

基于突变级数法的区域低碳经济 水平及协调性评价

——以陕西省为例

位贺杰, 张艳芳, 朱妮, 栗新巧

(陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710119)

摘要: 以陕西省为研究对象, 构建了一套由低碳系统和发展系统组成的低碳经济评价指标体系。综合运用熵值法、突变级数模型和协调模型, 对该省 2003—2011 年的低碳经济发展水平和协调性进行了评价。结果表明, 陕西低碳经济发展水平由 2003—2006 年的“差”级别转变为 2007 年的“一般”级别和 2008—2011 年的“良好”级别; 陕西省低碳经济发展进程中, 生态环境保护水平提升较快, 产业结构和能源结构变动不稳定, 技术对低碳经济的正效应逐渐凸显出来; 陕西省低碳系统和发展系统在研究期内处于拮抗期, “十二五”期间, 有望进入基本协调期, 进而给低碳经济发展带来动力。

关键词: 低碳经济; 突变级数模型; 协调模型; 陕西省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)06-0305-06

中图分类号: F062.2

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.06.059

Evaluation on Development Level and Coordination of Low-carbon

Economy Based on Catastrophe Progression Model

—Taking Shaanxi Province as an Example

WEI He-jie, ZHANG Yan-fang, ZHU Ni, LI Xin-qiao

(College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

Abstract: An evaluation index system was established for Shaanxi Province which consisted of low-carbon system and development system about low-carbon economy, and the level and coordination of Shaanxi Province from 2003 to 2011 were evaluated using the model of entropy, catastrophe progression and coordinate. The results showed that the relatively level of the year from 2003 to 2006 was “unacceptable”, that of the year 2007 was “average”, and that of the year from 2008 to 2011 was “well”. The level of ecological protection was obvious progress and the effect of technology to low-carbon economy was gradually highlighted, while industrial and energy structure was unstable in the development process of low-carbon economy in Shaanxi Province. Low-carbon system and development system in Shaanxi Province was antagonistic during the study period. During the 12th Five-Year Plan, it may enter the basic coordination phase and promote the development of low-carbon economy.

Keywords: Low-carbon economy; catastrophe progression model; coordination model; Shaanxi Province

低碳经济是指碳生产力和人文发展均达到一定水平的一种经济形态, 具有低能耗、低污染、低排放和环境友好的突出特点, 旨在实现控制温室气体排放和发展社会经济的全球共同愿景^[1]。

国外学者对低碳经济发展路径^[2-4]、低碳经济政策与方案^[5-7]、低碳经济技术与能源^[8-10]等方面的评价居多, 较为重视实践性和领域性研究。国内学者主要采用构建指标体系进行综合评价, 评价方法多采用

收稿日期: 2013-06-24

修回日期: 2013-12-25

资助项目: 教育部人文社科研究规划基金项目“区域土地利用的低碳效应与低碳经济发展模式研究: 以西安市为例”(10XJA790011); 陕西师范大学中央高校基金项目(GK201302031); 国家自然科学基金项目(41371523)

作者简介: 位贺杰(1988—), 男(汉族), 河南省项城市人, 硕士研究生, 研究方向为水土资源评价与生态低碳。E-mail: shanxishidawhj@163.com。

通信作者: 张艳芳(1969—), 女(汉族), 陕西省榆林市人, 博士, 副教授, 主要从事水土资源评价、生态安全与低碳研究。E-mail: zhangyf@snnu.edu.cn。

层次分析法、DEA 法、因子分析法等^[11-15],对低碳经济跨时段评价较少,协调性研究鲜有涉及,研究尺度以宏观尺度居多^[11-13,16-19]。突变级数法在解决跨时间尺度问题,多指标集成问题方面具有较强适用性,且该评价方法较为客观,在低碳研究领域中得到重视^[19-20]。

陕西省是能源生产与消耗大省,2011 年能源消费总量超过 1.0×10^8 t 标准煤,纯碳排放量达 7.0×10^7 t,人均碳排量远超全国平均水平,2003—2011 年,陕西省能源消费年增长速度超过 10%,且能源消费结构以煤为主,能源结构相对单一,煤炭消费量所占比重在 70% 以上;与高碳消费相对应,陕西省 3 次产业结构中,第二产业比重达约 60%,二产业中重工业比重高达 80%,高于全国平均水平约 14%,该省年耗标煤 5.0×10^7 t 以上的 565 家企业实现的总产值占规模以上工业企业的 74.5%,而消耗的能源所占比重则高达 97.8%;另一方面,陕西省的经济增长仍沿袭传统的粗放式发展方式,对资源的粗放利用导致陕西省的经济增长仍然属于资源密集型,万元 GDP 能耗高于全国平均水平,为陕西省低碳经济发展设置了

