

基于双目标渐进法的中国省域生态文明发展水平评估研究

解钰茜, 张林波, 罗上华, 杨娇, 李芬, 王德旺

(中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 本文构建了包含 4 个领域、10 个目标、25 个指标的省域生态文明发展水平评估指标体系。在对比和改进现有数据标准化处理方法的基础上, 提出双目标渐进法对评价指标进行归一化处理, 并采用综合加权指数法对 2014 年我国的 31 个省、自治区、直辖市的生态文明发展水平进行评估。结果显示, 我国生态文明发展水平较低, 东南沿海地区生态文明发展水平高于中西部地区。总体来看, 目前我国整体经济社会建设成效显著, 但我国生态文明发展水平与预期目标及国际水平相比还有一定差距, 因此在生态环境保护、工业污染控制、产业优化和资源高效利用方面还需加强。

关键词: 生态文明发展水平; 省域生态文明评估; 双目标渐进法; 单目标渐进法; 极差标准化

中图分类号: X22 **献标识码:** A

Evaluating the Level of Provincial Ecological Civilization Development in China Using the Double-Benchmark Progressive Method

Xie Yuxi, Zhang Linbo, Luo Shanghua, Yang Jiao, Li Fen, Wang Dewang

(Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: To assess the level of provincial ecological civilization development in China, this work constructs an evaluation index system that includes four areas, 10 targets, and 25 specific indicators. Based on a comparison and improvement of existing data standardization methods, this study puts forward a double-benchmark progressive method as the standardization method, and adopts the comprehensive weighted-index method to evaluate the ecological civilization development level of China's 31 provinces (including provinces, autonomous regions, and municipalities). The results indicate that the ecological civilization development level in China is low, and that the ecological civilization development level of the southeastern coastal areas is higher than those of Central and Western China. In general, gaps still exist between China's ecological civilization development level, its expected level, and the global level. Although China has made remarkable achievements to date in terms of overall economic and social construction, it is necessary to further strengthen and pay attention to ecological environmental protection, industrial pollution control, industrial optimization, and efficient resource use.

Keywords: ecological civilization development level; provincial ecological civilization evaluation; double-benchmark progressive method; single-benchmark progressive method; maximum-difference normalization method

收稿日期: 2017-06-16; 修回日期: 2017-07-03

通讯作者: 张林波, 中国环境科学研究院, 研究员, 主要研究方向为生态文明建设、生态资产核算等; E-mail: zhanglb@craes.org.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“生态文明建设若干战略问题研究(二期)”(2015-ZD-16)

本刊网址: www.enginsci.cn

一、研究背景

针对可持续发展和生态文明建设情况的评估,国内外一些机构、学者已从不同视角、不同尺度开展研究,如中国省域生态文明建设评价研究 [1]、中国绿色发展指数研究 [2]、全球环境绩效指数(EPI)研究 [3]等。这些评价研究的指标覆盖广、综合性强,反映了不同国家、不同城市生态文明的发展状况,但在具体指标数据标准化评估方法上仍存在不足,如极差标准化和 Z-score 标准化方法仅限于数据的无量纲处理,处理后的数据无实际含义。本研究提出双目标渐进法的标准化方法,对比讨论了其与极差标准化和单目标渐进法的差异,并在此基础上对 2014 年我国 31 个省、自治区、直辖市(不包含香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾地区)的生态文明发展水平进行评估。

二、研究方法与数据来源

(一) 指标体系构建

本研究结合我国生态文明建设的总体目标,以生态环境质量改善为核心,兼顾经济、社会和环境领域的协调发展,遵守客观性、可行性、综合性、简明性和合理性原则,综合衡量生态文明建设各领域的整体协调程度,全面客观地评价整个经济社会的发展,构建包含 4 个领域、10 个目标、25 个指标的评估体系,对我国生态文明发展水平进行评估。具体指标体系见表 1。

