

2000—2014年全球粮食安全格局的 时空演化及影响因素

马恩朴^{1,2}, 蔡建明¹, 林静¹, 郭华³, 韩燕^{1,2}, 廖柳文^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 天津市农业科学院农村经济与区划研究所, 天津 300192)

摘要: 粮食安全是实现可持续发展整体目标的基础, 由于“至2015年使饥饿人口比例减半”的千年发展目标并未如期实现, 使得2030年零饥饿目标的实现面临更大挑战。鉴于此, 亟需从全球粮食安全格局的时空演化中寻找全球粮食安全问题的内在原因。在建立粮食安全评价因子数据集和粮食安全影响因素数据集的基础上, 运用多指标综合评价法评价2000—2014年172个国家的粮食安全水平; 进而通过空间自相关分析研究全球粮食安全格局的空间模式与变化特征; 在此基础上运用多元非线性回归方法分析粮食安全格局的影响因素。结果表明: ①全球粮食安全格局呈现出社会经济发展与粮食安全水平“高一高集聚、低—低集聚”的空间模式, 其中高值区主要分布在除东欧以外的欧洲区域、北美洲、大洋洲和东亚部分国家, 低值区主要集中在撒哈拉以南非洲、南亚和西亚地区, 以及东南亚部分国家; ②在99%的置信水平上, 欧洲和撒哈拉以南非洲分别是全球粮食安全格局的热点和冷点, 在非集聚区, 海地和朝鲜等国存在长期粮食不安全问题; ③全球粮食安全格局总体稳定, 但极不安全和不安全组的内部变化明显, 粮食安全水平波动最大的国家也是粮食最不安全的国家; ④年平均气温、人均国内生产总值、获得洁净用水的人口占比、政治稳定与无暴力程度是全球粮食安全格局的主要影响因素。研究表明, 自2000年以来, 全球粮食安全状况有所改善, 但2013年出现趋势性逆转。受气候变化、居民购买力、健康卫生水平和政治经济稳定性影响, 全球粮食安全始终波动不稳, 局部区域目前仍面临突出的粮食安全问题。为此, 建议制定基于粮食供给、食物获取、食物利用和政治稳定性四大支柱的粮食安全战略, 并通过全球乡村振兴策略来推动粮食安全建设, 同时逐步引入城市农业等多元化生产方式, 使高度城市化区域建立起更富弹性的食物系统。

关键词: 全球粮食安全评估; 时空演化模式; 变化特征; 多元非线性回归; 综合指标体系

DOI: 10.11821/dlxb202002009

1 引言

粮食作为基本必需品, 是保障人类可持续发展最重要的物质基础, 在支撑社会经济发展中具有不可替代的基础性地位。粮食安全议题是多个联合国框架文件和国际科学研究计划的重点关注内容。继联合国千年发展目标 (Millennium Development Goals) 提出

收稿日期: 2018-05-28; 修订日期: 2019-12-02

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(71734001) [Foundation: Key Project of National Natural Science Foundation of China, No.71734001]

作者简介: 马恩朴(1989-), 男, 博士生, 贵州毕节人, 研究方向为城市农业、可持续城市化与土地利用/覆被变化研究。
E-mail: maenpu2015@sina.com

通讯作者: 蔡建明(1961-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事城市可持续性与城市发展战略、都市农业与城乡互动发展和城乡旅游发展等研究。E-mail: caijm@igsnr.ac.cn

“至2015年使饥饿人口占总人口的比例减半”后,《2030年可持续发展议程》进一步将“消除饥饿、实现食品安全和营养改善,促进农业可持续发展”作为联合国可持续发展目标(SDGs)之一。2016年5月召开的第二届联合国环境大会就食物浪费、保护生物多样性、土地退化和荒漠化防治等达成的多个决议也与粮食安全紧密相关^[1]。

在地球系统科学领域,先是“地球系统科学联盟”(ESSP)实施的4个可持续性联合计划之一——全球环境变化与食物系统计划关注全球环境变化下的食物问题,联合计划重点研究的4大议题:粮食、碳、水和人类安全均是关乎人类生计与生存可持续性的关键问题。2012年里约峰会正式推出的“未来地球(Future Earth)”计划在“全球发展”主题下提出要研究全球环境变化影响食物、水和生物多样性的机理,并为保障全球环境变化下满足人类发展所需要的食物供应提供科学对策^[2-3]。“未来地球2025愿景”在其学科发展体系中进一步将水、能源和食物供给的协同效应及其权衡关系,以及全球变化背景下的农业发展列为重点研究内容^[4-5]。

联合国和国际科学联盟对粮食安全的高度关注不仅是因为粮食安全在促进全球可持续性中发挥着基础支撑作用,更是因为可持续发展目标(SDGs)与现实状况之间的巨大差距。由于2008年数次粮价上涨引发的粮食危机和2011年“非洲之角”严重干旱等事件的影响,2015年,在联合国粮食与农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)监测的129个国家中57个未能实现长期饥饿人口比例减半的千年发展目标。2016年全球长期食物不足人口数为8.15亿,较2015年增加0.38亿人;尽管发育迟缓发生率由2005年的29.5%降至2016年的22.9%,但出现发育迟缓症状的5岁以下儿童仍高达1.55亿;2016年全球共5200万5岁以下儿童受消瘦困扰,而同时4100万的5岁以下儿童则超重^[6]。长期食物不足人口数在经过长时间减少后的近期反弹可能意味着趋势出现逆转^[6],全球粮食安全形势并不乐观。在此背景下,借助地理学科的综合优势,系统揭示全球粮食安全格局的时空演化规律,并探讨粮食安全格局的影响因素有助于识别粮食安全的高风险国家,确定未来粮食安全工作的重点区域和突破口,进而为促进可持续发展目标(SDGs)的实现提供科学依据和政策建议。

2 粮食安全的定义与评价

联合国粮食与农业组织(FAO)先后对“粮食安全”作过三次定义,分别是1974年的“任何人在任何时候都能得到为了生存和健康所需要的足够食品”,1983年的“任何人在任何时候既能买得到又能买得起他们所需要的基本食品”^[7],以及1996年的定义:“让所有人在任何时候都能在物质上和经济上获得充足的、安全的和有营养的食物,来满足其积极和健康生活的膳食需要及食物喜好”^[8-9]。粮食安全的早期定义仅限于供给层面,主要强调国家和全球的粮食供给。但研究发现,由于粮食没有得到合理分配,或者在获取食物上存在物质、经济或社会文化方面的种种障碍,导致国家或全球一级充足的粮食供给本身并不能保证家庭一级的粮食安全^[10-11]。这使得1983年的定义将重点转向家庭和个人获取食物的问题,对粮食安全的政策关切逐步将收入、支出、市场和价格因素纳入考虑^[12]。第三次定义进一步拓展了粮食安全的内涵和外延,内涵上将食物的卫生和健康标准,以及营养平衡纳入考虑;外延上则引入人权和社会文化等因素^[13]。可见,粮食安全并不仅仅是简单的粮食供给充足,它还与区域可达性、居民购买力、食品质量、以及政治与社会经济的稳定性等因素相关,考虑到在具有足够粮食供应的世界中仍然存在饥荒现象的巨大反差,采取综合视角、将“粮食供给、食物获取、食物利用和其他三

个维度随时间的稳定性”同时纳入考虑将十分必要。

由于许多国家数据收集系统不完整,加之政策背景差异,进行全球粮食安全评价面临较大的挑战^[1]。目前,数值模拟、试验方法和统计模型是国际上粮食安全评价常用的3种基本方法,研究视角侧重于气候变化对粮食安全的影响和经济影响评估^[15]。John等提出一种将价格和食品质量差异等引入现有经济模型的系统化方法来评价国际粮食安全水平,并使用校准模型评估了坦桑尼亚的粮食不安全状况^[14]。Andrea等通过分析2008年和2009年度巴西家庭食品消费数据发现不计入学校免费消费的食品可能会严重扭曲对家庭食品消费的评估,从而扭曲对巴西食品不安全程度的评价^[16]。Rahib等以谷物产量、谷类加工产品量和经济增长作为输入参数,通过If-Then规则确定各参数与粮食安全风险水平的关系,进而运用2型模糊系统法评价了土耳其的粮食安全风险^[17]。Thomas等对比分析了市场完全一体化和持续分割两种政策情景下全球粮食生产和土地使用的变化,结果表明,在市场持续分割情景下,撒哈拉以南非洲的营养不良现象将会增加^[18]。

