

引用格式:徐新良,李嘉豪,申志成,等.“一带一路”沿线国家农田生态系统脆弱性及其对气候变化的响应[J].地球信息科学学报,2020,22(4): 877-886. [ Xu X L, Li J H, Shen Z C. Vulnerability of farmland ecosystems in countries along the “Belt and Road” and responses to climate change[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(4):877-886. ] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190372

# “一带一路”沿线国家农田生态系统脆弱性及其对气候变化的响应

徐新良<sup>1</sup>, 李嘉豪<sup>1,2</sup>, 申志成<sup>1,2</sup>, 王世宽<sup>1</sup>

1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049

## Vulnerability of Farmland Ecosystems in Countries Along the "Belt and Road" and Responses to Climate Change

XU Xinliang<sup>1</sup>, LI Jiahao<sup>1,2</sup>, SHEN Zhicheng<sup>1,2</sup>, WANG Shikuan<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information Systems, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** In the context of global climate change, vulnerability of farmland ecosystems in countries along the "Belt and Road" can directly affect regional food security. In this paper, we quantitatively analyzed the spatial distribution characteristics of farmland ecosystem vulnerability in countries along the "Belt and Road", as well as the responses to climate change. Results show: (1) Farmland ecosystems in countries along the "Belt and Road" generally had higher vulnerability, wherein 77.1% farmland ecosystems were found moderately and severely vulnerable. There was significant spatial variation of the farmland ecosystem vulnerability—higher in Central Asia, West Asia, and Mongolia; moderate in China, Southeast Asia, and South Asia; and lower in Russia, the Commonwealth of the Independent States, and Central and Eastern Europe. (2) Since 1980, farmland ecosystems along the "Belt and Road" have become notably warmer and drier, with the warming and drying area accounts for 64.06% and distributed mainly in central and southern China, the Commonwealth of the Independent States, southwestern Russia, Central Asia, Western Asia, western and southern India, Myanmar, Cambodia, and Indonesia. Warming and drying was the main feature of climate change in the farmland ecosystems of countries along the "Belt and Road". (3) Areas of climate change arranged per farmland ecosystem vulnerability from the lowest to the highest were: warm-wet areas, cold-wet areas, warm-dry areas, and cold-dry areas. The farmland ecosystem in the warm-wet areas was the least vulnerable and that in the cold-dry areas the most; the area of highly vulnerable farmland ecosystem in the warm-wet areas accounted for 43.09%, and that of highly vulnerable farmland ecosystem in the cold-dry areas accounted for 56.01%. Temperature and precipitation variations and their coupling relation controlled the vulnerability of farmland ecosystems, of which the trend of precipitation variation was an important factor influencing farmland ecological coordination and vulnerability.

收稿日期:2019-07-12;修回日期:2019-10-24.

基金项目:中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA20010302)。 [ **Foundation item:** The Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, No.XDA20010302. ]

作者简介:徐新良(1972—),男,山东青岛人,博士,研究员,博士生导师,主要从事土地利用/土地覆被变化与陆地生态系统综合监测与评估研究。E-mail: xuxl@reis.ac.cn

Our findings could serve as a useful reference to address the issue of food security in countries along the "Belt and Road", and to promote the sustainable agricultural development and enhance international cooperation with countries along the "Belt and Road" in agriculture.

**Key words:** the "Belt and Road"; farmland ecosystem; vulnerability; gross primary productivity; climate change; response; food security

**\*Corresponding author:** XU Xinliang, E-mail: xuxl@lreis.ac.cn

**摘要:**全球气候变化背景下,“一带一路”沿线国家农田生态系统脆弱性直接影响着所在国家或地区的粮食安全问题。本文基于农田生态系统总初级生产力(GPP),使用定量的脆弱性评价方法,系统分析了“一带一路”沿线国家农田生态系统脆弱性的空间分布特征及其对气候变化的响应。结果表明:①“一带一路”沿线国家农田生态系统脆弱性普遍处于较高的程度,77.1%的农田生态系统表现为中度和重度脆弱,且农田生态系统脆弱性呈现出明显的空间分异格局,中亚、西亚和蒙古脆弱性较高,中国、东南亚和南亚的脆弱性处于中等水平,俄罗斯、独联体和中东欧脆弱性较低;②1980年以来“一带一路”沿线农田生态系统暖干化趋势明显,暖干化区域面积占64.06%,暖干化是“一带一路”沿线国家农田生态系统气候变化的主要特征;③农田生态系统脆弱性由低到高的气候变化区依次为暖湿区、冷湿区、暖干区、冷干区。暖湿区农田生态系统脆弱性最低,而冷干区农田生态系统脆弱性最高。气温和降水的变化及其耦合关系控制着农田生态系统脆弱性程度,其中降水变化趋势是影响农田生态系统脆弱性的重要因子。本研究为“一带一路”沿线国家应对和解决粮食安全问题,促进农业可持续发展,为加强各国之间的农业国际合作提供科学依据和有益参考。

