

碳排放约束下中国西部地区环境效率评价*

容建波¹ 严力蛟^{1**} 黄绍荣² 章戈³

(¹浙江大学生命科学院生态规划与景观设计研究所, 杭州 310058; ²浙江省余姚市环境保护局, 浙江余姚 315400; ³佐治亚理工学院地理信息系统中心, 美国佐治亚州亚特兰大 30308)

摘要 利用基于非期望产出的SBM模型测度分析了2000—2012年西部大开发以来中国西部地区在碳排放约束条件下的静态环境效率,同时运用Malmquist指数分析了环境效率的动态变化趋势,最后利用Tobit回归模型进行回归分析,分析了环境效率的相关影响因素,并提出了促进西部地区环境提升的可行建议。结果表明:碳排放约束下的西部地区环境效率明显低于无碳排放约束下的环境效率,两者之间的差距呈先增大后缩小的倒“U”型关系;在碳排放约束下,广西、内蒙古一直处于相对有效状态,而贵州、甘肃、青海、宁夏、新疆一直处于非有效状态,且效率值普遍偏低,其中宁夏的效率值只有0.281~0.386,一直处于最低水平;西部地区的环境效率虽然普遍处于非有效状态,但环境质量呈逐年好转趋势,年平均提高6.6%;西部地区环境效率损失的最主要原因是过多的CO₂排放量和能源消费量,能源强度对环境效率具有最大程度的负向影响;进出口贸易总额的增加显著降低了环境效率,而外商直接投资的增加则对环境效率的提高有积极作用。

关键词 环境效率; 碳排放; SBM模型; 中国西部

文章编号 1001-9332(2015)06-1821-10 中图分类号 Q14; X196 文献标识码 A

DOI:10.13287/j.1001-9332.20150413.010

Environmental efficiency evaluation under carbon emission constraint in Western China.

RONG Jian-bo¹, YAN Li-jiao¹, HUANG Shao-rong², ZHANG Ge³ (¹*Institute of Ecological Planning and Landscape Design, College of Life Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China*; ²*Yuyao Environmental Protection Bureau, Yuyao 315400, Zhejiang, China*; ³*Center for Geographic Information Systems, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30308, USA*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2015, 26(6): 1821-1830.

Abstract: This research used the SBM model based on undesirable outputs to measure the static environmental efficiency of Western China under carbon emission constraint from 2000 to 2012. The researchers also utilized the Malmquist index to further analyze the change tendency of environmental efficiency. Additionally, Tobit regression analysis was used to study the factors relevant to environmental efficiency. Practical solutions to improve environmental quality in Western China were put forward. The study showed that in Western China, environmental efficiency with carbon emission constraint was significantly lower than that without carbon emission constraint, and the difference could be described as an inverse U-shaped curve which increased at first and then decreased. Guang-xi and Inner Mongolia, the two provinces met the effective environmental efficiency levels all the time under carbon emission constraint. However, the five provinces of Guizhou, Gansu, Qinghai, Ningxia and Xinjiang did not. Furthermore, Ningxia had the lowest level of environmental efficiency, with a score between 0.281-0.386. Although the environmental efficiency of most provinces was currently at an ineffective level, the environmental efficiency quality was gradually improving at an average speed of 6.6%. Excessive CO₂ emission and a large amount of energy consumption were the primary factors causing environmental inefficiency in Western China, and energy intensity had the most negative impact on the environmental efficiency. The increase of import and export trade reduced the environmental efficiency significantly in Western China, while the increase of foreign direct investment had a positive effect on its environmental efficiency.

Key words: environmental efficiency; carbon emission; SBM model; Western China.

* 农业部面源污染控制重点开放实验室项目(KYJD09021)资助。

** 通讯作者。E-mail: yanlj@zju.edu.cn

2014-07-29 收稿, 2015-04-01 接受。

环境效率,也叫生态效率^[1]。关于环境效率的概念,世界可持续发展工商委员会(WBCSD)提出的概念得到了广泛认可,即:环境效率是指通过提供能满足人类需求和提高生活质量的竞争性定价商品和服务,同时使整个生命周期的环境影响与资源强度降低到至少与地球的估计承载相一致的水平^[2]。对于环境效率,国内外学者已做过大量相关研究,主要集中在评价指标体系、评价方法以及实际应用等方面。

在评价指标体系研究方面,Höh等^[3]在德国环境经济账户的设计中,设计了土地、能源、原材料、水、温室气体、酸性气体、劳动力、资本等作为投入要素的环境效率宏观层次评价指标;国内学者如诸大建等^[4]、余幸幸等^[5]参考德国环境经济账户的研究,结合我国实际构建了一套环境效率评价的指标体系,并进行了实证研究;周国梅等^[6]针对具体的工业行业研究认为,工业环境效率的指标体系应包括能源强度指标、原材料强度指标、污染物排放指标3方面内容;刘晶茹等^[7]从结构、功能、过程等多方面构建了生态产业园的环境效率评价指标体系。我国针对不同区域、行业虽然已有不少关于环境效率评价指标的研究与应用,但关于环境变量的指标多以“废水、废气(SO₂)、固体废弃物”等为衡量标准,忽略了碳排放这一指标,没有很好地适应当前低碳发展的时代需求。

环境效率测算方法研究方面,主要有生命周期法(life cycle assessment, LCA)^[8]、多准则决策法(multiple criteria decision making, MCDM)^[9-10]、随机前沿分析法(stochastic frontier analysis, SFA)^[11]、距离函数法(distance function)^[12]以及数据包络分析法(data envelopment analysis, DEA)等。由于DEA方法在评价具有多投入和多产出指标的相似决策单元(decision making unit, DMU)的相对效率方面具有很好的优势,近年来已被广泛地运用到各个层面的环境效率研究上来。例如Korhonen等^[13]运用DEA方法中不同投入、产出导向的CCR模型比较测算了欧洲24家电力企业的环境效率,并提出改善意见;Aldanondo-Ochoa等^[14]利用DEA方法测算了西班牙Navarre有机农业的技术效率和环境效率,定量得出了在相同的环境影响下,有机农业比传统农业更有效;Zhou等^[15]基于不同的DEA模型,评价比较了全球8个地区的环境效率。国内学者中,刘巍等^[16]运用DEA方法中的CCR模型分析了中国24家生态工业园的环境效率,并为园区的环境调控提出了量