国内方面,吴文斌等以人均GDP和人均粮食占有量为评价指标,通过建立空间EPIC模型,作物选择模型和IFPSIM模型分别模拟了水稻、玉米、小麦和大豆4类作物2020年的单产、播种面积和作物价格,进而评价了2020年的全球粮食安全状况^[9]。殷培红等综合考虑粮食供需平衡、粮食安全应急保障能力和经济补偿能力,以粮食安全保障支出不超过地方财政收入的25%为阈值进行中国粮食安全脆弱区识别,并分析其空间分异特征^[19]。朱晓禧等以存在性、自由性、有效性、稳定性和适应性作为粮食安全系统评价的指示器,分别评价了粮食安全自然系统、支撑系统和调配系统的安全等级,进而计算得到各子系统的安全度指数和中国粮食安全系统的安全度,揭示了中国粮食安全的空间特征^[15]。

有关粮食安全评价的现有研究主要侧重于某一方面,或集中于国家/区域水平,尤其是气候变化影响下的粮食安全和经济模型分析得到大量探讨,水、土地等单一要素影响下的国家/区域粮食安全问题也被广泛关注,但是面向全球层面的综合性评价仍然不足。自2000年以来,全球粮食安全格局发生了哪些变化、受哪些因素影响仍亟待研究。

粮食安全是一个受土地、水资源、气候变化、农业技术水平、区域可达性、居民购买力、食品质量、以及政治与社会经济稳定性等诸多因素影响的综合变量,为了更好地揭示全球面临的粮食安全问题,需要在系统评价基础上分析粮食安全格局的影响因素。据此,本文参考FAO粮食安全框架建立评价指标体系,采用综合评价和空间分析方法研究全球粮食安全格局的演化过程,并定量分析粮食安全格局的影响因素。

3 数据来源

本文使用的数据主要包括粮食安全评价因子数据集和粮食安全影响因素数据集。由于FAO粮食安全框架的综合性,其部分间接因子,即人均国内生产总值、获得洁净用水的人口占比、政治稳定与无暴力程度也被选入粮食安全的影响因素中。两大数据集的指标体系构成、数据来源、评价单元与年份取舍的详细情况如下。

3.1 粮食安全评价因子数据集

FAO在“粮食安全”的第三次定义中,提出由“粮食供给、食物获取、食物利用和其他3个维度随时间的稳定性”构成的粮食安全框架^[1]。由于FAO在粮食安全指标上具有最系统、最连续的数据记录,FAOSTAT (<http://www.fao.org/faostat/en/#home>)对各国的人口、营养状况、粮食供给等10类指标作了连续统计,这些指标及其组合已足以涵盖粮食安全的4个方面。因此,本文以FAOSTAT作为粮食安全评价因子的数据来源,根据

可用数据进一步细化、完善粮食安全框架,形成以粮食供给、食物获取、食物利用、经济与政治稳定性为二级指标,人均粮食产量等12个变量为三级指标的粮食安全评价指标体系。

在粮食安全评价指标体系中,粮食供给是粮食安全的必要条件,但并非充分条件。由于人均可支配收入、粮食价格以及运输、仓储、交易等农产品流通能力的差异,在具有足够粮食供应的世界中,食物的可获得性以及人们获取食物的能力仍然存在极大差异。同时受健康卫生条件、食物烹制程度和储存方式、以及膳食习惯等因素影响,食物利用存在显著的不充分、不科学和不均衡问题,食物浪费、食品健康、肥胖与消瘦并存等问题依然突出。这说明在粮食供应充足的前提下,粮食安全最终要通过获取食物,并充分、合理、有效利用其营养成分来实现。因此,食物获取和食物利用是实现粮食安全的最终途径。而经济与政治稳定性则用于衡量产量波动、价格波动和政治动荡等不确定因素对粮食供给、食物获取和食物利用的影响,是决定国家能否实现长期粮食安全的重要因素。据此,从FAOSTAT中选取相应变量作为三级指标构成粮食安全评价指标体系,通过筛选,不断剔除数据不完整、不连续的评价单元,最终得到2000—2014年172个国家的粮食安全评价因子数据集。指标体系的构成和测量方法如表1所示。

表1 粮食安全评价指标体系与测量方法
Tab. 1 Index system and method for evaluation of food security

一级指标	二级指标	三级指标	指标向性	测量方法
粮食安全指数	粮食供给	X_1 : 人均粮食产量(kg/人)	+ ^①	X_1 =粮食总产量/总人口
		X_2 : 人均蛋白质供应量(g/人·日)	+	X_2 =食物蛋白供应量/(总人口×当年天数)
		X_3 : 人均动物源蛋白供应量(g/人·日)	+	X_3 =动物源蛋白供应量/(总人口×当年天数)
		X_4 : 膳食能量供应充足率(%)	+	X_4 =每日膳食能量供应大于2320千卡 ^② 的人口数/总人口数
	食物获取	X_5 : 粮食短缺程度(kcal/人·日)	-	X_5 =2320-营养不良人群的每日人均膳食能量摄入
		X_6 : 人均国内生产总值(2011年美元定值)	+	X_6 =按购买力平价换算的国内生产总值/总人口
	食物利用	X_7 : 5岁以下矮小儿童占比(%)	-	X_7 =5岁以下矮小儿童数/5岁以下儿童总数
		X_8 : 5岁以下受浪费影响的儿童占比(%)	-	X_8 =5岁以下受浪费影响的儿童数/5岁以下儿童总数
		X_9 : 获得洁净用水的人口占比(%)	+	X_9 =获得洁净用水的人口数/总人口
	经济与政治稳定性	X_{10} : 人均粮食产量变异性	-	X_{10} =人均粮食产量的标准差/人均粮食产量的平均值
		X_{11} : 人均粮食供给变异性(kcal/人·日)	-	X_{11} =人均粮食供给的标准差
		X_{12} : 政治稳定与无暴力程度	+	X_{12} 来自世界银行开发的世界治理指标(WGI) ^③

注: ① 指标向性中“+”表示指标取值越大,粮食安全指数越高,“-”表示指标取值越大,粮食安全指数越低;② 2320千卡是按成人等价单位换算的每日膳食能量最低标准;③ 政治稳定与无暴力程度是世界治理指标(WGI)体系的6大指标之一,最早由考夫曼(Kaufmann)等于1999年提出,用于衡量人们对政局稳定、政治暴力和恐怖主义等的感知。

3.2 粮食安全影响因素数据集

从自然到社会的诸多因素会影响粮食安全,现有文献从单要素影响和多要素协同角度研究了粮食安全的影响因素。所涉及的影响因素包括土地退化^[20]、受地形影响的农田生产力变化^[21]、水资源短缺和水污染^[22]、旱灾风险^[23]、气候变化^[24]、水和土地在不同部门间的竞争性使用^[25-26]、以及地区冲突与气候变化的叠加^[6]等方面。本文在选取影响因素

时, 根据数据可用性对指标进行逐步筛选, 从研究初期拟定的19个初始指标中剔除无数据记录、记录时间不连续或覆盖空间不完整的9个指标, 最终得到包含10个指标, 涵盖2002—2014年134个国家的粮食安全影响因素数据集(表2)。