障碍,同时也提供了契机。

2010 年陕西省又被发改委认定为低碳经济试点省,加之能源大省压力,其发展低碳经济的任务任重道远,亟需加强该地区的低碳经济水平评价及低碳经济发展协调性方面的研究工作。本研究采用突变级数模型,辅以熵值法,构建低碳经济指标体系定量评价陕西省 2003—2011 年的低碳经济发展水平;借助协调模型测算陕西省 9 a 低碳经济协调性,评价该省低碳经济协调水平。

1 研究方法 with 模型构建

1.1 突变级数法

突变级数法的理论基础是突变理论(catastrophe theory),该理论主要依据势函数将临界点分类,它处理不连续性特征时并不涉及任何特殊的内在机制,这使它特别适用于研究内部机理未知的系统,势函数中的状态变量反映了系统的行为状态,而它的控制变量是影响状态变量的因素,控制变量个数一般不超过 4 个,此时突变模型的势函数、分叉集方程与归一公式详见表 1。

表 1 突变模型及其公式^[20-22]

突变模型	控制变量	势函数	分叉集	归一公式
折叠突变	1	$v_{(x)} = x^3 + u_1 x$	$u_1 = -3x^2$	$x_{u_1} = \sqrt{u_1}$
尖点突变	2	$v_{(x)} = \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}u_1 x^2 + u_2 x$	$u_1 = -6x^2, u_2 = 8x^3$	$x_{u_1} = \sqrt{u_1}, x_{u_2} = \sqrt[3]{u_2}$
燕尾突变	3	$v_{(x)} = \frac{1}{5}x^5 + \frac{1}{3}u_1 x^3 + \frac{1}{2}u_2 x^2 + u_3 x$	$u_1 = -6x^2, u_2 = 8x^3$ $u_3 = -3x$	$x_{u_1} = \sqrt{u_1}, x_{u_2} = \sqrt[3]{u_2}$ $x_{u_3} = \sqrt[4]{u_3}$
蝴蝶突变	4	$v_{(x)} = \frac{1}{6}x^6 + \frac{1}{4}u_1 x^4 + \frac{1}{3}u_2 x^3 + \frac{1}{2}u_3 x^2 + u_4 x$	$u_1 = -10x^2, u_2 = 20x^3$ $u_3 = -15x^4, u_4 = 4x^5$	$x_{u_1} = \sqrt{u_1}, x_{u_2} = \sqrt[3]{u_2}$ $x_{u_3} = \sqrt[4]{u_3}, x_{u_4} = \sqrt[5]{u_4}$

注: x 为状态变量, u 为控制变量。

利用突变级数法进行评价时,当某个上级指标(状态变量 x)包含 4 个或 4 个以下的下级指标(控制变量 u)时,对各个控制变量按重要程度进行排序,然后根据对应的突变模型归一公式,得出控制变量 u 的隶属度函数值,后遵循“非互补性指标”大中取小和“互补性指标”取平均值的原求状态变量 x 的值。

因此,利用突变级数模型去评价低碳经济这个复杂且难以精确模拟的系统是非常合理的,而且可以减少评价的主观性,又不失科学性、合理性,且本研究为跨时段研究,突变级数法更为适用^[20,23]。

1.2 指标体系构建与数据来源

目前学术界对于低碳经济概念还没有明确,但已有大量研究文献表明,低碳经济系统是一个涉及能

源、碳排放、经济、科技、环境、社会的复杂系统。基于此,参照已有文献^[1,11-19],利用频度分析法,并依据构建指标的系统性、层次性、可操作性、可比性等原则,舍弃一些年变化很小甚至不变的指标如人均森林面积、森林覆盖率等,同时考虑陕西省的实际情况,如煤炭大省及正处于经济转型期等,最终构建的指标体系详见表 2。

数据主要采集自 2004—2012 年《陕西统计年鉴》和《中国环境统计年鉴》,对年鉴中前后年份不统一的数据,统一使用最新数据,GDP 指标数据以及与 GDP 相关的指标数据,使用或计算时统一按 2003 年的不变价格进行了修正,碳排放及相关数据采用能源碳排放系数法^[24]计算。

