#### DOI: 10.5846/stxb201808231798

王春雨,王军邦,孙晓芳,王猛,王绍强,崔惠娟.孟印缅地区农田生产力脆弱性变化及气候影响机制——基于 1982—2015 年 GIMMS3g 植被指数. 生态学报,2019,39(21): - .

Wang C Y, Wang J B, Sun X F, Wang M, Wang S Q, Cui H J.Vulnerability of farmland productivity and climatic impact in Bangladesh, India, and Myanmar, based on GIMMS 3g NDVI in 1982–2015. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): - .

# 孟印缅地区农田生产力脆弱性变化及气候影响机制

——基于 1982—2015 年 GIMMS3g 植被指数

王春雨1,2,王军邦1,\*,孙晓芳2,\*,王猛2,王绍强1,崔惠娟1

1 中国科学院地理科学与资源研究所,中国科学院生态系统网络观测与模拟重点实验室,北京 1001012 曲阜师范大学地理与旅游学院,日照 276800

摘要:农田生产力对气候变化的敏感性决定了其脆弱性,全球气候变暖及极端气候频发将严重影响农业粮食生产,进而将可能 影响区域粮食安全。科学评估农田生产力脆弱性并分析其气候影响机制有助于积极应对气候变化,保障区域粮食安全,具有重 要的现实和科学意义。本文以"一带一路"区域的"孟中印缅经济走廊"为研究区,基于 1982—2015 年卫星遥感数据的归一化 植被指数,根据 IPCC 脆弱性定义,采用年际变率及其变化趋势计算农田生产力对气候变化的敏感性、适应性和脆弱性指数,分 时段分析研究区农田生态系统脆弱性空间格局变化及气候影响机制。结果表明:(1)较之 1982—2000 年,2000—2015 年期间 研究区农田脆弱性程度略有提升,高度和极度脆弱面积略有增加(分别增加 0.42%和 1.12%),但其分布格局发生北移。(2)年 降水、年平均气温和年辐射与年累积 NDVI 间线性回归分析表明,孟加拉和缅甸地区与气候因素显著相关的区域面积在本国农 田面积中的比例分别增加 21.3%和 16.7%,而印度地区减少 10.5%,全区减少 8.1%;(3)线性回归方程的复相关系数(*R*<sup>2</sup>)表征 气候变化的解释能力,整个研究区增加 12%,其中印度气候解释能力从 48%提升至 64%,增加 16%。(4)农田生产力脆弱性受 气候影响的范围略有减小,但影响程度增大,且存在较大的区域性差异;高温和降水季节不均引发的旱涝灾害是农田高脆弱度 形成的两个关键气候因素。本研究为该地区农业应对气候变化适应性管理措施的提出及决策提供了科学依据,有效支撑"一 带一路"建设;也为其他地区应用卫星遥感开展脆弱性研究提供了方法参考,为生态系统对全球变化响应研究提供重要知识 参考。

关键词:孟印缅;NDVI;农田生产力;脆弱性;时空格局;气候影响

# Vulnerability of farmland productivity and climatic impact in Bangladesh, India, and Myanmar, based on GIMMS 3g NDVI in 1982—2015

Wang Chunyu<sup>1,2</sup>, Wang Junbang<sup>1,\*</sup>, Sun Xiaofang<sup>2,\*</sup>, Wang Meng<sup>2</sup>, Wang Shaoqiang<sup>1</sup>, Cui Huijuan<sup>1</sup>

1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modelling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 College of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao 276800, China

**Abstract**: Vulnerability of agriculture is mainly determined by the sensitivity of farmland productivity to climatic changes. The global climate is predicted to continue its warming trend with increases in some extreme events in the future, which will have a great impact on crop yield, and seriously threaten regional food security. The scientific assessment of farmland productivity vulnerability and analysis of climate impact mechanisms, are helpful for mitigating climate change in pact and

**基金项目:**中国科学院重点部署项目(ZDRW-ZS-2016-6-4-2);国家自然科学基金项目(31861143015);国家重点研发计划(2017YFC0503803);山 东省自然科学基金(ZR2017BD010);山东省高校科技计划项目(J16LH01)

收稿日期:2018-08-23; 网络出版日期:2019-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: jbwang@igsnrr.ac.cn; sunxf@ lreis.ac.cn

ensuring regional food security, which has great practical and scientific implications. Based on the normalised vegetation index of satellite remote sensing data from 1982 to 2015, this paper takes the "Bangladesh, China, India and Myanmar Economic Corridor" in the "Belt and Road" region as the study area, and the sensitivity, adaptability and vulnerability indexes of farmland productivity to climate change (as defined by the IPCC), were calculated for the concepts of interannual variability and its changing trend. Changes in the spatial pattern of farmland ecosystem vulnerability, and analysis of climate impact mechanisms in the study area were carried out for different time periods. The results showed that: (1) Compared with 1982–2000, the vulnerability of farmland in the study area increased in 2000–2015, the extent of the high and exceedingly vulnerable area expanded by 0.42% and 1.12% respectively, and their spatial distributions moved northward; (2) Linear regression analysis between annual precipitation, annual average temperature, annual radiation and annual accumulated NDVI, showed that the area influenced significantly by climate increased by 21.3% and 16.7% in Bangladesh and Myanmar respectively, relative to their total national farmland areas, while the area in India decreased by 10.5%, and in the whole study area it decreased by 8.1%; (3) The multiple correlation coefficient  $(R^2)$  of the linear regression equation is indicative of the variability that is attributable to climate change, and it increased in the overall study area by 12%, with India's climatic contribution increasing from 48% to 64%, an increase of 16%; (4) The impacts were chariacterized with a slight decreasing of its scope but an increasing of its degree, and there are large regional differences; high temperatures, droughts and floods caused by uneven seasonal precipitation are key climatic factors contributing to the high vulnerability of farmland. This study not only mapped the vulnerability, but also revealed its changes and impacts from climate change over the 34 years, providing methods and insights for agricultural adaptation management and policy-making in those countries, and for consideration of regional food security in "The Belt and Road Initiative".