表2 粮食安全影响因素的测量方法与数据来源

Tab. 2 Methods of measuring factors affecting food security and data sources

影响因素	测量方法与数据来源	数据来源网址
Z ₁ : 人均农业用地(hm ² /人)	Z ₁ =农业用地面积/总人口	http://www.fao.org/faostat/en/
Z ₂ : 人均可再生水资源量(m ³ /人)	Z ₂ =可再生水资源量/总人口	可再生水资源量数据来自 ChartsBin: http://chartsbin.com/view/1469 ; 人口数据来自: http://www.fao.org/faostat/en/
Z ₃ : 年降水量(mm)	Z ₃ 来自东安格利亚大学气候研究中心	https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_3.23/crucy.1506241137.v3.23/countries/pre/
Z ₄ : 年平均气温(°C)	Z ₄ 来自东安格利亚大学气候研究中心	https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_3.23/crucy.1506241137.v3.23/countries/tmp/
Z ₅ : 水土协调度	Z ₅ =可再生水资源量/农业用地面积	可再生水资源量数据来自 ChartsBin: http://chartsbin.com/view/1469 ; 农业用地面积来自: http://www.fao.org/faostat/en/
Z ₆ : 地均化肥施用量(kg/hm ²)	Z ₆ =农用化肥施用量/农业用地面积	http://www.fao.org/faostat/en/
Z ₇ : CO ₂ 排放量(kt)	Z ₇ 来自世界资源研究所(WRI)的“国家温室气体排放数据集”, 该数据集由WRI发布, 整合了美国能源部橡树岭国家实验室、FAO、国际能源署、世界银行和美国环境保护署等机构的数据	http://datasets.wri.org/dataset/cait-country
Z ₈ : 人均国内生产总值(2011年美元定值)	Z ₈ =按2011年不变价换算的国内生产总值/总人口	http://www.fao.org/faostat/en/
Z ₉ : 获得洁净用水的人口占比(%)	Z ₉ =获得洁净用水的人口数/总人口	http://www.fao.org/faostat/en/
Z ₁₀ : 政治稳定与无暴力程度	Z ₁₀ 来自世界银行开发的世界治理指标(WGI)	https://datacatalog.worldbank.org/dataset/worldwide-governance-indicators

此外, 还使用了联合国减少灾害风险办公室EM-DAT的灾害统计数据、用数据看世界(Our World in Data)(<https://ourworldindata.org/war-and-peace>)的冲突数据以及世界地理信息系统数据(World GIS Data)的地图数据。

4 研究方法

4.1 多指标综合评价

随着粮食安全概念内涵与外延的拓展, 粮食产量等单一指标已不再能够充分反映粮食安全状况, 这使得多指标综合评价法成为粮食安全评价的有效工具。本文依次按以下步骤进行粮食安全的多指标综合评价。

4.1.1 数据标准化处理 采用极差标准化法对指标数据作标准化处理。

(1) 对正向指标有:

$$X'_{ij} = (X_{ij} - \min X_{ij}) / (\max X_{ij} - \min X_{ij}) \quad (1)$$

(2) 对负向指标有:

$$X'_{ij} = (\max X_{ij} - X_{ij}) / (\max X_{ij} - \min X_{ij}), \quad i = 1, 2, \dots, 172; j = 1, 2, \dots, 12 \quad (2)$$

式中: X_{ij} 为第*i*个国家(按字母排序)*j*项指标的原始数据; X'_{ij} 为对应的标准化变量值, $X'_{ij} \in [0, 1]$; $\max(X_{ij})$ 、 $\min(X_{ij})$ 分别为第*j*项指标的最大和最小值。

4.1.2 基于均方差的权重确定 由于本文进行粮食安全评价的目的是分析国家层面的粮食安全差异格局, 因此所确定的指标权重应能反映各指标样本取值的相对离散程度。为此, 采用均方差法来确定各指标的权重, 步骤如下。

(1) 基于标准化数据集, 计算2000—2014年各评价指标的均方差(即标准差):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{ij}' - \bar{X}_{ij}')^2}{n}}, \quad i=1, 2, \dots, 172; j=1, 2, \dots, 12 \quad (3)$$

式中: σ 表示指标均方差; X_{ij}' 为第*i*个国家*j*项指标的标准化变量值; \bar{X}_{ij}' 为标准化变量值的均值; *n*为参评国家数。

(2) 基于均方差, 分别计算2000—2014年粮食供给、食物获取、食物利用、经济与政治稳定性所属三级指标的权重系数:

$$\omega_{mkj} = \frac{\partial_{mkj}}{\sum_{k=1}^K \partial_{mkj}} \quad (4)$$

式中: *m*表示年份序号, *m* = 2000, 2001, ..., 2014; *k*是粮食供给、食物获取、食物利用、经济与政治稳定性所包含的三级指标数, *k*取4、2、3、3; *j*表示三级指标的序号, *j* = 1, 2, ..., 12; ω_{mkj} 表示*m*年第*j*项指标在对应上一级指标下的权重。

(3) 求2000—2014年各三级指标权重系数的均值, 以此作为各三级指标在研究期内的统一权重:

$$\omega_j = \sum_{m=2000}^{2014} \omega_{mkj} / 15, \quad k=4, 2, 3, 3; j=1, 2, \dots, 12 \quad (5)$$

式中: ω_j 即为各三级指标的权重, 计算结果如表3所示。

表3 三级指标的权重

Tab. 3 Weight of the third tier indicators

二级指标	粮食供给				食物获取		食物利用			经济与政治稳定性		
三级指标代码	<i>X</i> ₁	<i>X</i> ₂	<i>X</i> ₃	<i>X</i> ₄	<i>X</i> ₅	<i>X</i> ₆	<i>X</i> ₇	<i>X</i> ₈	<i>X</i> ₉	<i>X</i> ₁₀	<i>X</i> ₁₁	<i>X</i> ₁₂
权重	0.21	0.28	0.33	0.18	0.51	0.49	0.39	0.31	0.30	0.27	0.31	0.42

注: 三级指标代码的含义详见表1。

4.1.3 二级指标评价 以标准化数据集和三级指标权重为基础, 建立二级指标评价模型分别对2000-2014年各国的粮食供给(*Y*₁)、食物获取(*Y*₂)、食物利用(*Y*₃)和经济与政治稳定性(*Y*₄)进行评价:

$$Y_1 = 0.21X_1 + 0.28X_2 + 0.33X_3 + 0.18X_4; Y_2 = 0.51X_5 + 0.49X_6;$$

$$Y_3 = 0.39X_7 + 0.31X_8 + 0.30X_9; Y_4 = 0.27X_{10} + 0.31X_{11} + 0.42X_{12}$$

代入标准化的指标数据, 分别得到2000—2014年各国粮食供给、食物获取、食物利用、经济与政治稳定性的评价结果, 以作为雷达图面积模型的输入。

4.1.4 建立雷达图面积模型 当系统安全性取决于各子系统的状态及其交互作用时, 可使用雷达图面积模型来集成子系统的状态信息^[15]。就粮食安全而言, 充足的粮食供给显然是粮食安全的第一前提, 在此基础上粮食安全尚需要通过食物获取和食物利用来实现, 而如何稳定、可靠地供给、获取和利用食物则需要经济与政治稳定性作为保障。可见, 粮食供给、食物获取、食物利用、经济与政治稳定性构成了对粮食安全的闭合传递关系, 使用雷达图面积模型能够更好地反映这种关系。为此, 以FSI表示粮食安全指数, 建立雷达图面积模型 $FSI = (Y_1 \times Y_2 + Y_2 \times Y_3 + Y_3 \times Y_4 + Y_4 \times Y_1) / 2$ 进行粮食安全评价。

4.2 空间自相关分析

在粮食安全评价基础上, 本文运用GIS的分析模式工具对粮食安全指数作空间自相关分析, 通过计算2000—2014年的Moran's I 指数、 z 得分和 P 值来判断全球粮食安全格局的空间模式, 其中Moran's I 的数学公式为:

$$I = \frac{n}{S_0} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} z_i z_j}{\sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (6)$$

式中: z_i 是国家 i 的粮食安全指数与其平均值的偏差, 即 $z_i = FSI_i - \overline{FSI}$; z_j 同此; w_{ij} 是国家 i 和 j 之间的空间权重; n 为参评国家数, $n = 172$ 。

