DOI: 10.5846/stxb201302270311
赖玢洁,田金平,刘巍,刘婷,陈吕军.中国生态工业园区发展的环境绩效指数构建方法.生态学报,2014,34(22):6745-6755.
Lai B J,Tian J P, Liu W,Liu T, Chen L J.Environmental performance index for eco-industrial park development in China.Acta Ecologica Sinica,2014,34(22):6745-6755.

中国生态工业园区发展的环境绩效指数构建方法

赖玢洁[1],田金平[1,*],刘 巍[1],刘 婷[1],陈吕军[1,2]
(1. 清华大学环境学院,北京 100084;
2. 浙江省水质科学与技术重点实验室,浙江清华长三角研究院生态环境研究所, 嘉兴 314006)

摘要:运用多目标排序方法构建了中国生态工业园区发展环境绩效指数,以量化比较生态工业园区间的环境绩效。首先基于《综合类生态工业园区标准》筛选构建环境绩效评价指标体系,包括经济发展、资源能源消耗、污染排放 3 个准则层;其次应用标准化方法和正态分布的累积分布函数 NORMDIST 依次对各项指标原始数据进行 2 次数据处理;最后准则层、指标层均等权重进行归一化得到环境绩效指数。应用所构建的环境绩效指数方法以 2010 年为基准年,分析了 24 家综合类国家生态工业示范园区的绩效,并将《综合类生态工业园区标准》作为虚拟的"标准园区"进行比较。分析了环境绩效指数的影响因素,并基于环境绩效指数方法对中国生态工业示范园区发展的管理决策提出了建议。

关键词:生态工业园区;环境绩效;环境绩效指数;多目标排序

Environmental performance index for eco-industrial park development in China

LAI Binjie[1],TIAN Jinping[1,*], LIU Wei[1],LIU Ting[1], CHEN Lüjun[1,2]
1 *School of Environment Tsinghua University*, *Beijing* 100084, *China*
2 *Key Laboratory for Water Science and Technology of Zhejiang Province*, *Laboratory of Ecological and Environment*, *Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University*, *Jiaxing* 314006, *China*

Abstract: This study establishes the Environmental Performance Index (EPI) for eco-industrial park development in China by applying multi-criteria ranking method. First, an indicator system is established by referring to the Standard for Sector-integrate Eco-industrial Park. The indicator system includes eight indicators, which are classified into three categories, the indicators of economic development, resource and energy consumption, and pollution discharge. Second, a two-step normalization method is used to transform the original values of different indicators. Third, an equal weight method is applied for aggregation. The EPIs of the 24 national demonstration eco-industrial parks are analyzed and ranked with 2010 as the reference year. We suppose a standard eco-industrial park by referring to the Standard for Sector-integrate Eco-industrial Park. The key factors crucial to EPI are investigated, which include industrial structure, development stage of the eco-industrial park, and the type of the eco-industrial parks. The industrial structure of the eco-industrial park, moreover, the pillar industries of the park usually play a significant role on the EPI. The development stage of the eco-industrial park is the second key factor for the EPI. The accredited national demonstration eco-industrial parks generally have better EPIs than the eco-industrial parks on trial. The third important factor crucial to the EPI is the type of the industrial park. Overall, the EPI of the eco-industrial parks retrofitted from high-tech industrial development zone is better than those retrofitted from economic and technological development zone. At last, the policy implication based on ranking the EPI of the 24 eco-industrial parks is discussed. The standard eco-industrial park supposed above, which is designated an EPI of 60, is ranked

基金项目:环保公益性行业科研专项"生态工业园区发展低碳经济的评价体系、推行模式与综合示范"(201009059)
收稿日期:2013-02-27; **网络出版日期**:2014-03-14

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: tianjp@ tsinghua.edu.cn

along with the 24 eco-industrial parks by comparing the EPI respectively. We find that 23 of the 24 eco-industrial parks have better EPI than that of the standard eco-industrial park. The Standard for Sector-integrate Eco-industrial Park is still at a low level compared with most national high-tech industrial development zones and national economic and technological development zones that have accredited as the national demonstration eco-industrial parks. In addition, some industrial parks that have homed to the industries having intensive energy and water consumption, such as steel, chemical industry, and textile dyeing and finishing, do not achieve the same good EPI as the high-tech industrial development zones or economic and technological development zones. However, they have greatly improved technologies of cleaner production and are devoted to pollution control, and thus should also be encouraged and honored for eco-industrial park development. The management of the eco-industrial parks should be classified carefully according to the categories and stage of development thereof. The indicator system underling the EPI of eco-industrial park in this study is open, and new indicators could be added with the continuously development of eco-industrial park, by the two-step normalization method proposed. The EPI method can be used to quantitatively evaluate the performance of industrial parks and promote the eco-industrial park development in China.

Key Words: eco-industrial park; environmental performance; environmental performance index; multi-criteria ranking

