候的范围将收缩,且东北和青藏高原是对增暖最敏感因而环境最脆弱的地区; Liu^[20]也预估了未来青藏高原的苔原气候面积将缩小。

相比分辨率较粗的全球气候模式,高分辨率的区域气候模式可以更好地刻画复杂地形和植被覆盖状况,对区域和局地尺度气候有更好的模拟和预估效果^[21,22]。研究人员基于区域模式结果,评估和/或预估了未来世界各地包括东亚气候类型的变化^[11,15,23-30]。对于东亚地区, Shi等人^[11]利用高分辨率的RegCM3区域气候模式集合结果,预估未来中国的冷气候类型面积将显著减少,并且相比21世纪中期,21世纪末期将有更大的气候类型变化; Jo等人^[15]基于区域气候降尺度协同试验(CORDEX)东亚区域内的3个区域气候模式集合数据,预估在2和3°C升温阈值下,东亚区域的热带和亚热带将向北扩张,高纬度区域的亚寒带和苔原气候范围将快速收缩,青藏高原的气候类型变化明显。

但总体而言,目前使用区域模式集合预估结果进行中国柯本气候的评估和预估的研究尚不多,关注“两屏三带”国家生态安全屏障区的研究更少。本研究基于在5个全球模式驱动下RegCM4区域模式在东亚区域的动力降尺度集合结果,进行RCP4.5温室气体排放路径下,21世纪末期中国及其国家生态安全屏障区的柯本气候变化分析,以更好地预估这些地区气候类型的未来变化,为国家生态系统保护提供科学依据。

1 模式、资料和方法

研究使用的区域气候模式是国际理论物理中心(ICTP)发展的RegCM4^[31]。RegCM系列模式广泛应用于中国气候和气候变化的研究中,已取得大量成果^[32]。与之前的版本相比,RegCM4的重要改进之一是陆面过程方案使用CLM(communitary land model)^[33]替代了之前的

BATS(biosphere-atmosphere transfer scheme)^[34]。经过对模式不同物理参数化方案的对比试验, Gao等人^[35,36]推荐了RegCM4在中国区域模拟效果最优的模式物理方案设置,其中最主要的设置是CLM陆面过程方案和Emanuel对流参数化方案的组合。此外,根据韩振宇等人^[37]的研究,更新了RegCM4在中国地区的植被覆盖类型等参数,最终形成了一个适用于中国气候模拟的版本,进行了21世纪中国气候变化的动力降尺度集合模拟与预估^[38-42]。

在气候变化试验中,运行RegCM4所需的初始场和逐6 h更新的侧边界驱动场分别由参加CMIP5的5个模式CSIRO-Mk3-6-0^[43]、EC-EARTH^[44]、HadGEM2-ES^[45]、MPI-ESM-MR^[46,47]和NorESM1-M^[48,49]的历史试验和RCP4.5路径下^[50]的21世纪预估试验模拟结果提供。这些模式在所有参与CMIP5模式中具有较高的分辨率,且对中国气候有较好的模拟能力^[51]。

试验中RegCM4的模拟范围为CORDEX^[52]东亚区域,水平分辨率为25 km×25 km(经-纬度),时间为1979~2098年,这套区域降尺度模拟结果可以较好地模拟中国区域的平均气温、降水和极端气候事件^[53-56]。本研究选取其中的逐月气温和降水数据进行分析,为便于比较,将模拟结果插值至0.25°×0.25°(经-纬度)格点上。研究中选取1981~2010年作为当代时段,2069~2098年代表21世纪末期;此外,由于台湾地区的观测数据获取不便,本研究只包括“中国大陆”的结果。

由于气候模式不可避免地存在着模拟偏差,为更好地给出未来气候分型变化,首先基于CN05.1^[57]格点化观测数据集,使用delta分位数映射(quantile delta mapping)方法^[58]对模拟结果进行了误差订正,订正后模式对当代气候的模拟结果与观测结果基本一致,同时很好地保留了模式所预估的未来气候变化信号^[59]。

研究中采用一种经过改进的柯本气候分类标准柯本-特里瓦沙(Köppen-Trewartha,下文简称为柯本气候)^[27,60,61]。此分类标准基于年、季节和月平均的气温和降水数据,划分为6种基本气候带,每种气候带划分几种气候型,表1给出中国存在的主要气候型及其划分标准。相比原始柯本气候分类标准,柯本-特里瓦沙分类标准能更好地与实际的自然带边界相对应,与局地植被联系较强,也更适合于分析气候变化对生态系统的影响^[25,62]。为分析不同模拟间结果的一致性,基于单个模式结果分别计算柯本气候分布,若某格点有3个模式结果相同,则认为该格点的一致性较好。

表 1 柯本气候分类标准及所对应的自然景观^{a)}

Table 1 Köppen-Trewartha (K-T) climate classification and the corresponding vegetation types

气候带	气候型	定义	主要自然景观
A, 热带		所有月气温 $\geq 18^{\circ}\text{C}$	
	Aw, 热带稀树草原气候	干月 ^{b)} ≥ 3 个月	稀树草原
B, 干旱带	BW, 沙漠气候	年降水量 $(\text{cm}) \leq 0.5A^{c)}$	沙漠
	BS, 半干旱气候	年降水量 $(\text{cm}) > 0.5A^{c)}$	草原、森林
C, 亚热带		8~12个月的气温 $> 10^{\circ}\text{C}$, 年降水量 $\leq 89\text{ cm}$	
	Cw, 冬干温暖气候	冬季干燥 ^{d)}	亚热带常绿阔叶林
	Cr, 亚热带湿润气候	没有干季	亚热带常绿阔叶林
D, 温带		4~7个月的气温 $> 10^{\circ}\text{C}$	
	Do, 温带海洋性气候	最冷月气温 $\geq 0^{\circ}\text{C}$	温带落叶阔叶林
	Dc, 温带大陆性气候	最冷月气温 $< 0^{\circ}\text{C}$	针阔混交林
E, 寒温带		至多3个月的气温 $> 10^{\circ}\text{C}$	
	Eo, 寒温带海洋性气候	最冷月气温 $> -10^{\circ}\text{C}$	针叶林
	Ec, 寒温带大陆性气候	最冷月气温 $\leq -10^{\circ}\text{C}$	松林、云杉和落叶松组成的针叶林
F, 极地带	FT, 苔原气候	所有月气温 $< 10^{\circ}\text{C}$	苔原

a) 仅列出中国范围内存在的气候类型; b) 干月: 月平均降水量 $< 6\text{ cm}$; c) $A = 2.3T - 0.64P_w + 41$, 其中 T 为年平均气温($^{\circ}\text{C}$), P_w 是最冷6个月中的降水量占年降水量的比率; d) 冬季干燥: 夏季最湿润月份降水量 $>$ 冬季最干燥月份降水量的10倍