化调整意见;杨斌^[17]利用DEA模型从宏观角度测算了2000—2006年中国的区域环境效率,得出了粗放型经济增长方式是区域环境效率的制约因素之一;王俊能等^[18]运用DEA模型与Malmquist指数,分别从动、静两方面测度了中国31个省(区、市)的环境效率,并分析了相关影响因素。

在应用研究中,随着理论研究的不断深入,行业^[19]、企业^[13, 20]层面的环境效率研究逐渐成为热点,但宏观的区域、省际研究^[15, 17-18, 21-22]仍是主要的研究方向,特别是在国内企业层面数据缺失或难以获得的情况下。但是在国内的区域研究中,对中国西部这一特定区域的研究相对较少。

中国西部地区自2000年实施西部大开发战略以来,经济实力得到了快速增长,然而,经济高速增长带来的环境压力也日益突出,特别是东部地区高能耗、高污染产业不断向西部转移,使得西部地区成为“高碳”经济发展区^[23]。在低碳经济、绿色发展的趋势下,如何摆脱“先污染后治理”的传统发展模式,促进西部地区的低碳绿色可持续发展值得学术界思考。在已有的研究中,唐小力等^[24]、常建新等^[25]、张雪梅^[26]分别选用不同的评价指标和方法测算了西部地区的环境效率,但是没有把“碳排放”作为评价因子纳入到环境效率评价体系中。2014年国务院批转的《关于2014年深化经济体制改革重点任务的意见》中明确指出,要研究制定全国碳排放权交易管理办法,进一步管理、减少国家碳排放量。因此,在节能减排的宏观背景下,科学测度碳排放约束下西部地区的环境效率及其动态变化,定量研究其影响因素,将有助于西部地区有的放矢地制定经济发展政策、环保措施以及碳权交易政策,推动西部地区走上绿色可持续发展道路。因此,本文尝试在碳排放约束条件下,运用DEA方法分析西部大开发以来西部地区的环境效率。本文的西部地区指西部大开发涉及的重庆、四川、贵州、云南、广西、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆、内蒙等11省(区、市),因西藏数据缺失较多,不在此次研究范围内。

1 研究方法

1.1 传统的DEA方法

DEA是著名运筹学家Charnes等^[27]基于相对效率提出的一种分析方法。其具有不用确定生产过程的生产函数、所需评价指标相对较少、不需要统一指标单位、不需要人为确定指标权重,从而避免了主观因素的影响等优势^[28]。然而传统的DEA模型

(CCR、BCC) 要求产出尽可能地增加,投入尽可能地减少,是一种基于径向和角度的评价模型^[29]。而在现实的生产中往往会遇到一些非期望产出(undesirable outputs, 比如 CO₂ 等环境污染物),且希望这些非期望产出越少越好。此时,运用传统 DEA 模型具有很强的局限性。多数文献在处理非期望产出问题时,多是基于非期望产出与投入具有越少越好的共同特点,将非期望产出作为投入来进行 DEA 效率测算。但这与实际生产过程是不相符的,而且这种处理方式依旧不能很好地解决径向方法和角度选择所造成的投入、产出的松弛性问题,最终的评价结果是不准确的^[30]。

1.2 基于非期望产出的 SBM 模型

SBM(slack-based measure) 模型是 Tone^[31] 为解决具有非期望产出的效率评价问题提出的一种非径向和非角度的、基于松弛变量的测度模型。假定有 n 个 DMU,每个 DMU 都有 m 种投入、 s_1 种期望产出和 s_2 种非期望产出,投入、期望产出、非期望产出这 3 种投入、产出向量分别表示为: $X \in R^m, y^g \in R^{s_1}, y^b \in R^{s_2}$ 则可以定义如下矩阵:

$$\begin{aligned} X &= [x_1, \dots, x_n] \in R^{m \times n} \\ Y^g &= [y_1^g, \dots, y_n^g] \in R^{s_1 \times n} \\ Y^b &= [y_1^b, \dots, y_n^b] \in R^{s_2 \times n} \\ X > 0, Y^g > 0, Y^b > 0 \end{aligned}$$

在不变规模报酬情况下,可定义如下生产可能集 P :

$$P = \{ (x, y^g, y^b) \mid x \geq \lambda X, y^g \leq \lambda Y^g, y^b \geq \lambda Y^b, \lambda \geq 0 \} \text{ 其中权重向量 } \lambda \in R^n.$$

据此,基于非期望产出的 SBM 模型可表示为^[29]:

$$\rho^* = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{r=1}^{s_2} \frac{s_r^b}{y_{r0}^b} \right)} \quad (1)$$

$$s. t. \begin{cases} x_0 = \lambda X + s^- \\ y_0^g = \lambda Y^g - s^g \\ y_0^b = \lambda Y^b + s^b \\ s^- \geq 0, s^g \geq 0, s^b \geq 0, \lambda \geq 0 \end{cases}$$

式中: s 为投入、产出的松弛变量; s^- 、 s^b 分别表示投入、非期望产出的冗余; s^g 表示期望产出的不足; λ 为权重向量。目标函数 ρ^* 是关于任意 s^- 、 s^b 和 s^g 的严格单调递减函数,并且有 $\rho^* \in (0, 1]$ 。对于特定的 DMU,当且仅当 $\rho^* = 1$ 时,即 $s^- = s^b = s^g = 0$ 时,

DMU 是相对有效的,即 DMU 处于生产前沿面上。如果 $\rho^* < 1$,则说明 DMU 不在生产前沿面上,是相对无效的,存在着投入、产出的改善空间和必要性。

SBM 模型把松弛变量直接纳入到目标函数中,进而解决了松弛性的问题,也给具有非期望产出的效率评价带来了方便。刘勇等^[32] 对比分析不同的 DEA 模型表明,SBM 模型更能反映环境效率评价的本质。李静等^[33] 利用 SBM 模型,以环境污染物作为非期望产出测算了中国各省份、区域的环境效率。理论和实证研究表明,运用基于非期望产出的 SBM 模型评价区域环境效率是可行的,且有一定优势。因此,本文选用此 DEA 模型进行西部地区静态环境效率评估。

