

# 中国省域能源消耗碳排放安全评价

荣培君, 杨群涛, 秦耀辰\*, 李 旭, 张天宁, 张帅帅

(河南大学环境与规划学院/黄河文明传承与现代文明建设河南省协同创新中心, 河南 开封 475004)

**摘 要:**碳排放安全评价和预测在应对全球气候变化、实现区域可持续发展方面有重要意义。根据1996-2012年统计数据,基于压力—响应模型,从经济、社会、环境3个层面构建省域能源消费碳排放安全评价指标体系,分析了中国能源消费碳排放安全的时空分异,并运用GM(1, 1)方法进行预测。结果表明:1996-2012年,中国碳排放安全综合指数在临界安全区间内呈现波动下降趋势。其中,压力系统指数与综合指数变化态势趋于一致,响应系统指数表现为上升趋势;多数省区处于临界安全状态,亚安全状态省区逐渐消失,安全等级差的省区出现南移现象;大部分省区压力系统恶化的同时响应系统好转;区域间碳排放安全差距逐渐缩小,高压力低响应的区域大量减少。预测发现,2020年全国大部分省区处于临界安全或以下状态,碳排放安全情况不容乐观。

**关键词:**碳排放;安全评价;压力—响应模型;时空分异;中国

## 1 引言

面对全球气候变化带来的挑战,进行碳排放安全评价和预测是有效适应气候变化、降低气候变化风险的重要前提(陆大道等, 2012; 秦大河等, 2014; 樊杰等, 2015)。能源消耗作为碳排放的主要来源,对其进行有效控制具有必要性和紧迫性(刘竹等, 2011; Liu et al, 2013)。根据相关研究(徐美等, 2012; 张梦婕等, 2015),能源消耗碳排放安全可理解为:在人的必要需求得以满足的前提下,能源消费所产生的碳排放保持与区域人口、资源、环境、经济、社会系统协调发展的状态。可运用相关的预警方法和模型对碳排放安全进行分析、评价和预测,以达到提前预防和控制不安全因素的目的。

当前,因地制宜地构建系统有效的指标体系是对碳排放安全进行有效评价的基础,很多学者从单

项指标的选择和指标体系的构建两个方面对此进行分析。首先,在分析碳排放影响因素的基础上选择指标。就宏观层面而言,城市化和工业化进程中土地利用的变化是产生碳排放、影响碳排放安全的根本动力(York, 2007; 孙昌龙等, 2013; 周葵等, 2013; Lin et al, 2014),而能源强度与碳排放量呈负相关关系(Martínez- Zarzoso et al, 2011; 徐安, 2011)。聚焦到生产生活方式上,人口数量是影响城市和农村碳排放安全的主要因素,收入水平的高低是碳排放安全出现区域差异的重要因素(Zha et al, 2010; Al-mulali et al, 2012; 胡艳兴等, 2015)。从降低碳排放、增加碳汇的视角来看,提高森林固碳能力是影响碳排放安全等级上升的关键因素(鲁丰先等, 2013; 魏晓华等, 2015)。因此,人口数量、人均GDP、煤炭消耗比重、能源强度、森林覆盖率等可作为评价碳排放安全的相关指标。其次是构建碳排

收稿日期:2015-10;修订日期:2016-01。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB955804);国家自然科学基金项目(41171438, 41201602);河南省哲学社科规划办项目(2014CJJ065) [Foundation: National Key Basic Research Program of China (973 Program), No.2012CB955804; National Natural Science Foundation of China, No.41171438, No.41201602; Philosophy and Social Planning Project of Henan Province, No.2014CJJ065]。

作者简介:荣培君(1986-),女,河南开封人,博士研究生,主要研究方向为区域可持续发展, E-mail: rongpeijun@126.com。

通讯作者:秦耀辰(1959-),男,河南荥阳人,教授,博士生导师,主要从事区域可持续发展理论、模型与信息系统研究, E-mail: qinyu@henu.edu.cn。

引用格式:荣培君, 杨群涛, 秦耀辰, 等. 2016. 中国省域能源消耗碳排放安全评价[J]. 地理科学进展, 35(4): 487-495. [Rong P J, Yang Q T, Qin Y C, et al. 2016. Energy-related carbon emission security at the provincial level in China[J]. Progress in Geography, 35(4): 487-495.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.04.009

放安全体系框架,即从城市—区域低碳发展的角度出发,突出人地关系这一主线,构建压力—响应(Stress-Response, S-R)模型(Rapport et al, 1999)及其衍生的压力—状态—响应(Pressure-State-Response, PSR)模型(陈星等, 2005)和驱动力—压力—状态—影响—响应(Driving- Pressure- State- Impact- Response, DPSIR)模型(Gari et al, 2015)等。此类模型综合考虑自然环境和人类活动,强调社会经济运作与环境变化的互动关系,具有可测定性和可评价性的特点,容易与预测模型和信息系统相连接,因此得到广泛应用。纵观现有研究,从生态安全的角度进行碳排放问题的量化研究还相对欠缺,能体现时间维度的演变和实现区域间对比的研究更有待加强。