除对中国整体分析外, 同时针对“两屏三带”国家生态安全屏障区的气候型变化进行了分析, 包括青藏高原生态屏障区(I)、川滇-黄土高原生态屏障区(II)、东北森林带(III)、北方防沙带(IV)和南方丘陵山地带(V)^[3], 具体区域范围划分参照王晓峰^[63]提供的数据。

2 中国年平均气温和年降水及其变化

图1给出多模拟集合平均的中国当代年平均气温和年降水分布及其在21世纪末期的变化。注意到, 经过误差订正后的当代年平均气温和年降水模拟与观测结果基本保持一致^[59]。由图1(a)可见, 中国年平均气温在东部基本呈由南到北逐渐降低的分布, 西部则对地形的依赖性很大, 其中最高值($> 20^{\circ}\text{C}$)出现在大陆南端沿海地区, 最低值($< -5^{\circ}\text{C}$)主要集中于青藏高原西北部和东北地区北部。年降水量则呈现从东南向西北逐渐减少的分布(图1(b)), 最大值($> 1500\text{ mm}$)位于东南地区, 最小值($< 50\text{ mm}$)主要出现于新疆的塔里木盆地。

在RCP4.5中等温室气体排放路径下, 相比当代, 21世纪末期的中国年平均气温将整体升高 2°C (即国际标准单位体系下的2 K, 下同)以上(图1(c)), 全国平均增温幅度为 2.4°C , 其中西部增温高于东部, 青藏高原地区增温最明显, 增温最大的区域($> 2.8^{\circ}\text{C}$)集中在三江源附近地区; 除东北地区东部外, 东部增温在高纬度更明显。

不同于年平均气温的整体上升, 年降水变化的分布比较复杂。由图1(d)可以看出, 年降水在中国大部分地区以增加为主, 其中在西北地区增加幅度较大, 减少主要集中在西南地区, 但幅度较小($< 5\%$)。全国平均的年降水将增加7%。

3 中国当代柯本气候型的分布及变化预估

图2给出基于多模拟集合结果计算得到的当代和21世纪末期中国柯本气候型的分布及变化情况。基于经订正后的多模式集合结果与基于观测数据计算得到的当代中国柯本气候型分布基本一致, 在中国整体上的差异 $< 10\%$ 。从图2(a)可以看出, 中国长江以南大部分地区当代气候型主要是亚热带湿润气候(Cr), 西南及四川盆地和广东、广西沿海岸线则以冬干温暖气候(Cw)为主, 环海南岛地区为热带稀树草原气候(Aw); 在长江以北的中国东部, 经过淮河以北温带海洋性气候(Do)和温带大陆性气候(Dc)的过渡, 由黄河以北至内蒙古东部和东北地区西部主要为半干旱气候(BS), 其中部分地区也有Dc的分布, 如华北的天津至北京一带; 东北地区东部主要为Dc、西北部高纬度地区为寒温带大陆性气候(Ec)。中国西部黄河以西的西北地区主要被沙漠气候(BW)占据, 部分高山地区为苔原气候(FT)(祁连山、天山等), 准噶尔盆地四周同时存在BS分布; 青藏

图1 中国当代(1981~2010年)年平均气温(°C)(a)和降水(mm)(b)分布的集合模拟, 及相对当代, 21世纪末期(2069~2098年)的年平均气温(°C)(c)和降水变化(%) (d)

Figure 1 Spatial distributions of annual mean temperature (°C) (a) and precipitation (mm) (b) in the present day (1981–2010), and the projected changes in annual mean temperature (°C) (c) and precipitation (%) (d) by the end of the 21st century (2069–2098) over China

高原的主要气候型是FT, 在高原的西部有BS及局部的BW, 东侧川西地区则为寒温带海洋性气候(Eo)分布。

21世纪末期的中国气候型分布在保持总体格局的情况下, 在各类型的交界地带出现不同程度的变化, 特别是青藏高原和秦岭-淮河一带(图2(b)). 如图2(c), (d)所示, 东北地区的大兴安岭一带Ec将变化为Dc; 华北地区原有的一些零星分布的Dc将收缩或消失; 淮河以北至黄河, 除山东半岛是Dc被Cw和Do替代外, 都以Dc转变为Do为主; 秦岭东北部和北部的Dc将被Do替代;

环四川盆地将出现Do和Cr被Cw替代的趋势。此外, 广东、广西海岸带的Cw将为Cr取代; Aw将占据整个海南。

中国青藏高原及周边地区气候型有明显变化, 对应于这一地区更大的增暖(图1(c)), 其中川西地区的Eo将转变为Dc; 高原主体以大范围的FT减少为主, 在东部主要被Eo取代; 而在高原北部和中部部分地区气候有趋向干旱化的趋势, 转为BS; 高原西部部分地区BS转换为BW. 西北地区整体变化不大, 其中天山部分

图2 中国当代(1981~2010年)(a)和21世纪末期(2069~2098年)(b)的柯本气候分布, 及21世纪末期柯本气候分布的变化: 消失(c)和新出现(d)的气候型

Figure 2 Distribution of Köppen-Trewartha (K-T) climate types in the present day (1981–2010) (a) and by the end of the 21st century (2069–2098) (b), and the projected retreat (c) and expansion (d) of the climate types by the end of the 21st century over China

地区的FT转换为Ec, 而祁连山低海拔地区的FT则转换为BS.