(二) 评价方法及数据来源

本研究以 2014 年为评估年,以我国 31 个省、自治区、直辖市为评价单元。采用标准化方法进行

表 1 生态文明发展水平评估指标体系

领域层	目标层	指标层	单位	属性
绿色环境	生态状况指数	生态环境质量指数	—	正向指标
		环境质量指数		
	环境质量指数	环境空气质量	%	正向指标
地表水环境质量		%	正向指标	
绿色生产	产业优化指数	人均 GDP	元/人	正向指标
		第三产业增加值占 GDP 比重	%	正向指标
		研究与试验发展经费支出占 GDP 比重	%	正向指标
		资源效率指数		
	污染排放指数	单位建设用地 GDP	万元/km ²	正向指标
		单位工业增加值新鲜水耗	t/万元	负向指标
		单位 GDP 能耗	tce/万元	负向指标
		单位种植面积化肥使用量	t/hm ²	负向指标
		主要水污染物排放强度	t/km ²	负向指标
		主要大气污染物排放强度	t/km ²	负向指标
绿色生活	城乡协调指数	城镇化率	%	正向指标
		城镇居民人均可支配收入	元/人	正向指标
		城乡居民收入比例	—	负向指标
		农村卫生厕所普及率	%	正向指标
	城镇人居指数	村镇饮用水卫生合格率	%	正向指标
		人均公园绿地面积	hm ² /万人	正向指标
		建成区绿化覆盖率	%	正向指标
		绿色消费指数		
		人均生态足迹	全球公顷	负向指标
		污染治理指数		
绿色治理	污染治理指数	城市生活污水处理率	%	正向指标
		城市生活垃圾无害化处理率	%	正向指标
	建设绩效指数	环境保护投资占财政支出比重	%	正向指标
		环境信息公开率	%	正向指标
		自然保护区面积占比	%	正向指标

无量纲归一化处理,采用层次分析法对各层级指标赋予权重,并利用综合加权指数法对生态文明发展水平进行评估,最终将生态文明发展水平得分划分为5个等级,即A级($K \geq 90$)、B级($70 \leq K < 90$)、C级($60 \leq K < 70$)、D级($50 \leq K < 60$)和E级($K < 50$)。对评估指标中所涉及的社会经济指标的原始数据优先选择该年度中国统计年鉴、城市统计年鉴等统计数据,对环境保护、污染排放、污染治理等指标的原始数据优先选择该年度环境统计年鉴的统计数据及遥感数据、环境监测数据等行业统计数据,此外,对个别指标的原始数据则采用对

相关研究成果的引用,如生态环境质量指数、人均生态足迹等。权重及指标数据来源见表2。

综合加权指数法公式如下:

$$K = \sum_{j=1}^n W_i \cdot A_j \quad (1)$$

式(1)中, K 为综合评价指数,即生态文明发展指数; W_i 为各指标权重; A_j 为各指标标准化后值。其中,数据标准化方法参考现阶段评估研究普遍采用的方法,列举3种不同标准化方法,即极差标准化[5]、单目标渐进法[6]、双目标渐进法,并着重对标准化的方法及结果进行比较研究。极差法采

表2 权重及指标数据来源

领域层及权重	目标层及权重	指标层	单位	权重	数据来源	
绿色环境 (0.25)	生态状况指数 (0.5)	生态环境质量指数	—	1	利用遥感数据并参考《生态环境状况评价技术规范》(HJ192—2015)[4]相关计算方法得出	
		环境质量指数 (0.5)	环境空气质量	—	0.50	《中国环境统计年鉴》
绿色生产 (0.25)	产业优化指数 (0.4)	地表水环境质量	—	0.50	各省环境公报	
		人均GDP	元/人	0.40	国家统计局网站	
	资源效率指数 (0.3)	第三产业增加值占GDP比重	%	0.30	《中国城市统计年鉴》	
		研究与试验发展经费支出占GDP比重	%	0.30	各省统计年鉴	
	污染排放指数 (0.3)	单位建设用地GDP	万元/km ²	0.25	《中国统计年鉴》	
		单位工业增加值新鲜水耗	t/万元	0.25	各省统计年鉴	
		单位GDP能耗	tce/万元	0.30	《中国能源统计年鉴》	
		单位种植面积化肥使用量	t/hm ²	0.20	《中国环境统计年鉴》	
	绿色生活 (0.25)	城乡协调指数 (0.4)	主要水污染物排放强度	t/km ²	0.50	《中国环境统计年鉴》
			主要大气污染物排放强度	t/km ²	0.50	《中国环境统计年鉴》
城镇化率			%	0.20	《中国统计年鉴》	
城镇居民人均可支配收入			元/人	0.20	《中国统计年鉴》	
城镇人居指数 (0.4)		城乡居民收入比例	—	0.20	《中国统计年鉴》	
		农村卫生厕所普及率	%	0.20	《中国环境统计年鉴》	
绿色消费指数 (0.2)		村镇饮用水卫生合格率	%	0.20	《中国环境统计年鉴》	
		人均公园绿地面积	hm ² /万人	0.45	《中国环境统计年鉴》	
绿色治理 (0.25)	污染治理指数 (0.5)	建成区绿化覆盖率	%	0.55	《中国环境统计年鉴》	
		人均生态足迹	全球公顷	1	引用中国科学院地理科学与资源研究所和世界自然基金会相关研究数据	
	建设绩效指数 (0.5)	城市生活污水处理率	%	0.50	《中国环境统计年鉴》	
		城市生活垃圾无害化处理率	%	0.50	《中国环境统计年鉴》	
		环境保护投资占财政支出比重	%	0.30	《中国环境统计年鉴》	
环境信息公开率	%	0.30	引用环境保护部宣传教育中心数据			
自然保护区面积占比	%	0.40	《中国环境统计年鉴》			