**关键词:**一带一路;农田生态系统;脆弱性;总初级生产力;气候变化;响应;粮食安全

## 1 引言

农业一直都是世界各国十分关注的关乎国计民生的基础产业。农产品贸易与农业交流自古以来都是丝绸之路十分重要的合作内容<sup>[1]</sup>。近年来,随着全球农业发展格局的深度调整,气候变化对粮食主产区的影响逐渐加深,生物质能源与金融投机活动等非传统因素导致农产品国际市场不确定性不断增强,很多发展中国家仍然被贫苦和粮食安全等问题困扰。农业持续增长的动力不足与农产品市场供求结构的显著变化,已经成为世界各国需要共同面对的新问题、新挑战,特别是在“一带一路”沿线,很多国家实现粮食安全和营养、解决饥饿和贫困的形势迫在眉睫,亟待通过开展农业合作,共同促进农业可持续发展<sup>[2-3]</sup>。然而,在全球气候变化的影响下,“一带一路”沿线国家的农田生态系统正在面临严峻的挑战,因此开展“一带一路”农田生态系统脆弱性的研究,探索应对气候变化的农业可持续发展策略,是积极开展农业领域产业对接,不断拓展农业合作领域的科学基础。

对于农业脆弱性的研究,国内外研究多着眼于本国或临近地区的农业生态脆弱性,对于更大尺度甚至全球尺度的农业生态环境研究工作比较缺乏。例如,陈静等<sup>[4]</sup>以农业生态敏感性、恢复力和干

扰性为准则,评价了中国各农业可持续发展区的生态脆弱性;周松秀等<sup>[5]</sup>分析了南方丘陵区农业生态环境脆弱性的驱动力;夏兴生等<sup>[6]</sup>利用遥感和GIS技术建立评价模型,对三峡库区(重庆段)农业生态环境脆弱性进行量化评价;Steiner等<sup>[7]</sup>评估了美国南部平原的农业脆弱性,并针对该区域制定适应战略;Aleksandrova等<sup>[8]</sup>通过制定农业系统脆弱性指数,评估了乌兹别克斯坦阿姆河下游典型灌溉农业区的农业生态脆弱性。从研究方法来看,已有的研究主要采用指标评价法进行农业脆弱性的评估<sup>[9-15]</sup>。这种方法通俗易懂、操作简单,但脆弱性评价体系多样化,指标选取和指标权重赋值主观性强,难以对脆弱性的评价结果进行验证。目前,针对“一带一路”沿线农业脆弱性还没有一个客观、系统的评价体系。

本研究选择“一带一路”沿线国家农田生态系统作为研究对象,基于农田生态系统总初级生产力,使用定量的脆弱性评价方法,分析了农田生态系统脆弱性的空间分布特征,并在此基础上结合区域气温、降水变化趋势,分析了农田生态系统脆弱性对气候变化的响应,以期对“一带一路”沿线国家应对和解决粮食安全问题,促进农业可持续发展,加强各国之间的农业国际合作提供科学依据和有益参考。

## 2 研究区概况、数据源与方法

### 2.1 研究区概况

本文的研究区域为“一带一路”陆域途经区域,横跨欧亚非大陆,自然环境复杂多样,既有世界上最高的高原和山地,又有富庶的平原和三角洲;既有雨量充足的热带雨林,又有异常干旱的荒漠,生态环境总体较为脆弱。2015年研究区农田总面积达1159.77万 $\text{km}^2$ ,农田空间分布差异明显,呈现南北两大农田带(图1)。南部农田带呈东北—西南走向,主要分布在中国东部地区、中南半岛和印度半岛。北部农田带呈东—西走向,主要分布在北半球中纬度西部的西欧、中欧和东欧平原。近年来,在暖干化的气候变化背景下,极端天气气候事件频发,特别是一些极端天气气候异常的强度增强,对研究区域的农田生态系统产生了重大影响。

### 2.2 数据来源与处理

本研究使用的数据主要包括“一带一路”沿线国家农田生态系统空间分布数据、农田生态系统GPP数据和气温、降水等气象数据。

“一带一路”沿线国家农田生态系统空间分布数据来源于国家遥感中心研发的2015年全球土地覆盖数据集([http://www.chinageoss.org/geoarc/2017/B/B9/B9\\_2/index.html](http://www.chinageoss.org/geoarc/2017/B/B9/B9_2/index.html))<sup>[16-17]</sup>。该数据集的空间分辨

率为250 m,制图总体精度为74%。土地覆盖数据包括农田、森林、草地、灌丛、水体、不透水层、裸地和冰雪8种土地覆被类型,本研究利用GIS空间分析技术提取“一带一路”沿线国家农田空间分布数据来分析其脆弱性及其对气候变化的响应。

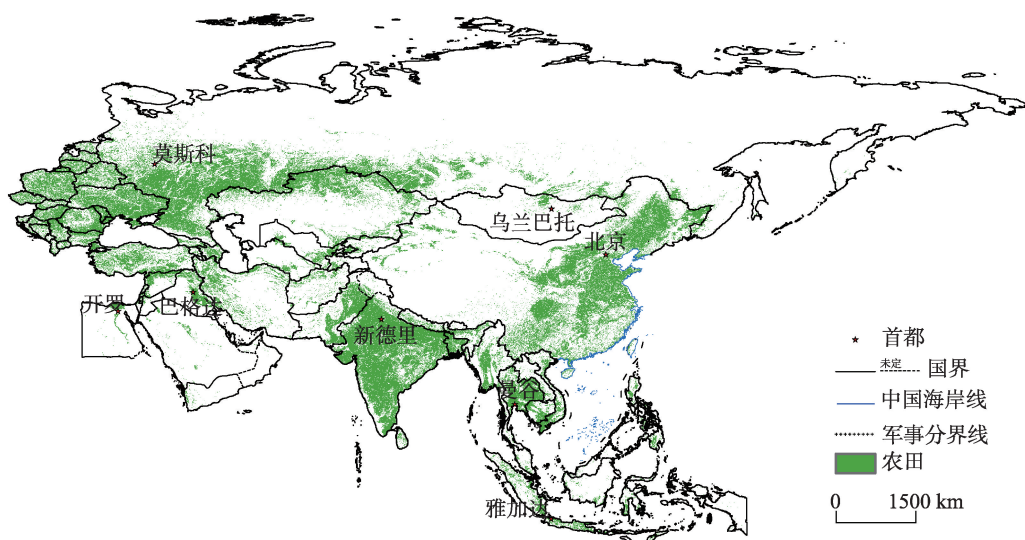
GPP数据来自美国俄克拉荷马大学(诺曼)微生物与植物生物学系空间分析中心发布的全球中等分辨率植被总初级生产力数据集(<https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.879558>)。该数据集空间分辨率为 $0.05^\circ$ ,时间分辨率为1年。数据集是基于改进的光利用效率模型,利用MODIS数据和NCEP Reanalysis II数据,模拟了2000—2015年全球植被总初级生产力的空间分布。研究证明该数据集具有令人满意的性能<sup>[18]</sup>,并且已被广泛应用于区域和全球尺度的研究中<sup>[19-24]</sup>。