图3(a)和表2显示了当代与21世纪末期各气候型分布面积的百分率. 在中国当代所有的气候型中, BS范围最大(22%), 接下来依次是BW(19%)、Dc(15%)、Cr(13%)、FT(12%)、Cw(7%)、Do(4%)、Ec(4%)、Eo(3%), 而Aw的范围最小(0.2%). 至21世纪末期, 中国22%(±4%, 基于5个预估结果分别计算柯本气候分布, 然后计算得到的1个标准差范围, 以反映预估间的不确定性. 下同)的国土面积($2096 \times 10^3 \pm 428 \times 10^3 \text{ km}^2$)上将发生气候型变化. 其中变化范围最大的气候型是FT, 由当代的12%缩减至4%, 面积缩小了 $745 \times 10^3 \text{ km}^2$. 其次为BS, 其范围由当代的22%扩张到未来的27%, 面积扩大了 $398 \times 10^3 \text{ km}^2$. 21世纪末期Cw的范围将增加, 从当代

的7%增加到未来的10%, 面积将扩大 $339 \times 10^3 \text{ km}^2$. 未来Eo的范围也略有扩大, 从当代的3%增加至4%, 面积将扩大 $159 \times 10^3 \text{ km}^2$. 21世纪末期Do和Ec的面积都将有一定的减少, 在1%($120 \times 10^3 \text{ km}^2$)左右; BW、Dc和Aw的范围略微增加, 增加数值分别为0.6%($55 \times 10^3 \text{ km}^2$)、0.3%($30 \times 10^3 \text{ km}^2$)和0.1%($13 \times 10^3 \text{ km}^2$); Cr的面积基本不变.

图3(b)给出了21世纪末各气候型相对当代各自面积变化的百分率及其标准差范围, 其中减少比例最多的是FT, 为64%(±13%); 其次为Ec和Do, 分别为33%(±18%)和28%(±6%). 扩张比例最大的是Aw, 达70%(±50%); 其次为Eo和Cw, 分别为63%(±29%)和54%(±28%); BS的扩张也较多, 为19%(±9%); BW和Dc的变化不大, 在2%~3%间; Cr的变化最小, 为0%(±17%). 同

图3 中国当代(颜色填充柱)和21世纪末期(斜线柱)各气候型所占国土面积的比例(a)及21世纪末期各柯本气候型变化率(b)(%)。 (b)图中圆点为平均值, 竖线表示5个模拟间的1个标准差范围。气候型分类见表1

Figure 3 Histograms of the percentage coverage of each K-T climate types in the present day (shaded) and by the end of the 21st century (striped) (a), and future change (%) (b) over China. In (b), the dot and vertical line indicate the mean and 1 standard deviation of the 5 simulations, respectively. The K-T climate classification can be found in Table 1

样, 基于各模拟结果分别计算柯本气候分布, 消失和新出现的气候型分布变化中, 5个模拟中3个一致的格点数占全国格点数的比例分别为87%和81%, 一致性均较好。

柯本气候类型的变化是在气温和降水的组合变化下产生的。为了分析导致气候型变化的主导因素, 图4给出了仅有气温变化而降水不变, 与仅有降水变化而气温不变时的21世纪末期柯本气候分布及其变化。仅有气温变化时(图4(a), (c), (e))的各气候型分布, 与综合考虑气温和降水变化时给出的分布(图2(b)~(d))有较好的一致性, 全国范围内气候型发生变化的面积比例为25%, 与综合考虑气温降水变化时的比例(22%)接近, 说明气温是大部分区域气候型变化的主导因素。仅有降水变化时(图4(b), (d), (f)), 整个中国的气候型变化分布比较零星, 改变的比例为7%, 远小于综合考虑气温降水变化时的情况, 变化主要以在北方地区和西部干旱带的缩减为主。仅有气温变化时, 消失和新出现的气候型分布变化中, 5个模拟中3个一致的格点数占全国格点数的百分比分别为92%和88%; 仅有降水变化时对应的数值分别为70%和69%, 一致性较气温的差, 反映了降水预估中存在更大的不确定性。

4 国家生态安全屏障区的变化

21世纪末期国家生态安全屏障区的气候型分布变化见图5。在青藏高原生态屏障区, FT将大范围退缩, 在

高原东部主要变为Eo, 西北部则转为BS。川滇-黄土高原生态屏障区的大部分地区气候型将发生变化, 当代东南部的Do未来将被Cw替代, 西北部的Eo大部分将被Dc替代, 中部和北部的Dc将分别被Do和BS替代, 该屏障区对应的植被变化(表1)将由针阔混交林为主转变为温带落叶阔叶林和亚热带常绿阔叶林为主。东北森林带西北部的部分Ec将被Dc替代, 主要植被将由松林、云杉和落叶松组成的针叶林变为针阔混交林。北方防沙带东部出现Dc被BS替代, 而西部山地的FT也将主要变为BS, 这些区域21世纪末期的主要植被都将变为草原-森林。南方丘陵山地带的气候型基本没有变化。在消失和新出现的气候型分布变化中, 一致性较好的格点数分别占国家生态屏障区总格点数的91%和86%。

表2给出了国家生态安全屏障区的气候型分布和变化的百分率与面积。所有国家生态安全屏障区有24% ($\pm 6\%$) 的面积($768 \times 10^3 \pm 188 \times 10^3 \text{ km}^2$)将发生变化, 其中Eo、BS、Dc、Cw和Do的面积将分别增加6% ($178 \times 10^3 \text{ km}^2$)、6% ($177 \times 10^3 \text{ km}^2$)、2% ($84 \times 10^3 \text{ km}^2$)、1% ($41 \times 10^3 \text{ km}^2$)和1% ($13 \times 10^3 \text{ km}^2$), 而FT和Ec的面积将分别减少12% ($393 \times 10^3 \text{ km}^2$)和3% ($97 \times 10^3 \text{ km}^2$), 其他两种气候型(BW和Cr)的面积基本不变。

气候变化对生态系统和生物多样性的影响显著: 导致生境的退化或丧失, 加速物种灭绝速度^[64,65], 改变物种的分布范围、物候、丰富度^[66,67]。“两屏三带”国家生态安全屏障区大多都位于生态系统受全球变暖影响