1.3 Malmquist 动态分析指数

SBM 模型测算得出的环境效率是一种静态的结果,无法从中得出时间序列上的动态变化。本文利用 Malmquist 指数来测算西部地区环境效率的动态变化情况。基于 DEA 方法的 Malmquist 指数是利用距离函数的比率来计算 DMU 的效率动态变化^[34]:

$$M_{t+1} = \left[\frac{D(x^{t+1}, y^{gt+1}, y^{bt+1})}{D(x^t, y^{gt}, y^{bt})} \times \frac{D^{t+1}(x^{t+1}, y^{gt+1}, y^{bt+1})}{D^t(x^t, y^{gt}, y^{bt})} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: x^t 、 x^{t+1} 分别表示 DMU 在 t 和 $t+1$ 时期的投入向量; y^{gt} 、 y^{gt+1} 分别表示 DMU 在 t 和 $t+1$ 时期的期望产出向量; y^{bt} 、 y^{bt+1} 分别表示 DMU 在 t 和 $t+1$ 时期的非期望产出向量; $D^t(x^t, y^{gt}, y^{bt})$ 、 $D^{t+1}(x^{t+1}, y^{gt+1}, y^{bt+1})$ 分别表示以 t 时期的技术为参照,DMU 在 t 和 $t+1$ 时期的距离函数; $D^t(x^t, y^{gt}, y^{bt})$ 、 $D^{t+1}(x^{t+1}, y^{gt+1}, y^{bt+1})$ 分别表示以 $t+1$ 时期的技术为参照,DMU 在 t 和 $t+1$ 时期的距离函数; M_{t+1} 表示 $t+1$ 时期 DMU 的环境效率跨期动态变化。当 $M_{t+1} > 1$ 时,环境效率增长,环境质量改善,且其数值越大,说明改善的程度越大;反之,则环境效率降低,环境恶化。

1.4 指标选取与数据来源

根据 DEA 方法的拇指法则,即 DMU 数量大于投入、产出指标数和的 2 倍,参考已有研究的投入、产出指标和本研究实际,本文的指标选取及数据来源如下:

投入指标: 鉴于研究的是环境效率,本文的投入指标选取与环境、资源、生产密切相关的能源消费总量、土地投入量以及资本投入表示。能源消费总量数据来源于相应年份的《中国能源统计年鉴》^[35] 中的“分地区能源消费总量”。土地投入量以建成区面积

表 1 各类能源的低位发热量和 CO₂ 排放因子Table 1 Low-calorific value and CO₂ emission factors of different energy sources

参数 Parameter	煤炭 Coal	焦炭 Coke	原油 Crude oil	汽油 Gasoline	煤油 Kerosene	柴油 Diesel oil	燃料油 Fuel oil	天然气 Natural gas
低位发热量 Low-calorific value (kJ · kg ⁻¹ , kJ · m ⁻³)	20908	28435	41816	43070	43070	42652	41816	38931
CO ₂ 排放因子 CO ₂ emission factors (kg · TJ ⁻¹)	94600	107000	73300	69300	71500	74100	77400	56100

表示,数据来源于相应年份的《中国统计年鉴》^[36]. 资本投入以不变价资本存量表示,由于中国没有关于资本存量的直接统计数据,本文参照张军等^[37]的研究,采用永续盘存法进行资本存量模拟,其基本公式为: $K_t = I_t + (1 - \delta) K_{t-1}$. 其中: K_t 表示 t 时期的资本存量; K_{t-1} 表示 $t-1$ 时期的资本存量; I_t 表示 t 时期的投资额; δ 表示折旧率. 以 2000 年为计算初始年,各省市在 2000 年的固定资本形成总额除以 10% 作为初始资本存量,以每年的固定资本形成总额表示当年投资量,并根据固定资产投资价格指数折算为以 2000 年为基年的不变价格,取 9.6% 的折旧率进行资本存量计算. 各相关数据均来源于相应年份的《中国统计年鉴》^[36].

期望产出:以地区生产总值 GDP 表示,并根据 GDP 平减指数^[38] 换算成以 2000 年为基年的不变价 GDP. 相应数据来源于《中国统计年鉴》^[36] 以及各省市统计年鉴.

非期望产出: 本文研究碳排放约束下的环境效率,因此选择 CO₂ 排放量作为非期望产出. 由于我国没有针对各省市的碳排放监测统计数据,本文参考《2006 年 IPCC 国家温室气体排放清单指南》^[39] 的估算方法,选取煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气等 8 种主要能源的终端消费量(能量值)与各自的 CO₂ 排放因子乘积之和来表示. 计算公式为: $m_{CO_2} = \sum_{i=1}^8 m_i \times QDW_i \times E_i$. 其中: m_{CO_2} 表示 CO₂ 排放量; m_i 表示各能源终端消费量 ($\times 10^4$ t, 亿 m³); QDW_i 表示各类能源的低位发热量 (kJ · kg⁻¹, kJ · m⁻³); E_i 表示各类能源的 CO₂ 排放因子 (kg · TJ⁻¹). 能源终端消费量以及低位发热量数据来源于相应年份的《中国能源统计年鉴》^[35], 各能源的 CO₂ 排放因子来源于《2006 年 IPCC 国家温室气体排放清单指南》^[39].

2 结果与分析

2.1 静态效率测算结果分析

根据上述指标数据,基于非期望产出的 SBM 模

型,利用 DEA-SOLVER 软件计算 2000—2012 年中国西部地区 11 个省(区、市)的静态环境效率. 为了与不含碳排放约束条件的环境效率进行比较,同时计算了不含 CO₂ 排放量的环境效率,结果如表 2.