Key Words: Bangladesh, India, and Myanmar; NDVI; farmland productivity; vulnerability; spatial-temporal pattern; climatic impact

近几十年来,在自然条件变化和人类活动共同影响下,全球气候正在经历一场以变暖为主要特征的显著 变化<sup>[1]</sup>。气候变化引起的生态系统脆弱性是生态系统敏感性和适应性综合响应的结果。科学评估气候变化 对生态系统的影响,识别生态系统敏感性和脆弱性,可为生态系统管理及其可持续发展提供科学依据,是适应 和减缓气候变化影响的关键和基础,也是全球环境变化和实现可持续发展研究的核心问题之一<sup>[2-3]</sup>。农田生 态系统作为对气候变化敏感的生态系统之一,极易因气候变化改变其对外部压力的敏感性及自身适应能力, 导致气候脆弱性上升,造成农产品减产、粮食有效供给不足,威胁区域粮食安全<sup>[4-5]</sup>。位于南亚季风区的孟加 拉国、印度和缅甸是受气候变化影响严重的典型农业大国<sup>[6-8]</sup>,根据 IPCC 报告,该地区未来 50 年以干旱和洪 涝为主的极端气候事件发生频率上升<sup>[9]</sup>,将会对农业生产造成更大的影响和威胁<sup>[10-11]</sup>。同时,该地区作为孟 中印缅经济走廊及"一带一路"建设的关键地带与节点,对该地区农田生态系统脆弱性及气候影响进行评估, 为有效应对和减缓气候变化影响的适应性管理和可持续发展措施的提出提供科学基础,对保障区域粮食安 全,积极推动"一带一路"发展,支撑"孟中印缅经济走廊"建设,具有非常重要的现实和科学意义。

系统的脆弱性被认为是系统在压力或胁迫环境中的暴露程度、对压力或胁迫的敏感性及系统本身对压力 或胁迫的弹性或恢复力的综合反应<sup>[12-13]</sup>。目前,生态系统脆弱性评价面临的主要困难之一是难以确定生态 系统变化的阈值<sup>[14]</sup>。於琍等<sup>[15]</sup>从植被分布和生态系统功能两方面,对中国陆地生态系统的脆弱性进行相应 的评价,解决了生态系统变化阈值的问题。然而由于长时间序列数据资料的缺乏,对脆弱性形成的区域差异 性和时间动态性研究鲜见报导<sup>[16]</sup>。

卫星遥感的归一化植被指数(NDVI)被认为是反映植被现实状况的指标而广泛应用于植被动态监测等研究。GIMMS NDVI3g数据集是目前最长时间序列的 NDVI 数据集,已应用于全球和区域植被动态变化及对气候变化响应研究<sup>[17-20]</sup>。累积 NDVI 可表征作物生产力,同时还避免了由 NDVI 到 NPP 换算引起的不确定

性<sup>[21]</sup>。因此,本研究利用遥感动态监测优势,基于年累积 NDVI 的变率及变化趋势构建了农田生产力脆弱性 指数,进而分析 1982—2015 年孟印缅三国农田生态系统脆弱性空间格局,定量分析其动态变化的气候影响机 制,以期为该地区农业适应性管理措施的提出和"孟中印缅经济走廊"建设提供决策参考,同时为生态系统气 候脆弱性的动态研究提供新的方法。

#### 1 数据与方法

#### 1.1 研究区概况

研究区孟加拉国、印度和缅甸是南亚和东南亚国家,地理范围约为 68°7′—101°10′ E,8°24′—37°36′N。 大部分位于低纬度地区,主要气候类型为热带季风气候,全年高温,有明显的旱雨季之分。孟加拉国地处恒河 下游,境内多为冲击平原,且拥有极其发达的水系,农业优势明显,但低平地势易引发洪涝。印度耕地面积居 亚洲之首,是世界上最大的粮食生产国之一,恒河平原和德干高原地势平坦、土壤肥沃,是主要的农耕区。缅 甸地势北高南低,中部河谷平原非常适宜农耕(图1)。孟印缅地区主要粮食作物为水稻、小麦和玉米,据 2017 年 FAO 统计该地区水稻产量位居世界前列。但过去 50 年,温度的持续上升与雨季降雨量的减少,致使 孟印缅大部分地区干旱趋势加剧;而雨季极端降水事件显著增加,致使印度中部、东部和孟加拉国西北部洪涝 灾害风险突增<sup>[9]</sup>。