S_0 是所有空间权重的聚合:

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} \quad (7)$$

式中: w_{ij} 通过GIS的“生成空间权重矩阵”来获取。

4.3 多元非线性回归分析

由于研究中发现多个影响因素与粮食安全指数呈非线性关系, 故决定采用多元非线性回归方法来分析粮食安全格局的影响因素, 主要包括以下步骤:

(1) 影响因素筛选。以FSI为因变量, 粮食安全影响因素为自变量进行逐步回归分析, 按显著性 F 检验概率 ≤ 0.05 为进入标准, > 0.10 为删除标准进行影响因素筛选, 同时建立作为对照的多元线性回归方程组。通过筛选, 影响因素中的年降水量(Z_3)、年平均气温(Z_4)、地均化肥施用量(Z_6)、人均国内生产总值(Z_8)、获得洁净用水的人口占比(Z_9)和政治稳定与无暴力程度(Z_{10})6个因素进入了回归模型^①。

(2) 非线性变量替换。主要通过单变量曲线估计和转换变量赋值来实现。首先进行单变量曲线估计, 在SPSS 20.0中, 以FSI为因变量, 分别对上一步中筛选出的影响因素做曲线估计。操作时在模型选项中选中所有非线性模型, 并以判定系数 R^2 最大为选择依据确定最佳曲线估计方程。其次, 进行转换变量赋值。将标准化影响因素值代入最佳曲线估计方程计算得到单因素非线性作用下的粮食安全模拟值 Y_{ij} ($i=1, 2, \dots, 133; j=1, 2, \dots, m; m$ 为进入各期回归方程的自变量个数, m 取4、5、6); 引入转换变量 T , 将模拟值 Y_{ij} 赋予 T , 这样, 转换变量 T 与FSI之间呈线性关系, 可进一步通过多元线性回归确定 T 的系数。

(3) 建立多元非线性回归方程组。首先以粮食安全指数FSI为因变量, 转换变量 T 为自变量, 采用“进入”方法再次进行多元线性回归, 确定各转换变量 T 的系数, 建立转换方程组。继而将转换变量 T 的表达式(即曲线估计方程)代入转换方程组得到多元非线性回归方程组。对多元线性回归方程组和非线性回归方程组, 根据拟合优度及显著性检验结果择优用于影响因素分析, 其中, 对于多元非线性回归方程, 求FSI对各影响因素的偏导数:

$$f_{Z_i}(Z_i, Z_j, Z_p, Z_q) = \lim_{\Delta Z_i \rightarrow 0} \frac{f_{Z_i}(Z_i + \Delta Z_i, Z_j, Z_p, Z_q) - f_{Z_i}(Z_i, Z_j, Z_p, Z_q)}{\Delta Z_i} \quad (7)$$

式中: Z_i, Z_j, Z_p, Z_q 代表进入回归模型的影响因素, 角标取值为3、4、6、8、9和10。令 $\Delta Z_i = 1$, 所得结果即为影响因素 i 对粮食安全的作用系数。

① 并非每年的回归模型都包含文中的6个因素, 此处的6是按最大值计的。

5 结果与分析

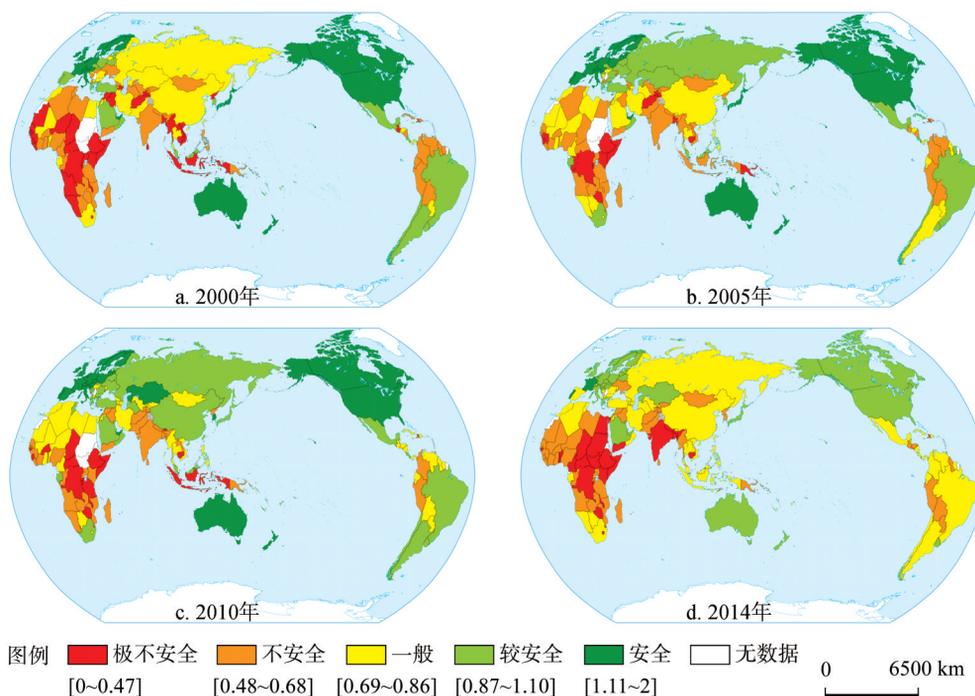
5.1 粮食安全评价结果

基于综合评价,以FSI自然间断点值的均值作为统一分级标准,将历年评价结果划分为极不安全($0 \leq \text{FSI} \leq 0.47$)、不安全($0.48 \leq \text{FSI} \leq 0.68$)、一般($0.69 \leq \text{FSI} \leq 0.86$)、较安全($0.87 \leq \text{FSI} \leq 1.10$)和安全($1.11 \leq \text{FSI} \leq 2$) 5个级别;并运用轮廓系数(Silhouette Coefficient)检验FSI的聚类有效性,得到所有年份的轮廓系数均大于0.60,表明统一分级标准科学合理。研究期FSI的聚类有效性如表4所示,典型年份的评价结果如图1所示。

表4 2000—2014年粮食安全指数的聚类有效性

Tab. 4 Classification validity of Food Security Index in 2000-2014

年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
S_i	0.69	0.67	0.67	0.66	0.67	0.67	0.67	0.64	0.66	0.63	0.63	0.63	0.62	0.65	0.63



注: 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)2948号的标准地图制作,底图无修改。

图1 2000—2014年全球粮食安全格局的变化

Fig. 1 Changes of global food security pattern in 2000-2014

5.2 粮食安全格局分析

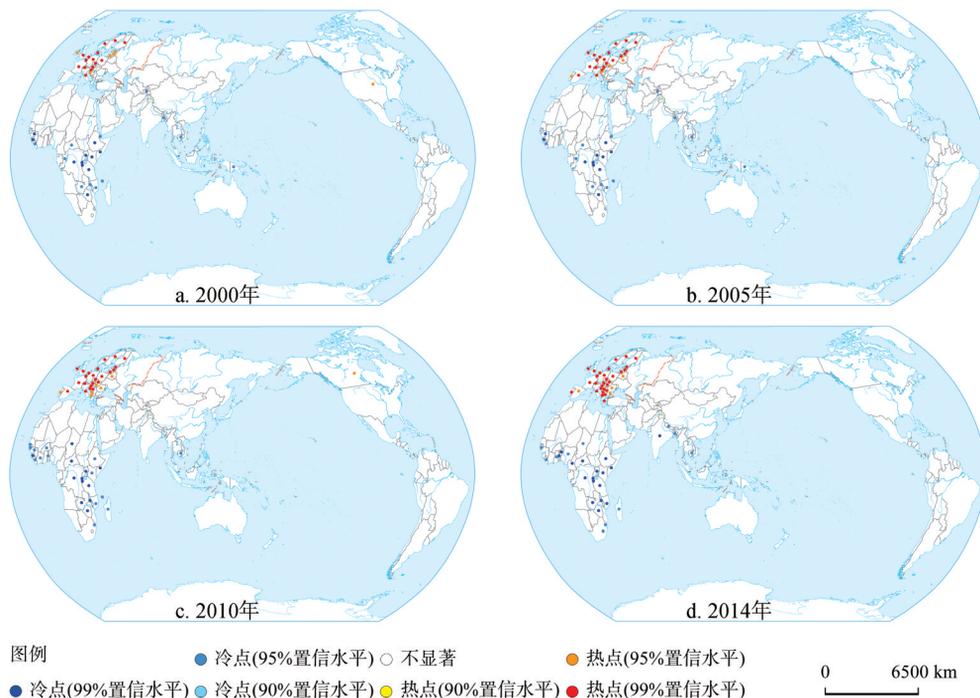
通过空间自相关分析得到2000—2014年全球粮食安全指数的Moran's I 、 z 得分与 P 值,如表5所示。