2.1.1 总体效率评价 从图 1 可以看出,相对于不考虑碳排放的环境效率,考虑碳排放因素的西部平均环境效率值均有较大程度的降低,说明碳排放使环境效率有较多的损失. 在两种情况下,效率值分别在 0.783 ~ 0.830 及 0.698 ~ 0.758 之间波动,均没有达到 1,处于相对无效状态,说明我国西部地区的环境状况有很大的提升空间. 自西部大开发以来,我国西部地区碳排放约束下的环境效率与无碳排放约束的环境效率之间的差距呈先增大后缩小的倒“U”型关系,并以 2006 年为拐点可以划分为两个阶段: 2000—2006 年,两种情况下的环境效率差值呈缓慢扩大趋势,而在 2006 年后呈缓慢缩小趋势. 说明在实施西部大开发的头几年,西部地区在发展经济的过程中节能减排力度不够,经济发展与环境保护不够协调,使得两者之间的差距不断加大;而 2006—2010 年国家实施“十一五”规划,期间实施了节能减排强制措施,所以两者间的差距逐渐缩小,但也存在偶尔反弹的现象. 西部地区的节能减排等工作仍需要持之以恒的进行下去.

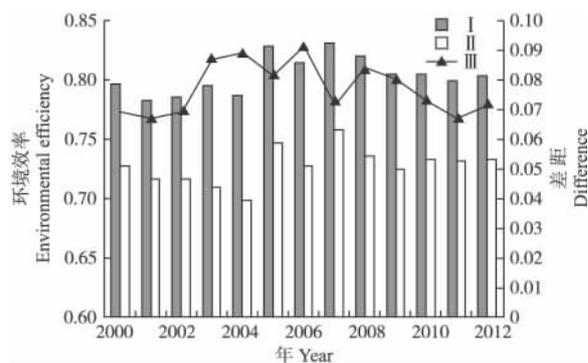


图 1 中国西部地区平均环境效率的变化

Fig. 1 Change of mean environmental efficiency in Western China.

I: 不考虑碳排放 Regardless of carbon emission; II: 考虑碳排放 Include carbon emission; III: 差距 Difference.

表 2 2000—2012 年中国西部地区环境效率

Table 2 Environmental efficiency value in Western China from 2000 to 2012

省份 Province		年份 Year												
		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
重庆	I	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.954	0.985	0.991	0.959	0.962	0.953	0.994
Chongqing	II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.886	0.956	0.967	0.928	1.000	1.000	1.000
四川	I	0.910	0.872	0.852	0.845	0.835	0.926	1.000	1.000	1.000	0.985	1.000	1.000	1.000
Sichuan	II	0.893	0.864	0.817	0.756	0.744	0.878	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
贵州	I	0.605	0.600	0.627	0.626	0.640	0.712	0.680	0.718	0.714	0.676	0.690	0.694	0.674
Guizhou	II	0.457	0.455	0.480	0.465	0.466	0.536	0.500	0.531	0.527	0.499	0.520	0.535	0.512
云南	I	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.913	0.887	0.845	0.857	0.858
Yunnan	II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.771	0.759	0.702	0.728	0.715
广西	I	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Guangxi	II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
陕西	I	0.879	0.818	0.823	0.869	0.844	0.949	0.919	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Shaanxi	II	0.752	0.719	0.717	0.734	0.676	0.851	0.742	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
甘肃	I	0.687	0.693	0.676	0.707	0.697	0.755	0.725	0.723	0.707	0.696	0.694	0.698	0.709
Gansu	II	0.530	0.544	0.531	0.538	0.529	0.579	0.557	0.556	0.542	0.541	0.546	0.555	0.551
青海	I	0.531	0.534	0.568	0.611	0.589	0.638	0.625	0.643	0.659	0.653	0.687	0.654	0.678
Qinghai	II	0.459	0.444	0.480	0.490	0.477	0.524	0.493	0.505	0.514	0.516	0.564	0.532	0.597
宁夏	I	0.494	0.470	0.468	0.444	0.418	0.445	0.423	0.418	0.416	0.412	0.408	0.387	0.384
Ningxia	II	0.386	0.352	0.349	0.313	0.297	0.317	0.301	0.298	0.295	0.292	0.292	0.284	0.281
新疆	I	0.649	0.626	0.625	0.645	0.625	0.687	0.630	0.639	0.612	0.579	0.566	0.543	0.533
Xinjiang	II	0.518	0.500	0.502	0.500	0.483	0.532	0.483	0.492	0.465	0.434	0.427	0.411	0.393
内蒙古	I	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Inner Mongolia	II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
均值	I	0.796	0.783	0.785	0.795	0.786	0.828	0.814	0.830	0.819	0.804	0.805	0.799	0.803
Average	II	0.727	0.716	0.716	0.709	0.698	0.747	0.724	0.758	0.735	0.724	0.732	0.731	0.732
方差	I	0.042	0.042	0.040	0.039	0.042	0.036	0.042	0.043	0.042	0.043	0.043	0.047	0.048
Variance	II	0.067	0.070	0.066	0.068	0.071	0.064	0.070	0.077	0.073	0.075	0.076	0.077	0.078

I: 不考虑碳排放 Not including carbon emission; II: 考虑碳排放 Including carbon emission.

2.1.2 省际环境效率差异分析 从表 2 可以看出,在碳排放约束下,只有广西、内蒙古一直处于效率前沿面上,具有相对较好的环境质量,而贵州、甘肃、青海、宁夏、新疆则一直处于非有效状态,且效率值普遍偏低,其中宁夏的效率值均低于 0.4,一直处于西部地区的最低水平,环境问题急需解决。云南省在 2000—2007 年处于相对有效状态,而在 2008—2012 年则偏离了有效前沿面,演变为相对无效状态,说明其他一些省(区、市)的环境质量改善提升的幅度比云南省大,并最终超越了云南省的环境效率。这在四川、陕西两省体现得最为明显。四川在 2005 年以前处在非有效前沿面上,而在 2006—2012 年提升为相对有效状态;陕西在 2000—2006 年一直处于无效状态,而在 2007 年以后则提升到了相对有效水平,说明期间两省均采取了有效的节能减排措施。对比分析表 2 中 I、II 的方差值,碳排放约束下的方差值均大于无约束条件下的方差值,即在约束条件下,西部地区省际间的环境效率差异程度加大并呈无规律的波动变化,表明各省(区、市)的环境治理成效存在

明显差异,地区间可以相互学习,共享环境治理技术和方法,共同促进环境改善。

2.1.3 投入、产出冗余率分析 DMU 处于相对无效状态是因为其相对于有效前沿面具有投入、非期望产出的多余,以及期望产出的不足,SBM 模型直接把松弛变量引入目标函数,可以很方便地得出非有效 DMU 的投入、产出冗余率,进而明确效率提升改进方向。本文以 2012 年为例进行投入、产出冗余率分析,计算结果如表 3 所示。

