北京大学学报(自然科学版) 第 53 卷 第 6 期 2017 年 11 月
Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, Vol. 53, No. 6 (Nov. 2017)
doi: 10.13209/j.0479-8023.2017.123

未来气候变化情景下中国北方农牧交错带脆弱性评估

周一敏 张昂 赵昕奕†

教育部地表分析与模拟重点实验室, 北京大学城市与环境学院, 北京 100871;
† 通信作者, E-mail: sh-zhao@urban.pku.edu.cn

摘要 基于中国地面降水和气温0.5°×0.5°格点数据集以及区域协同降尺度试验东亚地区项目组RCP4.5和RCP8.5情景下未来气候预估数据, 对中国北方农牧交错带1980—2100年的气候脆弱性进行模拟和分析。结果表明, 北方农牧交错带气候脆弱性在未来的100年中整体上呈现增大的趋势, 特别是2050年后, 增大速度进一步加剧, 到21世纪末, 几乎整个北方农牧交错带都表现出明显脆弱性。从宁夏中卫到呼和浩特北部一带, 脆弱性形势较为严峻, 而大兴安岭北部地区脆弱性程度较低。

关键词 中国北方农牧交错带; 脆弱性; 区域协同降尺度实验
中图分类号 P404

Analysis of Vulnerable Characteristics in Chinese Northern Farming-Pastoral Region Based on Coordinated Regional Downscaling Experiment

ZHOU Yimin, ZHANG Ang, ZHAO Xinyi†

Laboratory for Earth Surface Processes (MOE), The College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871;
† Corresponding author, E-mail: sh-zhao@urban.pku.edu.cn

Abstract Based on the grid data set of temperature and precipitation of China (0.5°×0.5°) and the output of coordinated regional downscaling experiment (CORDEX) East Asia, including the climate prediction based on RCP4.5 and RCP 8.5, the authors simulate and analyze vulnerability in Chinese northern farming-pastoral region from 1980 to 2100 with temperature, precipitation and maximum near-surface wind speed. The results show that the ecologically vulnerability in Chinese northern farming-pastoral region increases during 2006–2100, especially after 2050, the increase speed rises rapidly. By the end of 21st century, almost all the Chinese northern farming-pastoral region shows at least obvious vulnerability. Said on the space, the vulnerability is severe from Zhongwei to north of Hohhot, however, it's better in north Great Khingan.

Key words Chinese northern farming-pastoral region; vulnerability; coordinated regional downscaling experiment (CORDEX)

全球气候变化的核心是全球变暖。工业化以来, 全球平均陆地和海洋温度升高约 0.8℃, 特别是 20 世纪 50 年代以来, 人们观测到许多前所未有的气候变化现象, 全球平均陆地和海洋温度升高约 0.6℃, 积雪数量减少, 海平面上升, 温室气体浓度增加[1]。自然生态系统对气候变化非常敏感, 最近 20 年, 全球自然生态系统的破坏日趋严重[1–6]。全球气候变暖、人类活动排放的温室气体是导致自然生态系统破坏的重要原因之一[1]。

IPCC 第 5 次评估报告利用世界气候研究计划

国家自然科学基金(41471073)资助
收稿日期: 2016–06–22; 修回日期: 2016–09–14; 网络出版日期: 2017–07–31

组织(WCRP)耦合模式比较计划(CMIP)的第 5 阶段实验计划(CMIP5), 对 4 个不同典型浓度路径(RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 和 RCP8.5)进行未来情景试验, 得到不同排放情景下未来全球气候可能的变化情况[1]。同时, 很多研究利用这些结果对未来的气候情况进行预测和分析[7–11]。

研究气候变化的影响, 最重要的是研究气候的脆弱性(自然和人为作用下表现出的敏感性和不稳定性)。关于脆弱性的表述和函数描述很多[1,12–15]。IPCC 第 3 次评估报告将脆弱性定义为系统受气候变化导致的不良后果或者无法应对其不良后果的程度, 是系统对敏感性和适应性的函数。

长期以来, 我国北方的农牧交错带是农业和畜牧业的过渡地区, 在气候、生物、土壤等自然要素和人类活动影响中具有过渡性和波动性的特点, 导致该区域的生态环境经常受到冲击和破坏, 表现出敏感性强、退化趋势明显等脆弱性特征[16–19]。近年来, 由于气候变化和人类活动的影响, 该地区沙漠化持续扩张, 情况十分严重。北方农牧交错带的形成是自然和人为因素共同作用的结果, 其中, 气候是该地区大尺度的背景要素, 是脆弱环境形成的主导因素。该地区处于东亚季风和西北大陆气候的交汇带, 年降水量少, 平均值在 250~450 mm 之间; 降水量年际变化大, 集中在七、八两月, 占全年降水量的 45%~55%; 干旱、风沙频发。因此, 北方农牧交错带是进行气候变化脆弱性研究的重点地区。

1 研究区域、资料和方法

1.1 研究区域

北方农牧交错带北起大兴安岭西麓的呼伦贝尔, 经内蒙古东南、冀北、晋北, 直至鄂尔多斯、陕北, 包括北方五省区的 52 个县(市), 总面积约 25 万 km^2[20](图 1)。该区域是一个典型的农牧过渡带, 年降水量在 400 mm 左右, 不仅是自然条件和农业生产的过渡带, 也是汉族和少数民族交错居住的地区[21]。