2000—2014年, Moran's I 均大于0,且 P 值均为0,表明可以拒绝“粮食安全指数在国家之间呈随机分布”的零假设,即全球粮食安全差异具有统计学上的显著性,且呈现“高一高集聚、低—低集聚”的总体空间分布格局。具体来看,全球粮食安全的高值区主

表5 2000—2014年粮食安全指数的Moran's I 、 z 得分与 P 值
Tab. 5 Moran's I , z score and P value of the food security index in 2000-2014

年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Moran's I	0.22	0.22	0.22	0.23	0.24	0.25	0.28	0.27	0.28	0.26	0.29	0.25	0.27	0.24	0.27
z 得分	14.00	13.84	13.71	14.40	15.14	15.39	17.12	16.51	17.69	16.44	18.27	15.44	16.68	15.04	17.04
P 值	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

要分布在除东欧以外的欧洲区域、北美洲、大洋洲和东亚部分国家；全球粮食安全的低值区主要集中在撒哈拉以南非洲、南亚和西亚地区、以及东南亚部分国家（图1）。在99%的置信水平上，欧洲和撒哈拉以南非洲分别是全球粮食安全格局的热点和冷点，其中历年粮食安全指数最高的20个国家中七成以上分布在欧洲；而粮食安全指数最低的20个国家中一半以上分布在撒哈拉以南非洲（图2）。在90%或95%的置信水平上，热点区还包括美国和加拿大；冷点区则包括中亚的塔吉克斯坦、东南亚的缅甸、老挝和南亚地区孟加拉国、阿富汗等国家。在非集聚区，海地和朝鲜存在长期粮食不安全问题。



注：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)2948号的标准地图制作，底图无修改。

图2 2000—2014年全球粮食安全格局的热点与冷点
Fig. 2 Hot VS cold spots of global food security pattern in 2000-2014

从变化来看，全球粮食安全格局总体比较稳定，但极不安全和不安全组的变化比较明显。以FSI年际变化幅度的均值表示各国粮食安全指数的动态度，经降序排列后发现动态度最高的20个国家中除科威特以外，其余均面临突出的粮食安全问题。研究还发现，历年粮食最不安全的20个国家稳定出现在66个国家组成的集合中，以该集合中各国重复出现于历年FSI最末20位的次数为依据，将重复出现5次及以上的23个国家作为全球粮食安全工作的重点区域，包括有：海地（15）、索马里（15）、埃塞俄比亚（14）、阿

富汗(13)、乍得(13)、刚果民主共和国(12)、孟加拉国(11)、利比里亚(9)、卢旺达(9)、塔吉克斯坦(9)、赞比亚(9)、塞拉利昂(8)、中非共和国(7)、伊拉克(6)、柬埔寨(5)、几内亚比绍(5)、印尼(5)、朝鲜(5)、马拉维(5)、尼日利亚(5)、坦桑尼亚(5)、东帝汶(5)和也门(5)^②,上述国家具有粮食安全指数低且波动大的特点。总体上看,全球粮食安全状况在逐步改善,但2013年出现趋势性逆转,尽管粮食“极不安全”的国家有所减少,但“不安全”的国家却显著增加;同时粮食安全波动不稳、局部区域粮食安全问题依然十分突出。

5.3 影响因素甄别结果

为甄别粮食安全影响因素而建立的各年多元非线性回归方程如表6所示,其相应的检验结果如表7所示。

由表7可知,在引入转换变量 T 后,除2011年以外,其他年份非线性回归方程组的 R^2 和 F 值均高于线性回归,各影响因素的非线性组合对粮食安全指数变异的解释度明显高于线性组合,说明多元非线性回归方法能够有效提高影响因素分析的准确性。据此,本文采用2011年的多元线性回归方程和其他年份的多元非线性回归方程来解释各影响因素对粮食安全的作用。其中,2011年的多元线性回归方程为:

表6 各年多元非线性回归方程组
Tab. 6 Multiple nonlinear regression equations by years

年份	多元非线性回归方程
2002	$FSI = 0.30 + 0.27Z_3^3 - 0.41Z_4^2 + 0.12Z_4 - 1.20Z_8^2 + 1.52Z_8 + 1.85Z_9^3 - 2.83Z_9^2 + 1.35Z_9 + 0.20Z_{10}^2 + 0.02Z_{10}$
2003	$FSI = 0.31 - 0.06Z_4 - 1.16Z_8^2 + 1.47Z_8 + 2.04Z_9^3 - 2.98Z_9^2 + 1.31Z_9 + 0.19Z_{10}^2 + 0.05Z_{10}$
2004	$FSI = 0.28 + 0.03Z_4^2 - 0.09Z_4 + 0.25Z_8^3 - 1.42Z_8^2 + 1.47Z_8 + 2.19Z_9^3 - 3.32Z_9^2 + 1.56Z_9 + 0.11Z_{10}^3 + 0.01Z_{10}^2 + 0.12Z_{10}$
2005	$FSI = -0.06 - 0.04Z_4 - 1.01Z_8^2 + 1.26Z_8 + 3.38Z_9^3 - 5.54Z_9^2 + 2.91Z_9 + 0.20Z_{10}^2 + 0.27Z_{10}$
2006	$FSI = 0.34 - 0.13Z_3^3 + 0.18Z_3^2 - 0.05Z_3 - 0.11Z_4 - 1.18Z_8^2 + 1.53Z_8 + 2.65Z_9^3 - 3.95Z_9^2 + 1.7Z_9 + 0.26Z_{10}^3 - 0.17Z_{10}^2 + 0.13Z_{10}$
2007	$FSI = 0.39 - 0.09Z_4 - 0.35Z_8^3 + 0.49Z_8^2 - 0.15Z_8 - 0.96Z_9^2 + 1.28Z_8 + 2.40Z_9^3 - 3.51Z_9^2 + 1.50Z_9 + 0.22Z_{10}^2 - 0.01Z_{10}$
2008	$FSI = 0.54 - 0.14Z_4 - 1.22Z_8^2 + 1.61Z_8 + 0.30Z_9^2 - 0.13Z_9 + 0.21Z_{10}^3 - 0.08Z_{10}^2 + 0.11Z_{10}$
2009	$FSI = 0.39 + 0.12Z_3^3 - 0.17Z_3^2 + 0.06Z_3 - 0.11Z_4 - 0.14Z_8^3 + 0.20Z_8^2 - 0.08Z_8 - 1.14Z_8^2 + 1.47Z_8 + 2.13Z_9^3 - 3.26Z_9^2 + 1.46Z_9$
2010	$FSI = 0.38 + 0.02Z_4^3 - 0.12Z_4 + 0.82Z_6^3 - 1.07Z_6^2 + 0.26Z_6 - 1.18Z_8^2 + 1.52Z_8 + 2.47Z_9^3 - 3.79Z_9^2 + 1.69Z_9 + 0.24Z_{10}^3 - 0.14Z_{10}^2 + 0.10Z_{10}$
2011	$FSI = -0.02 - 0.05Z_4 - 3.32Z_6^3 + 3.91Z_6^2 - 0.61Z_6 - 1.13Z_8^2 + 1.45Z_8 + 3.10Z_9^3 - 5.10Z_9^2 + 2.62Z_9 + 0.45Z_{10}^3 - 0.56Z_{10}^2 + 0.47Z_{10}$
2012	$FSI = 0.35 - 0.06Z_4 - 0.06Z_6^3 + 0.07Z_6^2 - 0.01Z_6 - 1.03Z_8^2 + 1.39Z_8 + 1.96Z_9^3 - 3.01Z_9^2 + 1.34Z_9 + 0.33Z_{10}^3 - 0.27Z_{10}^2 + 0.23Z_{10}$
2013	$FSI = 0.46 - 0.04Z_4 + 0.32Z_8^3 - 0.77Z_8^2 + 0.63Z_8 + 1.69Z_9^3 - 2.21Z_9^2 + 0.68Z_9 + 0.29Z_{10}^3 - 0.30Z_{10}^2 + 0.24Z_{10}$
2014	$FSI = 0.49 - 0.04Z_4 + 0.97Z_8^3 - 1.90Z_8^2 + 1.24Z_8 + 1.33Z_9^3 - 1.70Z_9^2 + 0.49Z_9 + 0.29Z_{10}^2 - 0.09Z_{10}$