考虑近年来中国碳排放快速增长背景下碳排放安全评价的紧迫性,以及各省区资源禀赋、人口压力、城市化发展、经济增长、能源消耗结构及减排举措存在的较大差异,本文以中国省区为基本单元,融合压力—响应(P-R)与环境—经济—社会(E-E-S)分析框架,构建能源消耗碳排放安全指标体系,评价中国省区碳排放安全的空间分布以及随时间的变化特征,并借助操作性较强、精度相对较高的GM(1, 1)模型预测未来省域碳排放安全变化趋势,以期为制定区域碳减排策略,促进区域可持续发展提供依据。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文所用数据来源于1996-2014年《中国统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》、《中国农村统计年鉴》及各省统计年鉴,其中因中国森林资源清查时间间隔为5年,从而森林覆盖率每5年间的数值采用等差补值处理,其他个别缺失数据采用相邻年份数值进行线性插补。碳排放量的数据采用联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)提供的方法,选取原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气、天然气9类主要化石能源,以各类能源的消费总量乘以各自的平均低位发热量与CO<sub>2</sub>排放系数计算得到(程叶青等, 2013; 胡艳兴等, 2015)。需要指出的是,因缺乏相关数据,本文研究区域未包括西藏自治区、台湾省、香港和澳门特别行政区。

2.2 指标体系构建

按照选取关键指标、简化指标体系和可操作性原则,从准则层、单元层和指标层3个等级层面上构建碳排放安全评价指标体系,如表1所示。具体来说,考虑碳排放安全受到威胁的原因和环境恶化的速度来分析“压力”;从预防碳排放安全恶化应采取的措施分析“响应”,包括增加碳汇、改进技术和对治理碳排放产生的污染等。需要说明的是,首先,脱钩指数是用来衡量经济发展与能源消耗导致的碳排放之间关系的指标,有不同的计算方法,本文采用能源消费增长率与GDP增长率的比值来表示。改革开放以来,中国GDP一直呈快速正向增长,因而脱钩指数的正负实际上取决于能源消费量的变动,并在中国经济保持平稳增长的前提下为负向作用指标(张金萍等, 2014)。其次,根据环境库茨涅茨曲线,经济增长与碳排放量之间并非线性关系,因此,在对城镇居民人均可支配收入和农村居民家庭纯收入两个指标进行性质界定时,参考相关研究(朱永彬等, 2009; 王铮等, 2010; 王莉雯等,

表1 能源消费碳排放安全评价指标体系

Tab.1 Evaluation index system of energy-related carbon emission security

目标层	指标层	单元指标层	子指标层	影响
能源消费碳排放安全	压力系统	经济压力	人均GDP( $I_1$ )/(万元/人)	-
			第二产业所占比重( $I_2$ )/%	-
			城镇居民人均可支配收入( $I_3$ )/(元/人)	-
			农村居民家庭人均纯收入( $I_4$ )/(元/人)	-
		社会压力	人口密度( $I_5$ )/(人/km <sup>2</sup> )	-
			人口自然增长率( $I_6$ )/%	-
			城镇化水平( $I_7$ )/%	-
			能源强度( $I_8$ )/(t标准煤/万元)	-
		环境压力	碳排放年均增长率( $I_9$ )/%	-
			煤炭比重( $I_{10}$ )/%	-
			脱钩指数( $I_{11}$ )/%	-
			人均碳排( $I_{12}$ )/(kg/人)	-
	响应系统	经济响应	工业污染治理投资占GDP比重( $I_{13}$ )/%	+
			林业投资占GDP比重( $I_{14}$ )/%	+
		社会响应	R & D 人员比重( $I_{15}$ )/%	+
			零碳能源比重( $I_{16}$ )/%	+
		环境响应	建成区绿化覆盖率( $I_{17}$ )/%	+
			森林覆盖率( $I_{18}$ )/%	+

2014),中国人均排放高峰将出现在2030年,在本文的研究时段(1996-2012年)内未达到倒U型拐点,因此将二者定为负向指标。三是能源强度,即单位GDP的能源消耗,用于表征能源使用效率和使用质量,是科技水平高低的体现,直接关系到能源消费碳排放量,其值越高,碳排放安全越受到威胁,故定为负向指标。

2.3 评价方法及步骤

根据上述碳排放安全评价指标体系,在对原始指标处理和计算权重的基础上,测算各省区的综合得分并对其进行安全评价,而后进行安全预测,具体步骤如下:

(1) 采用极差标准化方法对原始数据进行处理,并采用均方差赋权法来确定指标权重大小,其公式为:

$$w_j = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^m (z_{ij} - \bar{x})^2}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_{ij} - \bar{x})^2}} \tag{1}$$

式中: $w_j$ 为第 $j$ 个指标的权重, $z_{ij}$ 为第 $i$ 年第 $j$ 项指标的标准化值, $m$ 为年份数, $n$ 为指标个数, $\bar{x}$ 为各指标标准化后的均值。