# 1.2 数据及处理

NDVI采用 1982 至 2015 年每半月合成的 GIMMS NDVI 3g.v1 数据。该数据集是 NASA's Goddard Space Flight Center 15d 合成数据,空间分辨率为 0.083°× 0.083°,通过分析时间序列下地物 NDVI 变化进行了数 据集质量评价,取得了较好的验证结果<sup>[19]</sup>。为了消除 作物种植和收获时间不一致导致的 NDVI 的非气候因 素引起的波动,本研究采用全年每半月 NDVI 值累积得 到的全年总值来表征农田全年生产力,通过预处理得到 空间分辨率为 8km 的年 NDVI 数据。

气候数据来自美国国家环境预报中心(NCEP)和 国家大气研究中心(NCAR)协作提供的再分析数据集 NCEP2,数据空间分辨率为1.875°×1.875°,要素包括 全球逐日气温、降水和太阳短波辐射数据<sup>[22]</sup>。为了与 NDVI数据空间分辨率相匹配且尽可能保留 NDVI 的空 间细节信息,本文采用 Zhao<sup>[23]</sup>的算法将气候数据插值 为0.083°×0.083°经纬度空间分辨率,通过预处理得到 时空范围、分辨率和投影与 NDVI 一致的年平均气温、 年降水量和年太阳短波辐射数据。



图 1 基于 2010 年土地利用与覆盖遥感数据产品(MOD12)的孟 印缅耕地空间分布格局

Fig.1 The distribution of the cultivated land from the remotely sensed land use/cover product (MOD12) in 2010 in Bangladesh, India and Myanmar

土地利用数据采用中分辨率成像光谱仪(MODIS)数据的土地利用/覆被变化数据产品(MOD12Q1),空间 分辨率为1000m。孟印缅地区面积最大的国家—印度1985—1995年耕地面积变化小于0.1%<sup>[24]</sup>,2000—2010 年印度耕地面积变化幅度小于0.5%<sup>[25]</sup>,耕地面积年际变化较小,因此,以2010年土地利用与覆盖数据来提 取研究区农田。

1.3 脆弱性计算与分级

以於琍等所用的系统功能特征量变率及变化趋势定量评价法<sup>[15]</sup>为基础,利用年累积 NDVI 计算农田生产力适应性、敏感性和脆弱性。该方法基于 IPCC 第三次评估报告中给出的脆弱性的定义,即脆弱性取决于

系统对气候变化的敏感性和系统对气候变化的适应能力,可表达为:

$$V = S - A \tag{1}$$

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)。V越小,表示该生态系统脆弱性越低,反之,脆弱性越高。其中敏感性S为该系统的某一方面对气候变化的响应 程度,以系统特征量相对特定时间尺度内的离散程度表示,计算公式为:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{n} |F_i - \overline{F}|}{\overline{F}}$$
(2)

式中: $F_i$ 表示第 *i*年的年累积 NDVI,  $\overline{F}$ 表示在研究时段内年累积 NDVI 的 n 年平均值。

一个开放或半开放的动态系统对外界胁迫或干扰的自我调节能力被认为是系统的适应性,在对其定量化时,采用系统功能特征的变率在一定时段内的变化趋势作为系统偏离稳定状态的一种度量。若变率的变化趋势减小或保持不变,则表示系统是趋向相对稳定的状态,能够较好地适应气候变化;反之,则表明系统对气候变化不适应,可能导致系统脆弱性增加。具体地,本文中适应性 A 采用农田年累积 NDVI 的相对距平在一定时段内年际变化线性拟合趋势线的斜率来表示:

$$y = Ax + b \tag{3}$$

$$A = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}$$
(4)

式中:y为年累积 NDVI 的相对距平即( $F_i = \overline{F}$ )/ $\overline{F}$ ,;A表示变率的变化趋势,即系统的自适应能力,x表示给定时间段内的年序。

脆弱度分级采用1倍标准差分级法,根据研究区内V的相对大小,将研究区农田生产力脆弱性划分为5 个等级,脆弱等级范围分别是-0.99—-0.88,-0.88—-0.48,-0.48—0.09,0.09—0.30,0.30—0.97,相应分为不 脆弱、轻度脆弱、中度脆弱、高度脆弱和极度脆弱。

#### 1.4 气候影响机制分析方法

采用多元线性回归分析法<sup>[26]</sup>,确定气候对农田生态系统生产力的影响程度,及降水、气温和太阳短波辐射变化的贡献,进而分析农田生态系统脆弱性的气候影响机制。具体多元线性回归方程如式(5)所示:

$$F = b_p P + b_T T + b_R R + b_0 \tag{5}$$

*F*为年累积 NDVI 的距平百分比,*P*、*T*、*R*分别为年降水、年均温和年太阳辐射的距平百分比, $b_p$ 、 $b_r$ 、 $b_R$ 为回 归系数,表征 NDVI 对降水、气温和辐射的敏感性, $b_0$ 为截距。回归方程的复相关系数  $R^2$ 表示拟合的回归方程对 因变量变化的解释能力,这里表征气候因素对农田生产力的影响程度;回归方程的统计显著性水平 p 值为 0.1。

#### 2 结果与分析

#### 2.1 气候变化

1982—2015 年孟印缅地区气候变化出现变暖趋缓现象,同时降水和辐射也出现 2000 年前后不同的变化 趋势,从暖干化变为不显著的变暖和变湿(图 2)。2000 年前表现为暖干化趋势,年降水量以 5.7mm/a 的速率 减少,年均温以 0.02℃/a 的速率上升,年总太阳辐射以 19.8MJ/m<sup>2</sup>的速率增加;2000 后降水以 19.0mm/a 的速 率增加,温度变化趋势不显著,辐射以 21.0MJ/m<sup>2</sup>的速率减少;且气候变化的空间格局存在差异。