中国生态工业园区(Eco-industrial park,EIP)发展已逾十年[1-2]。截止 2014 年 8 月,共建成 26 个国家生态工业示范园区,59 个开发区通过规划论证正在创建国家生态工业示范园区。中国生态工业园区分为三类,综合类园区、行业类园区和静脉类生态工业园区。已建成和在建的 85 个 EIP 中,有 71 个是综合类生态工业园区,占 84%;在通过验收的 26 个 EIP 中,23 个为综合类生态工业园区。综合类生态工业园区在现阶段中国生态工业园区建设中占主导地位。“十八大”将生态文明建设提升到前所未有的高度,国家生态工业示范园区建设是工业领域建设生态文明的重要载体。生态工业园区建设的环境绩效的客观评价对于进一步推进中国生态工业园区的发展具有重要的应用价值和实际意义。中国生态工业园区建设目前仍缺乏对其环境绩效通用的量化评价方法。《综合类生态工业园区标准(HJ274—2009)》及“关于发布《综合类生态工业园区标准》(HJ 274—2009)修改方案的公告”提出的 9 项基本条件和 24 项指标仅是目前园区创建国家生态工业示范园区的达标要求,为判断性指标(不低于或不高于),且多项指标为定性要求或主观指标,据此标准难以量化比较同类型园区(如综合类生态工业示范园区)的发展绩效。通过指标体系或环境绩效指数方法是解决这一问题的两类重要方法。如何构建和应用环境绩效指数来分析中国生态工业示范园区的发展现状并提出政策建议是本研究重点解决的问题。本研究基于《综合类生态工业园区标准》,提出国家生态工业示范园区环境绩效指数构建方法,以量化评价中国生态工业园区发展的环境绩效,以 2010 年为基准年分析了 24 家综合类国家生态工业示范园区的环境绩效指数,开展横向比较,并基于《综合类生态工业园区标准》的相关指标虚拟一个“标准园区”与 24 家综合类生态工业园区进行对比。进一步分析了环境绩效指数的影响因素,为管理决策部门推进国家生态工业示范园区建设提供决策支撑和政策建议。

1 文献综述

环保部针对生态工业园区建设出台了三类标准,包括相应的基本条件和指标体系。其中《综合类生态工业园区标准(HJ274—2009)》[3] 包括 9 项基本要求,指标体系由 24 项指标构成,分为经济发展、物质减量与循环、污染控制、园区管理四大类。通过建立指标体系评估园区环境绩效面临的一个主要问题是无法对园区的综合绩效进行评价,也难以对园区间进行横向量化比较。且该标准仅是生态工业园区建设必须达到的最低要求,不能对生态工业示范园区的环境绩效进行进一步评估。国内一些学者从不同角度对工业园区的环境绩效、生态效率等开展了研究,一些代表性研究结果的比较见表 1。

表 1　国内学者关于工业园区效率的评价方法比较

Table 1　Examples on efficiency assessment of industrial parks

指标体系评价重点 Targets of indicator system	指标确定原则 Indicators selection principles	指标体系内容 Contents of indicator system	指标值确定 Valuing of indicators
生态工业园运行效率[4]	考虑指标体系的实际价值，通用性，在不同园区运用的可比性	分经济运行、资源转化、污染减排、生态工业特征和园区管理 5 个准则层,共 27 项指标	定量指标采用距离指标采用打分方法
高新工业园区生态效率[5]	根据已有文献中的指标进行统计,专家评定指标重要性并排序择优	分资源消耗类和环境影响 2 类共 6 项指标(单位工业增加值综合能耗、新鲜水耗、废水产生量、固废产生量、COD 排放量、SO_2 排放量)	根据生态效率的概念模型和指数评价计算公式,确定评价模型的指标值
基于生态效率的工业园区循环经济指标体系[6]	基于《综合类生态工业园区标准》和《节约能源法》,舍去难以量化的指标,从经济、环境、资源、循环四个方面建立指标体系	分经济发展、资源能源利用率、环境污染控制和物质循环利用 4 个准则层共 8 项指标	采用 TOPSIS(理想解法)作为评价方法,距离综合评价法,需标准值参照

表 1 所列文献针对园区效率评价构建指标体系,通过距离模型、专家打分、理想解法等方法对指标赋值,量化评估园区的绩效[4-7]。这些方法均是主观建立指标体系和确定筛选原则,但并没有结合中国生态工业园区发展实际,也没有针对国家生态工业示范园区进行分析。本研究基于环保部公布的《综合类生态工业园区标准(HJ274—2009)》及“关于发布《综合类生态工业园区标准》(HJ 274—2009)修改方案的公告”,构建生态工业园区环境绩效指数,从而量化评价中国国家生态工业示范园区。绩效指数方法是在评价指标体系基础上,进一步对园区间的综合绩效进行量化比较的方法。

目前,绩效指数方法在国家和地区层面可持续发展评价、开发区投资环境评价等方面已有应用实例。耶鲁大学建立了全球国家环境绩效指数(Environmental Performance Index,简称 EPI)方法,每年发布各国的环境绩效指数[8];耶鲁大学、哥伦比亚大学、香港城市大学、中国环保部环境规划院联合发布了中国省级环境绩效指数[9];商务部建立了国家级经济技术开发区投资环境综合评价指数[10]。表 2 为这 3 个代表性案例指数构建方法的比较。

表 2　基于指数方法的区域层面发展绩效案例对比

Table 2　Comparison of environmental performance index cases

绩效指数 Performance index	指数发布机构 Institution	指标体系 Indicator system	指标数据来源 Data source	指数计算方法 Index calculation method	指标权重赋值 Weight assignment
全球国家环境绩效指数	耶鲁大学环境法律与政策研究中心	2 个层面 22 项指标	政府统计数据,研究机构或国际组织收集的资料,监测数据,模型模拟数据	对数变换法+接近目标法+加权平均法	基于层次分析法
中国省级环境绩效指数	耶鲁大学、哥伦比亚大学、香港城市大学和中国环境保护部环境规划院	3 个层面 24 项指标	《中国环境统计年鉴》、《中国统计年鉴》、《海域使用管理报告》等	接近目标法+加权平均法	基于层次分析法
国家级经济技术开发区投资环境综合评价指数	中国商务部	8 个层面 97 项指标	开发区管委会全部相关部门	极差归一法+加权平均法	基于层次分析法

构建绩效指数方法,指标的选取、指标权重赋值及指数计算方法是 3 个最核心的问题。对比表 2 中 3 种指数的构建方法,其均包括两级指标体系,权重分配均采用层次分析方法,但指数计算方法各有不

同。全球国家环境绩效指数和中国省级环境绩效指数主要采用接近目标法,其前提是各项指标设定一个恰当的政策预期目标。国家级经济技术开发区投资环境综合评价指数使用极差归一法,即将指标原始数据集合等比例变换至 0—100 的范围内。