(2) 进行能源消费碳排放安全评价警情( $F_j$ )测算。利用各指标标准化数据与各指标的权重相乘求和得出结果,其计算公式如下:

$$F_j = \sum_{j=1}^n w_j \times z_{ij} \tag{2}$$

(3) 根据相关研究(赵宏波等, 2014; 张强, 2010),确定能源消费碳排放安全等级的划分标准,如表2所示。将各省每年的碳排放安全预警指标数

值与之对应,评价其安全程度。

(4) 运用GM(1, 1)模型对未来各省区能源消耗碳排放安全的变化趋势进行预测,具体建模步骤参考周健等(2011)的研究,并进行精度检验,当方差比 $c < 0.35$ 和小误差概率 $P > 0.95$ 时,模型可进行预测。

3 结果与分析

3.1 中国碳排放安全时序

由图1可知,中国能源消耗碳排放安全综合指数处于0.45~0.65的临界安全状态。但从走势上看,2000年达到近20年最安全状态,接近亚安全;之后安全状态不断下降至接近不安全,2009年回升后又有所下降。从压力系统指标数值可以看出,中国能源消费碳排放的压力系统指标得分在2002年之前稳中有升,尔后呈现持续快速下降的趋势,因压力系统均为负向指标,说明2002年之后,碳排放压力大幅度增大,碳排放安全阻碍因素影响强烈。响应系统指标数值除个别年份略有波动外,一直稳中有升,这是中国能源消费碳排放安全综合指标值未迅速下滑的重要原因。值得注意的是,综合指数和压力指数之间的差异由小变大,说明响应系统发挥的作用正在逐渐增大。

结合各项指标数据,可以归结为以下几个方面原因:第一,中国的城镇化率在1998年和1999年均出现了下降现象,第二产业比重也随之下降;同时,2000年以前,经济增长水平较为缓慢,尤其是农村居民家庭纯收入基本处于停滞状态,2000年以后则逐渐快速增长。由于大部分时期处于弱脱钩状态,因此人均碳排在2000年以后也增长迅速。第二,

表2 碳排放安全等级划分标准  
Tab.2 Classification of energy-related carbon emissions security

区间	安全评价	警情特征
[0~0.25)	病态	碳排放增速极快且处于无序增长状态,人口压力巨大,能源消耗过度,环境污染严重,碳排放与经济发展严重不协调,碳排放调控及减排效果极不理想,人口、资源、环境、经济、社会系统无序发展。
[0.25~0.45)	不安全	碳排放增速较快且伴随一定的无序增长状态,人口压力较大,能源消耗与环境污染较严重,碳排放与经济发展比较不协调,碳排放调控及减排效果不理想,阻碍了人口、资源、环境、经济、社会系统的协调发展。
[0.45~0.65)	临界安全	碳排放增速稍快,存在一定的人口压力,能源消耗与环境污染较明显,经济发展态势一般,碳排放与经济发展处于协调边缘,碳排放调控及碳减排虽不理想但有初步效果,人口、资源、环境、经济、社会系统协调发展状况一般。
[0.65~0.85)	亚安全	碳排放增速放缓,人口增长处于比较稳定状态,资源能源消耗与环境污染得到一定程度改善,经济发展态势较好,碳排放与经济发展处于初级协调状态,碳排放调控及减排效果较好,人口、资源、环境、经济、社会系统协调发展状况较好。
[0.85~1.0]	安全	碳排放增速明显下降,人口增速较低且稳定,资源能源消耗与环境污染得到极大改善,经济运行良好,碳排放与经济增长处于高度耦合协调发展状态,碳排放调控及减排效果理想,实现人口、资源、环境、经济、社会系统的协调发展。



人口总量不断增加,在一定程度上会给能源消耗造成压力,但人口自然增长率从1996年的9.66‰一直降至2003年的3.0‰,尔后有小幅回升,继而平稳缓慢下降。第三,1996年以来,中国的建成区绿化覆盖率和森林覆盖率均稳步提高,尤其是2008年以后,科研方面人力物力的投入大幅增加,林业投资所占比重也有较快提高,一系列积极的应对措施,为碳排放增速的减缓和碳汇的有效增多提供了保障。此外,从政策方面来看,20世纪90年代以来,随着全球可持续发展理念的兴起,中国的环保意识

逐渐觉醒,能源利用技术稳步提高。1996-2001年期间,中国开始了国有企业所有制改革,淘汰了落后产能,关停大量排放密集型的中小企业,推动了低碳科技进步。21世纪初期,中国再次出现重化工倾向,二产比重飞速增加,低碳技术进步有所放缓,但2004年之后,随着国家《节能中长期专项规划》和《中国应对气候变化国家方案》等政策法规的实施,低碳科技发展迅速,实现了能源消耗强度的不断降低。

3.2 碳排放安全时空变化

3.2.1 碳排放安全评价总体分析

根据上述研究方法,得到各省区的能源消耗碳排放安全各子指标权重,将各省区权重最大的5个指标挑选出来,加以汇总(表3)。其中,能源强度指标的权重在28个省区均位居前五,其他影响较大的指标依次为:城镇居民人均可支配收入、煤炭比重、人均碳排放、第二产业比重。而后,使用ArcGIS 10.0软件将能源消耗碳排放安全警情计算结果进行了可视化处理(图2-4),其中,综合评价是按照上述安全等级划分标准的5类进行分类,压力和响应系统是根据数据特征按照等间距方法分类。