用指标数据的最大、最小值作为归一化依据, 单目标渐进法选用每个指标的唯一目标值进行归一化处理, 双目标渐进法在单目标渐进法的基础上进行了改进, 选取设定不同目标值作为归一化依据, 具体标准化方法如下。

1. 极差标准化

极差标准化方法是对原始数据进行线性变换, 设 $\min X$ 和 $\max X$ 分别为属性 A 的最小值和最大值, 将 A 的一个原始值 x 通过 max-min 标准化映射成在区间 $[0,1]$ 中的值 X , 其具体公式如下:

$$A_{ij} = \begin{cases} \frac{X_{ij} - \min(X_{ij})}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} & (\text{当 } X_{ij} \text{ 为正向指标时}) \\ \frac{\max(X_{ij}) - X_{ij}}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} & (\text{当 } X_{ij} \text{ 为负向指标时}) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, A_{ij} 为第 i 年的第 j 个评价指标数据标准化后的值; X_{ij} 为第 i 年的第 j 个评价指标的原始值; $\max(X_{ij})$ 为第 i 年的第 j 个评价指标最大值; $\min(X_{ij})$ 为第 i 年的第 j 个评价指标最小值。

2. 单目标渐进法标准化

单目标渐进法标准化采用每个指标的唯一目标值作为参考, 通过每个指标趋近目标值的程度, 对相应指标的要求进行赋值(原理见图1), 其具体公式如下:

$$A_{ij} = \begin{cases} \frac{X_{ij}}{S(X_{ij})}, 0 \leq X_{ij} \leq S(X_{ij}) \\ 1, X_{ij} \leq S(X_{ij}) \end{cases} \quad (\text{当 } X_{ij} \text{ 为正向指标时}) \quad (3)$$

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{X_{ij} - S(X_{ij})}{S(X_{ij})}, X_{ij} \geq S(X_{ij}) \\ 1, 0 \leq X_{ij} \leq S(X_{ij}) \end{cases} \quad (\text{当 } X_{ij} \text{ 为负向指标时}) \quad (4)$$

当 $A_{ij} < 0$ 时, 取值为 0; 当 $A_{ij} > 100$ 时, 取值为 100。式(3)、式(4)中, A_{ij} 为第 i 年的第 j 个评价指标数据标准化后的值; X_{ij} 为第 i 年的第 j 个评价指标的原始值; $S(X_{ij})$ 为第 i 年的第 j 个评价指标标准值。

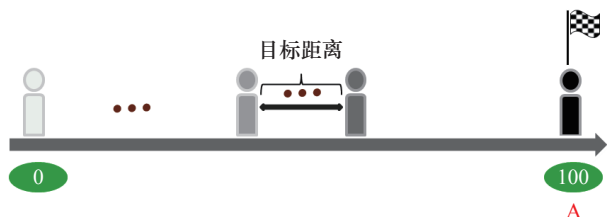


图1 单目标渐进法标准化方法原理图

3. 双目标渐进法标准化

双目标渐进法标准化在单目标渐进法的基础上进行了改进, 设定 2 个不同目标值作为参考, 通过每个指标趋近目标值的程度, 对相应指标进行赋值。两个目标值分别设定为 A 值和 C 值, A 值即指标通过标准化后可获得 90 分时所对应的数值, C 值即指标通过标准化后可获得 60 分时所对应的数值。A 值和 C 值的选择主要依据我国及各行业标准中的相关规定、国家相关规划或其他要求、国内外同发展水平城市的现状值, 如本次评估主要参考《国家生态文明建设示范县、市指标(试行)》(草案)《城市园林绿化评价标准》《生态县、生态市、生态省建设指标(试行)》《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》和《国家新型城镇化规划(2014—2020 年)》等文件, 及世界银行有关中高收入、高等收入国家的 2014 年数据, 具体目标值的选取见表 3。对于部分无法找到确切参考依据的指标, 将依据指标数据的统计学分布特征, 即选取各指标原始数据按顺序排列时, 位置在整体数据 60% 位置的数值作为 C 值、90% 位置的数值作为 A 值(原理见图 2)。其具体公式如下:

$$A_{ij} = \left[(X_{ij} - S_{C(X_{ij})}) \times \frac{(S_A - S_C)}{(S_{A(X_{ij})} - S_{C(X_{ij})})} + S_C \right] \times 0.01 \quad (5)$$