气象数据来源于美国国家气候中心(National Climatic Data Center)(<http://www.ncdc.noaa.gov>),“一带一路”沿线国家涉及到2023个气象站点,本研究利用ArcGIS软件对气象站点气温和降水要素进行空间克里金插值,获得研究区1980—2015年 $0.05^\circ$ 分辨率的年平均气温和降水数据。

### 2.3 分析方法

#### 2.3.1 脆弱性评价

截至目前,脆弱性的概念超过25种。而被人们



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1667号的标准地图制作,底图无修改。

图1 2015年“一带一路”沿线国家农田空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of farmland in countries along the “Belt and Road” in 2015

广泛接受的脆弱性的概念为“脆弱性是自然或社会系统易受或无法应对气候变化(气候变率和极端气候)造成的不利影响的程度,是系统内的气候变化特征、速度和强度,及其敏感性和适应能力的函数”<sup>[25]</sup>。生态系统脆弱性可用简单的数学形式表达:

$$V = S - A \quad (1)$$

式中: $V$ 为系统的脆弱性(Vulnerability); $S$ 为系统的敏感性(Sensitivity); $A$ 为系统的适应性(Adaptation)。为了消除数据量纲不一致问题,在进行脆弱性的计算之前,需对敏感性及适应能力的计算结果进行数据标准化处理。依据脆弱性的计算结果利用自然断点法将农田生态系统脆弱性划分为5级,从轻到重依次为微度脆弱、轻度脆弱、中度脆弱、重度脆弱和极度脆弱。

农田生态系统的敏感性是系统受气候变化刺激响应的程度,在外界刺激作用不变的前提下,响应程度越高,敏感性越强,脆弱性越高<sup>[26]</sup>。本研究以GPP作为农田生态系统的功能特征参数,可以在很大程度上反映区域的气候要素<sup>[27-28]</sup>影响。以GPP的年际波动情况来反映其敏感性,其计算公式为:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n |G_i - G_m|}{G_m} \quad (2)$$

式中: $G_i$ 表示GPP在第*i*个时段内的平均值( $n=16$ ); $G_m$ 表示GPP在2000—2015年内的平均值; $S$ 表示GPP的变率,即敏感性,反映了GPP在相对特定时间段(2000—2015年)内与平均值的离散程度。

农田生态系统的适应能力是农田生态系统在人为干预下适应气候变化(气候变率和极端气候)以缓和潜在的损害和应对后果的能力,是系统保持稳定状态的一种度量<sup>[29]</sup>。而变率的变化趋势正是对系统在一段时间内偏离稳定状态的一种度量。如果变率的变化趋势减小或不变,则生态系统趋于相对稳定的状态,表明生态系统具有较高的适应气候变化的能力,脆弱性较低;反之,则表明生态系统具有较低的适应气候变化的能力,脆弱性较高。变率的变化趋势可以用农田生态系统GPP在一定时间内年际变率线性拟合趋势线的斜率表示:

$$y = ax + b \quad (3)$$

式中: $y$ 为GPP的年际变率; $a$ 为变率的变化趋势,表示生态系统的适应能力<sup>[30]</sup>。

GPP年际变率可表示为:

$$y = \left| \frac{G_i - G_m}{G_m} \right| \quad (4)$$

斜率 $a$ 的计算公式为:

$$a = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (5)$$

式中: $x$ 表示年变量; $y$ 表示第*x*年的GPP年际变率; $n$ 表示时间序列年限( $n=16$ )。

### 2.3.2 气候变化分析

采用最小二乘法分别建立时间与年平均气温和降水的一元线性回归方程,方程斜率的绝对值代表变化幅度,大于零表示温度(降水)增加,反之则表示减少<sup>[31]</sup>。采用Mann-Kendall法对变化趋势进行显著性检验,如果检验值的绝对值大于1.96,则变化趋势达到95%的置信度,认为存在显著的变化趋势<sup>[32-33]</sup>。根据气象要素的变化趋势(上升/下降),采用叠加分析和重分类等方法可以将农田生态系统气候变化划分为4种趋势:冷干、冷湿、暖干和暖湿<sup>[34]</sup>。