由图2可知,1996-2012年,中国大部分省区总体能源消耗碳排放安全处于临界安全状态,无一省区属于安全状态,但空间格局发生了一定变化。

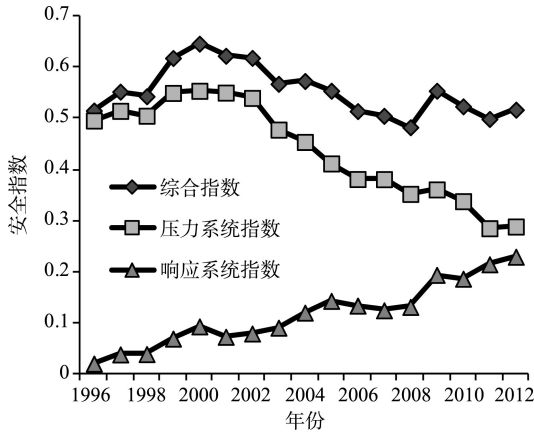


图1 1996-2012年中国能源消费碳排放安全评价结果  
Fig.1 Results of energy-related carbon emission security evaluation in China, 1996-2012

表3 影响较大指标及其对应省区  
Tab.3 Main influencing factors and regions of high impact

指标	省区数量	省区简称
能源强度	28	京、津、冀、晋、蒙、辽、吉、黑、沪、苏、浙、皖、闽、赣、鲁、豫、湘、粤、桂、渝、川、贵、滇、陕、甘、青、宁、新
城镇居民人均可支配收入	19	津、冀、晋、辽、黑、皖、闽、赣、豫、鄂、湘、桂、渝、川、贵、滇、陕、甘、新
煤炭比重	17	京、津、冀、吉、沪、浙、闽、赣、豫、湘、粤、琼、川、滇、甘、宁、新
人均碳排放	17	津、冀、蒙、辽、吉、苏、浙、闽、赣、鲁、豫、湘、桂、琼、川、滇、陕
第二产业比重	16	京、蒙、辽、黑、苏、闽、赣、鲁、豫、鄂、湘、桂、琼、渝、陕、青

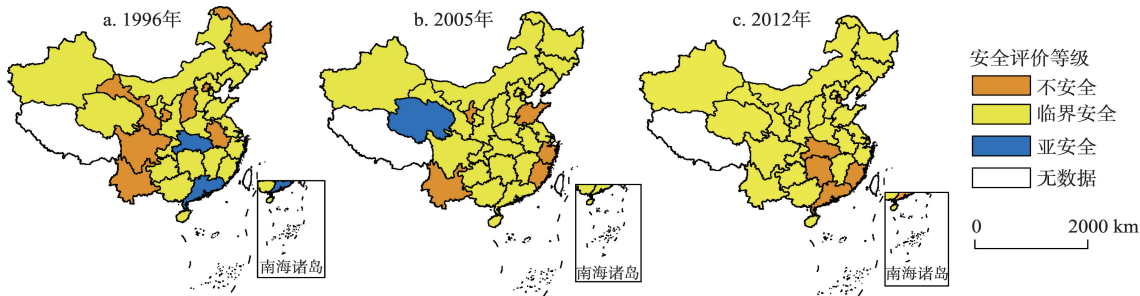


图2 1996-2012年能源消耗碳排放安全总体警情时空差异  
Fig.2 Spatiotemporal changes of energy-related carbon emission security in China, 1996-2012

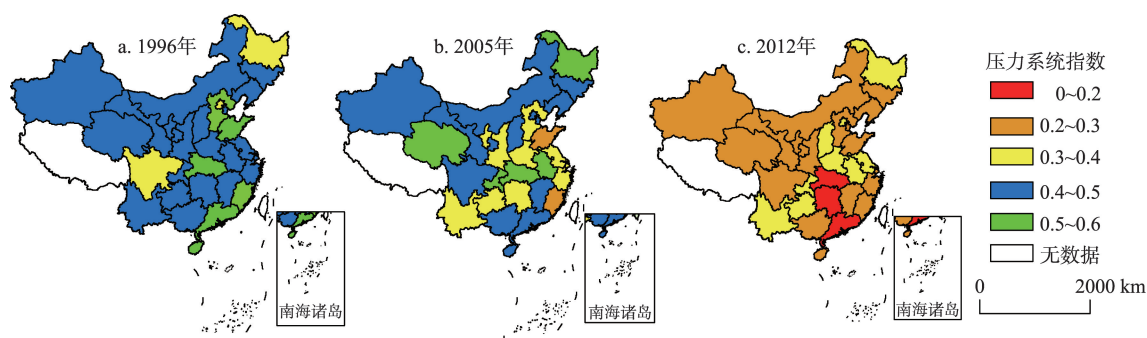


图3 1996-2012年碳排放安全压力系统时空差异

Fig.3 Spatiotemporal changes of pressure indicators of carbon emission security in China, 1996-2012