2 生态工业园区环境绩效指数构建方法

图 1 为本研究提出的生态工业园区发展的环境绩效指数的构建步骤和方法。

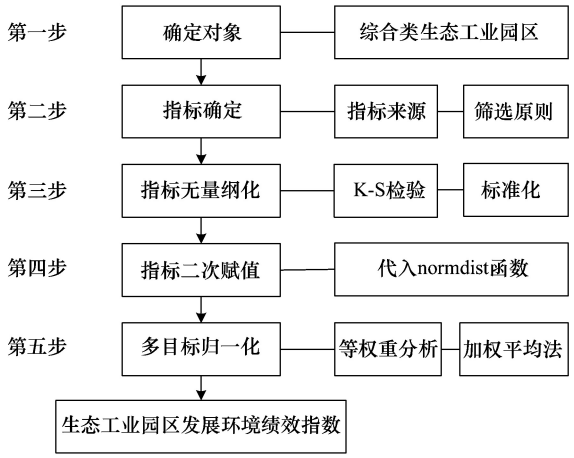


图 1 生态工业园区发展环境绩效指数的构建方法

Fig.1 Schematic diagram of environmental performance index establishment for eco-industrial park development

综合类生态工业园区在现阶段中国生态工业园区建设中占主导地位,本研究以综合类生态工业园区为讨论对象。

2.1 指标确定

指标体系是构建生态工业园区环境绩效指数的基础。本研究指标筛选基于《综合类生态工业园区标准(HJ274—2009)》,提出以下原则筛选生态工业园区发展的环境绩效指标:

(1)现阶段生态工业园区建设仍以经济发展为驱动,通过转变发展方式提高园区的资源能源效率和产出率,减少污染物产生量和排放量,指标体系应兼顾经济发展指标、资源能源消耗指标和环境指标;

(2)指标以反映园区经济、环境明确特性的量纲化的定量指标为主,不包括定性描述指标;

(3)环境绩效指数衡量一年期静态的绩效,指标选择侧重状态量而非时间相关量;

(4)指标数据可量化、易获取,不包括以百分数表达的相对定量指标。

《综合类生态工业园区标准(HJ274—2009)》包括 9 项基本条件和 24 项指标,基本条件对于工业园区申报创建国家生态工业示范园区十分重要,所有的在建或已验收命名的国家生态工业示范园区均需满足基本条件,基本条件以定性描述为主,即各样本的指标值相同,均为“达到”。根据最小均方法,即使该指标反应了非常重要的方面,但各样本的赋值相同时,在构建指数体系时它们需被去掉[11]。因此生态工业园区建设的 9 项基本条件未纳入指数构建系统。

24 项指标中,“综合能耗弹性系数、新鲜水耗弹性系数、COD 排放弹性系数、SO_2排放弹性系数”均为时间相关量,本研究未将其纳入指数构建系统中。

“废物收集和集中处理能力、环境管理制度与能力、园区编写环境报告书情况”均为定性指标,各国家生态工业示范园区这些指标的赋值几乎相同,这些指标在本研究中也未纳入指数构建系统中。

“工业用水重复利用率、工业固体废物综合利用率、危险废物处置率、生活污水集中处理率、生活垃圾无害化处理率、生态工业信息平台的完善度、重点企业清洁生产审核实施率、公众对环境的满意度、公众对生态工业的认知率”均为百分值表征的、设定了最低目标线的相对定量指标,本研究中这些指标也未纳入指数构建系统。经过筛选,表 3 为本研究构建环境绩效指数的 8 项基础指标,分为经济发展、资源能源消耗和污染排放三类。

表 3 所示的 8 项指标中,第 1、2 项为正向指标,指标值越大表示绩效越好;第 3—8 项指标为负向指标,指标值越小表示绩效越好。

2.2 指标无量纲化

表 3 各指标的性质、量纲和数量级不同,构建指数时需对原始指标值进行规范化处理[6],即无量纲化处理。常用的无量纲化方法有接近目标法[8-9]、百分位法[12]、标准分界法[13]、极差归一化变换法[14]、标准化方法[14]等。表 2 中全球国家环境绩效指数和中国省级环境绩效指数实例均采用接近目标法。《综合类生态工业园区标准(HJ274—2009)》对表 3 中 1—8 项指标给出了标准值,但其仅是达标的最低要求,实际上很多国家生态工业示范园区的指标都优于相应标准值,因此标准值并不适于作为目标值,即基于标准值的接近目标法不适用于生态工业园区

环境绩效指数构建。

表 3　生态工业园区环境绩效指数构建基础指标及权重分配

Table 3　Indicators for environmental performance index establishment and weight allocation of the indicators

序号 Entry	指标 Indicators	单位 Units	类别 Categories	指标层权重 Weight of indicators
1	人均工业增加值	万元/人	经济发展	1/6
2	单位工业用地工业增加值	亿元/km^2	(1/3)	1/6
3	单位工业增加值综合能耗	tce/万元	资源能源消耗	1/6
4	单位工业增加值新鲜水耗	m^3/万元	(1/3)	1/6
5	单位工业增加值废水产生量	t/万元	污染排放	1/12
6	单位工业增加值固废产生量	t/万元	(1/3)	1/12
7	单位工业增加值 COD 排放量	kg/万元		1/12
8	单位工业增加值 SO_2 排放量	kg/万元		1/12

不论采用哪种无量纲化方法,一个重要的前提是无量纲化所选用的转化公式要根据客观事物的特征及所选用的统计分析方法确定,这一方面要求能尽量客观地反映指标实际值与事物综合发展水平间的对应关系,另一方面也要符合统计分析的基本要求[15]。