式(5)中, 当 $A_{ij} < 0$ 时, A_{ij} 取值为 0; 当 $A_{ij} > 100$ 时, A_{ij} 取值为 100。其中, A_{ij} 为第 i 年的第 j 个评价指标数据标准化后的值; X_{ij} 为第 i 年的第 j 个评价指标的原始值; $S_{A(X_{ij})}$ 为第 i 年的第 j 个评价指标标准值 A 值; $S_{C(X_{ij})}$ 为第 i 年的第 j 个评价指标标准值 C 值; S_A 为此评价指标标准值 A 值对应分数(90 分); S_C 为此评价指标标准值 C 值对应分数(60 分), $\frac{(S_A - S_C)}{(S_{A(X_{ij})} - S_{C(X_{ij})})}$ 为某一指标每增加(或减少)时对应赋分值的增加(或减少)。

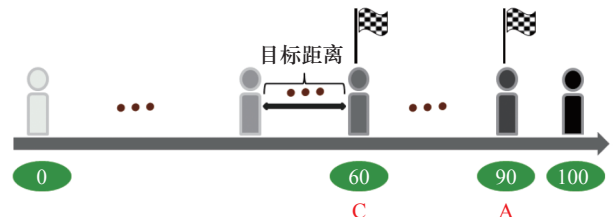


图2 双目标渐进法标准化方法原理图

三、结果与讨论

(一) 不同评价方法评估结果对比及分析

本研究对 3 种标准化评估结果进行对比, 以评估研究中普遍采用的极差法作为参照, 分别对比单目标渐进法和双目标渐进法的差异, 结果对比见表 4、表 5。

从 3 种标准化方法的计算原理来看, 极差标准化等主要以数学原理为依据的标准化方法仅对指标原始数据进行无量纲的归一化处理, 即计算出每个数据在各自评估数据范围内的定位 (顺序), 但处理后的数据无实际含义。而目标渐进法由于参考国内行业标准、规划目标值、国际同水平值等相关指标要求, 或直接给定了每个指标的实际目标值, 且本研究首次提出的双目标渐进法定义

了 $\frac{(S_A - S_C)}{(S_{A(x_j)} - S_{C(x_j)})}$ 值 (见评价方法中“双目标渐进法”公式), 即指标原始数值每增加 (或减少) 多少, 对应标准化后所得分数增加 (或减少) 多少, 也就是规定了指标原始值与标准化值的变化关系, 故此方法在满足无量纲化数据处理的同时兼具实际得分情况, 可判定最终评估结果得分能否反映实际生态文明的发展水平, 或是否符合我国或世界相应的发展水平。双目标渐进法还提出了指标目标值在无规定的参考要求时如何选取目标值, 即可以根据每个指标数据统计学分布特征设定目标值, 解决了目标渐进法评估中指标目标值的取值问题。

从 3 种标准化方法计算评估结果的数据统计学特征来看, 生态文明发展水平各省平均值以双目标渐进法评估的得分最高, 其次是单目标渐进法、极

表 3 目标值的选取

类型	指标	单位	A 值	C 值
国家或行业标准	环境空气质量	%	85	60
	地表水环境质量	%	85	70
	农村卫生厕所普及率	%	95	60
	村镇饮用水卫生合格率	%	95	60
	环境信息公开率	%	80	50
	自然保护区面积占比	%	20	14.8
	单位 GDP 能耗	tce/万元	0.2	0.7
	城市生活污水处理率	%	95	85
	城市生活垃圾无害化处理率	%	95	85
	人均公园绿地面积	hm ² /万人	13	7.5
	建成区绿化覆盖率	%	40	36
	单位种植面积化肥使用量	t/hm ²	0.25	0.5
	国家相关规划	研究与试验发展经费支出占 GDP 比重	%	2.5
国内外城市类比	城镇化率	%	80	60
	人均 GDP	元/人	60 000	30 000
	第三产业增加值占 GDP 比重	%	60	40
	城镇居民人均可支配收入	元/人	18 000	53 000
统计学特征	生态环境质量指数	—	80	50
	单位建设用地 GDP	万元/km ²	60 000	30 000
	单位工业增加值新鲜水耗	t/万元	20	50
	环境保护投资占财政支出比重	%	3	1
	主要水污染物排放强度	t/km ²	1	3
	主要大气污染物排放强度	t/km ²	0.5	6.5
	城乡居民收入比例	—	1.5	2.5
	人均生态足迹	全球公顷	1	2