在碳排放约束条件下,贵州、云南、甘肃、青海、宁夏、新疆等 6 省(区、市)在 2012 年均处在非有效前沿面上,存在一定的效率损失。从表 3 可以看出,GDP 的冗余率均为 0,表明效率损失均不是由 GDP 的产出不足引起的,而是由投入要素和非期望产出的冗余引起的,提升西部地区环境效率应将减少单位 GDP 资源投入和污染产出作为重点。

把整个西部地区作为一个总体来看,致使其效率损失的最主要原因是过多的 CO₂ 排放和能源消费,表明西部地区能源利用与经济产出不协调,能源

表 3 2012 年中国西部地区投入、产出冗余率分析
Table 3 Analysis of input and output redundancy rate in Western China in 2012

省份 Province	效率得分 Efficiency score	投入冗余率 Input redundancy rate (%)			非期望产出冗余率 Undesirable output redundancy rate (%)	期望产出冗余率 Desirable output redundancy rate (%)
		资本 Capital	能源消费总量 Energy consumption	土地 Land	CO ₂ 排放量 CO ₂ emission	GDP
重庆 Chongqing	1.000	0	0	0	0	0
四川 Sichuan	1.000	0	0	0	0	0
贵州 Guizhou	0.512	29.7	53.3	10.8	68.8	0
云南 Yunnan	0.715	21.1	20.6	0	40.8	0
广西 Guangxi	1.000	0	0	0	0	0
陕西 Shaanxi	1.000	0	0	0	0	0
甘肃 Gansu	0.551	20.5	37.7	27.5	59.3	0
青海 Qinghai	0.597	34.5	60.1	0	29.2	0
宁夏 Ningxia	0.281	44.6	71.4	63.0	86.7	0
新疆 Xinjiang	0.393	45.8	55.4	37.8	73.3	0
内蒙古 Inner Mongolia	1.000	0	0	0	0	0
均值 Average	0.732	17.8	27.2	12.7	32.6	0
方差 Variance	0.078	352.3	836.8	451.3	1199.5	0

利用效率不高的问题较突出,需要改善和提高能源利用技术,减少 CO₂排放量;土地投入冗余率相对最低,只有 12.7%,在建设用地上相对紧张的时代出现土地投入冗余,一方面可能是西部地区地广人稀,可利用土地相对于东部地区要多,另一方面也说明西部地区存在一些土地不合理利用现象,土地资源存在一定程度上的过度开发或不必要开发;另外,资本投入也存在较多冗余,说明西部地区存在一定的资本利用不合理现象。

分省(区、市)来看,不同地区的投入、产出冗余率存在一定的差异。各省(区、市)的效率损失均是由于投入和非期望产出过多引起的。除青海外,其他省(区、市)效率损失的最主要原因都是 CO₂排放过多,其中宁夏表现得最为突出,其 CO₂排放冗余高达 86.7%,同时,宁夏的其他各项投入冗余率也相对较高,从而导致其环境效率值是 11 个省(区、市)中最低的。对于青海,冗余率最大的是能源消费总量,但其 CO₂排放冗余是西部地区中最低的,一定程度上说明青海在节能上表现不好,但在减排上相对于其他非有效区域要好。在非有效 DMU 中,只有云南和青海未出现土地投入冗余情况,说明这两个地区的土地资源利用较合理,而其他地区都需要强化土地资源管理,优化土地资源配。在资本投入上,6 个非有效地区均有不同程度的冗余,需要进行有效的资金整合与优化配置。总之,从整体和局部来看,能源消费量和 CO₂排放量过多是效率损失的两个最主

要因素,因此应该将节能减排作为重点来改善西部地区的环境质量。

2.2 环境效率动态变化分析

从表 4 可以看出,就整个西部地区而言,在碳排放约束下,其 Malmquist 指数均大于 1,且在 2006—2007 年达到最大值 1.098,说明西部大开发以来,西部地区的环境在逐年稳步地改善,其中 2006—2007 年进步最大,这与前文提到的在 2006 年开始实施国家“十一五”规划相一致。就各省(区、市)而言,西部大开发以来,其环境质量均得到了改善,其中内蒙古的提升幅度最大,达到 11%。结合前文,虽然宁夏每年的相对效率都是最低的,但其环境状况也正在得到逐年改善。对比 2008—2012 年四川、云南、陕西的 Malmquist 指数,四川、陕西两省的 Malmquist 指数值整体大于云南,说明四川、陕西两省环境改善的程度更大,一定程度上再次说明了四川、陕西的环境效率演变为相对有效,而云南由相对有效演变为相对无效。但是在整体环境提升的大背景下,也存在环境质量倒退的现象,如重庆在 2004—2005 年、云南在 2002—2003 年及 2004—2005 年、陕西在 2000—2001 年均出现了不同程度的环境倒退现象,虽然广西一直处于有效前沿面上,但在 2002—2003 年及 2003—2004 年也出现了一定的环境倒退。总体而言,随着西部大开发的实施,西部地区技术水平的提高,民众环保意识的加强,西部地区的环境状况正朝着良性的可持续发展方向逐步迈进。

表 4 2000—2012 年中国西部地区环境效率 Malmquist 动态变化指数

Table 4 Change of environmental efficiency in Western China based on Malmquist index from 2000 to 2012