表 2 当代和21世纪末期中国及其国家生态安全屏障区不同柯本气候型所占比例(%)和面积(10^3 km^2)及其范围(以 ± 1 个标准差表示)
Table 2 The coverage (10^3 km^2), its percentage (%) and the spread (as indicated by ± 1 standard deviation) of K-T climate types in the present day and by the end of the 21st century over the national ecological security shelter zones in China

地区 (总体变化百分率/面积)	柯本气候型类型	当代各气候型所占比例/面积 (10^3 km^2)	21世纪末期各气候型所占比例/面积 (10^3 km^2)
中国总计 ($22\%/2103 \times 10^3 \text{ km}^2$) ($\pm 4\%/428 \times 10^3 \text{ km}^2$)	Aw	0%/19	0%/32
	BW	19%/1856	20%/1911
	BS	22%/2136	27%/2534
	Cw	7%/629	10%/968
	Cr	13%/1273	13%/1269
	Do	4%/420	3%/303
	Dc	15%/1382	15%/1412
	Eo	3%/254	4%/413
	Ec	4%/388	3%/260
	FT	12%/1173	4%/428
屏障区总计 ($24\%/768 \times 10^3 \text{ km}^2$) ($\pm 6\%/188 \times 10^3 \text{ km}^2$)	BW	15%/484	15%/491
	BS	20%/657	26%/834
	Cw	5%/146	6%/187
	Cr	5%/170	5%/172
	Do	3%/103	4%/116
	Dc	21%/659	23%/743
	Eo	2%/62	8%/240
	Ec	8%/264	5%/167
	FT	20%/649	8%/256
I, 青藏高原生态屏障 ($41\%/370 \times 10^3 \text{ km}^2$) ($\pm 12\%/106 \times 10^3 \text{ km}^2$)	BW	8%/76	8%/77
	BS	26%/233	38%/346
	Dc	0%/0	2%/19
	Eo	3%/28	23%/207
	Ec	1%/9	5%/42
	FT	62%/560	24%/221
II, 川滇-黄土高原生态屏障 ($37\%/143 \times 10^3 \text{ km}^2$) ($\pm 12\%/47 \times 10^3 \text{ km}^2$)	BS	10%/39	15%/58
	Cw	16%/61	27%/104
	Do	27%/103	30%/116
	Dc	35%/135	23%/89
	Eo	8%/32	5%/18
	FT	4%/14	0%/1
III, 东北森林带 ($20\%/148 \times 10^3 \text{ km}^2$) ($\pm 8\%/57 \times 10^3 \text{ km}^2$)	BS	1%/6	1%/8
	Dc	66%/488	85%/629
	Ec	31%/229	12%/89
IV, 北方防沙带 ($11\%/104 \times 10^3 \text{ km}^2$) ($\pm 3\%/32 \times 10^3 \text{ km}^2$)	BW	44%/409	45%/414
	BS	41%/379	45%/422
	Dc	4%/36	1%/6
	Eo	0%/2	2%/15
	Ec	3%/26	4%/36
	FT	8%/76	4%/34
V, 南方丘陵山地带 ($1\%/3 \times 10^3 \text{ km}^2$) ($\pm 4\%/10 \times 10^3 \text{ km}^2$)	Cw	33%/85	32%/83
	Cr	66%/170	67%/172

图 4 21 世纪末期仅有气温变化时, 中国柯本气候分布(a)及其消失(c)和新出现(e)的气候型, 及仅有降水变化时中国柯本气候分布(b)及其消失(d)和新出现(f)气候型的分布

Figure 4 K-T climate types with temperature change only (a) and the corresponding retreat (c) and expansion (e), and with precipitation change only (b) and the corresponding retreat (d) and expansion (f) by the end of the 21st century over China

最明显的高海拔和高纬度地区^[68]。在“两屏三带”中, 气候型面积分布百分率和面积变化最大的区域都位于青藏高原生态屏障区, 变化的面积达到41%($\pm 12\%$) ($370 \times 10^3 \pm 106 \times 10^3 \text{ km}^2$), FT的范围收缩剧烈, 从当代的

62%缩减到21世纪末期的24%, 面积将减少约 $339 \times 10^3 \text{ km}^2$; Eo、BS和Ec的范围将分别扩张20% ($179 \times 10^3 \text{ km}^2$)、12% ($113 \times 10^3 \text{ km}^2$)和4% ($33 \times 10^3 \text{ km}^2$)。此外, 还出现了新的气候型Dc。总体而言, 青藏高原生

图 5 21 世纪末期(2069–2098 年)国家生态安全屏障区柯本气候分布的变化: 消失(a)和新出现(b)的气候型. I, 青藏高原生态屏障; II, 川滇-黄土高原生态屏障; III, 东北森林带; IV, 北方防沙带; V, 南方丘陵山地带

Figure 5 The projected retreat (a) and expansion (b) of K-T climate types by the end of the 21st century (2069–2098) over the national ecological security shelter zones. I, the ecological barrier of the Qinghai-Tibet Plateau; II, the ecological barrier of the Sichuan-Yunnan-Loess Plateau; III, the northeastern forest shelter; IV, the northern sand-prevention shelter; V, the southern hilly and mountainous shelter

态屏障区当代的 FT 未来将主要被寒温带(E 类型)和干旱带(B 类型)气候替代; 当代的主导气候型是 FT(62%)和 BS(26%), 而未来则变为 BS(38%)和 FT(24%), Eo 所占的比例也增加较多. 该屏障区的气候型变化主要是由于气温变化, 降水变化仅导致西部和北部干旱带的范围缩小. 气候变暖已对青藏高原生态系统产生深刻影响, 如导致树线上升、高寒草原的植物物种多样性和丰富度下降等^[69–72], 随着温室气体浓度的进一步升高, 这些影响会进一步加剧.