### 2.3.3 农田生态脆弱性对气候变化响应分析

将研究区农田生态系统脆弱性与气候变化趋势进行叠加分析,得到各气候变化趋势下的农田生态系统脆弱性空间分布。利用分区统计等工具,得到各气候变化趋势下农田生态系统脆弱性各等级的面积及比例,进而分析研究区农田生态系统脆弱性对气候变化的响应。

## 3 结果及分析

### 3.1 “一带一路”沿线国家农田生态系统脆弱性空间格局

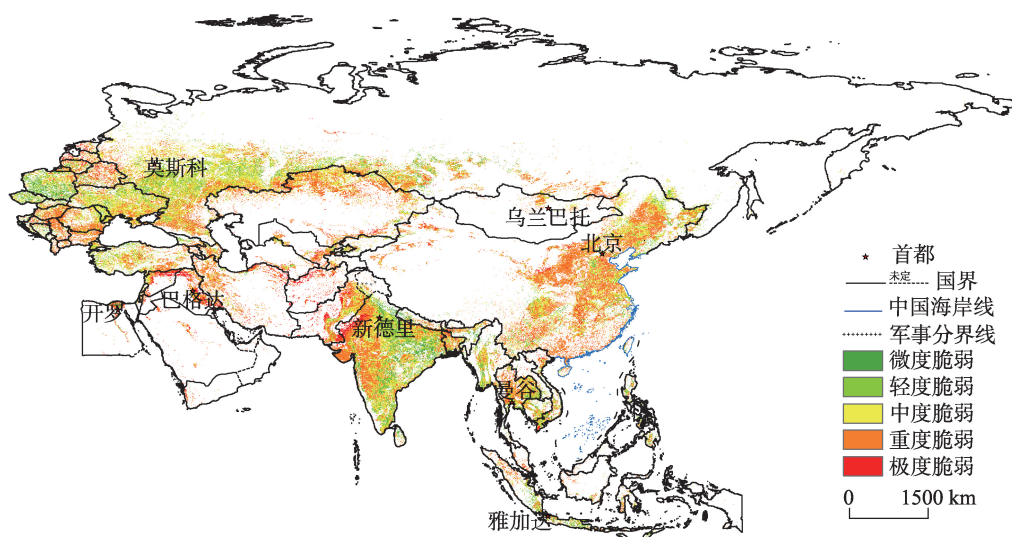
从农田生态系统脆弱性计算结果看(表1)，“一带一路”沿线多数地区为中度和重度脆弱,二者共占总面积的77.1%,反映出“一带一路”沿线农田生态系统脆弱性普遍处于较高的状态。从农田生态系统脆弱性空间分布格局看(图2),脆弱性空间分异明显:①区域尺度上,中亚、西亚和蒙古脆弱性较高,中国、东南亚和南亚的脆弱性处于中等水平,且后二者十分接近,俄罗斯、独联体和中东欧脆弱性较低;②国家尺度上,高度脆弱(重度脆弱和极度脆弱)主要分布在叙利亚、伊拉克、伊朗、阿富汗和印巴交界处,轻微脆弱(微度脆弱和轻度脆弱)主要分布在波兰、捷克、俄罗斯、印度和印度尼西亚。

西亚农田生态系统脆弱性最高,高度脆弱面积占比约62.1%,且高度脆弱中极度脆弱面积比例远

表1 2000—2015年“一带一路”沿线区域农田生态系统脆弱性面积比例

Tab. 1 Proportions of farmland area per vulnerability level in countries along the “Belt and Road” from 2000 to 2015 (%)

分区	微度脆弱	轻度脆弱	中度脆弱	重度脆弱	极度脆弱
全区	3.26	14.83	35.18	41.92	4.81
俄罗斯	2.06	19.85	48.06	28.85	1.18
独联体	1.89	16.35	48.52	30.40	2.84
中东欧	6.77	19.18	37.92	32.49	3.64
东南亚	6.01	20.58	32.64	36.26	4.51
南亚	6.24	19.78	32.15	34.63	7.20
中国	1.31	7.62	39.23	49.09	2.75
蒙古	0.11	5.16	34.68	58.19	1.86
中亚	0.40	4.44	32.58	57.70	4.88
西亚	1.23	8.30	28.42	45.72	16.33



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1667号的标准地图制作，底图无修改。

图2 2000—2015年“一带一路”沿线农田生态系统脆弱性空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of farmland ecosystem vulnerability in countries along the "Belt and Road" from 2000 to 2015