当原始数据呈正态分布时,通常采用标准化方法对数据进行无量纲化处理[15]。根据中心极限定理,当样本数足够多时,标准化后的数据也服从标准正态分布[16]。上述无量纲化方法中,相对于百分位变换法,标准化方法更精细,能准确反映原始数据间的差异;相对于标准分界法,标准化方法变换后的数据在大样本情况下服从正态分布;相对于极差归一化方法,标准化方法能避免异常数据的影响。当生态工业园区的样本数量越多时,用标准化方法进行无量纲化就越精确。

图 1 中,在对指标数据进行无量纲化时,需先对其进行 K-S 检验,验证其是否满足正态分布。满足正态分布的前提下,按以下步骤进行无量纲化处理:

设 p 维向量 $X=(X_1,X_2,\cdots X_p)$ 的观测值矩阵为(A)所示

$$X=\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} \quad (A)$$

式中,x_{np}表示第 n 个园区的第 p 项指标。

标准化变换后的观测值矩阵如(B)所示:

$$X=\begin{bmatrix} x^*_{11} & x^*_{12} & \cdots & x^*_{1p} \\ x^*_{21} & x^*_{22} & \cdots & x^*_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x^*_{n1} & x^*_{n2} & \cdots & x^*_{np} \end{bmatrix} \quad (B)$$

式中,x^*_{np}表示 x_{np} 标准化之后的值,其计算方法见式(1):

$$x^*_{ij}=\frac{x_{ij}-\overline{x_j}}{\sqrt{s_j}} \quad i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,p \quad (1)$$

式中,$\overline{x_j}$为变量 x_j 的观测值的平均值,s_j 为变量 x_j 的观测值的方差,$\sqrt{s_j}$ 为标准差,$\overline{x_j}$ 与 s_j 的计算方法见式(2)和(3):

$$\overline{x_j}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_{ij} \quad (2)$$

$$\sqrt{s_j}=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_{ij}-\overline{x_j})^2} \quad j=1,2,\cdots,p \quad (3)$$

表 2 中第 1—8 项指标,$\overline{x_j}$ 可用《综合类生态工业园区标准(HJ274—2009)》中的标准值代替。在标准化过程中,式(1)与式(3)可表达为:

$$x^*_{ij}=\frac{x_{ij}-x^0_j}{\sqrt{s_j}} \quad (4)$$

$$\sqrt{s_j}=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_{ij}-x^0_j)^2} \quad (5)$$

式中,x^0_j 为第 j 项 指标在《综合类生态工业园区标准(HJ274—2009)》中的标准值。当园区的指标刚好达到标准值时,标准化变换后其重新赋值为 0;当园区的指标值大于标准值时,经标准化变换后其重新赋值为正;反之,为负。

对于正向指标,直接按式(4)—(5)进行标准化变换;对于负向指标,需在原始数据基础上乘以-1。经过标准化变换之后,矩阵 X^* 各列的均值均为0,标准差均为1。

2.3 指标二次赋值

按2.2标准化方法进行变换后,数据统一为无量纲状态。根据《综合类生态工业园区标准(HJ274—2009)》评价,生态工业园区各项指标的表现只有达标与不达标之分,其评价示意可用图2表示。其中标准分界线表示标准值,标准分界线右侧表示达到和超过标准值,即为达标区;左侧表示未达到标准值,即不达标区。

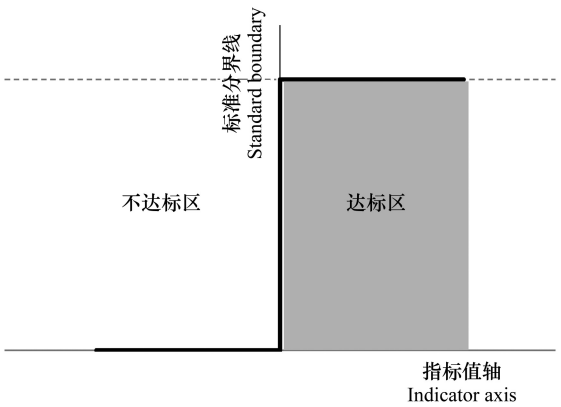


图2 基于《综合类生态工业园区标准》的评价示意图

Fig.2 Schematic diagram of performance assessment based on the Standard for Sector-integrate Eco-industrial Park

图2的方法无法区分达标园区之间的绩效梯度,也无法区分未达标园区绩效持续改善的变化。为优化原有的评价系统,进一步区分不同园区各项指标的绩效表现,在无量纲化基础上,需对每一项指标进行二次赋值。一种方法是采用等比例梯度评价进行二次赋值(图3),以量化区分不同园区的绩效表现。

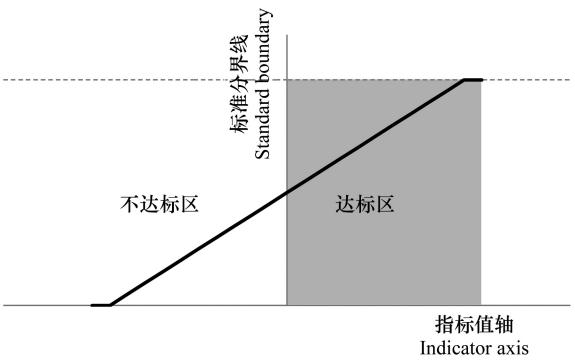


图3 梯度评价方法对指标二次赋值示意图

Fig.3 Schematic diagram of reassignment on indicators by the gradient assessment method

图3的方法对标准化后的指标值进行等比例转化,但其仍无法避免异常点对结果造成的影响。当某个园区一些指标的绩效远远优于或劣于其他园区时,等比例变换易导致一些"异常指标"二次赋值分布不均,对整体结果造成"拖动"。如二氧化硫排放,对以天然气为原料的园区和以燃煤为主的园区,在单位工业增加值二氧化硫排放量方面将存在巨大差别。