表7 多元线性与非线性回归方程的检验比较

Tab. 7 Comparison of regression test between multiple linear and nonlinear regression equations

方程组类型	检验项	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
多元线性回归方程组	R^2	0.78	0.79	0.78	0.79	0.83	0.83	0.82	0.83	0.83	0.86	0.86	0.69	0.72
	F	114.45	118.01	110.6	117.77	124.08	121.3	147.35	102.51	124.83	153.29	152.71	70.32	80.87
非线性回归方程组	R^2	0.83	0.83	0.82	0.82	0.88	0.84	0.85	0.86	0.86	0.85	0.87	0.72	0.77
	F	160.09	157.89	141.2	146.46	185.76	129.99	186.05	128.65	160.09	147.59	162.64	81.11	106.88

注: 两类方程组的所有Sig.均为0。

② 括号内的数字为研究期内各国重复出现于FSI最末20位的总次数。

$$FSI = 0.009 - 0.10Z_4 - 0.64Z_6 + 0.82Z_8 + 0.61Z_9 + 0.36Z_{10}, R^2=0.86, F=153.29, Sig.=0$$

据此, 以2011年的回归系数和其他年份的偏导数作为各因素的影响系数如表8所示。

表8 各因素的影响系数
Tab. 8 Influence coefficient of each factor

年份	年降水量	年平均气温	地均化肥施用量	人均国内生产总值	获得洁净用水的人口占比	政治稳定与无暴力程度
2002	-	-0.0216	-	0.3192	0.3720	0.2262
2003	-	-0.0570	-	0.3190	0.3780	0.243
2004	-	-0.0682	-	0.2970	0.4366	0.2436
2005	-	-0.0354	-	0.2538	0.7518	0.4713
2006	-0.0104	-0.1104	-	0.3472	0.3978	0.2200
2007	-	-0.0924	-0.0087	0.3180	0.3885	0.2128
2008	-	-0.1380	-	0.3840	0.1689	0.2324
2009	0.0048	-0.1056	-0.0066	0.3245	0.3276	0.2520
2010	-	-0.1005	0.0120	0.3360	0.3630	0.1955
2011	-	-0.1000	-0.6400	0.8200	0.6100	0.3600
2012	-	-0.0560	-0.00029	0.3540	0.2886	0.2871
2013	-	-0.0380	-	0.1850	0.1610	0.2379
2014	-	-0.0378	-	0.3120	0.1224	0.2035

注: “-”指影响因素未出现在该年的回归方程中。

5.4 影响机理分析

研究表明, 年平均气温、人均国内生产总值、获得洁净用水的人口占比和政治稳定与无暴力程度是全球粮食安全格局的主要影响因素。其中, 年平均气温代表了气候变化的影响。作为保障粮食安全的基础性产业, 农业极易受气候变化影响, 并且这种影响具有多情景性。尽管较高的积温和CO₂浓度有利于作物发育和光合作用, 使作物种植界限向两极扩展, 进而促进局部区域的粮食增产; 但同时气候变化也增加了干旱、洪水、热浪和风暴等极端气候事件的概率, 使农业遭受损失^[27]。对167个国家FSI与年均温的关系分析表明, 年均温上升对64个国家的粮食安全有负面影响, 对36个国家有正面影响, 对8个国家的影响呈倒“U”型, 对59个国家的影响则不明显。总体上, 升温不利于全球粮食安全, 2002—2014年, 年平均气温每升高1℃会使粮食安全指数最低减少0.022, 最高减少0.138, 平均减少0.074。这很大程度上源于近期以来极端气候事件的增加, 分析表明, 在0.01的显著性水平上, 全球年均温与干旱次数、风暴次数和洪水次数的相关系数分别为0.75、0.87和0.89(图3)。从机理上看, 积温上升、CO₂肥效、物候变化、病虫害变化和极端气候事件均是气候变化影响粮食安全的途径。这些复杂影响给农业生产带来的双向作用机制使全球粮食安全格局形成了不同的区域情景, 进而构成全球粮食安全格局演化的基础性因素。

在食物获取层面上, 按购买力平价计算的人均国内生产总值能够反映不同国家居民的实际收入水平和消费水平, 衡量了各国居民获取食物能力的高低, 与粮食安全呈正相关关系。研究表明, 按购买力平价计算的人均国内生产总值每增加1万美元, 则粮食安全指数平均增加0.35。粮食安全指数低的国家, 其人均国内生产总值也低。可见, 居民获取食物的能力差异是全球粮食安全空间分异的重要影响因素。

在食物利用层面上, 获得洁净用水的人口占比与粮食安全呈正向关联, 其标准化取值每增加1, 则粮食安全指数增加0.37。从消费端来看, 水安全依然是粮食安全的重要基

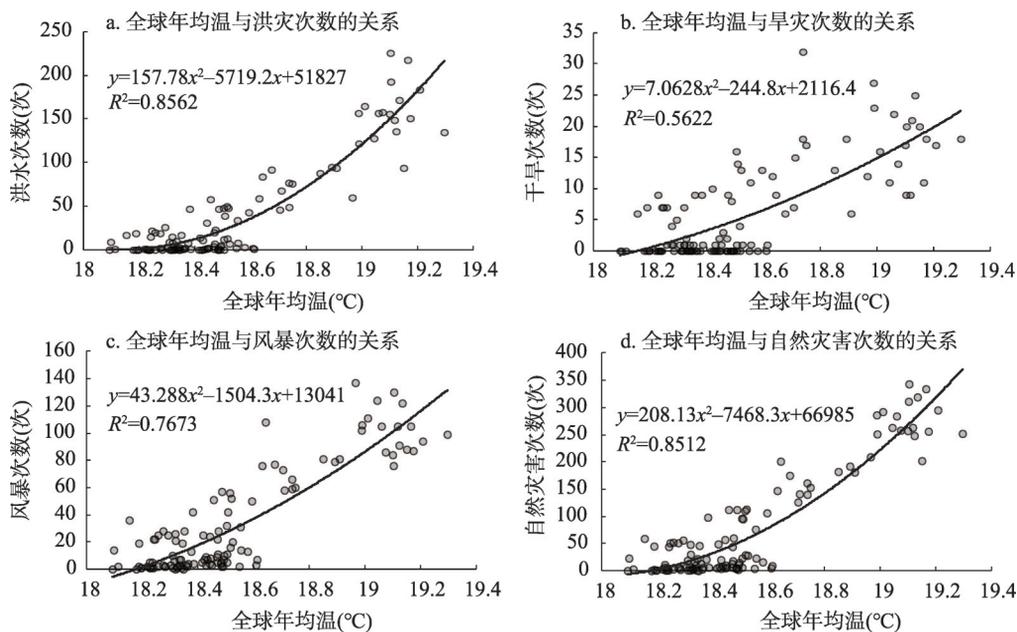


图3 全球年均温与极端气候事件的关系

Fig. 3 The relationship between global average annual temperature and extreme weather events