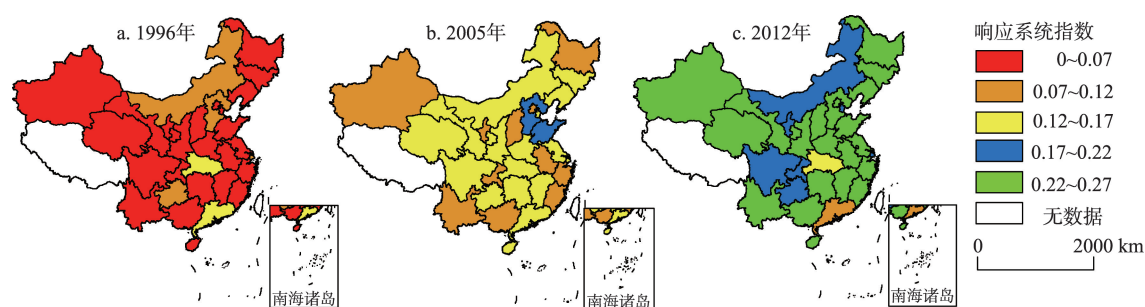


图4 1996-2012年碳排放安全响应系统时空差异

Fig.4 Spatiotemporal changes of response indicators of energy-related carbon emission security in China, 1996-2012

1996年,北京、黑龙江、山西、安徽及西部地区的甘肃、四川、云南处于不安全状态,湖北、广东则处于亚安全状态。2005年,宁夏、山东、浙江、福建、云南为不安全状态,青海由临界安全变为亚安全状态。2012年,天津、湖北、湖南、广东、福建成为不安全区域,没有安全等级较高的亚安全和安全省区。从整体上看,安全等级差的省区出现南移现象,碳排放安全现状不容乐观。由于处于临界安全区间的省份较多,且仅从综合指数值难以判断其安全等级分布的原因。为此,以下将从压力和响应两个子系统分别进行分析。

### 3.2.2 各子系统碳排放安全时空差异

#### (1) 压力系统

根据压力系统数值得分分布情况,采取等间距方法将其划分为5个等级,如图3所示。由图3可以看出,1996-2012年,压力系统指数空间格局发生显著变化,其总体趋势为评价价值变小,即安全程度下降,由于压力系统的指标均为负向,由此说明影响能源消费碳排放安全的驱动力因素在逐渐增强。尤其是2005年之后,相较于1996-2005年,发生较为显著的变化,结合数据发现此阶段全国总体经济

增长、城镇化和工业化发展及碳排放增长较为迅速。1996年,压力系统整体较为理想,压力相对较大的为北京、四川和黑龙江,其余省区碳排放压力均相对较小。1996-2005年,黑龙江的碳排放压力大幅度减小,青海、重庆和安徽的碳排放压力也有所减轻,而中东部和南部大部分地区压力系统都呈恶化趋势,其中山东、福建碳排放压力从最轻等级变化为较严重等级。2005-2012年,全国大部分省份碳排放压力增长幅度较大,对碳排放安全造成严重威胁;其中胡焕庸线以西的区域基本处于较为严重区域,胡焕庸线以东区域也出现了最严重等级。2012年碳排放压力系统处于最严重等级的省区为湖北、湖南和广东,压力系统的恶化也是这三省成为不安全状态的主要原因。

#### (2) 响应系统

根据响应系统指标数值得分分布情况,采用等间距方法将其划分为5个等级,如图4所示。从中可以看出,1996-2012年,响应系统的空间格局亦发生了显著变化,整体上来看,由于绝大多数省区采取了较为有效的防止环境恶化的措施,碳排放安全得到了相应保障。从3个年份指标值过渡情况看,

响应系统较之压力系统变化相对平稳。1996年,中国各省基本处于无响应状态,只有湖北和广东相对较好。2005年较1996年均有所好转,其中山东、河北较为突出。2012年,全国绝大部分区域向好的方向发展,而湖北和广东响应系统未得到改善,且广东较之原先水平更差,成为相对落后省区。1996-2012年,响应系统变化最大(从最差等级变为最优等级)的有22个省区。

3.2.3 压力系统—响应系统拟合分析

上述压力、响应系统的分类分析侧重于从时间维度上得出区域碳排放安全的空间变化,而压力系统—响应系统拟合分析是以不同时间截面30个省区的平均值为依据,划分为:高压高响应、高压低响应、低压高响应和低压低响应4个类别(图5),更能显示各省区在同一时间截面上碳排放安全状况在全国范围所处的位置,对各省区低碳发展政策的制定有重要的借鉴意义。从不同时间截面上看,1996年大部分省区都处于高压低响应和低压高响应两种极端状况,说明各省区资源禀赋、经济发展和对环保重视程度差异较大。而2005年以后,高压高响应区域和低压低响应省区明显增多,高压低响应区域明显减少,说明省区间碳排放安全状态差距缩小的同时,环境改善引起了全社会的重视。其中,青海省一直维持低压高响应的较好状态,而相对应的高压低响应的省区(如2012年的湖北省和广东省)应引起重视,积极制定相关政策,加大改善碳排放现状的措施和力度。此外,由图5可知,4种压力系统—响应系统拟合状况下,各省区存在一定的空间集聚效应,说明相邻或相近省区在资源禀赋、社会发展或环境政策上存在相似之处。

3.3 警情预测分析

根据上述能源消耗碳排放安全评价指标体系的18个指标及各省区1996-2012年的数据,运用灰色GM(1,1)预测模型,对未来几年的评价指标值进行预测,并通过精度检验,说明预测指标值是可靠的,将预测指标值代入评价模型,得到预测结果,其中2020年预测结果如表4所示。