本研究采用正态分布的累积分布函数NORMDIST(x, μ, σ, cumulative)进行二次赋值,缩小同一指标最优和最劣园区间指标值的差距,同时扩大标准值附近的指标值间的差距。正态分布的累积分布函数的表达见式(6):

$$f(x,\mu,\sigma)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}e^{-\left[\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad (6)$$

式中,x 为经标准化处理的指标值,μ 为平均值,σ 为标准方差。

正态分布的累积分布函数NORMDIST(x, μ, σ, cumulative)中,cumulative为一逻辑值,指明函数的形式,如果cumulative为1,函数NORMDIST返回累积分布函数;如果为0,返回概率密度函数。按式(6)变换后的曲线如图4所示。

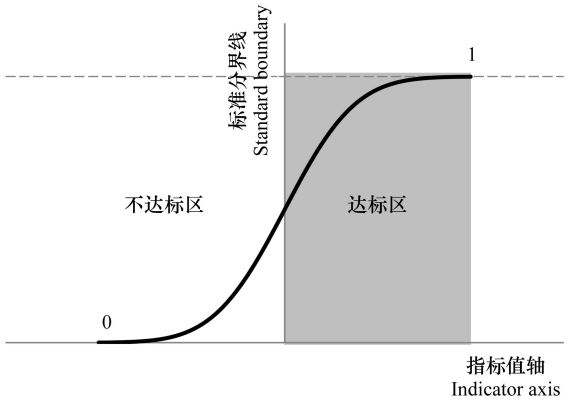


图4 正态分布的累积分布函数的曲线示意

Fig.4 Schematic diagram of reassignment on indicators by the NORMDIST function

图4中,单项指标表现差的园区二次赋值趋向于0,表现优的园区二次赋值趋向于1。在偏离标准值较大时曲线较平缓,在标准值附近曲线斜率较大。这样变换后使得园区单项指标值在远小于或远超过

标准值时,指标值的变化不会对二次赋值结果造成较大影响;而当指标值在标准值附近时,微小的进步就可使其二次赋值有较大提升。这样二次赋值后有助于鼓励园区针对尚未达标或刚达标的指标进一步改进,以提升园区的整体绩效指数;同时也可避免单指标偏离标准值过大时对指数产生巨大的拖动效应。

为了使二次赋值的结果符合人们对打分的普遍认识,即 0 到 100 分的范围,因此在原函数上乘以 100。同时设置式(6)中的参数,调整 μ 赋值为 -0.25,使得表 3 中列入《综合类生态工业园区标准(HJ274—2009)》的 8 项指标的标准值得分设定为及格线 60。当园区单项指标原始值优于标准值时,经标准化和二次赋值后的值大于 60;反之,则小于 60。

原数据经过标准化处理,标准方差 σ 为 1,逻辑值 cumulative 为 1,即二次赋值 P_{ij} = 100×NORMDIST(x_{ij}^{*} ,-0.25,1,1)。经如上调整,园区单项指标的评价曲线如图 5 所示。

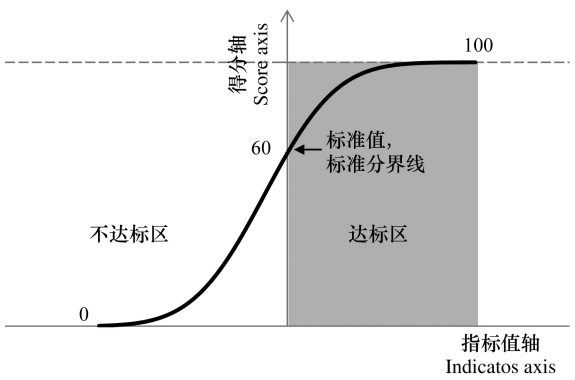


图 5　参数调整后的生态工业园区指标值的评价示意图

Fig.5　Schematic diagram of reassignment on indicators by the NORMDIST function by assigning an EPI of 60 to the "standard EIP"

当园区样本数越多,其指标数据越趋向于正态分布,依次经标准化和正态分布的累积分布函数计算的园区单项指标的赋值更加符合自然规律。

2.4　多目标归一化

表 3 中单项指标完成无量纲化和二次赋值后,进一步应用加权平均法[17-18]进行归一化处理,计算方法见式(7):

$$\mathrm{EPI}_i = \sum_{j=1}^{n} w_j P_{ij} \quad i = 1,2,\cdots,m \qquad (7)$$

式中,w_j为第 j 项指标对应的权重值。EPI_i为第 i 个园区的环境绩效指数,指数越大者表示其环境绩效越好。

关于指标权重赋值,很多文献采用层次分析法,通过专家打分确定权重。如全球国家 EPI、中国省级 EPI 和中国国家级经济技术开发区投资环境综合评价指数均采用了该方法。此外,等权重分析法也被广泛应用。一些作者研究认为"等权重方法往往能使得到的结果与复杂的权重赋予方法得到的结果非常相近"[19]。

在以 2010 年为基准年,基于 24 个综合类园区开展的实证分析中,首先对表 3 所列的指标进行了相关性分析,表 3 所列各项指标彼此相对独立,无直接相关性联系。本研究采用准则层等权重、准则层内各指标等权重相同的分析法,即准则层权重均为 1/3,每类准则层内各指标再等权重划分(表 3)。从而可以加权平均归一化得到园区的环境绩效指数。

3　国家生态工业示范园区环境绩效指数

以 2010 年为基准,分析该年 24 个综合类国家生态工业示范园区的环境绩效指数。并将《综合类生态工业园区标准》的最低要求作为标准值虚拟园区,与 24 个园区一起进行绩效比较研究。园区数据采集于各园区提交的国家生态工业示范园区年度工作报告和生态工业园区建设规划文本,数据使用得到管理部门许可。用 SPSS 软件针对 8 项指标,25 个园区(包含虚拟的"标准园区")2010 年的指标数据分别进行 K-S 检验,验证其是否服从正态分布。验证结果显示,每项指标的 P 值均大于 0.05,说明 8 项指标 25 个园区的实际指标值均服从正态分布。依据式(1)—(5)对数据进行标准化处理,再将无量纲化之后的指标数据代入 Normdist 函数,对其进行二次赋值。最后按准则层等权重、准则层内各指标等权重的方法,对数据进行归一化处理,得到每个园区的环境绩效指数,并按照其值的大小对 25 个园区进行排序,结果见图 6。