础。因为食品的全生命周期均涉及到水,同时水也参与食物摄入后的新陈代谢过程,实际上洁净用水是营养的基石,营养则是粮食安全的核心。在全球层面上,以安全饮用水为代表的健康卫生条件是影响粮食安全的主要因素之一。据统计,目前全球近8.84亿人无法获得安全饮用水,其中大部分人生活在非洲;在全球粮食最不安全的20个国家中,获得洁净用水的人口占比最高为86.6%(伊拉克),最低的巴布亚新几内亚仅为40%,20个国家的平均水平为67.2%。

最后,如何实现长期粮食安全,需要稳定的经济与政治环境作为保障。研究表明,政治稳定与无暴力程度与粮食安全存在正向关联,政治稳定与无暴力程度的标准化取值每增加1,则粮食安全指数增加0.26。21世纪以来,国家间冲突仍时有爆发,国内冲突频繁不断,全球每年发生的国内冲突在23次以上,最长达32次;2000—2016年,全球年均冲突总数为146次,最低年为111次,最高年高达205次。暴力冲突给动荡区域的粮食安全带来毁灭性打击,冲突不仅破坏正常的农业生产,毁坏农田、作物和农业基础设施,还会冲击市场预期,造成农产品市场急剧波动;严重冲突甚至阻碍了国际粮食援助的进行。实证分析表明,2000年以来,在粮食最不安全的50个国家中,除莫桑比克和赞比亚以外,其余国家的政治稳定与无暴力程度均为负值。可见,稳定的经济和政治环境是粮食安全的重要保障。

6 结论与政策建议

6.1 结论

(1) 全球粮食安全格局的空间分布模式是“高一高集聚、低—低集聚”,这种格局特征具有统计学上的显著性。其中高值区主要分布在除东欧以外的欧洲区域、北美洲、大

洋洲和东亚部分国家, 低值区主要集中在撒哈拉以南非洲、南亚和西亚地区、以及东南亚部分国家。欧洲和撒哈拉以南非洲在99%的置信水平上是全球粮食安全格局的热点和冷点; 在90%或95%的置信水平上, 热点区还包括美国和加拿大, 冷点区则包括塔吉克斯坦、缅甸、老挝、孟加拉国和阿富汗等国家。

(2) 2000—2014年, 全球粮食安全格局总体稳定, 但极不安全和不安全组的内部变化明显。全球粮食安全状况在逐步改善但2013年出现趋势性逆转, 尽管极不安全组减少了10.14个百分点, 但不安全组却增加10.71个百分点, 同时粮食安全的国家占比在持续增长后出现急速下降, 全球粮食安全波动不稳, 局部区域仍面临突出的粮食安全问题, 尤其以暴力冲突和气候变化叠加影响的区域为甚。

(3) 年平均气温、人均国内生产总值、获得洁净用水的人口占比、政治稳定与无暴力程度是全球粮食安全格局的主要影响因素, 它们分别代表了供给层面、获取层面、利用层面和保障层面的关键因子。其中, 年平均气温的影响系数均为负, 表明具有双重效应的气候变化总体上对粮食生产有不利影响。其他3个因素则分别代表了国家通过贸易获取食物的能力、国家提供健康卫生和安全饮用水等基本公共服务的能力、以及国家的政府管理与社会治理能力, 三者共同影响了国家保障粮食安全的能力水平。

(4) 粮食安全是典型的交叉学科问题, 业已存在和正在涌现的诸多因素, 如气候变化、粮食贸易垄断、食品金融化、贸易摩擦、生物能源和跨国农业投资等因素正在增加该问题的复杂性。在本来具有足够粮食供应的世界中仍然存在的饥荒现象难以从粮食产量等单一因素上获得解释, 因此需要综合考虑粮食安全的各个维度。实际上, 充足的粮食供给只是粮食安全的必要条件, 而非充分条件, 粮食安全更多是一种能力安全而非单一的产量安全。

6.2 政策建议与启示

在当前的饥饿人口基数下, 实现2030年的“零饥饿”目标意味着: 2019—2030年全球每年需要减少约6791万饥饿人口。鉴于此, 提出几点政策建议以供参考。

(1) 构建基于四大支柱的粮食安全战略。在粮食供给层面, 考虑欠发达国家居民购买力偏低的实际, 供给层面的切实策略是提高粮食自给率, 这需要通过推动农业开发来实现, 重点是评估全球耕地资源潜力及其开发利用的环境影响, 设计以多主体利益共享和减贫为核心的农业开发模式, 以及现代农业技术推广应用等方面; 在食物获取层面, 重点是提高食物的可获得性以及居民获取食物的能力, 改善交通基础设施, 建立多样化的区域食物系统; 在食物利用层面, 重点是在欠发达地区普及安全饮用水等基础设施, 制定区域性健康食品计划等; 在经济与政治稳定性层面, 重点是研究暴力冲突对粮食安全的影响机理, 制定应对和化解冲突的策略路线。

(2) 通过振兴乡村推动粮食安全建设。鉴于全球四分之三的饥饿人口生活在农村地区, 农村显然是粮食安全工作的重点所在。如何有效化解粮食安全问题, 乡村振兴或许是一个长久之道。建议在全球粮食安全工作的重点区域尽快建立起现代农业发展所需的产业体系、生产体系和经营体系; 同时发展中国家应高度重视自身农业基础设施建设、科技支撑能力培育、农机装备水平提升和农业经营模式创新, 在保障小农土地权利的前提下促进小农与企业的有效合作与利益共享。

(3) 通过多种方式加强中国贡献。评价表明, 中国粮食安全指数的多年平均值为0.84, 仅处于一般水平, 粮食安全面临着耕地资源减少、水土组合不佳、气候变化影响、从业人员老弱化和消费结构升级等多重挑战。在总人口仍持续增长的背景下, 中国

应通过严格保护耕地资源、培育新型职业农民、提升农业技术水平和采用新型生产方式等多种举措来保障国内粮食安全,这本身是对全球粮食安全的一大贡献。特别是,随着城市化世纪快速到来,应认真考虑城市农业等新型生产方式,采用受控环境农业技术,积极发展屋顶农业、垂直农场、公共空间景观农业和社区支持农业等多种城市农业形式,在城市中打造兼具食用性和观赏性的生产性景观,建立起富有弹性的区域食物系统,进而贡献于粮食安全。

参考文献(References)