#### 2.2 脆弱性格局及变化

1982—2000年,孟印缅农田生态系统以中度脆弱为主,主要分布在印度(图3)。中度脆弱面积占整个研究区农田面积的45.37%,重度和极度脆弱区面积分别占8.43%和9.49%(图4)。孟加拉和缅甸均以轻度脆弱和中度脆弱为主,分别占研究区农田面积的4.44%和1.75%;印度农田面积的60.14%处于中度及以上脆弱



图 2 1982—2015 年孟印缅年累积 NDVI、年总降水量、年平均气温和年太阳辐射年际变化

Fig.2 The inter-annual variability of annual accumulative NDVI, annual total precipitation, annual mean temperature and annual solar radiation in Bangladesh, India and Myanmar from1982 to 2015

区,其中高度和极度脆弱农田比例分别为16.8%和24.15%。

相较于前一时段,2000—2015 年农田脆弱程度略有上升,高度和极度脆弱比例分别上升 0.42% 和 1.12%, 但分布格局发生显著变化,高度和极度脆弱农田分布发生北移(图 3 和图 4)。如在印度,中度及以上脆弱程 度农田的比例变化小于 5%,但空间分布格局变化明显,由 2000 年前的德干高原地区转移到西北地区,成为主 要的高度和极度脆弱区;南部农田脆弱度下降。



图 3 基于年累积 NDVI 的孟印缅农田生产力在 1982 至 2000 年期间和 2000 至 2015 年期间脆弱性空间格局 Fig.3 The vulnerability of the period of 1982—2000 and 2000—2015 for the farmland productivity based on the annual accumulated NDVI in Bangladesh, India and Myanmar



脆弱性 Vulnerability

图 4 孟印缅三国不同等级脆弱性农田占研究区农田总面积的比例

Fig.4 The proportion of farmland with different vulnerability grades to the total area of farmland in the study area

#### 2.3 气候影响机制分析

#### 2.3.1 气候影响程度

在象元水平上根据式(5)进行线性回归分析,2000年前后置信度水平高于90%区域的复相关系数(R<sup>2</sup>) 空间格局如图5所示,较之前一时段,2000年后气候变化的影响范围略有减小,空间分布表现为向东扩展,气 候变化对农田生产力变化的解释程度提高。置信度水平高于90%气候变化影响区域占全区农田面积的比例 减小了8.1%,其中孟加拉和缅甸占各自国家农田面积的比例分别增加了21.32%和16.73%,印度减少了10. 51%;但气候变化对全区农田生产力变化的解释程度提高了12%,其中印度和孟加拉分别增加16%和13%, 缅甸较低,近为9%(表1)。结果表明,2000年后缅甸和孟加拉国农田生产力受气候变化影响的范围扩大且 程度增强;而印度受气候变化影响的范围减小但程度增强。

表 1 孟印缅三国年累积 NDVI 距平与气候因子距平多元线性回归关系统计置信度 90%以上区域占各国农田总面积的比例和区域平均复相差 系数(*R*<sup>2</sup>)

Table 1 The farmland area percent of the region where the confidence level is above 90% for the linear regression between the annual accumulated NDVI and the climatic factors, and the mean multiple correlation coefficient ( $R^2$ ) of the corresponding area in Bangladesh, Myanmar and India

国家 Country	1982—2000		2000—2015		变化 Change	
	面积 Area/%	$R^2$	面积 Area/%	$R^2$	面积 Area/%	$R^2$
孟加拉 Bangladesh	32.2	0.44	53.5	0.57	21.3	0.13
印度 India	43.4	0.48	32.9	0.64	-10.5	0.16
缅甸 Myanmar	7.6	0.42	24.3	0.51	16.7	0.09
孟印缅 BIM	41.4	0.45	33.3	0.57	-8.1	0.12



图 5 孟印缅三国农田生产力与气候要素多元回归模型的 R<sup>2</sup>空间格局

Fig.5 The spatial pattern of multiple correlation coefficient  $(R^2)$  of multiple linear regression analyzed between the productivity and climate

孟印缅三国农田生产力对气温、降水和辐射变化响应的敏感性空间格局及其前后两个时段的变化如图 6 所示,较之前一时段,2000—2015年,气候对全区农田生产力的影响从前期的以降水为主转变为以气温为主, 但缅甸受降水影响增强。印度西部和东北部农田生产力对气温变化的敏感度显著增强,而印度南部对降水敏 感度增强,孟加拉农田生产力对气温变化的敏感度显著增强,而缅甸则对降水和辐射变化敏感。





## 2.3.2 年降水量变化的影响

根据式(5)中降水的回归系数(*b<sub>p</sub>*),研究区农田年累积 NDVI 对降水变化总体为正响应,且回归系数从 2000 年前的 0.011 增大至后期的 0.02,即降水较均值每增加一倍,年累积 NDVI 增加 0.02 倍(图 8);全区受降 水正影响的区域从前期的 53.19%扩大到 2000 年后的 61.83%,相应地,全区受降水负影响的区域面积减少了 8.6%(图 7)。前期降水负影响区主要分布在印度西部和德干高原北部与东南部,约占印度农田面积的 47.6%。孟加拉国东部也是受降水负效应显著影响的地区。2000 年后孟加拉国负响应区增加了 2.23%,印度 减少了 11.16%,缅甸增加了 2.22%,降水负响应区主要分布在孟加拉国大部分地区,印度德干高原大部分地