根据安全评价变化趋势分析可知:北京和黑龙江逐渐向亚安全状态好转,而河北、上海、福建、河南、湖北、广东、广西等省区将发展为不安全状态。整体而言,全国大部分省区处于临界安全和不安全状态,碳排放安全情况不容乐观,在未来的生产生

表4 各省区2020年碳排放安全等级  
Tab.4 Provincial level carbon emission security scores in 2020

省区	评价值	安全评价	省区	评价值	安全评价
京	0.7604	亚安全	豫	0.4030	不安全
津	0.4649	临界安全	鄂	0.2840	不安全
冀	0.3224	不安全	湘	0.3614	不安全
晋	0.6126	临界安全	粤	0.2585	不安全
蒙	0.4455	不安全	桂	0.4167	不安全
辽	0.5215	临界安全	琼	0.4526	不安全
吉	0.4561	临界安全	渝	0.5274	临界安全
黑	0.7414	亚安全	川	0.4338	不安全
沪	0.4286	不安全	贵	0.5476	临界安全
苏	0.5394	临界安全	滇	0.5333	临界安全
浙	0.4468	不安全	陕	0.4267	不安全
皖	0.5739	临界安全	甘	0.5503	临界安全
闽	0.3034	不安全	青	0.5906	临界安全
赣	0.4098	不安全	宁	0.6462	临界安全
鲁	0.4045	不安全	新	0.4963	临界安全

注:为提高预测精度,个别省区预测时用周期分析法进行了修正。

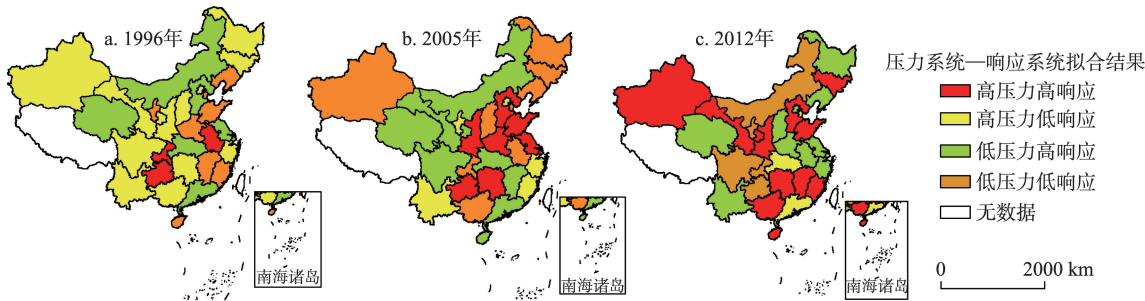


图5 1996-2012年各省区碳排放安全压力系统和响应系统拟合状况

Fig.5 Spatiotemporal coupling of pressure system and response system of energy-related carbon emission security at the provincial level, 1996-2012



活以及环境保护过程中,应采取积极有效的预防措施,保障社会、经济和生态环境协调发展。

## 4 结论及讨论

本文从时间和空间2个维度对中国省域尺度能源消耗碳排放安全的特征变化进行探索,得出以下结论:

(1) 在概念体系方面,应用生态安全理论丰富碳排放问题研究,从压力和响应2个方面,分经济、社会、环境3个层次构建能源消耗碳排放安全评价指标体系,有效地反映了碳排放安全的时空二维特征。

(2) 在方法方面,采用压力—响应模型,突出人地关系主线,结合客观的指标赋权方法和无需海量历史数据且精度较高的GM(1, 1)预测方法,能够较准确地研究能源消耗碳排放安全评价问题,且可实现省区的横向及纵向对比。

(3) 在结果内涵方面,1996-2012年,中国能源消耗碳排放安全警情处于0.45~0.65的临界安全状态,2000年以后呈波动下降的趋势,碳排放安全对压力系统依赖程度较高,响应系统作用不断增强;大部分省区压力系统恶化的同时,响应系统好转;各省区碳排放安全空间差异较大,空间格局发生了一定变化,安全等级差的省区出现南移现象;省区间碳排放安全差距逐渐缩小,高压低响应的省区大量减少;2020年,全国大部分省区警情处于临界安全及以下状态,碳排放安全情况不容乐观。

(4) 在政策建议方面,地方政府部门在认清本地区碳排放安全情况的前提下,可从能源强度、城镇居民人均可支配收入、煤炭比重、人均碳排放、第二产业比重等相对敏感的指标入手,结合本地区自身情况,在保证居民生活质量前提下采取有针对性的措施,以实现区域可持续发展。

本文用生态安全理论丰富碳排放问题研究,使之具有时空异质性的同时具有趋势预见性,为因地制宜制定区域碳减排策略提供可资借鉴的依据。目前,关于生态安全阈值的计算一直是难点,尚无取得共识的模型和方法,若各省区采取不同动态阈值将使各省区间的可比性降低,因此本文只是在相关文献的基础上进行了初步划分。此外,受数据获取所限,只能以省区为单元进行测度,未能细化到地级市单元,需在以后进一步深化。