- [1] Liu Yue, Zhao Wenwu, Zhang Xiao. Promoting the delivering on the Environmental Dimension of the 2030 Agenda for Sustainable Development: Summary of the Second Session of the United Nations Environment Assembly. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(12): 3843-3846. [刘月, 赵文武, 张骁. 助推2030可持续发展议程环境目标落实: 第二届联合国环境大会会议简述. *生态学报*, 2016, 36(12): 3843-3846.]
- [2] Future Earth Interim Secretariat. *Future Earth Initial Design*. Paris: International Council for Science, 2013.
- [3] Liu Yuanxin, Zhao Wenwu. Future Earth: Research programme on global sustainability. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(23): 7610-7613. [刘源鑫, 赵文武. 未来地球: 全球可持续性研究计划. *生态学报*, 2013, 33(23): 7610-7613.]
- [4] Future Earth Interim Secretariat. *Future Earth 2025 Vision*. Paris: International Council for Science, 2014.
- [5] Liu Yuanxin, Zhao Wenwu, Wang Jun. Coordinated response to global change for sustainable development: Future Earth 2025 Vision. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(7): 2414-2417. [刘源鑫, 赵文武, 王军. 协同应对全球变化, 促进可持续发展: “未来地球2025愿景”. *生态学报*, 2015, 35(7): 2414-2417.]
- [6] Food and Agriculture Organization of the United Nations, United Nations Children's Fund, World Food Programme, et al. *The State of Food Security and Nutrition in the World 2017: Enhancing Resilience and Promoting Peace and Food Security*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017. [联合国粮食及农业组织, 联合国儿童基金会, 世界粮食计划署, 等. 2017年世界粮食安全和营养状况: 增强抵御能力, 促进和平与粮食安全. 罗马: 粮农组织, 2017.]
- [7] Luo Xiaoling, Zhang Yu, Yang Huaidong. Definition of food security in China and its evaluation. *Journal of Shandong Agricultural University*, 2006, 30(3): 14-18. [罗孝玲, 张妤, 杨怀东. 我国粮食安全的界定与评估. *山东农业大学学报*, 2006, 30(3): 14-18.]
- [8] FAO. *The State of Food Insecurity in the World 2001*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization, 2002.
- [9] Wu Wenbin, Tang Huajun, Yang Peng, et al. Model-based assessment of food security at a global scale. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(8): 907-918. [吴文斌, 唐华俊, 杨鹏, 等. 基于空间模型的全球粮食安全评价. *地理学报*, 2010, 65(8): 907-918.]
- [10] An Yiming, Zhao Wenwu. Global climate change and food security: Review of the 2012 Planet under Pressure International Conference. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(15): 4940-4942. [安艺明, 赵文武. 全球气候变化与粮食安全: 2012年Planet Under Pressure国际会议述评. *生态学报*, 2012, 32(15): 4940-4942.]
- [11] Stephens E C, Jones A D, Parsons D. Agricultural systems research and global food security in the 21st century: An overview and roadmap for future opportunities. *Agricultural Systems*, 2017(1): 1-6.
- [12] Maxwell S, Smith M. Household food security: A conceptual review.//Maxwell S et al. *Household Food Security: Concepts, Indicators, Measurements: A Technical Review*. UNICEF and IFAD, 1992: 1-6.
- [13] Jiang Li, Xu Feibiao. Review on climate change and food security. *International Information*, 2011(5): 37-42. [蒋丽, 徐飞彪. 气候变化与粮食安全问题研究综述. *国际资料信息*, 2011(5): 37-42.]
- [14] John B, Birgit M, Stacey R. A food demand framework for international food security assessment. *Journal of Policy Modeling*, 2017, 39: 827-842.
- [15] Zhu Xiaoxi, Fang Xiuqi, Gao Yong. Assessment of the food security in China based on system science. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2012, 33(6): 11-17. [朱晓禧, 方修琦, 高勇. 基于系统科学的中国粮食安全评价研究. *中国农业资源与区划*, 2012, 33(6): 11-17.]
- [16] Andrea B, Mauro E D, Carlo C. National food security assessment through the analysis of food consumption data from Household Consumption and Expenditure Surveys: The case of Brazil's Pesquisa de Orçamento Familiares 2008/09. *Food Policy*, 2017, 72: 20-26.

- [17] Rahib H A, Kaan U, Umit I, et al. Assessment of food security risk level using type 2 fuzzy system. *Procedia Computer Science*, 2016, 102: 547-554.
- [18] Thomas W H, Uris L C B. Attaining food and environmental security in an era of globalization. *Global Environmental Change*, 2016, 41: 195-205.
- [19] Yin Peihong, Fang Xiuqi. Assessment on vulnerable regions of food security in China. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(10): 1064-1072. [殷培红, 方修琦. 中国粮食安全脆弱区的识别及空间分异特征. *地理学报*, 2008, 63(10): 1064-1072.]
- [20] Li Zhongpei, Li Decheng, Zhang Taolin. Threat and strategies of soil degradation to food security. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(4): 65-69. [李忠佩, 李德成, 张桃林. 土地退化对全球粮食安全的威胁及防治对策. *水土保持通报*, 2001, 21(4): 65-69.]
- [21] Yan Huimin, Liu Jiyuan, Cao Mingkui. Spatial pattern and topographic control of China's agricultural productivity variability. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(2): 171-180. [闫慧敏, 刘纪远, 曹明奎. 中国农田生产力变化的空间格局及地形控制作用. *地理学报*, 2007, 62(2): 171-180.]
- [22] Kang Shaozhong. Towards water and food security in China. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(8): 880-885. [康绍忠. 水安全与粮食安全. *中国生态农业学报*, 2014, 22(8): 880-885.]
- [23] Jia Huicong, Wang Jing'ai, Pan Donghua, et al. Maize drought disaster risk assessment based on EPIC Model: A case study of maize region in northern China. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(5): 643-652. [贾慧聪, 王静爱, 潘东华, 等. 基于EPIC模型的黄淮海夏玉米旱灾风险评价. *地理学报*, 2011, 66(5): 643-652.]
- [24] IPCC Working Group III. Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on Emissions Scenarios. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.
- [25] Bach H, et al. Cooperation for water, energy, and food security in transboundary basins under changing climate. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2016, 37(8): 1-7. [H.巴赫, 等. 全球气候变化背景下跨界流域水、能源和粮食安全的合作. *水利水电快报*, 2016, 37(8): 1-7.]
- [26] Karabulut A A, Crenna E, Sala S, et al. A proposal for integration of the ecosystem-water-food-land-energy (EWFLE) nexus concept into life cycle assessment: A synthesis matrix system for food security. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172: 3874-3889.
- [27] McCarl B A, Fernandez M A, Jones J P H, et al. Climate change agriculture and food security: Consequences and possible decisions. *Current History*, 2013, 112(750): 33-37.

Spatio-temporal evolution of global food security pattern and its influencing factors in 2000-2014

MA Enpu^{1,2}, CAI Jianming¹, LIN Jing¹, GUO Hua³, HAN Yan^{1,2}, LIAO Liuwen^{1,2}

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Analysis and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. School of Resources & Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Tianjin Institute of Rural Economy and Zoning Study, Tianjin Academy of Agricultural Sciences, Tianjin 300192, China)

Abstract: Food security is the basic foundation in accomplishing of the overall Sustainable Development Goals (SDGs). As the objective in SDGs of "halving the proportion of hungry people by 2015" has not been achieved as scheduled, it will become more challenging to realize its final goal of zero hunger by 2030. So exploring the underlying causes of global food security pattern from perspectives of spatio-temporal evolution is badly needed. In this paper, a comprehensive evaluation method with multi-indices was applied to evaluate the food security level of 172 countries in 2000-2014 based on an established global database with country-

specific time series data. Then the spatial pattern and changing characteristics of global food security by country was conducted through the spatial autocorrelation analysis. Upon this basis, the underlying factors affecting the food security pattern were further identified and analyzed with a multiple nonlinear regression method. The findings and results show that: (1) The global food security pattern can be summarized as "high-high and low-low agglomerations" of socio-economic status and food security level. The most food secure countries are mainly distributed in the regions with more advanced economy such as North America, Oceania, parts of East Asia, and Western Europe. On the contrary, the least food secure countries are mainly distributed in sub-Saharan Africa, South Asia, West Asia, and parts of Southeast Asia. (2) At 99% confidence level, Western Europe and sub-Saharan Africa are respectively the hot and cold spots in global food security landscape, while in non-aggregation areas such as Haiti and North Korea, there exist long-term food insecurity problems. (3) The spatio-temporal pattern of global food security is generally stable, but the internal changes in the extremely insecure groups are significant. The countries with the most changeable levels of food security are also the countries with the most food insecurity. (4) Annual mean temperature, per capita GDP, the proportion of people who have access to clean water, and political stability are the key factors affecting the global food security pattern. The study indicates that while the global food security situation has improved since 2000, there was a reverse sign or omen in 2013. Affected by climate change, residents' purchasing power, infrastructure condition, and political and economic stability, global food security has in fact been volatile and some areas in the world are still facing acute food security problems. In addressing this challenge, a food security strategy based on the four dimensions, i.e. food supply, food access, food use and political stability, and a worldwide rural revitalization approach, is highly recommended. Meanwhile, it is necessary to progressively introduce some diversified modes of production such as urban agriculture to build a more resilient food system in those fully urbanized regions.

Keywords: global food security evaluation, spatio-temporal evolution pattern, change characteristics, multiple nonlinear regression, comprehensive index system