在川滇-黄土高原生态屏障区, 未来将有 37% ($\pm 12\%$) 的面积 ($143 \times 10^3 \pm 47 \times 10^3 \text{ km}^2$) 发生气候型变化. 当代主导气候型是 Dc(35%)和 Do(27%), 21 世纪末期的主导气候型变为 Do(30%)、Cw(27%)和 Dc(23%). 其中 Cw、BS 和 Do 的面积将分别增加 11% ($43 \times 10^3 \text{ km}^2$)、5% ($19 \times 10^3 \text{ km}^2$) 和 3% ($13 \times 10^3 \text{ km}^2$); Dc 和 Eo 的面积将分别减少 12% ($46 \times 10^3 \text{ km}^2$) 和 3% ($14 \times 10^3 \text{ km}^2$), FT 将基本消失. 相应地, 对于植被变化, 当代的针叶林、阔叶林、苔原等未来将主要被亚热带常绿阔叶林、森林-草原和温带落叶阔叶林替代. 未来气候条件可能变差, 需要注意该屏障区植被退化的风险. 气温变化是该屏障区气候类型变化的主要因素, 降水变化影响北部 BS 和 Do 的变化.

东北森林带的气候型种类相对较少, 只有 Dc、Ec 和 BS 三种. 当代和未来的主导气候型均为 Dc. 相对当代, 21 世纪末期将有约 20% ($\pm 8\%$) 的面积 (148×10^3

$\pm 57 \times 10^3 \text{ km}^2$) 发生气候型变化, Ec 的范围将收缩 19% ($140 \times 10^3 \text{ km}^2$), 转换为 Dc. 东北森林带的气候型变化仅受气温变化的影响. 未来东北森林带的针叶林将部分被针阔混交林替代, 从而影响寒温带北方落叶针叶林生态系统和部分珍稀濒危动植物适宜分布的范围^[73].

在北方防沙带, 当代和未来的主导气候型均为 BW 和 BS. 21 世纪末期有 11% ($\pm 3\%$) 的范围 ($104 \times 10^3 \pm 32 \times 10^3 \text{ km}^2$) 发生气候型变化, 其中 BS、Ec 和 BW 的范围将有所扩张, 数值分别增加 4% ($43 \times 10^3 \text{ km}^2$)、1% ($10 \times 10^3 \text{ km}^2$) 和 1% ($5 \times 10^3 \text{ km}^2$); 而 FT 和 Dc 的范围将分别缩减 4% ($42 \times 10^3 \text{ km}^2$) 和 3% ($30 \times 10^3 \text{ km}^2$); 同时出现新的气候型 Eo, 面积占 2% ($15 \times 10^3 \text{ km}^2$). 北方防沙带的气候型变化主要由于气温的变化, 降水的变化仅影响干旱带的范围. 在生态保护和修护中, 需要注意该区域未来气候变化导致的干旱化及可能的沙漠范围的扩张.

南方丘陵山地带主要为 Cr 和 Cw 两种气候型, 其中主导气候型一直是 Cr, 但两种气候型变化也相对较小, 有 1% ($\pm 4\%$) 面积 ($2 \times 10^3 \pm 10 \times 10^3 \text{ km}^2$) 的 Cw 被 Cr 替代, 主要由未来冬季降水变化不大或减少导致^[56].

5 结论与讨论

本文基于 5 个不同全球模式分别驱动下 RegCM4 区域模式 25 km 水平分辨率的动力降尺度集合模拟结果, 分析了 RCP4.5 排放路径下 21 世纪末期中国及其国

家生态安全屏障区的柯本气候型变化,得到的主要结论如下。

(1) 相对当代, 21世纪末期中国的年平均气温将整体增加, 全国平均增加值为 2.4°C , 其中西部增温高于东部, 青藏高原地区的升温最明显, 最大升温值在 2.8°C 以上。除西南地区外, 中国大部分地区的年降水将增加, 以西北地区最明显, 全国平均将增加7%。

(2) 21世纪末期中国气候型发生变化的面积比例为22%, 气候型分布在保持总体格局的情况下, 青藏高原和秦岭-淮河的南北方过渡带附近发生较大变化, 其中青藏高原地区的FT将大幅收缩, 秦岭-淮河一带的Dc和Do将分别被Do和Cw替代。在各气候型中, FT范围缩减最多(64%); BS相对当代面积将扩张19%, 许多地方的气候趋向于干旱化。气候型变化的主导因素是气温的升高。

(3) 未来各国家生态安全屏障区中有24%范围的气候型将发生变化, 其中变化最大的是青藏高原生态屏

障区, 数值达到41%, 其以FT范围的大幅缩减为主, 会引起当前生物适宜分布范围的较大变化, 生态脆弱性较大; 川滇-黄土高原生态屏障区的变化百分率次之, 为37%, 以Cw和BS的较大扩张为代表, 当前植被退化的风险较大; 东北森林带的面积变化为20%, 以Ec范围的收缩为主, 影响寒温带北方针叶林生态系统; 北方防沙带的变化数值为11%, 半干旱和干旱面积的扩张占其中变化的近一半。

最后需要指出的是, 受目前科学发展水平的限制, 在对未来气候变化进行预估方面还存在着较大的不确定性, 特别是在区域和局地尺度上, 未来需要开展更高分辨率的多全球-多区域模式集合预估模拟和分析。更进一步, 需要使用耦合有动态植被过程的气候模式开展相关研究, 以更好地描述气候与植被间的相互作用及气候-植被系统的变化, 为“两屏三带”国家生态安全屏障区的气候变化适应决策服务提供具有更坚实科学基础的数据和建议。