## 参考文献(References)

- 陈星, 周成虎. 2005. 生态安全: 国内外研究综述[J]. 地理科学进展, 24(6): 8-20. [Chen X, Zhou C H. 2005. Review of the studies on ecological security[J]. Progress in Geography, 24(6): 8-20.]
- 程叶青, 王哲野, 张守志, 等. 2013. 中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量[J]. 地理学报, 68(10): 1418-1431. [Cheng Y Q, Wang Z Y, Zhang S Z, et al. 2013. Spatial econometric analysis of carbon emission intensity and its driving factors from energy consumption in China[J]. Acta Geographica Sinica, 68(10): 1418-1431.]
- 樊杰, 王亚飞, 汤青, 等. 2015. 全国资源环境承载能力监测预警(2014版)学术思路与总体技术流程[J]. 地理科学, 35(1): 1-10. [Fan J, Wang Y F, Tang Q, et al. 2015. Academic thought and technical progress of monitoring and early-warning of the national resources and environment carrying capacity (V 2014)[J]. Scientia Geographica Sinica, 35(1): 1-10.]
- 胡艳兴, 潘竞虎, 王怡睿. 2015. 基于ESDA-GWR的1997-2012年中国省域能源消费碳排放时空演变特征[J]. 环境科学学报, 35(6): 1896-1906. [Hu Y X, Pan J H, Wang Y R. 2015. Spatial-temporal evolution of provincial carbon emission in China from 1997 to 2012 based on ESDA and GWR model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 35(6): 1896-1906.]
- 刘竹, 耿涌, 薛冰, 等. 2011. 城市能源消费碳排放核算方法[J]. 资源科学, 33(7): 1325-1330. [Liu Z, Geng Y, Xue B, et al. 2011. A calculation method of CO<sub>2</sub> emission from urban energy consumption[J]. Resources Science, 33(7): 1325-1330.]
- 鲁丰先, 张艳, 秦耀辰, 等. 2013. 中国省级区域碳源汇空间格局研究[J]. 地理科学进展, 32(12): 1751-1759. [Lu F X, Zhang Y, Qin Y C, et al. 2013. Spatial patterns of provincial carbon source and sink in China[J]. Progress in Geography, 32(12): 1751-1759.]
- 陆大道, 樊杰. 2012. 区域可持续发展研究的兴起与作用[J]. 中国科学院院刊, 27(3): 290-300, 319. [Lu D D, Fan J. 2012. The rise and effects of regional sustainable development studies in China[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 27(3): 290-300, 319.]
- 秦大河, Stocker T. 2014. IPCC第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 10(1): 1-6. [Qin D H, Stocker T. 2014. Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report[J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 10(1): 1-6.]