1.2 资料

本研究中的未来情景气象数据资料来源于区域协同降尺度试验(coordinated regional downscaling experiment, CORDEX)项目中的东亚地区项目组(https://cordex-ea.climate.go.kr/)。CORDEX 项目是将全球气候模式的结果与区域气候模式耦合, 进行区域未来气候变化情景预测的计划。东亚项目主要由韩国科学家完成, 其输入数据源为全球模式比较计划 CMIP5 的试验结果, 并且在未来气候的预测中提供 RCP4.5 和 RCP8.5 两种代表浓度的未来情景气象数据。CORDEX 东亚区项目组提供 5 套区域气候模式的结果, 分别为 HadGEM3-RA, RegCM4, MM5, WRF 和 RSM 模式。上述 5 种模式的空间分辨率均为 0.44°。不同区域气候模式模拟的时间序列长度不同, 详细信息见表 1。

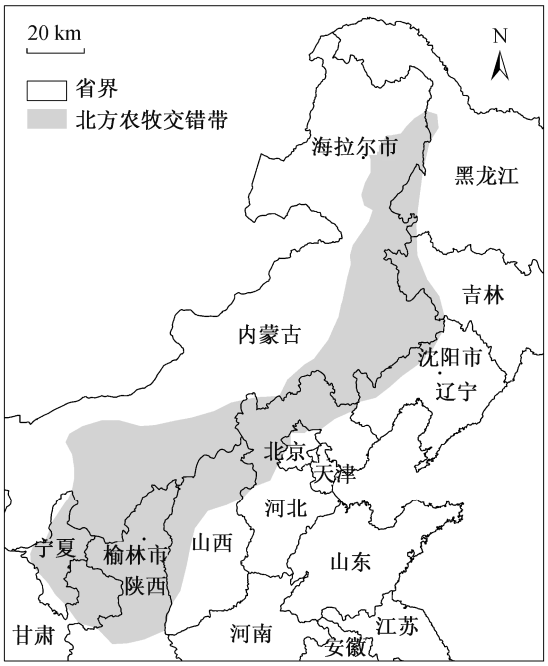

图 1 北方农牧交错带示意图

Fig. 1 Sketch map of northern farming-pastoral region

本研究使用的地面气象基本数据来自中国气象数据共享服务网(http://www.cma.gov.cn/2011qxfw/2011qsjgx/)。使用的数据集为“中国地面降水 0.5×0.5°格点数据集(V2.0)”、“中国地面气温 0.5°×0.5°格点数据集”和“中国地面气候资料日值数据集(日最大风速)”, 前两个数据集是国家气象信息中心基于中国 731 个站点的逐日气温和降水资料, 结合全国 DEM 资料进行的温度场和降水量场空间结构分析, 第 3 个数据集为站点数据的日最大风速。本研究将上述 3 个数据集与区域气候模式的历史数据集进行比较, 用来估算区域气候模式数据的误差。

1.3 研究方法

决定一个地区气候条件的主要因素是其水热组

表 1　5 种区域气候模式的基本信息

Table 1　Basic information of 5 regional climate models

区域气候模式	全球气候模式	历史数据集	未来情景数据		每年天数
			RCP4.5	RCP8.5	
HadGEM-RA	HadGEM2-AO	1950—2005 年	2006—2010 年	2006—2010 年	360
MM5	HadGEM2-AO	1979—2005 年	2006—2049 年	2006—2035 年	365/366
RegCM4	HadGEM2-AO	1979—2005 年	2006—2050 年	2006—2050 年	360
RSM	HadGEM2-AO	1980—2005 年	2006—2050 年	2006—2050 年	360
WRF	HadGEM2-AO	1981—2005 年		2006—2049 年	365/366

合状况。我们以干燥度作为气候背景，考虑降水变率和大风日数，提出用来描述气候脆弱性的脆弱指数(Eco)，并将其无量纲化为

$$\mathrm{Eco}=\frac{K}{(1-v)(1-m)^2},$$

其中，K 为干燥度，$K=0.16\sum T_{10}/r$，T_{10} 为日平均气温≥10℃期间的积温，r 为年降水量，v 为年平均降水相对变化率，m 为大风日数与全年日数比值。利用 CMIP5 中区域气候模式过去和未来的气温、降水和日极大风速数据，模拟过去和未来的 Eco 指数，再利用中国气象数据共享服务网的实测数据，计算得到过去的 Eco 指数，最后通过对比，得到未来可能的 Eco 变化情况。

在对中国北方地区计算结果和实际生态环境分析[22]基础上认为 Eco 值为 1.0 大致是脆弱环境与非脆弱环境的分界。脆弱指数可分为 4 级，如表 2 所示。

表 2　脆弱指数分级

Table 2　Ecological vulnerability degree index

Eco 取值范围	脆弱程度
Eco＜1.0	非脆弱性
1.0≤Eco＜1.5	潜在脆弱性
1.5≤Eco＜3.0	明显脆弱性
3.0≤Eco	极端脆弱性

2　数据分析和结果

2.1　过去 45 年的气温、降水和 Eco 指数

图 2 是利用中国地面气温/降水 0.5°×0.5°格点数据集得到的北方农牧交错带全区平均气温和降水量时间序列。图 2(a)是 1951—2005 年年平均气温的时间序列。北方农牧交错带平均气温呈上升趋势，50 年内上升约 1.5~2℃。图 2(b)是 1961—2005 年年平均降水量的时间序列。1961—2005 年，北方农牧交错带的降水量呈微弱减少趋势。