区及缅甸东部地区。

2.3.3 年均温变化的影响

整个研究区农田年累积 NDVI 对气温变化均以负响应为主,但 2000 年后负响应程度减弱,回归系数(*b<sub>r</sub>*) 由前期的-1.32 降低到后期的-0.93(图 8)。1982—2000 年,孟印缅年累积 NDVI 对温度变化负响应的区域约 占 62.7%,主要集中在印度西部的印度沙漠周边,及德干高原西北部,平均敏感程度为-2 及以下范围内,即温 度较均值每增加 1 倍,年累积 NDVI 较均值减少 2 倍以上(图 7)。2000 年之后,除孟加拉国和印度东北部以 外,孟印缅大部分地区年累积 NDVI 对气温变化表现为负响应,负响应区面积增加了 6.34%,但平均敏感度有 所下降。其中,印度年累积 NDVI 对气温变化负响应的高敏感(*b<sub>r</sub><-2*)区面积比例降低了 20.89%。 2.3.4 年太阳辐射量变化的影响

除缅甸 2000 年前后农田生产力对辐射变化均表现为正响应以外,孟加拉国和印度在 2000 年前均以正响 应为主,而 2000 年后均转变为负响应(图 8);2000—2015 年,孟印缅地区太阳辐射量对生产力的影响发生显 著变化,回归系数 b<sub>R</sub>由前期的 0.75 转变为-0.71,全区 80.77%的地区年累积 NDVI 受辐射量的负效应影响,较 前期增长了 68.41%(图 7)。1982—2000 年,仅印度北部和西部及孟加拉国东部部分地区年累积 NDVI 对辐射变化表现为负响应,其余地区均为正响应。2000 年后,除印度沙漠东北部部分地区和缅甸外,其余地区均以负响应为主。

#### 3 讨论

#### 3.1 脆弱性研究方法

损失函数法<sup>[27]</sup>、农业风险评估<sup>[28]</sup>、产量差<sup>[29]</sup>等概念以及 CERES<sup>[30]</sup>、YIELD<sup>[31]</sup>作物模型和 GCM、 PERECIS 气候模式等被广泛应用于农业生态系统的气候脆弱性评价。但由于建立区域尺度跨时段的脆弱性 评价指标体系较困难,有关生态系统脆弱性的动态研究较少,且多缺乏对脆弱性机理方面的探讨。本研究采 用国际上目前时间序列最长的基于卫星遥感的 NDVI 数据用于农田生产力脆弱性定量评价,能够反映气候变 化及极端气候事件对其影响的信息,也使农田生产力及气候影响的空间异质性得以体现;还消除了作物耕作 制度等因素导致的 NDVI 的波动的影响,对于认识和理解系统状态的相对稳定程度有更明确的指示意义。 3.2 对气候变化的敏感性

农作物对气候变化的敏感性,主要与作物类型、品种、管理措施等有关,本研究中累积 NDVI 对气候变化 的响应,在 2000 年前后出现变化,其变化的原因在于多个方面。首先,可能是作物类型和品种发生了变化。 研究表明,不同作物类型对气候变化的响应存在差异,同种作物不同品种对气候变化的敏感性也存在差 异<sup>[32]</sup>。近年来,在国际水稻研究所(IRRI)和国际玉米小麦改良中心(CIMMYT)育种工作的支持下,印度引入 耐旱水稻品种 Sahbhagi dhan<sup>[33]</sup>和防锈、半矮、高产小麦品种<sup>[34]</sup>,缅甸伊洛瓦底三角洲栽种如 Pawsan Hmway、 Pawsan Baygyar、Pharpon Pawsan 等耐盐、耐涝、深水水稻<sup>[32]</sup>,在一定程度上缓解了气候变化及极端气候事件对 粮食产量带来的不利影响。其次,种植制度改变,如缅甸中部实行混合种植制度,以提高土壤肥力,提高作物 总体产量<sup>[35]</sup>,2000 年后该地区农田生产力脆弱度较前一时段下降。上述表明,作物品种改良和合理的种植 制度,是积极适应气候变化的有效途径之一。

3.3 极端气候事件因素

除生态系统自身敏感性外,气候变化也会影响系统的脆弱性,包括温度和降水的自然变异与异常变化导致的极端天气事件两个方面的影响<sup>[36]</sup>。首先气候变率增大导致农田生产力脆弱性升高。如在印度西部的古吉拉特邦和中部的中央邦地区,及孟加拉国西北部的拉杰沙希、北部的朗布尔和达卡专区,2000年之后这些地区气温和降水变率均较前一时段增大,脆弱性随之升高;印度南部的卡纳塔克邦在2000年之后对气温变化的敏感性减弱,对降水和辐射的敏感性增强,其脆弱性因太阳辐射变率的下降而明显下降;缅甸中部对降水和辐射波动敏感,2000年后降水和辐射变率的降低使农田脆弱性降低,特别是曼德勒省地区。



图 7 孟印缅三国年累积 NDVI 对降水、气温及太阳辐射的响应及占研究区农田面积的比例

Fig.7 The regression coefficiencies and area percent of the accumulated NDVI to precipitation, temperature and solar radiation in Bangladesh, India and Myanmar in the two periods of 1982-2000 and 2000-2015