- 孙昌龙, 靳诺, 张小雷, 等. 2013. 城市化不同演化阶段对碳排放的影响差异[J]. 地理科学, 33(3): 266-272. [Sun C L, Jin N, Zhang X L, et al. 2013. The impact of urbanization on the CO<sub>2</sub> emission in the various development stages[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 33(3): 266-272.]
- 王莉雯, 卫亚星. 2014. 沈阳市经济发展演变与碳排放效应研究[J]. 自然资源学报, 29(1): 27-38. [Wang L W, Wei Y X. 2014. The research on economic development and carbon emission effect of Shenyang[J]. *Journal of Natural Resources*, 29(1): 27-38.]
- 王铮, 朱永彬, 刘昌新, 等. 2010. 最优增长路径下的中国碳排放估计[J]. 地理学报, 65(12): 1559-1568. [Wang Z, Zhu Y B, Liu C X, et al. 2010. Integrated projection of carbon emission for China under the optimal economic growth path[J]. *Acta Geographica Sinica*, 65(12): 1559-1568.]
- 魏晓华, 郑吉, 刘国华, 等. 2015. 人工林碳汇潜力新概念及应用[J]. 生态学报, 35(12): 3881-3885. [Wei X H, Zheng J, Liu G H, et al. 2015. The concept and application of carbon sequestration potentials in plantation forests[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 35(12): 3881-3885.]
- 徐安. 2011. 我国城市化与能源消费和碳排放的关系研究[D]. 武汉: 华中科技大学. [Xu A. 2011. Study of the relation of urbanization and energy consumption and carbon emissions in China[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology.]
- 徐美, 朱翔, 刘春腊. 2012. 基于RBF的湖南省土地生态安全动态预警[J]. 地理学报, 67(10): 1411-1422. [Xu M, Zhu X, Liu C L. 2012. Early-warning of land ecological security in Hunan Province based on RBF[J]. *Acta Geographica Sinica*, 67(10): 1411-1422.]
- 张金萍, 闫卫阳, 孙玮, 等. 2014. 中国低碳发展的类型及空间分异[J]. 资源科学, 36(12): 2491-2499. [Zhang J P, Yan W Y, Sun W, et al. Types and spatial differentiation of low-carbon development in China[J]. *Resources Science*, 36(12): 2491-2499.]
- 张梦婕, 官冬杰, 苏维词. 2015. 基于系统动力学的重庆三峡库区生态安全情景模拟及指标阈值确定[J]. 生态学报, 35(14): 4880-4890. [Zhang M J, Guan D J, Su W C. 2015. Scenarios simulation and indices thresholds determination of ecological security in Three Gorges Reservoir based on system dynamics[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 35(14): 4880-4890.]
- 张强, 薛惠锋, 张明军, 等. 2010. 基于可拓分析的区域生态安全预警模型及应用: 以陕西省为例[J]. 生态学报, 30(16): 4277-4286. [Zhang Q, Xue H F, Zhang M J, et al. 2010. Early-warning model based on extension analysis for ecological security and its application: Case study of Shaanxi Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 30(16): 4277-4286.]
- 赵宏波, 马延吉. 2014. 基于变权一物元分析模型的老工业基地区域生态安全动态预警研究: 以吉林省为例[J]. 生态学报, 34(16): 4720-4733. [Zhao H B, Ma Y J. 2014. Study on early-warning model based on variable weight-matter element analysis for ecological security in old industrial bases: A case study of Jilin Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 34(16): 4720-4733.]
- 周健, 刘占才. 2011. 基于GM(1,1)预测模型的兰州市生态安全预警与调控研究[J]. 干旱区资源与环境, 25(1): 15-19. [Zhou J, Liu Z C. 2011. The research on the control and warning of ecological security based on GM (1, 1) model[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 25(1): 15-19.]
- 周葵, 戴小文. 2013. 中国城市化进程与碳排放量关系的实证研究[J]. 中国人口·资源与环境, 23(4): 41-48. [Zhou K, Dai X W. 2013. An empirical study on the relationship between urbanization and carbon emission in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 23(4): 41-48.]
- 朱永彬, 王铮, 庞丽, 等. 2009. 基于经济模拟的中国能源消费与碳排放高峰预测[J]. 地理学报, 64(8): 935-944. [Zhu Y B, Wang Z, Pang L, et al. 2009. Simulation on China's economy and prediction on energy consumption and carbon emission under optimal growth path[J]. *Acta Geographica Sinica*, 64(8): 935-944.]
- Al-mulali U, Sab C N B C, Fereidouni H G. 2012. Exploring the bi-directional long run relationship between urbanization, energy consumption, and carbon dioxide emission [J]. *Energy*, 46(1): 156-167.
- Gari S R, Newton A, Icely J D. 2015. A review of the application and evolution of the DPSIR framework with an emphasis on coastal social ecological systems[J]. *Ocean & Coastal Management*, 103: 63-77.
- Lin B Q, Ouyang X L. 2014. Energy demand in China: Comparison of characteristics between the US and China in rapid urbanization stage[J]. *Energy Conversion and Management*, 79: 128-139.
- Liu Z, Guan D B, Crawford-Brown D, et al. 2013. A low-carbon road map for China[J]. *Nature*, 500: 143-145.
- Martínez-Zarzoso I, Maruotti A. 2011. The impact of urbanization on CO<sub>2</sub> emissions: Evidence from developing countries[J]. *Ecological Economics*, 70(7): 1344-1353.



- Rapport D J, Whitford W G. 1999. How ecosystems respond to stress common properties of arid and aquatic systems [J]. *BioScience*, 49(3): 193-203.
- York R. 2007. Demographic trends and energy consumption in European Union Nations, 1960- 2025[J]. *Social Science Research*, 36(3): 855-872.
- Zha D L, Zhou D Q, Zhou P. 2010. Driving forces of residential CO<sub>2</sub> emissions in urban and rural China: An index decomposition analysis[J]. *Energy Policy*, 38(7): 3377-3383.

## Energy-related carbon emission security at the provincial level in China

RONG Peijun, YANG Quntao, QIN Yaochen\*, LI Xu, ZHANG Tianning, ZHANG Shuaishuai

(College of Environment and Planning/Collaborative Innovation Center on Yellow River Civilization of Henan Province, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China)

**Abstract:** Facing the great challenge of climate change, carbon emission security-an important part of ecological security-has become a prominent issue. This study used the 1996-2012 statistics of 30 provinces (except Tibet) of the Chinese mainland to analyze the spatial and temporal differences of energy-related carbon emission security, with the aim to provide some guidance for regional carbon emission reduction strategy and sustainable development. The assessment indicator system of energy consumption-related carbon emission security was based on the pressure- response model, which consists of three main aspects: economic, social, and environmental. Then carbon emission security situation was projected for 2013 to 2020 by using the GM (1,1) method. The results show that: from 1996 to 2012, energy consumption-related carbon emission security of China was at a critical level (0.45-0.65) and showed a downward trend since 2000. The response system played an increasingly more important role in the security state of energy-related carbon emissions; carbon emission security of various provinces is very different, its spatial pattern underwent some changes, and the provinces of low security level shifted southward; most provinces face more pressure while the situation of the response system has improved; disparity of regional CO<sub>2</sub> emission security gradually narrowed, provinces of high pressure and low response reduced substantially; energy intensity, per capita disposable income of urban residents, proportion of coal, per capita carbon emission, proportion of the secondary industry have great influence on carbon emission security in the majority of provinces. The forecasting results show that carbon emission security situation is not optimistic. Most provinces will be in the critical and unsafe state with regard to carbon emission.

**Key words:** carbon emissions; security state; stress-response model; spatiotemporal difference; China