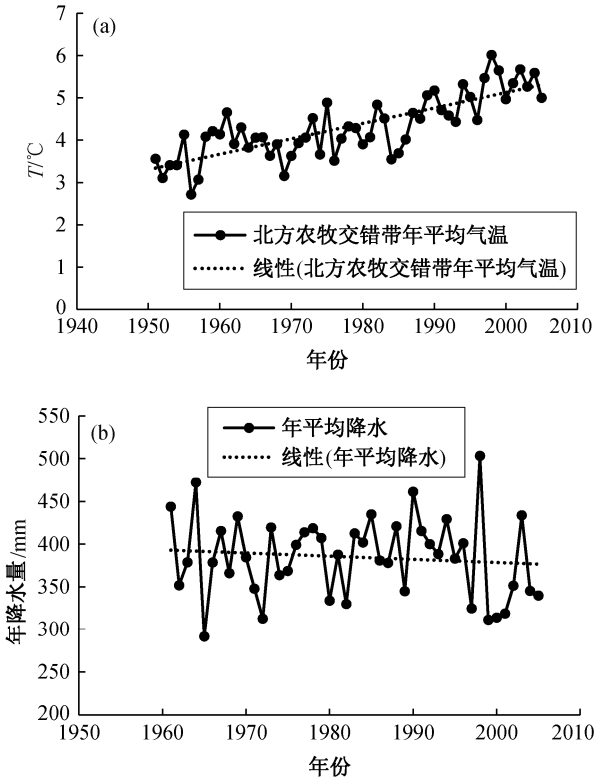

图 2　北方农牧交错带年平均气温和降水量

Fig. 2　Average temperature and precipitation of northern farming-pastoral region

图 3 是利用 CMA 的 3 个数据集得到的北方农牧交错带 26 年(1980—2005 年)的平均 Eco 指数。呈非脆弱性的只有呼伦贝尔和大兴安岭之间的一小部分地区。此地区周围和坝上、大同南部、固原南

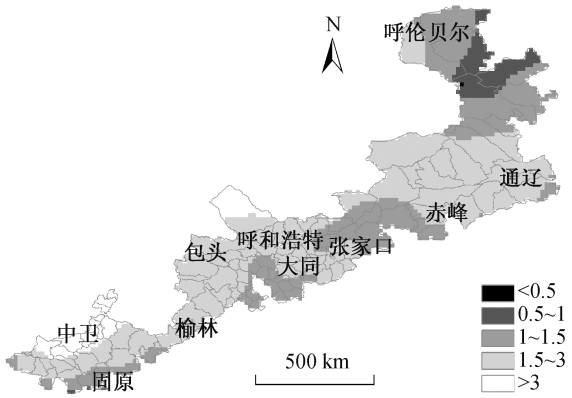

图 3 北方农牧交错带 26 年的平均 Eco 指数
Fig. 3 26 year average Eco index of northern farming-pastoral region

部呈现潜在脆弱性。呼和浩特北部的荒漠和银川、中卫一带呈现极端脆弱性。其他大部分地区均呈现明显脆弱性。

2.2 未来不同情景下的 Eco 指数

在 2006—2100 年 RCP4.5 和 RCP8.5 两种不同的温室气体排放情景下，通过计算 5 种区域气候模式模拟结果的平均值，得到 Eco 指数，以此讨论北方农牧交错带在未来 100 年中可能的生态脆弱性变化情况。图 4 是 5 种区域气候模式 2006—2100 年北方农牧交错带的平均 Eco 指数。RCP4.5 情景下，2005—2100 年基本上保持匀速增长，2100 年平均 Eco 指数约为 1.5。RCP8.5 情景下，2005—2050 年 Eco 指数也呈缓慢增长，增长速度略大于 RCP4.5 情景。2050 年以后，Eco 指数快速增长，2050—2100 年增长了约 0.8。1980—2005 年为模式历史数据结果，平均 Eco 指数从 1 左右开始缓慢增加。RCP4.5 情景下，2050 年以前的 Eco 指数增加速度也较缓慢，之后明显加速；RCP8.5 情景下，Eco 指数迅速增长。

图 5 为 5 种区域气候模式在 RCP4.5 情景下 2011—2040 年、2041—2070 年和 2071—2100 年的 30 年平均 Eco 的空间分布情况。在第一个 30 年中，中部的大部分区域呈现非脆弱性，在中卫和呼和浩特以北的地区有小块地区出现明显脆弱性，在固原到榆林到包头的带状区域和通辽一带出现潜在脆弱性。在第 2 个 30 年中，原先呈潜在脆弱性地区的面积增大，并且在榆林地区出现明显脆弱性地区。在最后一个 30 年中，在原先大面积的潜在脆弱性地区出现大量明显脆弱性地区，包括通辽地区和榆林一带呼伦贝尔北部也出现大面积的潜在脆弱性地区。

与图 5 类似，图 6 是 5 种区域气候模式在 RCP8.5 情景下 2011—2040 年、2041—2070 年和 2071—2100 年的 30 年平均 Eco 的空间分布情况。在第一个 30 年的平均值上，RCP8.5 情景的结果基本与 RCP4.5 情景一致。在第二个 30 年中，相比 RCP4.5 情景，通辽地区出现大量的明显脆弱性的地区，中卫地区更是出现极端脆弱性的情况。在最后一个 30 年中，只有少部分地区有非脆弱性的分布，原本非脆弱性的地区大部分为潜在脆弱性，原本潜在脆弱性的地区变为明显脆弱性，而中卫和呼和浩特以北的地区更是出现了部分极端脆弱性的地区。