从图 6 可知大部分园区的环境绩效指数都大于 60,《综合类生态工业园区标准(HJ274—2009)》中的标准值要求偏低。

4　结果讨论

由图 6 可知,环境绩效指数在 60 以上的有 22 个园区,仅有 2 个园区的环境绩效指数低于 60。环

境绩效指数在 75 以上的园区绩效指数差距都比较小,而 75 以下的园区的环境绩效指数差距相对较大,这与二次赋值的原则是相一致的,即园区指标值在远小于或远超过标准值时,指标值的变化不会对二次赋值结果造成较大影响;而当指标值在标准值附近时,微小的进步就可使其二次赋值有较大提升。

挑选四个有代表性的工业园区进行进一步分析,即环境绩效指数最高的开发区(1)、处于 50 分位的开发区(13)、最接近标准值的开发区(24)和最低的开发区(25),其指标值见表 4。

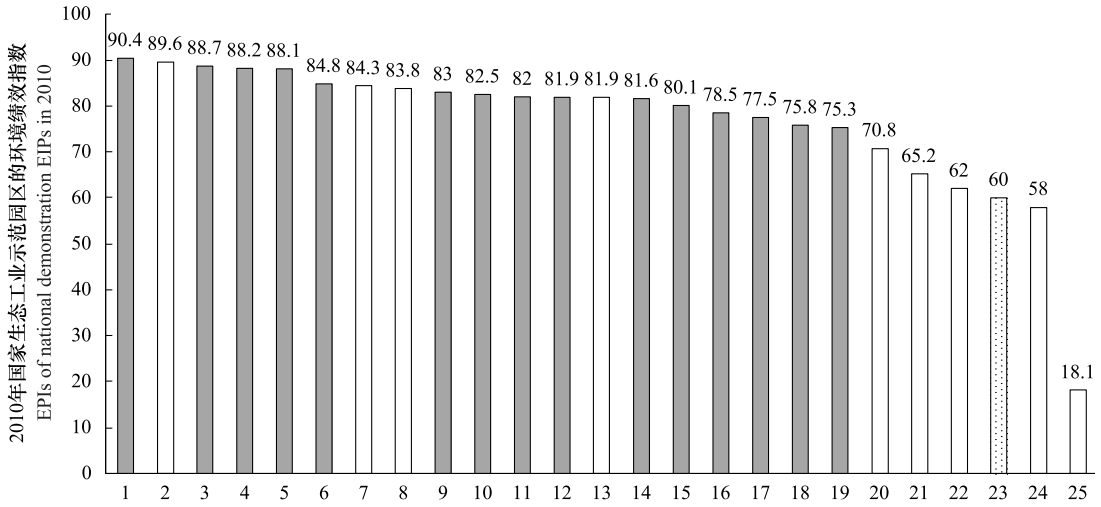


图 6 2010 年综合类国家生态工业示范园区环境绩效指数

Fig.6 EPIs of the Sector-integrate national demonstration EIPs in 2010

23 号为《综合类生态工业园区标准(HJ274—2009)》中标准值虚拟的园区,其环境绩效指数赋值为 60;带填充者为已通过考核验收的园区

表 4 四个代表园区的指标数据及环境绩效指数

Table 4 Indicators and EPIs of the four typical EIPs

指标 Indicator	标准值 Standard value	园区 1 EIP 1	园区 13 EIP 13	园区 24 EIP 24	园区 25 EIP 25
人均工业增加值 Industrial added value(IAV) per capita/(万元/人)	15	38.59	30.00	13.13	13.06
单位工业用地工业增加值 IAV per km^2/(亿元/km^2)	9	38.40	11.74	9.96	4.35
单位工业增加值综合能耗 Energy consumption per IAV/(tce/万元)	0.5	0.13	0.19	0.64	1.09
单位工业增加值新鲜水耗 Fresh water consumption per IAV/(m^3/万元)	9	2.36	2.19	9.47	50.30
单位工业增加值废水产生量 Waste water consumption per IAV/(t/万元)	8	1.70	1.97	6.4	31.95
单位工业增加值固废产生量 Solid waste per IAV/(t/万元)	0.1	0.032	0.05	0.13	0.33
单位工业增加值 COD 排放量 COD per IAV/(kg/万元)	1	0.11	0.08	0.52	3.15
单位工业增加值 SO_2排放量 SO_2 per IAV/(kg/万元)	1	0.11	0.65	0.62	6.33
环境绩效指数 EPI	60	90.4	81.9	58	18.1

按照权重分配原则,经济发展类指标、资源能源消耗类指标和污染排放类指标各占 1/3,其中经济发展类和资源能源消耗类两类指标各含两个指标,而污染排放类中含 4 个指标,因此前面两类单个指标的权重更大,其对应指标数据对环境绩效指数结果的影响也更大,而污染排放类的单个指标对环境绩

效指数结果的影响相对较小。

4.1　园区产业结构对环境绩效指数的影响

对于环境绩效指数最高的园区 1,其形成了电子信息、汽车制造及零部件、现代家电、生物医药与食品加工四大主导产业。人均工业增加值达到了 38.59 万元/人,单位工业用地工业增加值为 38.40 亿元/ km^2,其两项经济发展类指标(正向指标)均远远大于对应的标准值;而资源能源消耗类指标(负向指标)中,单位工业增加值综合能耗为 0.13tce/万元,单位工业增加值新鲜水耗为 2.36 m^3/万元,也均小于标准值;对于污染排放类指标(负向指标),其对应指标数据也都远远小于标准值。鉴于园区 1 的各项指标值都远远优于标准值,因此其环境绩效指数综合得分必然远大于 60。