图 8 孟印缅三国年累积 NDVI 对降水、气温和太阳短波辐射的平均敏感性

Fig.8 The average response of farmland productivity to precipitation, temperature and solar shortwave radiation in Bangladesh, India and Myanmar

洪涝、干旱和高温等极端气候事件频发是脆弱性变化的另一个因素。如农田脆弱性长期处于较高水平的 印度西部的拉贾斯坦邦,降水量相对较少,灌溉使地下水位下降,河渠干涸[37],河流流量减少降低了地下蓄水 层再补给,进一步加剧农田脆弱性。孟加拉国的拉杰沙希专区降水变异系数在全国居首,局部高强度降雨和 河流泛滥易引发洪水<sup>[32]</sup>,至1999年,孟加拉国大约1百万公顷耕地为高度易发洪水,近5百万公顷耕地为中 等易发洪水<sup>[38]</sup>,而雨季降水量减少易引发干旱,洪涝和干旱均会加剧农田脆弱程度。同样,在缅甸,气候变化 对当地水稻产量影响最大的是高温和干旱极端气候事件<sup>[35]</sup>。

应对极端气候事件影响的有效措施之一是建设水利设施。孟加拉国近 30 年来年降水量持续上升,冲击 平原低地极易受季节性洪涝灾害影响,基础设施建设水平较低,导致其受降水负效应影响的范围较前一时段 有所增加。缅甸中部的曼德勒省年降水量超过了 2000mm,受洪水灾害影响频繁,其后一时段受降水负效应 影响面积较前一时段增加了 2.22%。而印度则相反,水利工程、设施建设缩小了降水负效应的影响范围;截至 2000 年,印度共建设 3.36×10<sup>4</sup>km 堤防、3.79×10<sup>4</sup>km 排灌渠,使 2337 个城镇受到了保护,4713 个村镇的洪水 保护标准得到了提高<sup>[39]</sup>。

本研究中累积 NDVI 对温度的响应既存在负响应,也存在正响应;而负响应可能与该地区的高温胁迫有 关。有研究表明,高温会使作物光合作用减弱,会对作物籽粒灌浆造成严重损害,同时,高温会导致病虫害发 生率增加以及成熟期提前导致干粒重降低而造成减产<sup>[40]</sup>。模型模拟也表明,平均气温在 32℃以上时,温度每 上升 1℃,水稻产量减少 5%左右<sup>[41]</sup>。在降水量较少地区,高温胁迫也会通过干旱放大其负效应<sup>[42-43]</sup>,降水量 增加时,有可能会缓解高温胁迫<sup>[35,44,45]</sup>。正响应区域一般是温度较低的区域,如印度南部、喜马拉雅南麓和 孟加拉国北部地区,多年平均气温均低于 25℃,生产力对气温变化表现为正响应。

由于极端气候事件在生态系统脆弱性的形成及变化中起到重要作用,今后需针对性地开展极端气候事件 对农田生产力的影响,通过加强地面调查,选取如干旱指数和洪涝指数等进行研究。气候变化还会通过影响 作物的收获频率影响生产力,而且气候变化对作物生产力的影响还会因病虫害被放大或抑制<sup>[46]</sup>。此外, Wang 等<sup>[43]</sup>的研究表明热带植被的光合作用在干、湿季对温度和降水的响应存在显著差异,因此区分干湿季 进行脆弱性-气候关系研究具有重要意义。未来要着重从以上方面开展农田生产力脆弱性研究。

## 3.4 土地利用变化的影响

本研究中 2000—2015 年孟印缅地区高度和极度脆弱农田面积及在整个研究区农田面积中所占比例较前 一时段上升的原因,除受气候要素影响程度增强以外,还可能与土地利用变化有关。林地或建设用地转化为 耕地后,其生产力脆弱性一般会增大。印度作为孟印缅三国中面积最大的国家,相关研究显示 1985—1995 年 耕地面积比例下降 0.1%,但 1995—2005 年上升 1.9%<sup>[24]</sup>;2000—2010 年,印度耕地面积以小于 0.5%的幅度呈 微弱增长趋势<sup>[25]</sup>,因此在本研究中土地利用变化对农田脆弱性变化的影响相对较小。

#### 4 结论

本研究根据 IPCC 给定的脆弱性定义,基于长时间序列卫星遥感数据的植被指数年际变率及其变化趋势 定义生态系统功能对气候变化的敏感性和适应性,分时段建立了孟印缅三国农田生态系统脆弱性空间分布格 局,分析了气候变化对农田生产力的影响。研究发现,2000 年之后研究区农田脆弱程度较前一时段总体上 升,高度和极度脆弱范围扩大,空间分布发生北移。后一时段农田生产力受气候影响程度较前一时段总体增 强,孟加拉和缅甸地区气候影响范围和程度均增加,印度地区气候影响范围虽有所缩小,但影响程度增强。具 体而言,近 30 年来整个研究区农田生产力对降水总体表现为正响应,对气温表现为负响应。而对辐射前一时 段表现为正响应,后一时段转变为负响应,不同地区、前后时段间也存在差异。农田高脆弱度的形成主要与气 候要素的高变异性有关,虽然不同地区高脆弱度形成的主导气候要素不同,但高温、不均匀降水及其引发的旱 涝灾害是两个关键因素。需完善气象综合监测体系,加强农业灾害预报与预警,加强农业基础水利设施建设, 培育和选用抗旱抗涝、耐高温和低温等品种也是降低农田脆弱性,有效应对气候变化的方法之一<sup>[47]</sup>。本文基 于长时间序列卫星遥感数据分析农田脆弱性的时空变化,不仅对该地区应对气候变化提供决策依据,支撑 "一带一路"建设,同时也为其他区域开展生态系统对全球气候变化响应及适应研究提供了很好的方法和理