表 2 陕西省低碳经济评价指标体系

系统层 A	要素层 B	指标层 C
低碳系统 A ₁	低碳产出 消费 指标 B ₁	C ₁ * 人均碳排放(t/人)
		C ₂ * 能源消费增长速度/%
		C ₃ 单位能源产出(万元·t ⁻¹)
		C ₄ 单位碳排放产出/(万元·t ⁻¹)
	低碳结 构效率 指标 B ₂	C ₅ * 煤在能源消费中比重/%
		C ₆ 清洁能源在能源消费中的比重/%
		C ₇ 能源加工转化效率/%
		C ₈ 万人科技活动人员数
	低碳生态 环保 指标 B ₃	C ₉ 人均公园绿地面积/m ²
		C ₁₀ 建城区绿化覆盖率/%
		C ₁₁ 城市生活垃圾无害化处理率/%
		C ₁₂ 单位二氧化硫产出/(万元·t ⁻¹)
		C ₁₃ 人均 GDP/万元
发展系统 A ₂	经济发展 指标 B ₄	C ₁₄ GDP/亿元
		C ₁₅ 第二产业产值占 GDP 比重/%
		C ₁₆ 第三产业产值占 GDP 比重/%
	社会发展 指标 B ₅	C ₁₇ * 农村居民家庭恩格尔系数/%
		C ₁₈ * 城镇居民家庭恩格尔系数/%
		C ₁₉ 第三产业就业人员比重/%
		C ₂₀ 城市化率/%

注: * 代表逆向指标, 值越大, 对系统负面影响越大。

1.3 突变模型的构建

根据构建指标体系特征, 对于系统层 A, 采用低碳系统重要程度大于发展系统重要程度^[7,12-13]; 对于两个系统要素层 B 和指标层 C 的排序, 分别采用熵值法^[25] 计算权重进行排序, 以克服排序的主观性。在确定了各级指标的排列顺序后, 参照以上构建的指标体系, 最终提出指标逐级集成的突变模型如图 1 所示。

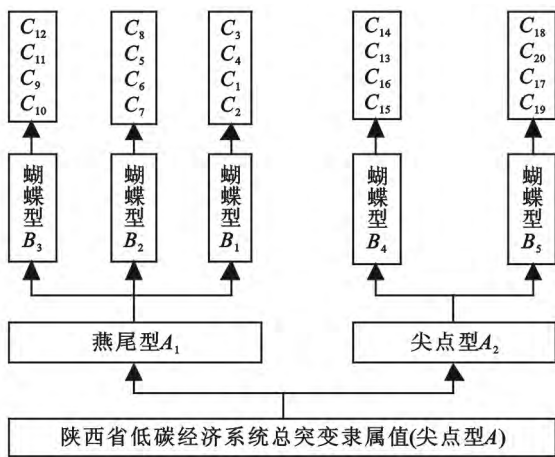


图 1 陕西省低碳经济评价逐级突变模型

1.4 协调模型的构建

协调度是指系统之间或系统要素之间在发展过程中彼此和谐一致的程度, 体现系统由无序走向有序

的趋势^[26]。在以上构建指标体系中的系统层, 低碳系统与发展系统存在密切联系, 二者协调度计算公式^[27] 为:

$$C = [(F_{A_1} \times F_{A_2}) / (F_{A_1} + F_{A_2})^2]^{1/2} \quad (1)$$

式中: F_{A_1} ——低碳系统水平; F_{A_2} ——发展系统水平; C ——协调度, $C \in (0, 0.3)$, 两系统处于低水平协调期; $C \in (0.3, 0.5)$, 两系统处于拮抗期; $C \in (0.5, 0.8)$, 两系统处于基本协调期; $C \in (0.8, 1)$, 两系统处于非常协调期^[28]。

只计算协调度无法体现低碳经济综合水平的提升, 为此又引入耦合协调度公式:

$$D = (C \times F_A)^{1/2} \quad (2)$$

式中: D ——耦合协调度; C ——协调度; F_A ——低碳经济综合水平。

2 结果与分析

2.1 指标计算及等级划分

依据突变模型中的归一公式对以上熵值法计算权重时得到的标准数据进行计算, 其中要素层 B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 的取值遵循“取平均值”的原则, 系统层 A_1, A_2 和目标层 A 的取值遵循“大中取小”原则, 最终得 2003—2011 年陕西省低碳经济发展评价的各项得分(图 2—4)。依据公式(1)—(2), 利用以上相关数据计算 9 a 低碳系统与发展系统协调度 C 和耦合协调度 D (图 5)。