园区 13,是以新材料、电子信息、先进装备制造为三大主导产业,其中新材料包括新型建筑复合材料、电工绝缘复合材料等。其与园区 1 对比,影响 EPI 得分的主要因素是单位工业用地工业增加值和单位工业增加值 SO_2排放量这两项指标,其与园区 1 的差距比较明显,其他几项指标两者差距不大。

对于园区 24,分析其每项指标的数据,与标准值均比较接近,但与园区(1)相差较大,因此综合环境绩效指数接近 60。其主导产业包括石化工业、造纸工业、钢铁工业,均是污染相对较重的行业,因此园区 24 的污染排放类指标基本处于达标边缘。

园区 25,其主导产业为轻纺、生物医药、电子信息、食品饮料、塑料包装。其各项指标都未能达标,其中经济类指标与标准值相差甚远,其他两类指标也严重超标,单位工业增加值新鲜水耗、单位工业增加值废水产生量和单位工业增加值 SO_2排放量超标达到了 4 倍及以上。

从上述分析可见,以园区物理边界为系统边界,比较园区发展的环境绩效,园区的主导产业类型对园区的环境绩效指数影响很大。本研究基于的 24 个样本均是改革开放后在 1984 年或 1992 年两个时间节点建立的开发区,历经至少 20 年的发展,已相对成熟。发展过程中,尤其是初期形成的主导产业类型、企业规模、企业环境管理水平等对园区的环境绩效影响很大。

4.2　园区 EIP 建设状态对环境绩效指数的影响

总体来说,通过验收的生态工业示范园区的绩效指数优于正在建设中的园区。在通过验收的 16 个园区中,其 2010 年的环境绩效指数绝大部分在 75 以上,远远超过国家标准值(60)。在批准建设的 8 个园区中,环境绩效指数差别较大,大部分低于 75。这一定程度上说明了国家生态工业示范园区体现了先进性和示范作用。环境绩效指数的计算可以帮助正在建设中的园区寻找与通过验收的园区之间的差距,指导制定针对性的措施缩小差距。

4.3　园区性质对环境绩效指数的影响

上述 24 个综合类国家生态工业示范园区的申请者主要由经济技术园区,高新技术产业开发区与保税区三类园区构成。24 个园区的环境绩效指数分布按性质分类见图 7。

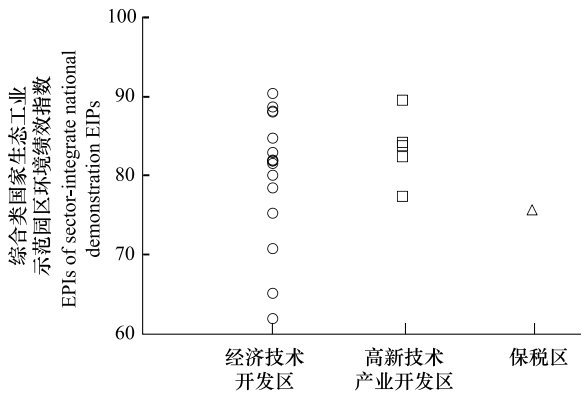


图 7　24 个园区按园区性质分类的环境绩效指数分布

Fig. 7　Distribution of EPIs for the 24 EIPs based on classification of their categories

经济技术开发区中未显示园区(25),其环境绩效指数为 18.1

由图 7 可知,24 个园区中经济技术开发区所占比例最大,环境绩效指数分布比较分散,即包括了绩效最好的园区(1),也包括了绩效最差的园区(25);高新技术产业开发区一共有 5 个样本,环境绩效指数集中在 77 以上,整体绩效水平较高;保税区只有一个样本,环境绩效指数处于中游水平。

究其原因,经济技术开发区与高新技术产业开发区虽然均是现阶段综合类国家生态工业示范园区建设的主要依托对象,但二者性质有所不同。经济技术开发区是所在城市及周围地区发展对外经济贸易的重点区域,产业结构多样,经济发展点也各有不同,因此其经济指标、资源能源利用率指标和污染排放指标均有较大差异,也导致了不同园区的环境绩效指数各不相同且差异较大。高新技术产业开发区是我国在一些知识密集、技术密集的省会城市和沿

海地区大型城市建立的发展高新技术为特色的产业开发区,以智力密集产业为为依托,通过实施高新技术产业的优惠政策和各项改革措施,最大限度地把科技成果转化为现实生产力,主导产业一般为高精尖科技产业,受国家高度重视和大力支持,其经济效益和环境效益都优于传统产业,因此其环境绩效指数相对较高。

5 结语

生态工业园区发展的环境绩效指数集成了经济发展类指标、资源能源消耗类指标和污染排放类指标,可综合反映园区发展的绩效。环境绩效指数是在园区的各项指标基础上,通过数学变换而得到,数值在 0—100 之间。基于《综合类生态工业园区标准(HJ274—2009)》相关指标的标准值虚拟一个“标准园区”,其环境绩效指数设定为 60。纵观 24 个园区 2010 年的绩效,绝大部分园区的环境绩效指数均大于 60,一方面说明在建和已验收的国家生态工业示范园区的绩效绝大部分超过“标准园区”,但另一方面也说明现有国家标准对国家经济技术开发区、国家高新技术产业开发区设置偏低。一些开发区主导产业虽以传统的涉水重污染行业为主,但其清洁生产水平在行业内已属于先进水平,这些开发区不宜与国家经济技术开发区或高新技术产业开发区基于相同的标准比较和考核。因此在实际管理工作中,应加强对园区生态化发展实施分类管理,对国家经济技术开发区、国家高新技术产业开发区不能仅要求达到标准,而应向更高的环境目标发展,真正起到对中国 1500 余家省级以上园区生态化发展的示范作用。