#### 论参考。

#### 参考文献(References):

- [1] 周文魁. 气候变化对中国粮食生产的影响及应对策略[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [2] 赵东升,吴绍洪.气候变化情景下中国自然生态系统脆弱性研究.地理学报,2013,68(5):602-610.
- [3] 徐君,李贵芳,王育红.生态脆弱性国内外研究综述与展望.华东经济管理,2016,30(4):149-162.
- [4] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Summary for Policymakers. Geneva: IPCC, 2001.
- [5] 张怀坤. 全球变暖条件下农业可持续发展研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [6] 汪亚光. 东南亚国家应对气候变化合作现状. 东南亚纵横, 2010, (5): 44-48.
- [7] Pathak H, Wassmann R. Quantitative evaluation of climatic variability and risks for wheat yield in India. Climatic Change, 2009, 93(1/2): 157-175.
- [8] Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [9] Malik N, Bookhagen B, Mucha P J. Spatiotemporal patterns and trends of Indian monsoonal rainfall extremes. Geophysical Research Letters, 2016, 43(4): 1710-1717.
- [10] Team C W, Pachauri R K, Meyer L A. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Geneva: IPCC, 2014.
- [11] 於琍,曹明奎,李克让.全球气候变化背景下生态系统的脆弱性评价.地理科学进展,2005,24(1):61-69.
- [12] Turner II B L, Kasperson R E, Matson P A, McCarthy, J J, Corell, R W, Christensen L, Eckley N, Kasperson J X, Luers A, Martello M L, Polsky C, Pulsipher A, Schiller A. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003, 100(14): 8074-8079.
- [13] Barros V R, Field C B, Dokke D J, Mastrandrea M D, Mach K J, Bilir T E, Chatterjee M, Ebi K L, Estrada Y O, Genova R C, Girma B, Kissel E S, Levy A N, MacCracken S, Mastrandrea P R, White L L. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [14] 刘春蓁. 气候变化影响与适应研究中的若干问题. 气候与环境研究, 1999, 4(2): 129-134.
- [15] 於琍,曹明奎,陶波,李克让,董文杰,刘洪滨,刘长友.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.植物生态学报,2008,32(3):521-530.
- [16] 李鹤, 张平宇, 程叶青. 脆弱性的概念及其评价方法. 地理科学进展, 2008, 27(2): 18-25.
- [17] Chang Q, Zhang J H, Jiao W Z, Yao F M. A comparative analysis of the NDVIg and NDVI3g in monitoring vegetation phenology changes in the northern hemisphere. Geocarto International, 2018, 33(1): 1-20.
- [18] Del Grosso S J, Parton W J, Derner J D, Chen M S, Tucker C J. Simple models to predict grassland ecosystem C exchange and actual evapotranspiration using NDVI and environmental variables. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 249: 1-10.
- [19] Tucker C J, Pinzon J E, Brown M E, Slayback D A, Pak E W, Mahoney R, Vermote E F, El Saleous N. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(20): 4485-4498.
- [20] Wang J B, Dong J W, Liu J Y, Huang M, Li G C, Running S W, Smith W K, Harris W, Saigusa N, Kondo H, Liu Y F, Hirano T, Xiao X M. Comparison of gross primary productivity derived from GIMMS NDVI3g, GIMMS, and MODIS in Southeast Asia. Remote Sensing, 2014, 6(3): 2108-2133.
- [21] Hill M J, Donald G E. Estimating spatio-temporal patterns of agricultural productivity in fragmented landscapes using AVHRR NDVI time series. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(3): 367-384.
- [22] Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, Yang S K, Hnilo J J, Fiorino M, Potter G L. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (r-2). Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(11): 1631-1643.
- [23] Zhao M S, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. Science, 2010, 329 (5994): 940-943.
- [24] Roy P S, Roy A, Joshi P K, Kale M P, Srivastava V K, Srivastava S K, Dwevidi R S, Joshi C, Behera M D, Meiyappan P, Sharma Y, Jain A K, Singh J S, Palchowdhuri Y, Ramachandran R M, Pinjarla B, Chakravarthi V, Babu N, Gowsalya M S, Thiruvengadam P, Kotteeswaran M, Priya V, Yelishetty K M V N, Maithani S, Talukdar G, Mondal I, Rajan K S, Narendra P S, Biswal S, Chakraborty A, Padalia H, Chavan M,

Pardeshi S N, Chaudhari S A, Anand A, Vyas A, Reddy M K, Ramalingam M, Manonmani R, Behera P, Das P, Tripathi P, Matin S, Khan M L, Tripathi O P, Deka J, Kumar P, Kushwaha D. Development of decadal (1985-1995-2005) land use and land cover database for India. Remote Sensing, 2015, 7(3): 2401-2430.