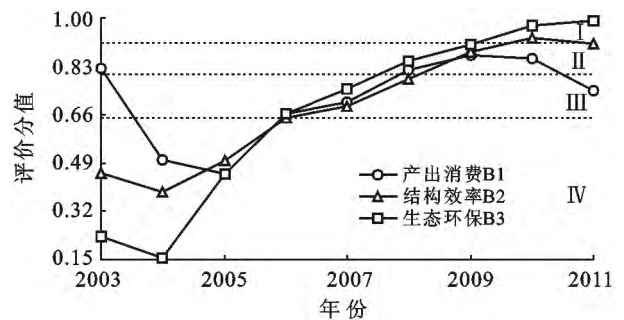


图 2 低碳系统要素层评价

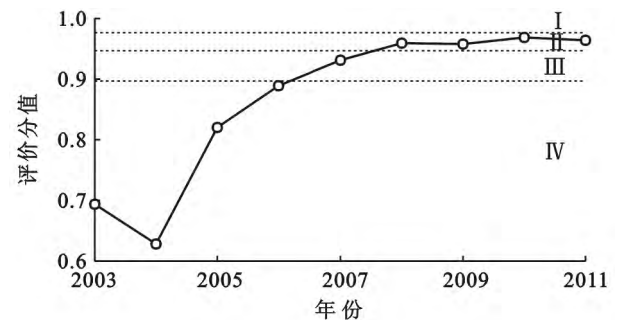


图 3 陕西省低碳经济发展综合评价

由于突变级数法归一公式所具有的特点,计算出的最终评价指一般均较高,值之间的差距也较小,导致很难判断评价对象的优劣,因此需要制定适合突变级数法的等级标准,而不是用常规的等级标准去判定评价价值^[5]。为此,设计评价指标标准为:常规状态下,

将评价标准划分为差(0~0.25),一般(0.25~0.5),良好(0.5~0.75),优秀(0.75~1),并依据底层指标的隶属值(0,0.25,0.5,0.75,1),按以上构建的突变模型计算,求出相应上层指标值,最终得到突变级数法的相对评价等级标准(表3)。

表3 陕西省低碳经济评价相对等级标准

等级	低碳水平	常规值	突变级数法取值		
			总值	A_1, A_2	B_1, B_2, B_3, B_4, B_5
I	优秀	0.75~1	0.977 3~1	0.955 2~1	0.912 3~1
II	良好	0.50~0.75	0.946 6~0.977 3	0.896 1~0.955 2	0.803 1~0.912 3
III	一般	0.25~0.50	0.897 5~0.946 6	0.805 4~0.896 1	0.648 7~0.803 1
IV	差	0~0.25	0~0.897 5	0~0.805 4	0~0.648 7

2.2 结果分析

2.2.1 低碳系统水平 低碳系统要素中,结构效率水平和生态环保水平提升较快,其变化特征与低碳经济综合水平基本一致,产出消费水平则呈现波动状态(图2—3)。(1)低碳经济的实质是能源利用效率的提高和清洁能源结构的创建^[1],所以低碳经济水平提升与二者息息相关,2003—2011年,陕西省能源加工转化效率和清洁能源占能源消费比重都有所增加,年平均增长率分别为2.93%和13.45%,直接促进了结构效率水平和低碳综合水平的提升,但是煤占能源消费比重这一指标波动较为明显,9a内在69%~77%之间波动,对低碳经济水平提升的效果尚未发挥,其原因主要是陕西为产煤大省,对煤炭资源的依赖导致传统以煤为主的能源消耗模式难以从根本上改变,这是影响陕西省发展低碳经济的症结问题,但也预示了陕西低碳的巨大发展空间。(2)从2004年起生态环保水平持续增长,相对水平也由“差(IV)”变为“优秀(I)”。生态环保要素中人均公园绿地面积、城市垃圾无害化处理率9a内的年平均增长率分别为11.31%和11.12%,单位二氧化硫产值9a内增加了1.5倍(去除价格因素影响),反映了陕西省在生态环保方面的成果较为突出,一方面是科技进步带来的正效应,另一方面与生态工程和政府实施条例有关,2003年陕西启动“大绿工程”,“十一五”期间政府出台了《陕西省应对气候变化方案》、《陕西省秦岭生态环境保护条例》等,有效提高了公众的生态与低碳意识。(3)产出消费水平呈现波动状态,相对水平由2003年的“良好”,降为2004和2005年的“差”,2006年以后逐渐得到恢复。分析原因可能是前期能源消费处于加速增长阶段,而此时技术进步推动单位能源产出和单位碳排放产出增长正效应较弱,导致产出消费水平降低,而2006年以后能源消费速度减缓,加之