2.3 未来气候情景下的 Eco 变化

图 7(a)为 5 种区域气候模式 1971—2000 年 30

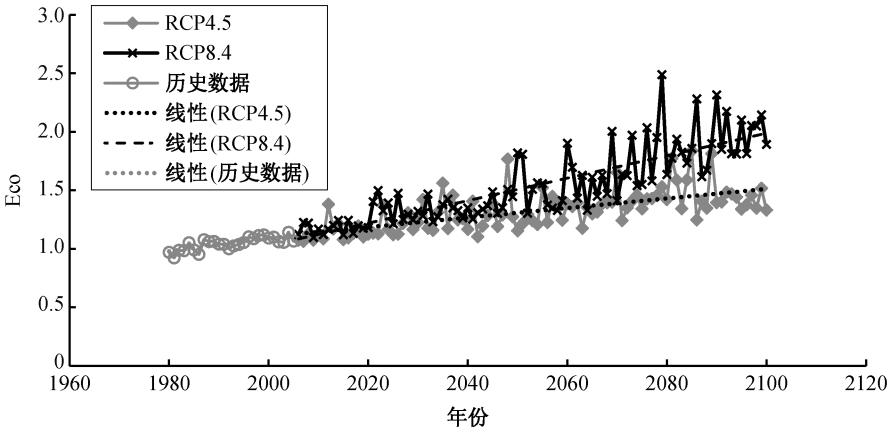

图 4 5 种区域气候模式平均 1980 到 2100 年的平均 Eco 指数
Fig. 4 Eco index from 1980 to 2100 of 5 regional climate models

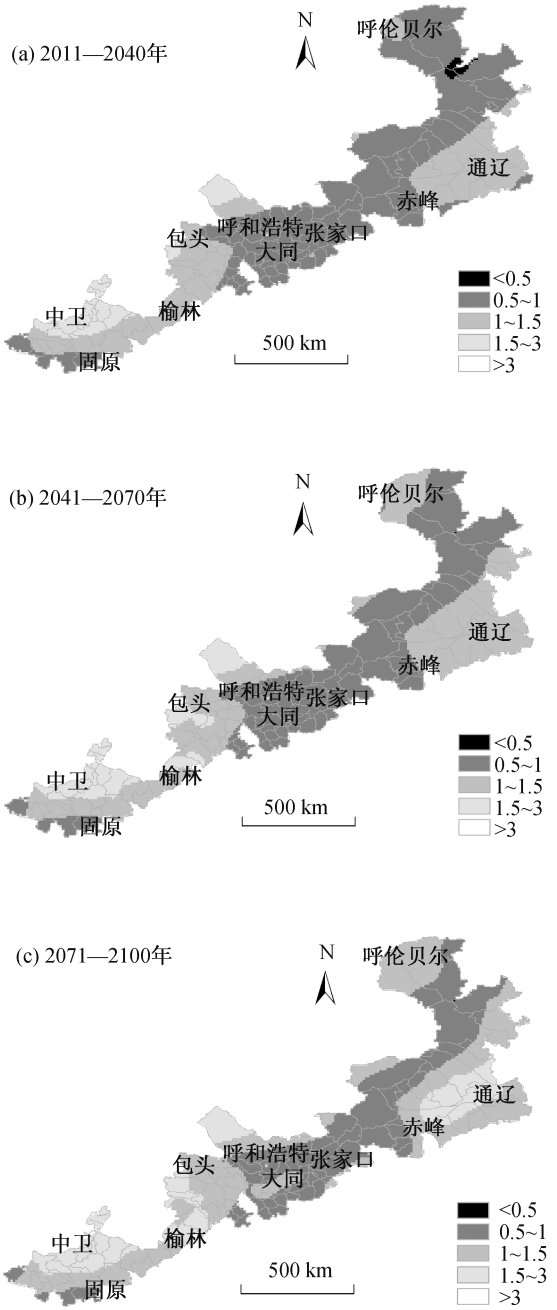

图 5　5 种区域气候模式 RCP4.5 下不同年份的平均 Eco
Fig. 5　Eco index of 5 regional climate models in RCP4.5