本研究建立的指数方法是针对生态工业园区发展、基于多目标排序方法比较园区间环境绩效的有效方法,通过比较促进园区提升各项指标,加强环境管理。该方法具有可扩展性,可根据管理需求,增减量化指标。“十二五”期间,国家进一步加大环境保护力度,氨氮和氮氧化物排放量、二氧化碳排放强度纳入约束性指标,可以将氨氮、氮氧化物和二氧化碳的排放强度(单位工业增加值对应的排放量)等指标纳入园区环境绩效指数构建体系。未来,随着工业园区环境管理加强,基础数据统计、监测能力提升,还可将 $PM_{2.5}$、VOCs,重金属、POPs 等特征污染物纳入环境绩效指数构建体系内。本研究建立的环境绩效指数方法可以为管理决策部门进一步推进国家生态工业示范园区建设提供决策支撑和政策建议,进一步推进中国生态工业示范园区的发展。

致谢:环保部科技司和相关园区的支持,特此致谢。

References:

[1] Shi H, Tian J P, Chen L J. China′s quest for eco-industrial parks, Part I. Journal of Industrial Ecology, 2012, 16(1): 8-10.

[2] Tian J P, Liu W, Li X, Lai B J, Chen L J. Study of eco-industrial park development mode in China. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(7): 60-66.

[3] Ministry of Environmental Protection of China. Standard for Sector-integrate Eco-industrial Parks. (2009-07-01) [2012-11-21]. http://kjs.mep.gov.cn/hjbhbz/bzwb/other/qt/200907/t20090701_153712.htm, 2009-07-01

[4] Sun X M, Cui Z J, Zhu L, Liu L. Establishment of indicator set for evaluating operating efficiency of eco-industrial parks. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(1): 124-128.

[5] Wang J D, Guo Z. Study on ecological efficiency assessment of high technology industrial park. Shanghai Quality, 2010, (7): 27-30.

[6] Wu X Q, Wang Y, Liu N, Gao Q, Lu G F. Evaluation of circular economy development in industrial park based on eco-efficiency theory and TOPSIS approach. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(12): 2203-2208.

[7] Yin R Y, Yang X, Sun X, Zhu X D. Environmental risk rankings and prior management strategies on chemical industry parks in the coastal area of Jiangsu Province. China Environmental Science, 2011, 31(7): 1225-1232.

[8] Yale University. EPI Methodology: Indicators. [2012-11-21]. http://epi.yale.edu/epi2012/methodology, 2012-11-21.

[9] Yale University. Towards a China Environmental Performance Index. [2012-11-21]. http://environment.yale.edu/envirocenter/files/China-EPI-Report.pdf, 2012-11-21.

[10] Comprehensive Evaluation Method of Investment Environment on National Economic and Technologic Development Zone. (2009-3) [2012-11-21]. http://tj.getdd.gov.cn/08zbjs.doc.

[11] Ye Y C. System Assessment Technology and Application. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.

[12] Fan Y, Hyndman R H. Sample quantiles in statistical packages. The American Statistician, 1996, 50(4): 361-365.

[13] Zhou C, He R M. Accuracy assessment of power system dynamic simulation based on landmark method. Proceedings of the CSEE,

2010, 30(7): 42-47.

[14] Xie Z H. Matlab Statistical Analysis and Application: 40 Cases Study. Beijing: Beijing Aeronautics and Astronautics University Press, 2010.

[15] Ma L P. Statistical data standardization-Unification. Beijing Statistics, 2000, (3): 34-35.

[16] Rice J. Mathematical Statistics and Data Analysis. 2nd ed. Duxbury: Duxbury Press, 1995.

[17] Afgan N H, Carvalho M G. Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants. Energy, 2002, 27(8): 739-755.

[18] Ntotas K Patlitzianas K D, Doukas H, Psarras J. Assessing the renewable energy producers′ environment in EU accession member states. Energy Conversion and Management, 2007, 48(3): 890-897.

[19] Huang I B, Keisler J, Linkov I. Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. Science of the Total Environment, 2011, 409(19): 3578-3594.

参考文献:

[2] 田金平, 刘巍,李星, 赖玢洁, 陈吕军. 中国生态工业园区发展模式研究. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(7): 60-66.

[3] 中国环境保护部. 综合类生态工业园区标准. (2009-07-01)[2012-11-21]. http://kjs.mep.gov.cn/hjbhbz/bzwb/other/qt/200907/t20090701_153712.htm, 2009-07-01.

[4] 孙晓梅, 崔兆杰, 朱丽, 刘雷. 生态工业园运行效率评价指标体系的研究. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(1): 124-128.

[5] 王金德, 郭政. 高新工业园区生态效率综合评价的探索. 上海质量, 2010, (7): 27-30.

[6] 吴小庆, 王远, 刘宁, 高倩, 陆根法. 基于生态效率理论和TOPSIS法的工业园区循环经济发展评价. 生态学杂志, 2008, 27(12): 2203-2208.

[7] 尹荣尧, 杨潇, 孙翔, 朱晓东. 江苏沿海化工区环境风险分级及优先管理策略研究. 中国环境科学, 2011, 31(7): 1225-1232.

[10] 中国商务部. 国家级经济技术开发区投资环境综合评价办法. (2009-3)[2012-11-21]. http://tj.getdd.gov.cn/08zbjs.doc, 2009-3.

[11] 叶义成. 系统综合评价技术及其应用. 北京: 冶金工业出版社, 2006.

[13] 周成, 贺仁睦. 应用界标分界法的电力系统动态仿真准确度评估. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 42-47.

[14] 谢中华. MATLAB统计分析与应用: 40个案例分析. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.

[15] 马立平. 统计数据标准化--无量纲化方法. 北京统计, 2000, (3): 34-35.