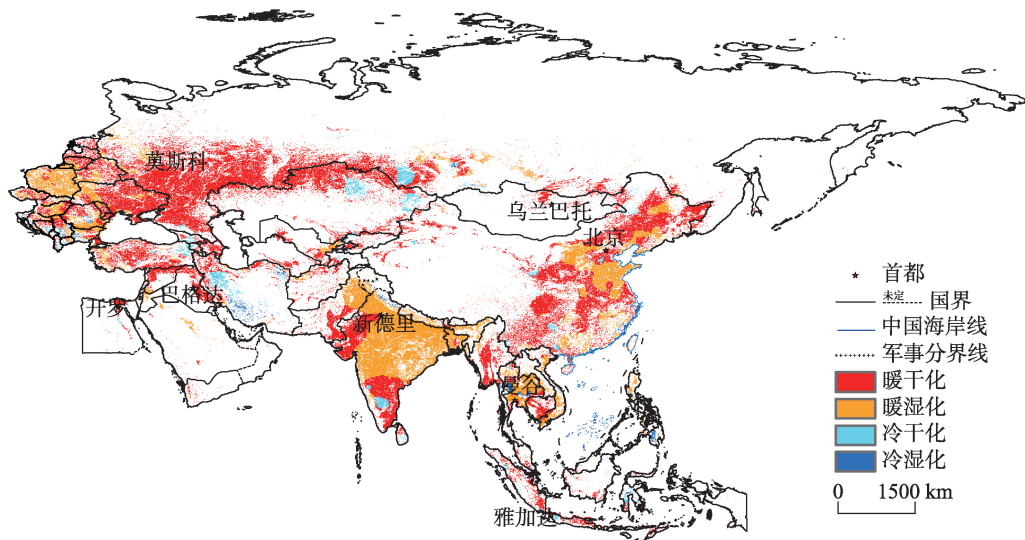
高于其他区域(16%)，该区域高度脆弱主要分布在伊拉克东部、伊朗西部和叙利亚与土耳其交界处；中亚脆弱性水平仅次于西亚，高度脆弱面积占比约62.6%，其中高度脆弱主要集中在哈萨克斯坦的北部及乌兹别克斯坦东南部，轻微脆弱主要集中在哈萨克斯坦东北部与俄罗斯交界处；另外，蒙古高度脆弱性面积占比约60.1%，脆弱性较高，其中高度脆弱主要集中在蒙古北部，轻微脆弱主要集中在东部。

俄罗斯高度脆弱面积占比约30%，轻微脆弱面积占比约21.9%，农田生态系统脆弱性最低，其中高度脆弱主要集中在西南边界处，轻微脆弱主要分布在西部地区；独联体高度脆弱面积占比约33.2%，轻

微脆弱面积占比约18.2%，其中高度脆弱主要集中在白俄罗斯和阿塞拜疆中部，轻微脆弱主要分布在乌克兰和格鲁吉亚中部；中东欧高度脆弱面积占比约36.1%，轻微脆弱面积占比约26%，其中高度脆弱主要集中在匈牙利、塞尔维亚、保加利亚和罗马尼亚，轻微脆弱主要集中在捷克和波兰。

### 3.2 “一带一路”沿线农田生态系统气候变化趋势

从气温变化看(图3)，“一带一路”沿线中国、南亚、东南亚、俄罗斯西南部、独联体、中东欧的大部分农田生态系统均呈现变暖趋势，其中显著变化区占37.11%；而变冷区仅占4.92%，零星分布在阿尔



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1667号的标准地图制作,底图无修改。

图3 1980—2015年“一带一路”沿线农田生态系统气候变化趋势空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of climate change types in the farmland ecosystems of countries along the "Belt and Road" from 2000 to 2015

巴尼亚、马其顿西部、保加利亚西部、塞尔维亚南部、土耳其东部、阿富汗西部、哈萨克斯坦东北部和印度南部等地区,其中无显著变化区域。

从降水变化看(图3),“一带一路”沿线农田生态系统变干区域最多,占67.77%,主要分布在中国中部及南部、独联体、俄罗斯西南部、中亚、西亚、印度西部及南部、缅甸、柬埔寨和印度尼西亚,但无显著变化区域;变湿区域占26.18%,主要分布在波兰、匈牙利、罗马尼亚南部、保加利亚、巴基斯坦东北部、印度中部、泰国、越南和中国的河北、河南、山东、福建和广西,其中显著变湿区域占6.05%。

在气温和降水的共同作用下,1980年以来“一带一路”沿线农田生态系统暖干化趋势明显(表2),呈现暖干化区域的面积占64.06%,主要分布在中国中部及南部、独联体、俄罗斯西南部、中亚、西亚、印度西部及南部、缅甸、柬埔寨和印度尼西亚,暖干化是“一带一路”沿线国家农田生态系统气候变化的主要特征;此外,暖湿区的分布仅次于暖干区,面积

占29.23%,主要集中在波兰、匈牙利、罗马尼亚南部、保加利亚、巴基斯坦东北部、印度中部、泰国、越南和中国的河北、河南、山东、福建和广西。

### 3.3 “一带一路”沿线农田生态系统脆弱性对气候变化的响应

从不同气候变化趋势下农田生态系统脆弱性面积占比看(表3),农田生态系统脆弱性由低到高的气候变化区依次为:暖湿区、冷湿区、暖干区、冷干区(图4)。暖湿区农田生态系统脆弱性最低,高度脆弱区面积占比为44.06%,且暖湿趋势下的农田生态系统脆弱性远低于其他气候变化区,面积占比为23.76%;而冷干区农田生态系统脆弱性最高,高度脆弱区面积占比达到了56.01%。

气温升高,“一带一路”沿线农田生态系统脆弱性降低,在气候变暖趋势下农田生态系统处于重度和极度脆弱区面积占比远小于变冷趋势下的脆弱性分布,而微度和轻度脆弱区面积占比却大于变冷

表2 1980—2015年“一带一路”沿线农田生态系统气候变化趋势面积占比

Tab. 2 Proportions of farmland ecosystem area per climate change type in countries along the

"Belt and Road" from 2000 to 2015

(%)

区域	暖	冷	干	湿	暖干	暖湿	冷干	冷湿
非显著变化区	57.97	4.92	67.77	26.18	64.06	29.23	3.72	1.20
显著变化区	37.11	0.00	0.00	6.05	0.00	1.79	0.00	0.00
全区	95.08	4.92	67.77	32.23	64.06	31.02	3.72	1.20

表3 1980—2015年气候变化趋势下农田生态系统脆弱性面积占比  
 Tab. 3 Proportions of farmland ecosystem area by vulnerability level in regions of different climate change types along the "Belt and Road" from 1980 to 2015 (%)