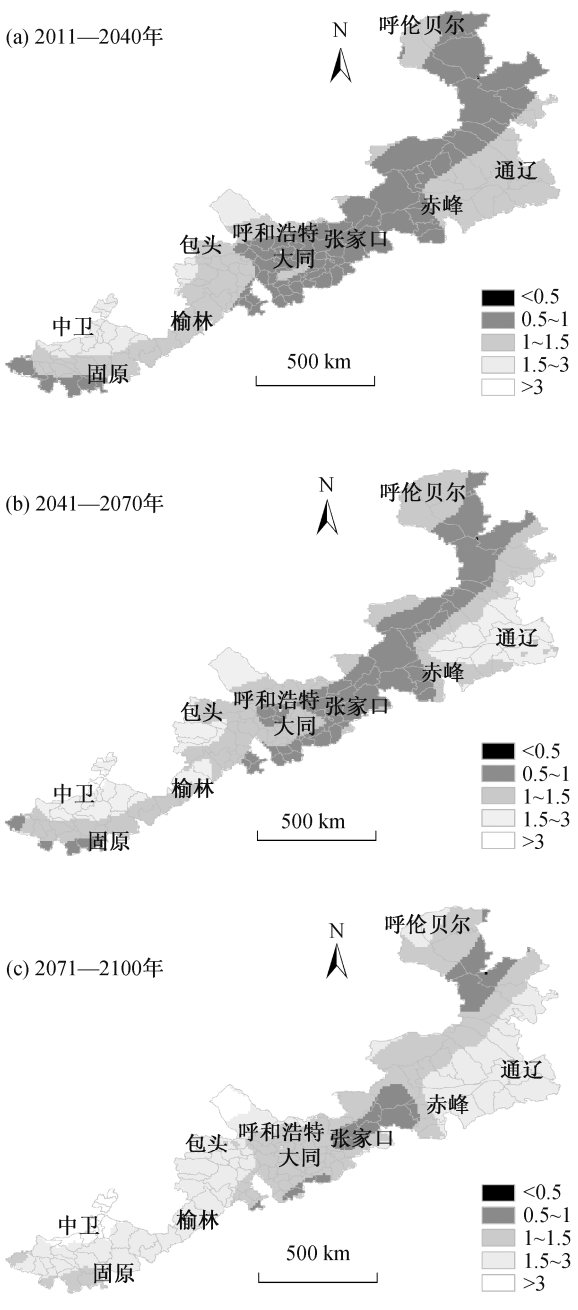

图 6　5 种区域气候模式 RCP8.5 下不同年份的平均 Eco
Fig. 6　Eco index of 5 regional climate models in RCP8.5

年平均 Eco 指数的空间分布。可以看出，大部分区域为非脆弱性区域，只有中卫到呼和浩特一带呈现潜在脆弱性。

图 8 和 9 为 5 种区域气候模式在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下 30 年平均 Eco 与 1980—2005 年平均 Eco 之差。在 RCP4.5 情景下，前两个 30 年整个地区增长幅度不大，大部分地区小于 0.5，只有中卫和呼和浩特以北地区出现超过 0.5 的增长幅度。最后一个 30 年，赤峰到通辽一带出现大于 0.5 的增长幅度。在 RCP8.5 情景下，第一个 30 年与 RCP4.5 情景下类似，大部分地区增长幅度小于 0.5。第二个 30 年，通辽一带出现大片增幅大于 0.5 的地区。最后一个 30 年中，Eco 增长幅度明显增大，从中卫到呼和浩特一带增加幅度超过 1，其中部分地区甚

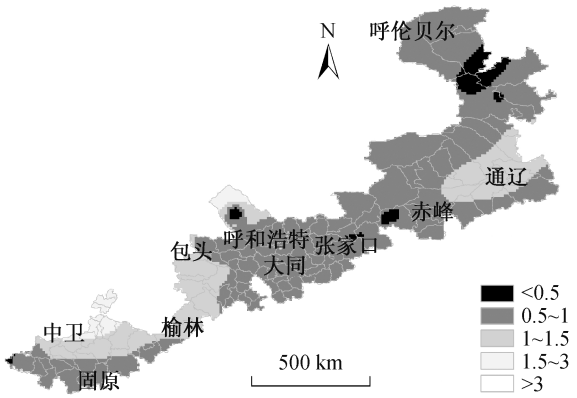

图 7 5 种区域气候模式 1980—2005 年的平均 Eco
Fig. 7 Eco index of 5 regional climate models in history

至超过 1.5，赤峰到通辽一带也有部分地区增幅超过 1。

结合 CMA 和 5 种区域气候模式，可以得到 21 世纪 30 年的平均 Eco 指数。把 5 种区域气候模式的未来 30 年的平均 Eco 指数预估值与1980—2005 年结果之差，加上 1980—2005 年的 CMA 数据结果，即可得到未来气候情景下的结果。图 10 和 11 分别为 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下，结合 CMA 与 5 种区域气候模式未来不同年份的 30 年平均Eco指数。在 RCP4.5 情景下，只有大兴安岭北部有小部分非脆弱性地区，在其两侧为潜在脆弱性地区，其他大部分地区为明显脆弱性状态，中卫和呼和浩特以北的地区表现出极端脆弱性。随着时间的推移，极端脆弱性地区面积没有明显增加，但是非脆弱性和潜在脆弱性地区面积急速减少，到最后 30 年，非脆弱性地区已经消失。在 RCP8.5 情景下，第一个 30 年中，极端和明显脆弱性地区与 RCP4.5 情景下类似，但非脆弱性和潜在脆弱性地区面积明显小于 RCP4.5 情景下。2041—2070 年，极端脆弱性和明显脆弱性地区面积略微增长，非脆弱性地区已经消失，潜在脆弱性地区面积大幅减少。最后一个 30 年，极端脆弱性地区面积急速增加，从中卫到呼和浩特地区几乎连成一片，潜在脆弱性地区只剩下大兴安岭北部和赤峰西南一小块地区，其他大部分地区皆为明显脆弱性地区。