科技技术正效应逐渐凸显,因此产出消费水平逐渐恢复,实际在2006年底,《陕西省节约能源条例》正式实施,整个省内广泛开展节能减碳行动,也取得了明显的成效。

2.2.2 发展系统水平 发展系统要素中,经济发展水平在波动中提高较快,社会发展水平呈现不稳定状态(图4)。2003—2007年,陕西经济发展水平和社会发展水平整体有所提高,但是波动比较剧烈,主要原因是一方面“量”型指标,如GDP、人均GDP、城市化率等增长较快,连续5a不断增长,推动整体水平提升,另一方面“构”型指标,如二产比重、三产比重、恩格尔系数等变动呈现不稳定状态,致使各年水平波动比较剧烈;2008年以后发展系统的变动趋势主要受全球金融危机的影响,陕西省地处内陆经济发展受金融危机影响较小,但是经济发展水平增长速度放缓,而社会发展受金融危机冲击较大,2008年城镇的登记失业率为3.91%,比2005年增长5.7%,整个省内失业率走高,就业压力增大,社会发展水平低迷,直到2010年才逐渐得到恢复。

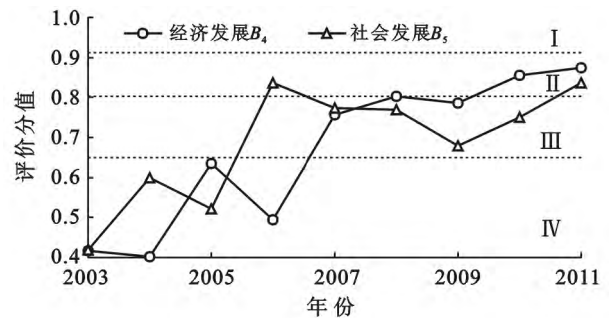


图4 发展系统要素层评价

2.2.3 综合水平 陕西省各年低碳经济发展相对状况:2003—2006年处于“差”级别,2007年处于“一般”级别,2008—2011年处于“良好”级别(图3)。在这

9 a中,2010年低碳经济发展水平绩效最好,接下来是2011,2008,2009,2007,2006,2005和2003年,2004年最差,这是低碳系统和发展系统互相作用的结果。2003—2006年陕西低碳经济发展处于起步阶段,受以前高碳、粗放经济发展模式的累计影响,整体发展水平表现为较差状况,此阶段内2004年为水平值拐点,根据突变模型内在原理,这是受2003年国内非典疫情滞后效应影响,此后低碳经济水平持续增长。这一阶段,陕西省低碳经济发展以企业率先发展低碳技术为主要特色,榆林天然气化工公司从2003年开始相继建成3套二氧化碳回收装置,成果突出,兴化集团、渭河煤化工公司等相继引进。2007年陕西低碳经济水平提升一层次,达到“一般”级别,在全国低碳经济分类中处于相对低碳区^[13],是其积极探索实践低碳经济的成效。2008—2011年省内低碳氛围初步形成,社会各界积极参与低碳建设活动,各种以低碳为主题的学术交流会、报告会接连不断。2010年8月,发改委将陕西省列为低碳试点省,低碳环保发展成为陕西经济工作的基本原则和价值取向。2011年,《陕西省低碳试点工作实施方案》上报发改委,方案中陕西省提出“十二五”和“十三五”低碳发展目标,并明确低碳发展的路线图。这些措施使陕西省低碳经济的发展渐入轨道,其优势与成果凸显出来,此阶段陕西省低碳经济水平处于“良好”级别。