气候变化趋势	微度脆弱	轻度脆弱	中度脆弱	重度脆弱	极度脆弱
非显著冷干化	1.81	9.75	32.43	52.58	3.43
非显著冷湿化	5.25	12.59	34.03	40.61	7.52
非显著暖干化	2.00	13.42	36.90	42.33	5.46
非显著暖湿化	5.85	17.91	32.18	40.46	3.60
显著暖湿化	7.74	27.26	37.78	24.61	2.61

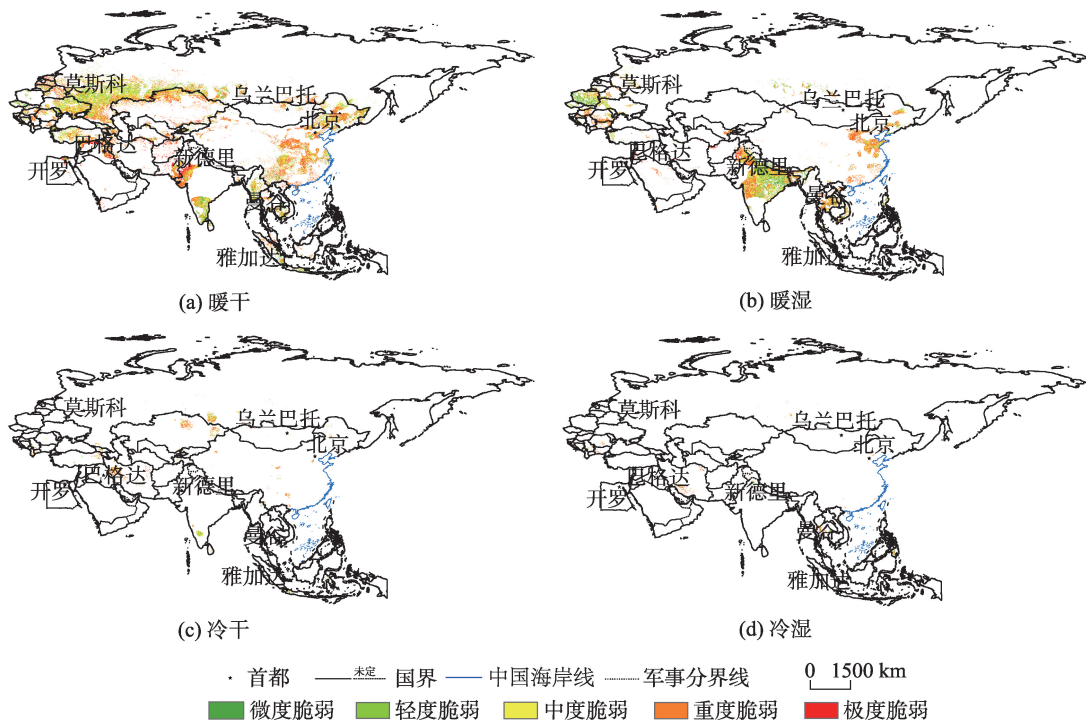
趋势下的脆弱性分布,可见气温变化趋势与农田生态系统脆弱性的关系为负相关。在不同的降水变化趋势下,农田生态系统脆弱性响应正好相反,降水量增加脆弱性减小,而降水量减少脆弱性却增强,具体表现为,在变湿趋势下微度和轻度脆弱区面积占比大于变干趋势下的脆弱性分布,而且变湿趋势下的重度和极度脆弱区面积占比远小于变干趋势下的脆弱性分布。可见,降水量呈上升趋势使“一带一路”沿线农田生态系统整体脆弱性下降。

此外,在变冷趋势下,冷干区农田生态系统高度脆弱区域面积占比远高于冷湿区;而变暖趋势下,

暖干区农田生态系统高度脆弱区域面积占比远高于暖湿区,说明相较于气温,降水减少是影响“一带一路”沿线农田生态系统脆弱性程度加重的重要因子。

### 4 结论与讨论

本研究先以GPP作为农田生态系统的功能特征参数,采用定量的脆弱性评估方法,分析了“一带一路”沿线农田生态系统脆弱性空间分布特征,以及在不同气候变化趋势下,农田生态系统的脆弱性



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1667号的标准地图制作,底图无修改。

图4 1980—2015年“一带一路”沿线各气候变化趋势下农田生态脆弱性空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of farmland ecosystem vulnerability in regions of different climate change types along the "Belt and Road" from 2000 to 2015

对气候变化的响应。本文主要结论如下:

(1)“一带一路”沿线国家农田生态系统脆弱性普遍处于较高的程度,77.1%的农田生态系统表现为中度和重度脆弱。农田生态系统脆弱性呈现出明显的空间分异格局,中亚、西亚和蒙古脆弱性较高,中国、东南亚和南亚的脆弱性处于中等水平,俄罗斯、独联体和中东欧脆弱性较低。

(2)1980年以来“一带一路”沿线农田生态系统暖干化趋势明显,呈现暖干化区域的面积占64.06%,主要分布在中国中部及南部、独联体、俄罗斯西南部、中亚、西亚、印度西部及南部、缅甸、柬埔寨和印度尼西亚,暖干化是“一带一路”沿线国家农田生态系统气候变化的主要特征。