3 结论与讨论

本文利用区域协同降尺度实验东亚项目组的结果，对未来我国北方农牧交错带的脆弱性进行模拟，得出以下结论。

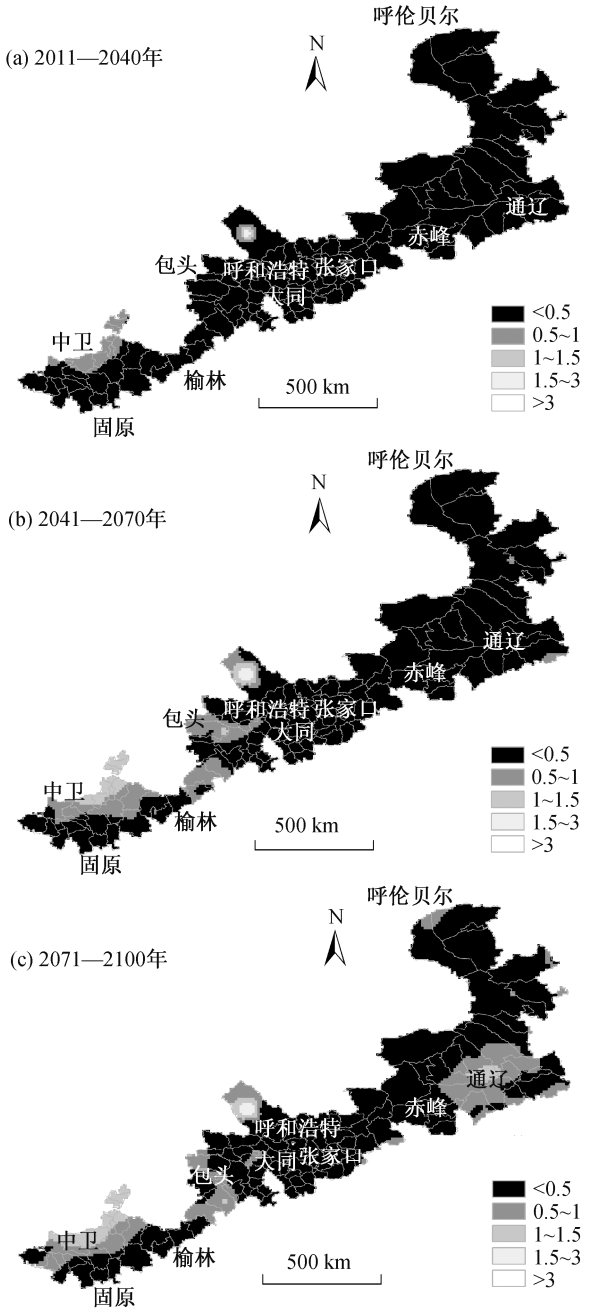

图 8 5 种区域气候模式 RCP4.5 下不同年份平均 Eco 与 1980—2005 年平均值之差
Fig. 8 Eco index of 5 regional climate models difference with the average Eco from 1980 to 2005 in RCP4.5

1961—2005年，我国北方农牧交错带平均气温上升 1~2℃，降水量略微下降。1980—2005年，只有大兴安岭北部一小块地区呈现非脆弱性，其周围和张家口到赤峰一带呈现潜在脆弱性，中卫和呼和浩特以北地区呈现极端脆弱性，其他大部分地区为

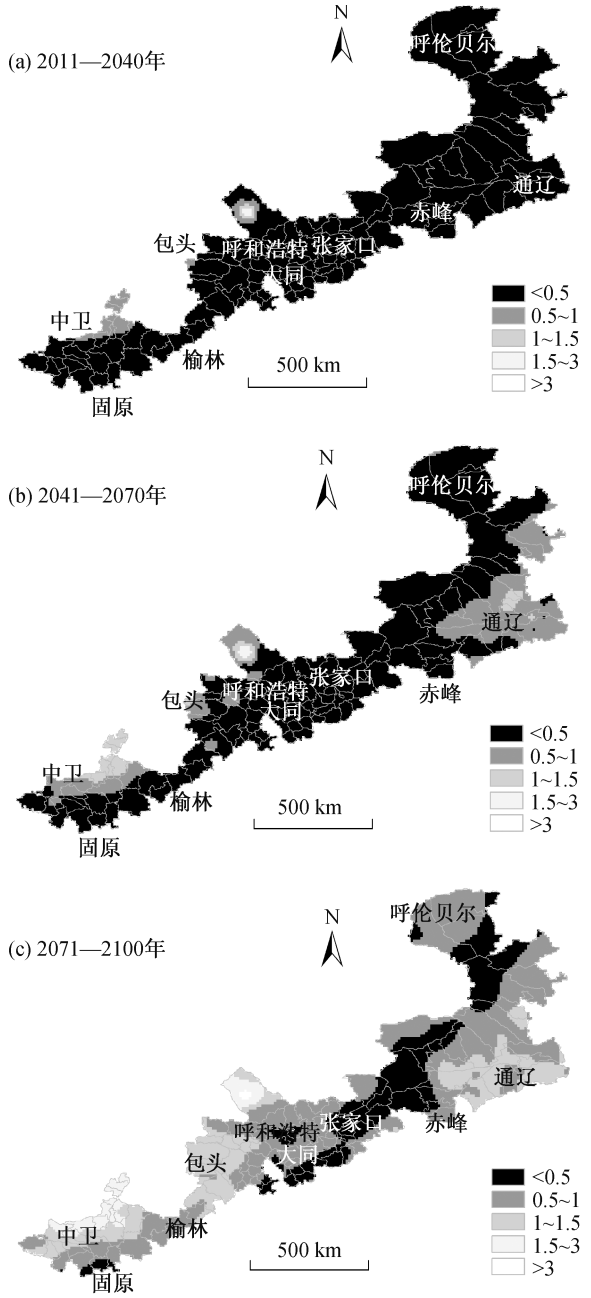

图 9　5 种区域气候模式 RCP8.5 下不同年份的平均 Eco 与 1980—2005 年平均值之差

Fig. 9　Eco index of 5 regional climate models difference with the average Eco from 1980 to 2005 in RCP8.5