致谢 文中涉及的中国地图经自然资源部地图技术审查中心审查, 审图号为GS(2021)7297号。

参考文献

- 1 The State Council, the People's Republic of China. Circular of the State Council on Issuing the National Ecological Environment Protection Program (in Chinese). 2000, http://www.gov.cn/gongbao/content/2001/content_61225.htm [中华人民共和国国务院. 全国生态环境保护纲要. 2000, http://www.gov.cn/gongbao/content/2001/content_61225.htm]
- 2 The State Council, the People's Republic of China. Decision of the State Council on Implementing Scientific Outlook on Development and Strengthening Environmental Protection (in Chinese). 2005, http://www.gov.cn/zwjk/2005-12/13/content_125736.htm [中华人民共和国国务院. 国务院关于落实科学发展观加强环境保护的决定. 2005, http://www.gov.cn/zwjk/2005-12/13/content_125736.htm]
- 3 National Development and Reform Commission of the People's Republic of China, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, Ministry of Finance of the People's Republic of China, et al. The Planning on National Ecological Protection and Construction (2013–2020) (in Chinese). 2013, <https://www.chinaacc.com/upload/html/2014/11/21/hubb83a90e4de74e67a2a6b4b6e26500bb.pdf> [中华人民共和国国家发展和改革委员会, 中华人民共和国科技部, 中华人民共和国财政部, 等. 全国生态保护与建设规划(2013–2020年). 2013, <https://www.chinaacc.com/upload/html/2014/11/21/hubb83a90e4de74e67a2a6b4b6e26500bb.pdf>]
- 4 Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate change 2013: The physical science basis. In: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- 5 Qin D H, Zhai P M. Evolution of Climate and Ecological Environment in China (in Chinese). Beijing: Science Press, 2021 [秦大河, 翟盘茂. 中国气候与生态环境演变. 北京: 科学出版社, 2021]
- 6 Hu T, Sun Y, Zhang X B. Temperature and precipitation projection at 1.5 and 2°C increase in global mean temperature (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2017, 62: 3098–3111 [胡婷, 孙颖, 张学斌. 全球1.5和 2°C 温升时的气温和降水变化预估. 科学通报, 2017, 62: 3098–3111]
- 7 Field C B, Barros V R. Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. In: Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2014
- 8 Li X, Wu J H, Li B. The battle for biodiversity and human future (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 2374–2378 [李骁, 吴纪华, 李博. 为生物多样性与人类未来而战. 科学通报, 2019, 64: 2374–2378]
- 9 Piao S, Fang J, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458: 1009–1013
- 10 Peel M C, Finlayson B L, McMahon T A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2007, 11: 1633–1644

- 11 Shi Y, Gao X J, Wu J. Projected changes in Köppen climate types in the 21st century over China. *Atmos Ocean Sci Lett*, 2012, 5: 495–498
- 12 Phillips T J, Bonfils C J W. Köppen bioclimatic evaluation of CMIP historical climate simulations. *Environ Res Lett*, 2015, 10: 064005
- 13 Belda M, Holtanová E, Kalvová J, et al. Global warming-induced changes in climate zones based on CMIP5 projections. *Clim Res*, 2016, 71: 17–31
- 14 Chan D, Wu Q, Jiang G, et al. Projected shifts in Köppen climate zones over China and their temporal evolution in CMIP5 multi-model simulations. *Adv Atmos Sci*, 2016, 33: 283–293
- 15 Jo S, Ahn J B, Cha D, et al. The Köppen-Trewartha climate-type changes over the CORDEX-East Asia Phase 2 domain under 2 and 3°C global warming. *Geophys Res Lett*, 2019, 46: 14030–14041
- 16 Köppen W. *Das Geographische System Der Klimate*. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1936
- 17 Mahlstein I, Daniel J S, Solomon S. Pace of shifts in climate regions increases with global temperature. *Nat Clim Chang*, 2013, 3: 739–743
- 18 Feng S, Hu Q, Huang W, et al. Projected climate regime shift under future global warming from multi-model, multi-scenario CMIP5 simulations. *Glob Planet Change*, 2014, 112: 41–52
- 19 Cheng Z G, Zhang Y M, Xu Y. Projection of climate zone shifts in the 21st century in China based on CMIP5 models data (in Chinese). *Adv Clim Chang Res*, 2015, 11: 93–101 [程志刚, 张渊萌, 徐影. 基于CMIP5模式集合预估21世纪中国气候带变迁趋势. *气候变化研究进展*, 2015, 11: 93–101]
- 20 Liu W. Decreasing “alpine tundra” climatic type with global warming in the Tibetan Plateau. *Theor Appl Climatol*, 2018, 137: 1949–1955
- 21 Gao X J, Shi Y, Song R, et al. Reduction of future monsoon precipitation over China: Comparison between a high resolution RCM simulation and the driving GCM. *Meteorol Atmos Phys*, 2008, 100: 73–86
- 22 Gao X J, Shi Y, Zhang D, et al. Uncertainties in monsoon precipitation projections over China: Results from two high-resolution RCM simulations. *Clim Res*, 2012, 52: 213–226
- 23 Gao X J, Giorgi F. Increased aridity in the Mediterranean region under greenhouse gas forcing estimated from high resolution simulations with a regional climate model. *Glob Planet Change*, 2008, 62: 195–209
- 24 Gallardo C, Gil V, Hagel E, et al. Assessment of climate change in Europe from an ensemble of regional climate models by the use of Köppen-Trewartha classification. *Int J Climatol*, 2012, 33: 2157–2166
- 25 Gallardo C, Gil V, Tejeda C, et al. Köppen-Trewartha classification used to assess climate changes simulated by a regional climate model ensemble over South America. *Clim Res*, 2016, 68: 137–149
- 26 Teichmann C, Eggert B, Elizalde A, et al. How does a regional climate model modify the projected climate change signal of the driving GCM: A study over different CORDEX regions using REMO. *Atmosphere*, 2013, 4: 214–236
- 27 Fernandez J P R, Franchito S H, Rao V B, et al. Changes in Koppen-Trewartha climate classification over South America from RegCM4 projections. *Atmos Sci Lett*, 2017, 18: 427–434
- 28 Skalák P, Farda A, Zahradníček P, et al. Projected shift of Köppen-Geiger zones in the central Europe: A first insight into the implications for ecosystems and the society. *Int J Climatol*, 2018, 38: 3595–3606
- 29 Remedio A R, Teichmann C, Buntemeyer L, et al. Evaluation of new CORDEX simulations using an updated Köppen-Trewartha climate classification. *Atmosphere*, 2019, 10: 726
- 30 He H, Luo G, Cai P, et al. Assessment of climate change in Central Asia from 1980 to 2100 using the Köppen-Geiger climate classification. *Atmosphere*, 2021, 12: 123
- 31 Giorgi F, Coppola E, Solmon F, et al. RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Clim Res*, 2012, 52: 7–29
- 32 Gao X J, Giorgi F. Use of the RegCM system over East Asia: Review and perspectives. *Engineering*, 2017, 3: 766–772
- 33 Oleson K W, Niu G Y, Yang Z L, et al. Improvements to the Community Land Model and their impact on the hydrological cycle. *J Geophys Res*, 2008, 113: G01021
- 34 Dickinson R, Henderson-Sellers A, Kennedy P. *Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as Coupled to the NCAR Community Climate Model*. NCAR Technical Note, 1993
- 35 Gao X J, Shi Y, Giorgi F. Comparison of convective parameterizations in RegCM4 experiments over China with CLM as the land surface model. *Atmos Ocean Sci Lett*, 2016, 9: 246–254
- 36 Gao X J, Shi Y, Han Z Y, et al. Performance of RegCM4 over major river basins in China. *Adv Atmos Sci*, 2017, 34: 441–455
- 37 Han Z Y, Gao X J, Shi Y, et al. Development of Chinese high resolution land cover data for the RegCM4/CLM and its impact on regional climate simulation (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2015, 37: 857–866 [韩振宇, 高学杰, 石英, 等. 中国高精度土地覆盖数据在RegCM4/CLM模式中的引入及其对区域气候模拟影响的分析. *冰川冻土*, 2015, 37: 857–866]
- 38 Gao X J, Wu J, Shi Y, et al. Future changes in thermal comfort conditions over China based on multi-RegCM4 simulations. *Atmos Ocean Sci Lett*, 2018, 11: 291–299