(3)农田生态系统脆弱性由低到高的气候变化区依次为:暖湿区、冷湿区、暖干区、冷干区。暖湿区农田生态系统脆弱性最低,高度脆弱区面积占比为43.09%;而冷干区农田生态系统脆弱性最高,高度脆弱区面积占比达到了56.01%。气温和降水的变化及其耦合关系控制着农田生态系统脆弱性程度,其中降水变化趋势是影响农田生态系统脆弱性的重要因子。

本文以农田生态系统GPP为主要指标,分析了“一带一路”沿线农田生态系统脆弱性对暖湿、暖干、冷湿、冷干4种主要气候变化的响应。农田生态系统本身也会受到作物品种、管理方式和机械化程度等人为因素的影响,因此本文分析中只是以GPP作为农田生态系统功能特征参数,具有一定的局限性。另外,在对气候要素进行空间化的时候,气象站的分布和空间插值方法可能导致气候变化趋势存在一定的不确定性,这种不确定性最终会影响农田生态系统脆弱性对气候变化响应的结果,但这种影响在大的空间尺度研究中是客观存在的。因此,在今后研究中将重点分析各种功能特征参数对农田生态系统脆弱性的影响。

#### 参考文献(References):

- [1] 刘艺卓,杨静,刘武兵.中国与“一带一路”沿线国家和地区构建自贸区的策略选择——基于农业的角度[J].世界农业,2018(4):25-29. [Liu Y Z, Yang J, Liu W B. The strategic choice for China to build free trade zones in countries along the Belt and the Road—from the perspective of Agriculture[J]. World Agriculture, 2018(4):25-29.]
- [2] 中华人民共和国农业部,中华人民共和国国家发展和改革委员会,中华人民共和国商务部,等.共同推进“一带一

路”建设农业合作的愿景与行动[N].农民日报,2017-05-12(001). [Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, National Development and Reform Commission of the People's Republic of China, Ministry of Commerce of the People's Republic of China, et al. Jointly promoting the vision and action of "one belt and one road" in building agricultural cooperation[N]. Farmers' Daily, 2017-05-12(001).]

- [3] 刘卫东.“一带一路”战略的科学内涵与科学问题[J].地理科学进展,2015,34(5):538-544. [Liu W D. Scientific understanding of the Belt and Road Initiative of China and related research themes[J]. Progress in Geography, 2015, 34(5):538-544.]
- [4] 陈静,周静平,李存军,等.全国农业生态系统脆弱性评价[J].江苏农业科学,2018,46(2):217-223. [Chen J, Zhou J P, Li C J, et al. National assessment of agroecosystem vulnerability[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018,46(2): 217-223.]
- [5] 周松秀,田亚平,刘兰芳,等.南方丘陵区农业生态环境脆弱性的驱动力分析——以衡阳盆地为例[J].地理科学进展,2011,30(7):938-944. [Zhou S X, Tian Y P, Liu L F. Analysis of driving forces of agricultural eco-environmental vulnerability in the hilly area in southern China: A case study in Hengyang basin[J]. Progress in Geographica Sinica, 2011,30(7):938-944.]
- [6] 夏兴生,朱秀芳,李月臣,等.基于AHP-PCA熵组合权重模型的三峡库区(重庆段)农业生态环境脆弱性评价[J].南方农业学报,2016,47(4):548-556. [Xia X S, Zhu X F, Li Y C, et al. Evaluation for vulnerability of agroecological environment in Three Gorges Reservoir area (Chongqing section) based on AHP-PCA entropy combination weight mode[J]. Journal of Southern Agriculture, 2016,47(4): 548-556.]
- [7] Steiner J L, Briske D D, Brown D P, et al. Vulnerability of Southern Plains agriculture to climate change[J]. Climatic Change, 2017,146:201-208.
- [8] Aleksandrova M, Gain A K, Giupponi C. Assessing agricultural systems vulnerability to climate change to inform adaptation planning: An application in Khorezm, Uzbekistan[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2016,21(8):1263-1287.
- [9] 杨庆媛,毕国华,陈展图,等.喀斯特生态脆弱区休耕地的空间配置研究——以贵州省晴隆县为例[J].地理学报,2018, 73(11):202-218. [Yang Q Y, Bi G H, Chen Z T, et al. Spatial allocation of fallow land in karst rocky desertification areas: A case study of Qinglong County, Guizhou Province [J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(11):202-218.]