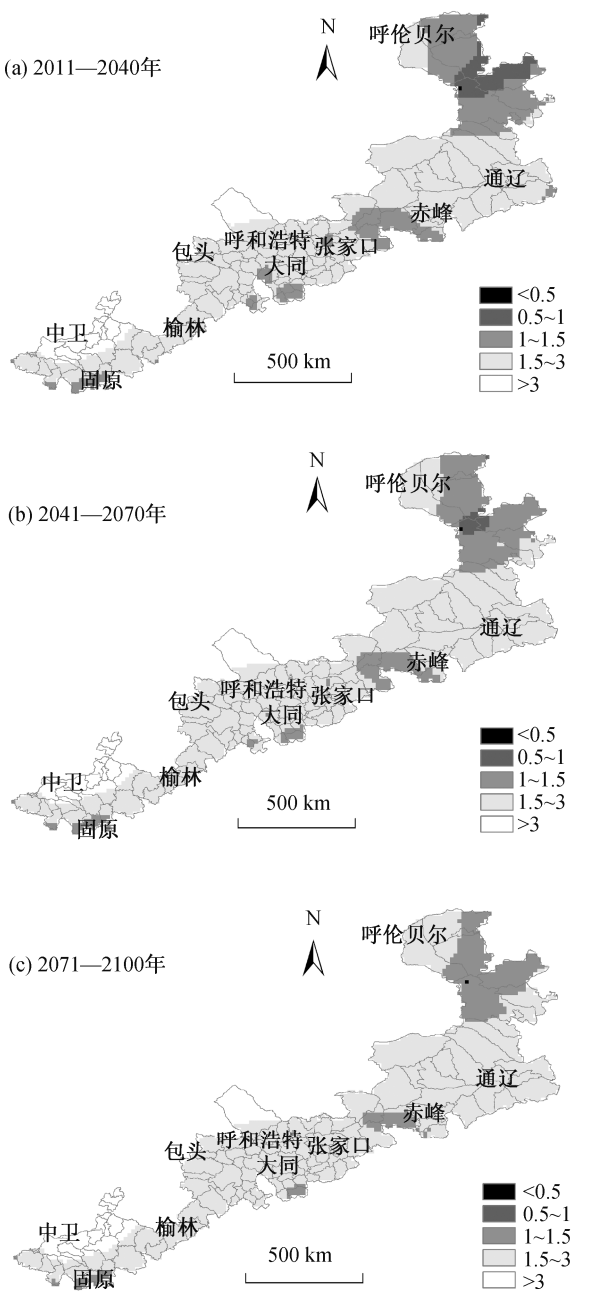

图 10　结合 CMA 与 5 种区域气候模式 RCP4.5 下不同年份的平均 Eco

Fig. 10　Eco index of CMA and 5 regional climate models in RCP4.5

明显脆弱性。

在 RCP4.5 情景下，与 1980—2005 年相比，2011—2040 年整个地区 Eco 指数上升幅度不大，均小于 0.5，表现出的脆弱性情况与前 30 年类似。2041—2070年同样与前 30 年类似，Eco 指数进一步上升少许。2071—2100年中，赤峰到通辽一带出现较大的增幅，中卫一带的增幅也进一步增加，非脆弱性地区已经消失，潜在脆弱性地区面积大幅度缩小，绝大部分地区都呈现明显脆弱性和极端脆弱性。

在 RCP8.5 情景下，2011—2040 年与 RCP4.5 情景下的状况类似。2041—2070 年，通辽和中卫地区 Eco 增幅明显加大，整个地区的脆弱性状况已经与