2.2.4 协调水平 由协调度计算值可以看出,研究期内陕西省低碳系统与发展系统处于拮抗期,而耦合协调度的变化特征与低碳经济综合水平变化一致(图3,图5)。

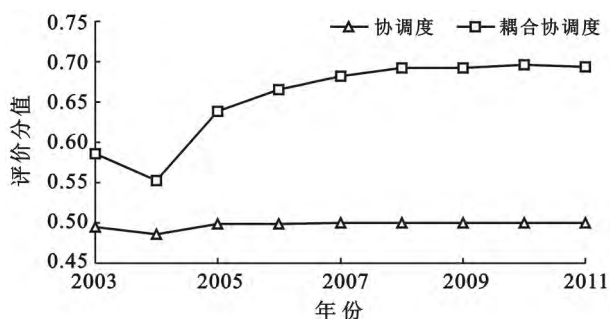


图5 陕西省低碳经济发展协调性评价

2003—2011年,低碳系统与发展系统的协调度值在0.48与0.50之间变化,表明两系统处于拮抗期,意味着陕西省发展社会经济的同时,又要考虑减排,两大系统相互博弈。2003—2006年协调度均值为0.4945,而2007—2010年其值为0.4999,依据协调度值的变化趋势,可以预估“十二五”期间其值有望突破0.5,两大系统会进入基本协调期。利用SPSS

19.0软件对耦合协调度和低碳经济综合水平进行相关性分析,二者相关系数为0.9991,在0.01置信水平下相关性显著,证明协调好低碳系统与发展系统关系,做好对二者的投资工作,对陕西省低碳经济综合水平提升意义重大。

3 结论

(1) 陕西省低碳经济水平综合得分趋势线的拐点出现在2004年,即2004年综合得分最低,是以前采取高碳、粗放发展模式的累计结果,而后水平有所提升并持续增长,是积极实践低碳发展模式的成果;陕西省低碳经济发展进程中,生态和环保是进步明显和优势的要素,产业结构和能源结构变动不稳定,技术对低碳经济的正效应逐渐凸显出来;研究期内陕西省低碳经济发展处于拮抗期,“十二五”期间,低碳系统和发展系统有望进入基本协调期,进而给低碳经济发展带来强大动力。

(2) 低碳系统和发展系统的协调性直接影响低碳经济的发展质量,相比传统的系统评价模型追求均衡发展,采用突变级数模型使得两系统发展过程中的变化更加明显、更加直观,更容易被发现。同时仅对陕西省低碳系统和发展系统的水平以及协调性进行评价是不够的,还需要对不同区域进行研究,检验研究结果的普遍性。只有通过更深更广的研究,才能使所得结果更加准确,从而更好地为我国低碳经济发展所用。

(3) 研究发现目前陕西低碳经济水平处于“良好”等级,但是本研究为相对低碳评价,即相对于2003—2010年,2011年低碳经济水平“良好”,并不意味着陕西省低碳经济已处于绝对的“良好”,陕西省应进一步努力,在已取得成绩基础上,按照低碳转型路线图,积极调整经济结构、开展省内试点、发展低碳技术,争取“十二五”期间低碳经济再上一台阶。

[参考文献]

- [1] 付加峰,庄贵阳,高庆先. 低碳经济的概念辨识及评价指标体系构建[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(8): 38-43.
- [2] Nader S. Paths to a low-carbon economy: The Masdar example[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 3951-3958.
- [3] Dagoumas A S, Barker T S. Pathways to a low-carbon economy for the UK with the macro-econometric E3MG model[J]. Energy Policy, 2010, 38(6): 3067-3077.
- [4] Foxon T J. A coevolutionary framework for analysing a transition to a sustainable low carbon economy[J]. Ecological Economics, 2011, 70(12): 2258-2267.