省份 Province	年份 Year												均值 Average	方差 Variance
	2000— 2001	2001— 2002	2002— 2003	2003— 2004	2004— 2005	2005— 2006	2006— 2007	2007— 2008	2008— 2009	2009— 2010	2010— 2011	2011— 2012		
重庆 Chongqing	1.086	1.024	1.011	1.032	0.958	1.057	1.089	1.075	1.060	1.071	1.048	1.109	1.052	0.002
四川 Sichuan	1.062	1.053	1.065	1.099	1.098	1.172	1.080	1.063	1.059	1.076	1.079	1.073	1.082	0.001
贵州 Guizhou	1.076	1.076	1.071	1.126	1.066	1.069	1.164	1.083	1.007	1.116	1.062	1.009	1.077	0.002
云南 Yunnan	1.048	1.016	0.974	1.047	0.999	1.007	1.059	1.032	1.052	1.015	1.070	1.062	1.032	0.001
广西 Guangxi	1.070	1.023	0.999	0.997	1.041	1.081	1.053	1.074	1.067	1.019	1.033	1.058	1.043	0.001
陕西 Shaanxi	0.985	1.022	1.045	1.035	1.042	1.026	1.085	1.110	1.081	1.045	1.062	1.055	1.049	0.001
甘肃 Gansu	1.083	1.058	1.086	1.077	1.072	1.082	1.083	1.067	1.078	1.076	1.061	1.084	1.076	0.000
青海 Qinghai	1.037	1.103	1.062	1.089	1.039	1.066	1.107	1.128	1.084	1.141	1.047	1.100	1.084	0.001
宁夏 Ningxia	1.040	1.081	1.029	1.061	1.060	1.088	1.081	1.070	1.078	1.077	1.021	1.070	1.063	0.000
新疆 Xinjiang	1.064	1.070	1.076	1.083	1.078	1.026	1.092	1.034	1.026	1.052	1.018	1.044	1.055	0.001
内蒙古 Inner Mongolia	1.083	1.108	1.125	1.129	1.152	1.079	1.181	1.122	1.108	1.100	1.059	1.073	1.110	0.001
均值 Average	1.058	1.058	1.049	1.070	1.055	1.068	1.098	1.078	1.064	1.072	1.051	1.067	1.066	-
方差 Variance	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	-	-

2.3 环境效率影响因素分析

参考已有相关研究^[40-41]及数据的可获得性,本文选择能源强度、产业结构、经济强度、政府规制以及对外开放作为西部地区碳排放约束下的环境效率影响因素进行深入分析。各变量解释说明如表 5,数据来源于文献[35-36,42]及各地区统计年鉴。本文以环境效率值为因变量,影响因素为自变量进行回归分析,定量分析相关影响因素与环境效率的关系。因为环境效率处于 0~1 之间,属于受限因变量,因而本文采用 Tobit 回归模型进行回归分析,以 Eviews 7.0 为计算平台,计算结果如表 6 所示。

根据回归分析结果可知,在西部整体范围内:

1) 能源结构与环境效率具有极显著的负向相关性,能源强度每提高 1%,环境效率将下降 0.24%。2) 在产业结构方面,第三产业比重对环境效率具有负向影响,且通过 0.1 显著性水平检验,即第三产业比重

越大,环境效率越低,且其对环境效率的影响程度要大于工业比重对环境效率的影响;工业比重与环境效率负向相关,但没有通过显著性检验。3) 政府规制正向影响环境效率,说明西部地区的环境排污费征收等政府强制手段有助于环境效率的提高,但这并不显著,表明两者没有明显的相关关系,也可能是西部地区没有建立明确的碳权交易机制所引起。4) 人均 GDP 对环境效率的影响为正,但影响程度很小,且不显著。5) 在对外开放方面,进出口贸易总额对环境效率具有负效应,且通过了 0.01 水平的极显著性检验;而外商直接投资对环境效率具有 0.05 显著水平的正向效应。

表 6 环境效率影响因素 Tobit 回归结果

Table 6 Tobit regression results of the factors influencing the environmental efficiency

变量 Variable	相关系数 Correlation coefficient	Z 统计量 Z statistic	P	
能源强度 Energy intensity	-0.2436 ***	-11.4654	0.0000	
产业结构 Industry structure	第三产业 比重	-0.0146 *	-1.6875	0.0915
	工业比重	-0.0015	-0.2094	0.8341
政府规制 Government regulation	0.3326	0.4755	0.6345	
经济强度 Economic intension	4.41×10^{-6}	0.8607	0.3894	
对外开放 Opening-up	进出口贸易	-0.0122 ***	-3.1437	0.0017
	外商直接 投资	0.0500 **	2.2926	0.0219
常数 C Constant C	1.9907 ***	3.9022	0.0001	

* $P < 0.1$; ** $P < 0.05$; *** $P < 0.01$.

表 5 影响因素变量说明

Table 5 Description of influencing variables

变量 Variable	变量说明 Variable description	
能源强度 Energy intensity	能源消费总量/GDP 总量 (每万元 t 标准煤)	
产业结构 Industrial structure	第三产业 比重	第三产业生产总值/GDP 总 量(%)
	工业比重	工业生产生产总值/GDP 总量 (%)
政府规制 Government regulation	排污费收入/GDP 总量 (%)	
经济强度 Economic intension	人均 GDP(万元)	
对外开放 Opening-up	进出口贸易	进出口贸易总值/GDP 总量 (%)
	外商直接 投资	外商直接投资额/GDP 总量 (%)

3 讨论与建议

3.1 产业结构与环境效率

本研究得出第三产业比重与环境效率负向相关,这有悖于一般的理论预测,其原因可能在于西部地区为求在短期内提高地区经济水平,在经济发展过程中“重二产,轻三产”,致使西部地区第三产业企业总体规模相对较小,发展水平较低,处于粗放发展阶段,环保意识不强,也无法承担治理污染的成本投资,在一定程度上说明西部地区第三产业的低碳作用没有得到有效发挥,急需科技提升。这与李健等^[43]、刘广为等^[44]的研究结果相仿。工业比重与环境效率负向相关但没有通过显著性检验,与仲云云等^[41]在全国尺度下研究得出工业比重显著降低中国环境效率的结论有所不同。这是否意味着中国西部地区工业比重的增加不会降低环境效率值?本研究认为不显著的原因可能在于:在西部地区发展过程中,受东部地区发展经验的启示,西部地区逐渐意识到“先污染后治理”的不可持续性;同时,近年来的国家政策也注重对工业产业进行技术创新和改革,鼓励高污染、高能耗的工业企业向低污染、低能耗、高效率转变。也可能是西部地区工业比重的提高增加了污染物等非期望产出的同时,也增加了地区GDP等期望产出^[45],期望产出和非期望产出产生了一定的相互抵消,最终使得环境效率没有出现明显变化。西部地区产业结构对环境效率的影响机制有待深入的研究。