- [25] 胡琼,吴文斌,项铭涛,陈迪,龙禹桥,宋茜,刘逸竹,陆苗,余强毅.全球耕地利用格局时空变化分析.中国农业科学,2018,51(6): 1091-1105.
- [26] Piao S L, Sitch S, Ciais P, Friedlingstein P, Peylin P, Wang X H, Ahlström A, Anav A, Canadell J G, Cong N, Huntingford C, Jung M, Levis S, Levy P E, Li J S, Lin X, Lomas M R, Lu M, Luo Y Q, Ma Y C, Myneni R B, Poulter B, Sun Z Z, Wang T, Viovy N, Zaehle S, Zeng N. Evaluation of terrestrial carbon cycle models for their response to climate variability and to CO<sub>2</sub> trends. Global Change Biology, 2013, 19(7): 2117-2132.
- [27] Hansen L J, Hoffman J R. Adapting governance for change//Hansen L J, Hoffman J R, eds. Climate Savvy. Washington, DC: Island Press, 2011: 199-212.
- [28] Dong Z Q, Pan Z H, An P L, Zhang J T, Zhang J, Pan Y Y, Huang L, Zhao H, Han G L, Wu D, Wang J L, Fan D L, Gao L, Pan X B. A quantitative method for risk assessment of agriculture due to climate change. Theoretical and Applied Climatology, 2018, 131(1/2): 653-659.
- [29] Hatfield J L, Wright-Morton L, Hall B. Vulnerability of grain crops and croplands in the midwest to climatic variability and adaptation strategies. Climatic Change, 2018, 146(1/2): 263-275.
- [30] 杨修,孙芳,林而达,居辉,熊伟.我国玉米对气候变化的敏感性和脆弱性研究.地域研究与开发,2005,24(4):54-57.
- [31] Mahmood R, Hayes J T. A model-based assessment of impacts of climate change on boro rice yield in bangladesh. Physical Geography, 1995, 16 (6): 463-486.
- [32] Karim Z, Hussain S G, Ahmed M. Assessing impacts of climatic variations on foodgrain production in Bangladesh//Erda L, Bolhofer W C, Huq S, Lenhart S, Mukherjee S K, Smith J B, Wisniewski J, eds. Climate Change Vulnerability and Adaptation in Asia and the Pacific. Dordrecht: Springer, 1996.
- [33] Mottaleb K A, Rejesus R M, Muty M, Mohanty S, Li T. Benefits of the development and dissemination of climate-smart rice: *Ex ante* impact assessment of drought-tolerant rice in South Asia. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2017, 22(6): 879-901.
- [34] CIMMYT. CIMMYT Business Plan 2006-2010: Translating the Vision of *Seeds of Innovation* into A Vibrant Work Plan. El Batan, Mexico: CIMMYT, 2006.
- [35] McKinley J, Adaro C, Pede V O, Setiyono T, Aung N M, Hom N H, Htwe N M, Hein Y, Than S M, Swe K L, Quicho E, Sheinkman M, Wassmann R. The Current State of Climate Change Perceptions and Policies In Myanmar: 2014 Report. Copenhagen, Denmar: CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security, 2015.
- [36] Satya P, Gernot L, Felicity W, Shirley K, Serena F, Nicole H, Hiromi I, Roopa R, Kim J. Practitioners and Policy-makers Exchange on Climate Change Adaptation in Agriculture. Bangkok: UNDP, 2010.
- [37] Dixon J, Gulliver A, Gibbon D. Global Farming Systems Study: Challenges and Priorities to 2030. Rome: FAO, 2001.
- [38] Karim Z, Hussain S G, Ahmed A U. Climate change vulnerability of crop agriculture//Huq S, Karim Z, Asaduzzaman M, Mahtab F, eds. Vulnerability and Adaptation to Climate Change for Bangladesh. Dordrecht: Springer, 1999: 39-54.
- [39] 万洪涛. 印度的洪水灾害与减灾措施. 水利发展研究, 2005, 5(9): 59-63.
- [40] Blum A, Sinmena B, Mayer J, Golan G, Shpiler L. Stem reserve mobilisation supports wheat-grain filling under heat stress. Australian Journal of Plant Physiology, 1994, 21(6): 771-781.
- [41] Baker J T. Modeling the impact of climate change on rice production in Asia. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 101(4): 291-292.
- [42] Moffat A S. Finding new ways to protect drought-stricken plants. Science, 2002, 296(5571): 1226-1229.
- [43] Wang X H, Ciais P, Wang Y L, Zhu D. Divergent response of seasonally dry tropical vegetation to climatic variations in dry and wet seasons. Global Change Biology, 2018, 24(10): 4709-4717.
- [44] Ray D K, Gerber J S, MacDonald G K, West P C. Climate variation explains a third of global crop yield variability. Nature Communications, 2015, 6: 5989.
- [45] Wassmann R, Jagadish S V K, Sumfleth K, Pathak H, Howell G, Ismail A, Serraj R, Redona E, Singh R K, Heuer S. Chapter 3 regional vulnerability of climate change impacts on Asian rice production and scope for adaptation. Advances in Agronomy, 2009, 102: 91-133.
- [46] Ray D K, Foley J A. Increasing global crop harvest frequency: Recent trends and future directions. Environmental Research Letters, 2013, 8 (4) · 044041.
- [47] 肖风劲,张海东,王春乙,王邦中,刘海波,王长科.气候变化对我国农业的可能影响及适应性对策.自然灾害学报,2006,15(6): 327-331.