- [5] Gomi K, Shimada K, Matsuoka Y. A low-carbon scenario creation method for a local-scale economy and its application in Kyoto City[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(9): 4783-4796.
- [6] Hughes N, Strachan N. Methodological review of UK and international low carbon scenarios[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(10): 6056-6065.
- [7] Böhringer C, Rutherford T F. Transition towards a low carbon economy: A computable general equilibrium analysis for Poland[J]. *Energy Policy*, 2013, 55(1): 16-26.
- [8] Babiker M H. Climate change policy, market structure, and carbon leakage[J]. *Journal of International Economics*, 2005, 65(2): 421-445.
- [9] Sperling D, Yeh S. Toward a global low carbon fuel standard[J]. *Transport Policy*, 2010, 17(1): 47-49.
- [10] Vatalis K I, Laaksonen A, Charalampides G, et al. Intermediate technologies towards low-carbon economy: The Greek zeolite CCS outlook into the EU commitments[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(5): 3391-3400.
- [11] 付加锋, 郑林昌, 程晓凌. 低碳经济发展水平的国内差异与国际差距评价[J]. *资源科学*, 2011, 33(4): 664-674.
- [12] 李晓燕. 基于模糊层次分析法的省区低碳经济评价探索[J]. *华东经济管理*, 2010, 24(2): 24-28.
- [13] 张欣, 赵涛. 基于 DEA 的我国省级区域低碳经济的效率评价研究[J]. *西安电子科技大学学报: 社会科学版*, 2011, 21(5): 61-67.
- [14] 杨颖. 四川省低碳经济发展效率评价[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(6): 52-56.
- [15] 白雪勤, 孙文生. 低碳经济评价方法及实证分析[J]. *广东农业科学*, 2012, 48(7): 218-220.
- [16] 郑林昌, 付加锋, 李江苏. 中国省域低碳经济发展水平及其空间过程评价[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(7): 80-85.
- [17] 唐笑飞, 鲁春霞, 安凯. 中国省域尺度低碳经济发展综合水平评价[J]. *资源科学*, 2011, 33(4): 612-619.
- [18] 李磊, 韩雪莹. 省域低碳经济发展分类及评价研究[J]. *数学的实践与认识*, 2012, 42(18): 34-42.
- [19] 王怡. 基于突变级数法的中国低碳经济复杂系统综合评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(5): 525-532.
- [20] 唐志鹏, 刘卫东, 周国梅, 等. 基于突变级数法的中国 CO₂ 减排的影响要素指标体系及其评价研究[J]. *资源科学*, 2009, 31(11): 1999-2005.
- [21] 谷松林. 突变理论及应用[M]. 甘肃兰州: 甘肃教育出版社, 1993.
- [22] 武克军, 王小鹏, 施亚岚, 等. 基于突变级数法的甘肃省生态环境敏感度评价[J]. *人民黄河*, 2010, 32(10): 11-13.
- [23] 魏婷, 朱晓东, 李杨帆. 基于突变级数法的厦门城市生态系统健康评价[J]. *生态学报*, 2008, 28(12): 6312-6320.
- [24] 王卉彤, 王妙平. 中国 30 省区碳排放时空格局及其影响因素的灰色关联分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(7): 140-145.
- [25] 何逢标. 综合评价方法的 Matlab 实现[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2010.
- [26] 潘文砚, 王宗军. 基于协调度模型的低碳竞争力评价指标体系研究[J]. *情报杂志*, 2012, 31(10): 76-82.
- [27] 刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 中国城市化与生态环境耦合度分析[J]. *自然资源学报*, 2005, 20(1): 105-112.
- [28] 赵媛, 沈璐. 江苏省能源与经济系统协调发展评价[J]. *地理科学*, 2012, 32(5): 557-561.

(上接第 304 页)

- [16] 榆林市编纂委员会. 榆林市志[M]. 陕西西安: 三秦出版社, 1996.
- [17] 朱震达, 吴正, 刘恕, 等. 中国沙漠概论[M]. 修订版. 北京: 科学出版社, 1980.
- [18] 赵景波, 马延东, 邢闪, 等. 腾格里沙漠宁夏中卫沙层含水量研究[J]. *山地学报*, 2010, 28(6): 653-659.
- [19] 王力, 邵明安, 侯庆春. 土壤干层量化指标初探[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(4): 87-90.
- [20] 赵景波, 王长燕, 岳应利, 等. 西安地区人工林土壤干层与水分恢复研究[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(6): 890-895.
- [21] 赵景波, 张冲, 董治宝, 等. 巴丹吉林沙漠高大沙山粒度成分与沙山形成[J]. *地质学报*, 2011, 85(8): 1389-1398.
- [22] 赵景波, 牛俊杰, 杜娟, 等. 咸阳市三原县新庄不同植被土层含水量研究[J]. *地理科学*, 2008, 28(2): 247-252.
- [23] 赵景波, 顾静, 杜娟. 关中平原第 5 层古土壤发育时的气候与土壤水环境研究[J]. *中国科学(D 辑): 地球科学*, 2008, 38(3): 364-374.
- [24] 赵景波, 王长燕, 邢闪. 陕西省洛川县第 3—4 层黄土和古土壤水分特征研究[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(4): 10-15.
- [25] 赵景波, 马延东, 邢闪, 等. 腾格里沙漠宁夏回族自治区中卫市沙层水分入渗研究[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(3): 13-16.