- [10] 杨晓静,徐宗学,左德鹏,等.东北三省农业旱灾风险评估研究[J].地理学报,2018,73(7):1324-1337. [ Yang X J, Xu Z X, Zuo D P, et al. Assessment on the risk of agricultural drought disaster in the three provinces of Northeast China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018,73(7):1324-1337. ]
- [11] 邹君,杨玉蓉,毛德华,等.湖南省农业生态水资源库脆弱性评价[J].冰川冻土,2010,32(1):196-203. [ Zou J, Yang Y R, Mao D H, et al. An assessment of vulnerability of agricultural ecological water resource bank in Hunan Province[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010,32(1):196-203 ]
- [12] 魏琦.北方农牧交错带生态脆弱性评价与生态治理研究[D].北京:中国农业科学院,2010. [ Wei Q. Ecology fragility evaluation and control in north ecotone between agriculture and animal husbandry[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010. ]
- [13] 杨飞,马超,方华军.脆弱性研究进展:从理论研究到综合实践[J].生态学报,2018,39(2):441-453. [ Yang F, Ma C, Fang H J. Research progress on vulnerability:from theoretical research to comprehensive practice[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018,39(2):441-453. ]
- [14] 田亚平,常昊.中国生态脆弱性研究进展的文献计量分析[J].地理学报,2012,67(11):1515-1525. [ Tian Y P, Chang H. Bibliometric analysis of research progress on ecological vulnerability in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012,67(11):1515-1525. ]
- [15] 王钰,胡宝清.西江流域生态脆弱性时空分异及其驱动机制研究[J].地球信息科学学报,2018,20(7):947-956. [ Wang Y, Hu B Q. Spatial and temporal differentiation of ecological Vulnerability of Xijiang River in Guangxi and its driving mechanism[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018,20(7):947-956. ]
- [16] 李加洪,施建成.全球生态环境遥感监测2015年度报告[M].北京:科学出版社,2016. [ Li J H, Shi J C. Annual report on remote sensing monitoring of global ecological environment in 2015[M]. Beijing: Science Press, 2016. ]
- [17] 牛铮,李加洪,高志海,等.《全球生态环境遥感监测年度报告》进展与展望[J].遥感学报,2018,22(4):672-685. [ Niu Z, Li J H, Gao Z H, et al. Progress and future of China's annual report on remote sensing monitoring of global ecosystem and environment[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018,22(4):672-685. ]
- [18] Zhang Y, Xiao X, Wu X, et al. A global moderate resolution dataset of gross primary production of vegetation for 2000-2016[J]. *Scientific Data*, 2017,4:170165.
- [19] Doughty R, Xiao X, Wu X, et al. Responses of gross primary production of grasslands and croplands under drought, pluvial, and irrigation conditions during 2010-2016, Oklahoma, USA[J]. *Agricultural Water Management*, 2018,204:47-59.
- [20] Zhu J W, Zhang M H, Zhang Y, et al. Response of tropical terrestrial gross primary production to the super El Niño event in 2015[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018,123(10):3193-3203.
- [21] Joiner J, Yoshida Y, Zhang, Y, et al. Estimation of terrestrial global gross primary production (GPP) with satellite data-driven models and eddy covariance flux data[J]. *Remote Sens*, 2018,10(9):1346-1366.
- [22] Stocker B D, Zscheischler J, Keenan T F, et al. Drought impacts on terrestrial primary production underestimated by satellite monitoring[J]. *Nature Geoscience*, 2019,12(4):264-270.
- [23] Martin S, Ghosh S, Behera M D. Assessing land transformation and associated degradation of the west part of Ganga River Basin using forest cover land use mapping and residual trend analysis[J]. *Journal of Arid Land*, 2019, 11(1):29-42.
- [24] Michael M, Tu K, Brown J. Optimizing a remote sensing production efficiency model for macro-scale GPP and yield estimation in agroecosystems[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018,217:258-271.
- [25] IPCC. Climate Change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Cambridge[M]. UK: Cambridge University Press, 2007.
- [26] 乔青,高吉喜,王维,等.生态脆弱性综合评价方法与应用[J].环境科学研究,2008,21(5):117-123. [ Qiao Q, Gao J X, Wang W. Method and application of ecological fragility assessment[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008,21(5):117-123. ]
- [27] 何敏,王鹤松,孙建新.基于植被生产力的西南地区生态系统脆弱性特征[J].应用生态学报,2019,30(2):429-438. [ He M, Wang H S, Sun J X. Characters of ecosystem vulnerability in southwestern China based on vegetation productivity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019,30(2):429-438. ]
- [28] 於琨,曹明奎,陶波,等.基于潜在植被的中国陆地生态系统对气候变化的脆弱性定量评价[J].植物生态学报,2008,32(3):521-560. [ Yu L, Cao M K, Tao B, et al. Quantitative assessment of the vulnerability of terrestrial ecosystems of china to climate change based on potential vegetation[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2008,32(3):521-530. ]

- [29] Cumming G S, Barnes G, Perz S, et al. An exploratory framework for the empirical measurement of resilience [J]. *Ecosystems*, 2005,8(8):975-987.
- [30] 肖桐,王军邦,陈卓奇.三江源地区基于净初级生产力的草地生态系统脆弱性特征[J].*资源科学*,2010,32(2):323-330. [ Xiao T, Wang J B, Chen Z Q. Vulnerability of grassland ecosystems in the Sanjiangyuan region based on NPP 2010[J]. *Resources Science*, 2010,32(2):323-330. ]
- [31] 徐新良,王靓,蔡红艳.“丝绸之路经济带”沿线主要国家气候变化特征[J].*资源科学*,2016,38(9):1742-1753. [ Xu X L, Wang L, Cai H Y. Spatio-temporal characteristics of climate change in the Silk Road Economic Belt[J]. *Resources Science*, 2016,38(9):1742-1753. ]
- [32] Gocic M, Slavisa T. Analysis of changes in meteorological variables using Mann- Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia[J]. *Global and Planetary Change*, 2013,100(1):172-182.
- [33] 王飞,丁建丽,魏阳.“一带一路”国家和地区百年尺度干旱化特征分析[J].*地球信息科学学报*,2017,19(11):1442-1455. [ Wang F, Ding J L, Wei Y. Analysis of drought characteristics over countries and regions of "The Belt and Road Initiatives" in recent one hundred years[J]. *Journal of Geo- information Science*, 2017,19(11):1442-1455. ]
- [34] 史培军,孙劭,汪明,等.中国气候变化区划(1961-2010年)[J].*中国科学:地球科学*,2014(10):2294-2306. [ Shi P J, Sun S, Wang M, et al. Climate change regionalization in China (1961- 2010) [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014,44(10):2294-2306. ]