- 39 Cheng Y, Zhou B T, Han Z Y, et al. Evaluation of multi-RegCM4 dynamical downscaling simulations on cluster high temperature events in China (in Chinese). *Adv Clim Chang Res*, 2020, 16: 657–666 [程阳, 周波涛, 韩振宇, 等. 一组RegCM4动力降尺度对中国群发性高温事件的模拟评估. *气候变化研究进展*, 2020, 16: 657–666]
- 40 Cai Y H, Han Z Y, Zhou B T. Evaluation of RegCM4 downscaling simulations on regional rainstorm events in China (in Chinese). *Adv Clim Chang Res*, 2021, 17: 420–429 [蔡怡亨, 韩振宇, 周波涛. 对基于RegCM4降尺度的中国区域性暴雨事件模拟评估. *气候变化研究进展*, 2021, 17: 420–429]
- 41 Zhou B T, Cheng Y, Han Z Y, et al. Future changes of cluster high temperature events over China from RegCM4 ensemble under RCP4.5 scenario. *Adv Clim Change Res*, 2020, 11: 349–359
- 42 Xie W, Zhou B T, Han Z Y, et al. Projected changes in heat waves over China: Ensemble result from RegCM4 downscaling simulations. *Int J Climatol*, 2021, 41: 3865–3880
- 43 Rotstayn L D, Collier M A, Dix M R, et al. Improved simulation of Australian climate and ENSO-related rainfall variability in a global climate model with an interactive aerosol treatment. *Int J Climatol*, 2010, 30: 1067–1088
- 44 Hazeleger W, Severijns C, Semmler T, et al. EC-Earth. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2010, 91: 1357–1364
- 45 Collins W J, Bellouin N, Doutriaux-Boucher M, et al. Development and evaluation of an Earth-system model—HadGEM2. *Geosci Model Dev*, 2011, 4: 1051–1075
- 46 Jungclaus J H, Fischer N, Haak H, et al. Characteristics of the ocean simulations in the Max Planck Institute Ocean Model (MPIOM) the ocean component of the MPI-Earth System Model. *J Adv Model Earth Syst*, 2013, 5: 422–446
- 47 Stevens B, Giorgetta M, Esch M, et al. Atmospheric component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6. *J Adv Model Earth Syst*, 2013, 5: 146–172
- 48 Bentsen M, Bethke I, Debernard J B, et al. The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M—Part 1: Description and basic evaluation of the physical climate. *Geosci Model Dev*, 2013, 6: 687–720
- 49 Iversen T, Bentsen M, Bethke I, et al. The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M—Part 2: Climate response and scenario projections. *Geosci Model Dev*, 2013, 6: 389–415
- 50 van Vuuren D P, Edmonds J, Kainuma M, et al. The representative concentration pathways: An overview. *Clim Change*, 2011, 109: 5–31
- 51 Jiang D B, Tian Z P, Lang X M. Reliability of climate models for China through the IPCC Third to Fifth Assessment Reports. *Int J Climatol*, 2016, 36: 1114–1133
- 52 Giorgi F, Jones C, Asrar G R. Addressing climate information needs at the regional level: The CORDEX framework. *WMO Bull*, 2009, 58: 175–183
- 53 Shi Y, Wang G, Gao X J. Role of resolution in regional climate change projections over China. *Clim Dyn*, 2017, 51: 2375–2396
- 54 Wu J, Gao X J, Xu Y. Climate change projection over Xiong'an District and its adjacent areas: An ensemble of RegCM4 simulations (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2018, 42: 696–705 [吴婕, 高学杰, 徐影. RegCM4模式对雄安及周边区域气候变化的集合预估. *大气科学*, 2018, 42: 696–705]
- 55 Wu J, Gao X J. Present day bias and future change signal of temperature over China in a series of multi-GCM driven RCM simulations. *Clim Dyn*, 2020, 54: 1113–1130
- 56 Zhang D F, Gao X J. Climate change of the 21st century over China from the ensemble of RegCM4 simulations (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 2516–2526 [张冬峰, 高学杰. 中国21世纪气候变化的RegCM4多模拟集合预估. *科学通报*, 2020, 65: 2516–2526]
- 57 Wu J, Gao X J. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2013, 56: 1102–1111 [吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比. *地球物理学报*, 2013, 56: 1102–1111]
- 58 Cannon A J, Sobie S R, Murdock T Q. Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *J Clim*, 2015, 28: 6938–6959
- 59 Tong Y, Gao X J, Han Z Y, et al. Bias correction of temperature and precipitation over China for RCM simulations using the QM and QDM methods. *Clim Dyn*, 2021, 57: 1425–1443
- 60 Trewartha G T, Horn L H. *An Introduction to Climate*. 5th ed. New York: McGraw Hill, 1980
- 61 Belda M, Holtanová E, Halenka T, et al. Climate classification revisited: From Köppen to Trewartha. *Clim Res*, 2014, 59: 1–13
- 62 de Castro M, Gallardo C, Jylha K, et al. The use of a climate-type classification for assessing climate change effects in Europe from an ensemble of nine regional climate models. *Clim Change*, 2007, 81: 329–341
- 63 Wang X F. National barrier zone of China (in Chinese). *Digit J Glob Change Data Repos*, 2020, doi: 10.3974/geodb.2020.03.01.V1 [王晓峰. 中国国家生态屏障区——全球变化数据大百科辞条. *全球变化数据仓储电子杂志*, 2020, doi: 10.3974/geodb.2020.03.01.V1]
- 64 Thomas C D, Cameron A, Green R E, et al. Extinction risk from climate change. *Nature*, 2004, 427: 145–148
- 65 Lambers J H R. Extinction risks from climate change. *Science*, 2015, 348: 501–502
- 66 Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 2003, 421: 37–42