3.2 对外开放程度与环境效率

张伟等^[46]在长三角都市圈环境约束下的能源效率研究中得出,外商直接投资对环境效率具有负面影响,与本研究得出的结果相反。其原因可能在于,西部地区原本处于较低的生产水平,外商直接投资带来了先进的生产技术和经营理念,使得西部地区的生产效率有了显著提高,经济增加幅度大于污染增加幅度,从而提高环境效率。同时,西部地区在引进外资时注意将其引入到高科技、低污染产业,进行低碳集约生产。进出口贸易极显著降低环境效率主要是因为西部地区在对外贸易中尚处于经济链条的低端,主要负责来料加工与组装,技术含量低且能耗大。西部地区的出口商品以高能耗、低附加值的商品为主,进口商品则以低能耗、高附加值的商品为主。换言之,西部地区的对外贸易增长是以能源消耗和环境污染为代价的。

3.3 建议

本文针对中国西部地区的环境效率作了一些新的尝试研究,弥补了现有研究的不足,但环境效率评价是一项综合的系统工程,尚有许多工作有待深入研究:1) 研究空间有待拓展。本文只针对西部地区进行研究,没有与中国的其他区域进行比较分析,不能很好地发现西部地区与其他地区的差别所在;2) 没有深入分析引起环境效率动态变化的原因及作用大小,这有待在后续研究中进行分析。本文只考虑了CO₂一种污染物而忽略了其他污染物,后续研究中应优化评价模型,考虑多种污染物进行全要素环境效率评价。

对促进西部地区节能减排、区域低碳可持续发展提出以下政策建议:1) 西部地区在引进国内外先进技术的同时应加强本土技术创新,促使能源利用率在2012年的基础上提高27个百分点,同时降低出口产品的能耗,提升其附加值,使其从能耗型产品向科技型产品转变;2) 优化产业结构,淘汰高能耗、高污染产业,减少33%的CO₂排放量;3) 加快第三产业结构调整与优化升级,提升第三产业的规模和市场竞争力,使其真正发挥低碳产业的作用;4) 土地开发利用方面,应合理制定土地利用规划,控制利用规模,在2012年基础上减少12%的建设用地量;5) 在引进外国资本时,注意将其引入到高科技、低能耗产业。

参考文献

- [1] Li J (李静). Study on the Regional Difference of Eco-efficiency and Its Environmental Regulation. Beijing: Social Sciences Literature Press, 2012 (in Chinese)
- [2] Wang Y-C (王义琛), Wang Y (王远), Zhu X-D (朱晓东), et al. Eco-efficiency change and its driving factors in Tongling City of Anhui Province. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2011, 22(2): 460-466 (in Chinese)
- [3] Höh H, Schoer K, Seibel S. Eco-efficiency indicators in German environmental economic accounting. *Statistical Journal of the United Nations Economic Commission for Europe*, 2002, 19: 41-52
- [4] Zhu D-J (诸大建), Qiu S-F (邱寿丰). Eco-efficiency indicators and their demonstration as the circular economy measurement in China. *Resources and Environment in the Yangtze Basin (长江流域资源与环境)*, 2008, 17(1): 1-5 (in Chinese)
- [5] Yu X-X (余幸幸), Chen D-J (陈东景). Research of eco-efficiency indicators in China. *Economic Research Guide (经济研究导刊)*, 2013(1): 15-16 (in Chinese)

- [6] Zhou G-M (周国梅), Peng H (彭昊), Cao F-Z (曹凤中). Circular economy and industrial eco-efficiency indicator system. *Urban Environment and Urban Ecology* (城市环境与城市生态), 2003, **16**(6): 201–203 (in Chinese)
- [7] Liu J-R (刘晶茹), Lyu B (吕彬), Zhang N (张娜), et al. Definition and evaluation indicators of ecological industrial park's complex eco-efficiency. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2014, **34**(1): 136–141 (in Chinese)
- [8] Lozano S, Iribarren D, Moreira MT, et al. The link between operational efficiency and environmental impacts: A joint application of life cycle assessment and data envelopment analysis. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**: 1744–1754
- [9] Gómez-López MD, Bayo J, García-Cascales MS, et al. Decision support in disinfection technologies for treated wastewater reuse. *Journal of Cleaner Production*, 2009, **17**: 1504–1511
- [10] Montanari R. Environmental efficiency analysis for enel thermo-power plants. *Journal of Cleaner Production*, 2004, **12**: 403–414
- [11] Reinhard S, Knox Lovell CA, Thijssen GJ. Environmental efficiency with multiple environmentally detrimental variables; estimated with SFA and DEA. *European Journal of Operational Research*, 2000, **121**: 287–303
- [12] Wang B (王兵), Wu Y-R (吴延瑞), Yan P-F (颜鹏飞). Environmental efficiency and environmental total factor productivity growth in China's regional economics. *Economic Research Journal* (经济研究), 2010(5): 95–109 (in Chinese)
- [13] Korhonen PJ, Luptacik M. Eco-efficiency analysis of power plants: An extension of data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 2004, **154**: 437–446
- [14] Aldanondo-Ochoa AM, Casanovas-Oliva VL, Arandia-Miura A. Environmental efficiency and the impact of regulation in dryland organic vine production. *Land Use Policy*, 2014, **36**: 275–284
- [15] Zhou P, Ang BW, Poh KL. Measuring environmental performance under different environmental DEA technologies. *Energy Economics*, 2008, **30**: 1–14
- [16] Liu W (刘巍), Tian J-P (田金平), Li X (李星), et al. Studies on environmental performance of sector-integrate eco-industrial parks with data envelopment analysis. *Ecological Economy* (生态经济), 2012(7): 125–128 (in Chinese)
- [17] Yang B (杨斌). Research on regional eco-efficiency of China from 2000 to 2006: An empirical analysis based on DEA. *Economic Geography* (经济地理), 2009, **29**(7): 1197–1202 (in Chinese)
- [18] Wang J-N (王俊能), Xu Z-C (许振成), Hu X-B (胡习邦), et al. Analysis of environmental efficiencies and their changes in China based on DEA theory. *China Environmental Science* (中国环境科学), 2010, **30**(4): 565–570 (in Chinese)
- [19] Bi G, Wang P, Yang F, et al. Energy and environmental efficiency of China's transportation sector: A multidirectional analysis approach. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, **2014**: 1–12
- [20] Hahn T, Figge F, Liesen A, et al. Opportunity cost based analysis of corporate eco-efficiency: A methodology and its application to the CO₂-efficiency of German companies. *Journal of Environmental Management*, 2010, **91**: 1997–2007
- [21] Huang J, Yang X, Cheng G, et al. A comprehensive eco-efficiency model and dynamics of regional eco-efficiency in China. *Journal of Cleaner Production*, 2014, **67**: 228–238
- [22] Zhang XP, Li YF, Wu WJ. Evaluation of urban resource and environmental efficiency in China based on the DEA model. *Journal of Resources and Ecology*, 2014, **5**: 11–19
- [23] Hu Y-Y (胡玉莹). On China's energy consumption, CO₂ emission and sustainable growth. *Contemporary Finance and Economics* (当代财经), 2010(2): 29–36 (in Chinese)
- [24] Tang X-L (唐小力), Zhu D-B (祝东波). An empirical analysis of environmental efficiency in western regions of China using DEA. *Journal of Chongqing University of Technology* (Social Science) (重庆理工大学学报: 社会科学版), 2012, **26**(4): 25–29 (in Chinese)
- [25] Chang J-X (常建新), Yao H-Q (姚慧琴). An empirical analysis of environmental-economic efficiency in western regions of China: Based on undesirable SBM model. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University* (Social Science) (内蒙古农业大学学报: 社会科学版), 2011, **13**(5): 83–86 (in Chinese)
- [26] Zhang X-M (张雪梅). The evaluation and dynamic analysis of eco-efficiency: Based on panel data of western China's provinces 2000–2010. *Economic Theory and Business Management* (经济理论与经济管理), 2013(2): 78–85 (in Chinese)
- [27] Charnes A, Cooper WW, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 1978, **2**: 429–444
- [28] Yin K (尹科), Wang R-S (王如松), Zhou C-B (周传斌), et al. Review of eco-efficiency accounting method and its applications. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(11): 3595–3605 (in Chinese)
- [29] Cooper WW, Seiford LM, Tone K. *Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA*. 2nd Ed. Berlin: Springer, 2007
- [30] Pan D (潘丹), Ying R-Y (应瑞瑶). Agricultural eco-efficiency evaluation in China based on SBM model. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(12): 3837–3845 (in Chinese)
- [31] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 2001, **130**: 498–509
- [32] Liu Y (刘勇), Li Z-X (李志祥), Li J (李静).