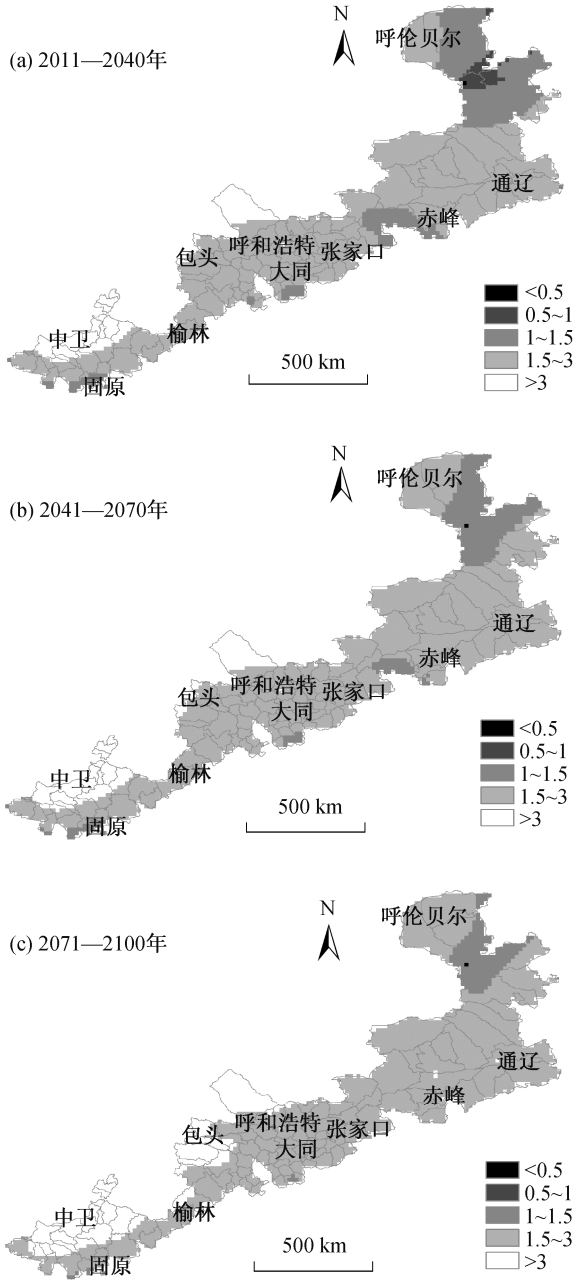

图 11 结合 CMA 与 5 种区域气候模式 RCP8.5 下不同年份的平均 Eco

Fig. 11 Eco index of CMA and 5 regional climate models in RCP8.5

RCP4.5 情景下最后一个 30 年类似。在最后一个 30 年中，整个地区 Eco 指数急剧增加，特别是中卫到呼和浩特一带，增幅超过 1.5，几乎所有地区都呈现明显脆弱性以上的情况，从中卫到呼和浩特大部分地区呈现出极端脆弱性。

从空间上看，中卫和呼和浩特以北是脆弱性最为严重的地区，连接这两个地区的走廊也是较为严重的地区。相反，大兴安岭北部地区为脆弱性最弱的区域，其次为张家口到赤峰一带。

通过研究得到，气温、降水和大风日数是导致该地区脆弱性的主要自然原因[16]。在未来气候变化情景下，这 3 个关键气候要素将是农牧交错带脆弱性评估的主要依据。为了使脆弱指数表达的评估结论更加具有实践参考价值，未来我们将对研究区域的地表土壤、植被和人类活动加以定量化。

参考文献

[1] IPCC. Climate change 2013: the scientific basis. Contribution of Working Group I to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013

[2] 叶笃正. 中国的全球变化预研. 北京: 气象出版社, 1992

[3] 葛全胜, 方修琦, 张雪芹, 等. 20 世纪下半叶中国地理环境的巨大变化. 地理研究, 2005, 24(3): 345–358

[4] Li Kerang, Lin Xianchao. Drought in China: present impacts and future needs // Wilhite D A. Drought assessment, management, and planning: theory and case studies. New York: Springer US, 1993: 263–289

[5] 郑度, 杨勤业, 顾钟熊. 黄秉维地理学术思想及其实践. 地理研究, 2003, 22(2): 133–139

[6] 赵昕奕, 蔡运龙. 区域土地生产潜力对全球气候变化的响应评价——以中国北方农牧交错带中段为例. 地理学报, 2003, 58(4): 584–590

[7] Huang A, Zhou Y, Zhang Y, et al. Changes of the annual precipitation over central asia in the twenty-first century projected by multimodels of CMIP5. Journal of Climate, 2014, 27(17): 6627–6646

[8] Hu K, Huang G, Zheng X, et al. Interdecadal variations in ENSO influences on Northwest Pacific-East Asian early summertime climate simulated in CMIP5 models. Journal of Climate, 2014, 27(15): 5982–5998

[9] 高超, 张正涛, 陈实等. RCP4.5 情景下淮河流域气候变化的高分辨率模拟. 地理研究, 2014, 33(3): 467–477

[10] 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

[11] 陶辉, 白云岗, 毛炜峄. CMIP3 气候模式对北疆气候变化模拟评估及未来情景预估. 地理研究, 2012, 31(4): 3–7

[12] Birkmann J. Measuring vulnerability to natural hazards. Tokyo: United Nations University Press, 2006

[13] Smith B, Pilifosova O. From adaptation to adaptive capacity and vulnerability reduction // Smith J B, Klein R J T, Huq S. Climate change, adaptive capacity and development. London: Imperial College Press, 2003: 9–28

[14] Metzger M J, Rounsevel M D A, Acosta-Michlik L, et al. The vulnerability of ecosystem services to land use change. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2006, 114(1): 69–85

[15] Smit B, Burton I, Klein R J T, et al. The science of adaptation: a framework for assessment. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 1999, 4(3/4): 199–213

[16] 牛文元. 生态环境脆弱带 ECOTONE 的基础判定. 生态学报, 1989, 9(2): 97–105

[17] 刘燕华, 李秀彬. 脆弱生态环境可持续发展. 北京: 商务印书馆, 2001

[18] 蒙吉军, 张彦儒, 周平. 中国北方农牧交错带生态脆弱性评价——以鄂尔多斯市为例. 中国沙漠, 2010, 30(4): 850–856

[19] 孙小明, 赵昕奕. 气候变化背景下我国北方农牧交错带生态风险评价. 北京大学学报(自然科学版), 2009, 45(4): 713–720

[20] 何磊. 气候变化对北方农牧交错带农业生产脆弱性的影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007

[21] 罗承平, 薛纪瑜. 中国北方农牧交错带生态环境脆弱性及其成因分析. 干旱区资源与环境, 1995, 9(1): 1–7

[22] 崔海亭, 王静爱, 朱宗元. 土地利用与景观变化. 北京: 中国环境出版社, 2016