表4 三种标准化方法评估结果对比

评价等级	极差标准化		单目标渐进法		双目标渐进法	
	数量 / 个	平均值 / 分	数量 / 个	平均值 / 分	数量 / 个	平均值 / 分
A	1	85.29	0	—	0	—
B	2	71.38	0	—	2	71.93
C	8	63.30	9	64.50	13	64.21
D	10	54.94	19	56.26	15	54.93
E	10	44.87	3	47.99	1	49.07

差标准化法; 3种方法计算得出的平均值与中位值之差均较小, 其中, 以双目标渐进法的计算结果之差最小。从评估结果的分布情况来看, 极差标准化法计算结果的数据离散度较大, 数据分布区间为38.05~85.29分, 单目标渐进法计算结果的数据离散度较小, 数据分布区间为47.34~69.85分, 双目标渐进法计算结果的数据离散度适中, 数据分布区间为49.07~73.79分。

从单目标渐进法、双目标渐进法与极差标准化法计算结果的各省生态文明发展水平排名来看, 3种方法评估结果排名趋势相似, 以极差标准化法为参照, 分别对比其与单目标渐进法、双目标渐进法评估结果排名的变动情况, 其中单目标渐进法的平均名次变化(上升或下降)为3.81, 双目标渐进法的平均名次变化(上升或下降)为2.90。

综上所述, 目标渐进法比普遍采用的极差标准化方法得出的指标归一化结果更具有实际意义, 且双目标渐进法比单目标渐进法更具科学性。

(二) 基于双目标渐进法的生态文明发展水平评估结果分析

本研究最终选取双目标渐进法对2014年我国31个省、自治区、直辖市生态文明发展水平进行评估, 评估结果见表6。结果显示, 2014年我国生态文明发展水平平均得分为59.73, 属于D级, 其中, 没有生态文明发展水平达到A级的地区, 生态文明发展水平达到B级的仅有浙江省和广东省2个地区, 占全国国土面积的2.97%; 达到C级的地区, 有14个, 包括福建省、海南省等地区, 占全国国土面积的23.45%; 达到D级的地区有14个, 包括江苏省、内蒙古自治区等, 占全国国土面积的69.08%; 达到E级的城市有1个, 为甘肃省, 占全国国土面积的4.50%, 可以看出, 2014年我国占国土面积70%以

表5 三种标准化方法评估结果统计学特征

评价等级	极差标准化	单目标渐进法	双目标渐进法
平均值 / 分	55.89	57.85	59.73
中位数 / 分	54.74	58.09	59.82
最大值 / 分	85.29	69.85	73.79
最小值 / 分	38.05	47.34	49.07
离散度	8.28	4.42	5.34

上的地区生态文明发展水平得分未及格(60分以下为未及格)。总体来看, 我国生态文明发展水平较低。

从空间分布情况看, 我国东南沿海地区生态文明发展水平略高于中西部地区。从4个评价领域层来看(见图3和表6), 各省、自治区、直辖市平均绿色生活得分较高, 为71.24分, 绿色生产得分较低, 为53.25分; 其中, B级地区除绿色治理领域得分较低, 其他领域得分均超过70分, 发展较为均衡; C级地区的绿色生活得分较高, 绿色环境和绿色治理得分均在60~70分, 但绿色生产得分较低, 是该地区的突出短板; D级地区除绿色生活得分在60分以上, 其他领域得分均为60分以下; E级城市4个领域得分均较低, 导致该地区生态文明发展水平最低。此外, 从评价指标体系中的10个目标层来看(见图3), 各省、自治区、直辖市城镇人居指数、环境质量指数和污染治理指数平均得分均较高, 分别为82.31分、72.65分和70.52分, 但污染排放指数、建设绩效指数、资源效率指数平均得分均较低, 分别为42.22分、49.11分和50.71分。综上所述, 我国生态文明发展水平与我国预期目标及国际水平还有一定差距, 虽然在社会经济生活方面有一定基础, 其中一些一线城市已达到国际中高收入或高收入国家的水平, 我国整体经济社会建设成效显著, 但在生态环境保护、工业污染控制、产业优化、资源高效利用方面还需进一步加强, 以实现生态文明建设各领域的均衡发展。