- Comparative study on DEA methods of environmental efficiency measurement. *Mathematics in Practice and Theory* (数学的实践与认识), 2010, **40**(1): 84 - 92 (in Chinese)
- [33] Li J (李 静), Cheng D-R (程丹润). Eco-efficiency across regions in China based on DEA-SBM model. *Journal of Hefei University of Technology* (Natural Science) (合肥工业大学学报: 自然科学版), 2009, **32**(8): 1208 - 1211 (in Chinese)
- [34] Liu B-L (刘秉镰), Li Q-B (李清彬). The dynamic analysis of China's city TFP: 1990 - 2006, based on the Malmquist index and DEA model. *Nankai Economic Studies* (南开经济研究), 2009(3): 139 - 152 (in Chinese)
- [35] National Bureau of Statistics (国家统计局). China Energy Statistical Yearbook: 2001 - 2013. Beijing: China Statistics Press, 2001 - 2013 (in Chinese)
- [36] National Bureau of Statistics (国家统计局). China Statistical Yearbook: 2001 - 2013. Beijing: China Statistics Press, 2001 - 2013 (in Chinese)
- [37] Zhang J (张 军), Wu G-Y (吴桂英), Zhang J-P (张吉鹏). The estimation of China's provincial capital stock: 1952 - 2000. *Economic Research Journal* (经济研究), 2004(10): 35 - 44 (in Chinese)
- [38] Shen L-S (沈利生), Wang H-G (王火根). How does GDP affect its data revision deflator. *Journal of Quantitative & Technical Economics* (数量经济技术经济研究), 2008, **25**(5): 155 - 160 (in Chinese)
- [39] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Kanagawa: Institute for Global Environment Strategies, 2006
- [40] Wang Q-W (王群伟), Zhou P (周 鹏), Zhou D-Q (周德群). Research on dynamic carbon dioxide emissions performance, regional disparity and affecting factors in China. *China Industrial Economics* (中国工业经济), 2010(1): 45 - 54 (in Chinese)
- [41] Zhong Y-Y (仲云云), Zhong W-Z (仲伟周). China's regional total factor carbon emission performance and influencing factors analysis. *Journal of Business Economics* (商业经济与管理), 2012(1): 85 - 96 (in Chinese)
- [42] Ministry of Environmental Protection (国家环境保护部), National Bureau of Statistics (国家统计局). China Environmental Statistical Yearbook: 2001 - 2013. Beijing: China Statistics Press, 2001 - 2013 (in Chinese)
- [43] Li J (李 健), Zhou H (周 慧). Correlation analysis of carbon emission intensity and industrial structure in China. *China Population, Resources and Environment* (中国人口资源与环境), 2012, **22**(1): 7 - 14 (in Chinese)
- [44] Liu G-W (刘广为), Zhao T (赵 涛). The carbon emission intensity forecast and tertiary industry proportion inspection analysis in China. *Economic Management* (经济管理), 2012, **34**(5): 141 - 152 (in Chinese)
- [45] Zeng X-G (曾贤刚). Environmental efficiency and its determinants across Chinese regions. *Economic Theory and Business Management* (经济理论与经济管理), 2011(10): 103 - 110 (in Chinese)
- [46] Zhang W (张 伟), Wu W-Y (吴文元). Research on total factor energy efficiency of metropolitan regions of Yangtze River delta based on environmental performance. *Economic Research Journal* (经济研究), 2011(10): 95 - 109 (in Chinese)

作者简介 容建波,男,1988年生,硕士研究生.主要从事景观生态学、城市生态学、生态规划研究. E-mail: rongjianbo@zju.edu.cn

责任编辑 肖 红