- 67 Lenoir J, Gegout J C, Marquet P A, et al. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science*, 2008, 320: 1768–1771
- 68 Solomon S, Manning M, Marquis M, et al. Climate change 2007: The physical science basis. In: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- 69 Piao S L, Zhang X Z, Wang T, et al. Responses and feedback of the Tibetan Plateau's alpine ecosystem to climate change (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 2842–2855 [朴世龙, 张宪洲, 汪涛, 等. 青藏高原生态系统对气候变化的响应及其反馈. 科学通报, 2019, 64: 2842–2855]
- 70 Chen D L, Xu B Q, Yao T D, et al. Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 3025–3035 [陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来. 科学通报, 2015, 60: 3025–3035]
- 71 Zhang R H, Su F G, Jiang Z H, et al. An overview of projected climate and environmental changes across the Tibetan Plateau in the 21st century (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 3036–3047 [张人禾, 苏凤阁, 江志红, 等. 青藏高原21世纪气候和环境预估研究进展. 科学通报, 2015, 60: 3036–3047]
- 72 Zhang X Z, Yang Y P, Piao S L, et al. Ecological change on the Tibetan Plateau (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 3048–3056 [张宪洲, 杨永平, 朴世龙, 等. 青藏高原生态变化. 科学通报, 2015, 60: 3048–3056]
- 73 Lü J J. The impacts of climate change on the distribution of rare or endangered species in China and adaptation strategies (in Chinese). Master Dissertation. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2009 [吕佳佳. 气候变化对我国主要珍稀濒危物种分布影响及其适应对策研究. 硕士学位论文. 北京: 中国环境科学研究院, 2009]

Summary for “中国及其屏障区柯本气候分类的RegCM4集合预估”

Projected shifts in Köppen climate zones over China and its national ecological security shelter zones

Jie Wu¹, Zhenyu Han^{2*}, Ying Shi² & Xuejie Gao^{3,4}¹ School of Geography and Environmental Engineering, Gannan Normal University, Ganzhou 341000, China;² National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;³ Climate Change Research Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;⁴ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China* Corresponding author, E-mail: hanzy@cma.gov.cn

Based on a set of five regional climate model 21st century climate change simulations, this study assesses future changes in Köppen-Trewartha climate types in China and its five national ecological security shelter zones. The regional climate model, the Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP) regional climate model RegCM4, is driven by five different global climate models, CSIRO-Mk3-6-0, EC-EARTH, HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR and NorESM1-M, at a grid spacing of 25 km under the representative concentration pathway RCP4.5. These global climate models were selected because of their high horizontal resolution and their good performance in reproducing temperature and precipitation over China. The model configuration used was customized for better performance over China. Bias correction was applied to the simulated temperature and precipitation before calculating the climate types.

By the end of the 21st century (2069–2098), the annual mean temperature over China is projected to increase by 2.4°C relatives to the present day (1981–2010) annual mean temperature, with the greatest warming (> 2.8°C) occurring in the Three Rivers Headwaters region. The annual mean precipitation change shows a general increase in most parts of China, except for a slight decrease (< 7%) in southwestern China. The increase is more pronounced over northwestern China.

The distribution of climate types was well reproduced by the simulations. A subtropical humid (Cr) climate mainly covers the regions south of the Yangtze River over eastern China. Southwestern China is dominated by a subtropical winter dry (Cw) climate. The Tibetan Plateau is mostly described as tundra (FT) and arid (type B) climate. Dry arid (BW) and semiarid (BS) climates cover most of the northern regions of 35°N except over northeastern China, where temperate continental (Dc) and subarctic continental (Ec) climates exist.

Compared to the present-day climates, a change of 22% in the climate types is projected to occur over the whole Chinese territory by the end of the 21st century. The changes are most significant over the Tibetan Plateau and along the climate transition zone of the Qinling Mountains-Huaihe River over China, with a dominant retreat of FT due to the profound warming and an expansion of BS and Cw being projected for the former, and a replacement of temperature oceanic (Do) by Cw being projected for the latter. Over northeastern China, the main projected change in the climate types is the replacement of Ec by Dc. Tropical wet-dry (Aw) climates will occur over all of Hainan Island. The analysis showed that most changes in climate types are driven by temperature rather than precipitation.

For the national shelter zones, climate types will change by 24% over all the areas. Profound changes of ~40% will occur in the shelter zones of the Qinghai-Tibet Plateau and the Sichuan-Yunnan-Loess Plateau, followed by those in the northeastern forest. More specifically, over the Qinghai-Tibet Plateau, the replacement of FT by subarctic oceanic (Eo), BS, Ec, and Dc climates is projected to occur. While FT (62%) and BS (26%) dominate this region currently day, BS (38%) and FT (24%) will account for a greater proportion of the region by the end of the 21st century. The change in climate types on the Sichuan-Yunnan-Loess Plateau is characterized by the expansion of Cw and BS and a loss of FT. Replacement of Ec by Dc is projected in the northeastern forest shelter zone, indicating a major retreat of subarctic coniferous forest there. Greater ecological vulnerability and risks in the future under climate change are expected in the zones. Generally, the changes are in good agreement among the individual simulations, indicating a small uncertainty in the projections.

climate change, regional climate model, Köppen climate types, national ecological security shelter zonesdoi: [10.1360/TB-2021-0744](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0744)