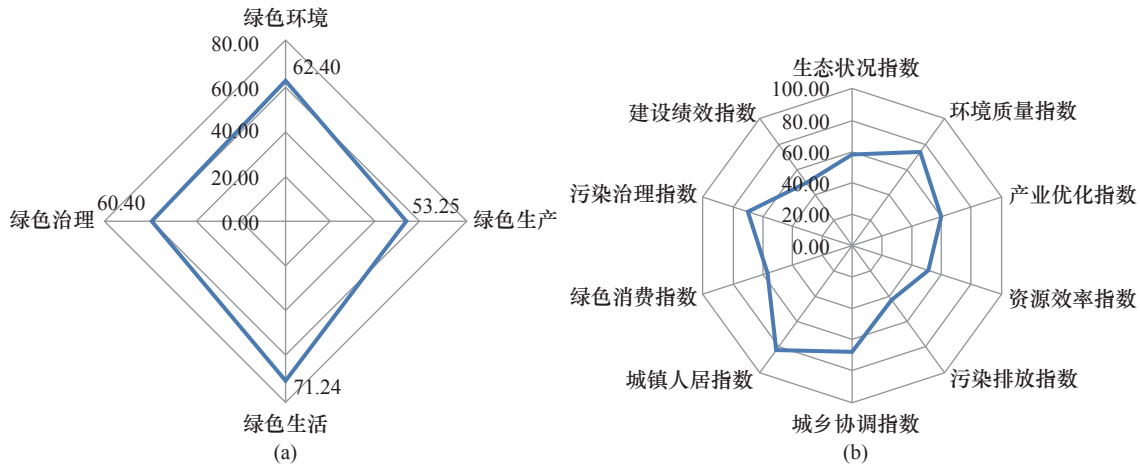


图3 各领域层和目标层雷达图

表6 各评价等级生态文明发展指数及各领域得分

评价等级	数量 / 个	面积占比 / %	绿色环境 / 分	绿色生产 / 分	绿色生活 / 分	绿色治理 / 分	生态文明发展水平 / 分	备注
B	2	2.97	79.89	71.98	77.47	59.72	71.93	浙江省、广东省
C	14	23.45	66.95	56.11	73.98	63.81	63.90	福建省、海南省等
D	14	69.08	55.63	48.83	68.48	57.60	54.58	江苏省、内蒙古自治区等
E	1	4.50	58.55	37.59	58.90	53.21	49.07	甘肃省
平均值			62.40	53.25	71.24	60.40	59.73	

参考文献

[1] 严耕, 吴明红, 樊阳程, 等. 中国省域生态文明建设评价报告 (ECI 2015) [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2015.
Yan G, Wu M H, Fan Y C, et al. Annual report on China's provincial ecological civilization index (ECI 2015) [M]. Beijing: Social Sciences Academic Press (China), 2015.

[2] 北京师范大学经济与资源管理研究院, 西南财经大学发展研究院, 国家统计局中国经济景气监测中心. 2014中国绿色发展指数报告: 区域比较 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
School of Economics and Resource Management of Beijing Normal University, Institute of Development Studies of SWUFE, China Economic Monitoring & Analysis Center of National Bureau of Statistics of the PRC. 2014 China green development index report: Regional comparison [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2014.

[3] 董战峰, 张欣, 郝春旭. 2014年全球环境绩效指数(EPI)分析与思考 [J]. 环境保护, 2015, 43(2): 55-59.
Dong Z F, Zhang X, Hao C X. Analysis and thoughts on 2014 environmental performance index [J]. Environmental Protection, 2015, 43 (2): 55-59.

[4] 中华人民共和国环境保护部. 生态环境状况评价技术规范 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015.
Ministry of Environmental Protection of the PRC. Technical regulations of ecological environment assessment [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2015.

[5] 胡永宏, 贺思辉. 综合评估方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
Hu Y H, He S H. Comprehensive assessment method [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2000.

[6] 董战峰, 郝春旭, 李红祥, 等. 2016年全球环境绩效指数报告分析 [J]. 环境保护, 2016, 44(20): 52-57.
Dong Z F, Hao C X, Li H X, et al. Analysis of the environmental performance index: 2016 report [J]. Environmental Protection, 2016, 44(20): 52-57.