

用水和排水视角下中国环境效率分析^{*}

谭雪, 杨喆, 黄泉泉, 马中, 石磊

(中国人民大学环境学院, 北京 100872)

提 要: 我国水资源空间和时间分布不均, 人均水资源有限, 用水和排水量巨大, 在这种背景下, 文中从用水和排水的角度研究 1998~2013 年间我国省级层面的环境效率。首先运用随机前沿分析法(SFA)进行估算, 发现我国环境效率地区差异显著, 东部地区环境效率普遍高于西部地区; 然后结合灰色关联分析探寻环境效率地区差异背后的原因, 发现水资源、经济发展水平、环境保护和监管力度都对地区环境效率有着不同程度的影响, 并对这些影响因素进行排序分析, 旨在为我国的环境效率提高和污染治理提供一些参考。

关键词: 环境效率; 用水; 排水; 随机前沿分析; 灰色关联

中图分类号: X143

文献标识码: A

2012 年, 中国人均水资源量 2186.1 m³, 不到世界人均水平的 1/3。世界上有水统计的 192 个国家里, 中国人均占有的水资源量是第 127 位。随着工业化和城镇化进程的加快, 中国用水量不断增加, 由 2000 年的 5530.7 亿 m³ 增加到 2012 年的 6141.8 亿 m³, 年均增长率为 0.9%。中国水资源供需矛盾日益突出, 正常年份全国年均缺水量 500 多亿 m³。2001~2012 年, 我国废水排放总量不断增加, 由 2001 年的 433 亿吨增长到 2012 年的 684 亿吨, 年均增长率 4.3%。我国人均水资源有限, 水资源空间分布和时间分布不均, 在这样的情况下, 从用水和排水的角度研究我国的环境效率是十分必要的。

环境效率可以追溯到德国学者 Sehaltgege 等(1990)提出的生态效率的概念, 1992 年世界可持续发展工商理事会(WBSCD)将此概念重新阐述并被广泛接受^[1]。此后国内外学者将经济发展的影响从对生态的影响扩展到对普遍环境的影响, 提出环境效率的概念, 并且从能源消耗、化肥使用、生态金融、资源价值等不同角度对环境效率进行研究。例如, Rafael 等(1999)运用距离函数法计算基于氮肥施用的环境效率, 并且比较随机参数分析和双曲线 DEA 的结果, 证实超对数函数法和随机前沿分析方法是环境绩效评估的有利工具^[2,3]。李胜文等(2010)选取资本和劳动作为投入, 运用 SFA 方法来衡量中国省级的环境效率和环境管制有效性^[4]。Song 等(2013)运用 DEA 方法评估了中国的生产力指数, 并且分析了中国环境效率的发展趋势^[5]。Zhang 等(2013)分析了中国制造业的能源消费和污染对中国环境效率的影响^[6]。谭雪等(2013)从能源消费的角度分析了东北三省环境效率, 并分别从横向和纵向比较分析了各省的历史发展情况和差异原因^[7]。Ochoa(2014)运用数据包络分析(DEA)方法对比分析了有机农业和传统农业的环境效率^[8]。白彩全等(2014), 运用耦合理论中的容量耦合方法分析了我国内地省级层面的金融集聚与生态效率的耦合度和耦合协调度, 指出我国普遍金融业滞后于生态效率^[9]。

生产前沿分析是目前普遍被学者采用的分析效率的方法, 即在一定的技术水平条件下, 计算各种比例投入所对应的最大产出集合。根据是否已知生产函数的具体形式, 生产前沿分析又可以分为参数方法(随机前沿分析)和非参数方法(数据包络分析), 这两种方法在目前的效率研究中都有着广泛的应用。但是, DEA 方法是一种确定性前沿分析方法, 未能包含随机因素对效率可能产生影响, 而且很难进行统计性检验来判断其效果; 而 SFA 方法沿袭了传统的生产函数的估计思想, 并可将随机因素纳入到模型分析中^[10], 更符合环境问题的现实情况, 因此文中选择运用 SFA 方法进行环境效率估算。

^{*} 收稿日期: 2014-10-27; 修回日期: 2014-11-15。

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项课题(2008ZX07633-02); 北京高等学校青年英才计划资助。

作者简介: 谭雪(1988-), 女, 辽宁抚顺人, 博士研究生, 主要从事水环境保护管理与政策相关研究。E-mail: tsnow2010@163.com

通讯作者: 石磊(1978-), 男, 山东青岛人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事环境经济与管理方面研究; E-mail: qdshl@126.com

诸多文献中鲜有从水的全过程(使用、排放)的角度分析环境效率,也鲜有学者将参数方法应用到此分析中,在分析角度和方法选择上存在一定的局限性。结合我国的现实环境状况,文中从用水和排水角度估算了 1998~2013 年我国省级层面的环境效率,并运用灰色关联分析探寻环境效率地区差异背后的原因。

1 材料与研究方法

1.1 数据选取与计算

选取中国 30 个省的面板数据进行分析,由于数据可得性原因,文中分析并未包含西藏自治区、香港和澳门特别行政区以及台湾省的数据。环境效率估算部分,指标选取包括:表征经济发展水平选取的指标是"地方生产总值(Y)";人力投入选取"地区年人口数(L)"来表示;资本数据采用"资本存量指标(K)",该指标不可在年鉴和数据库中直接得到,文中采用会计核算中常用的永续盘存法计算得到^①;水资源投入选取的指标是各省的"用水总量(W)";污染投入选取的指标是"废水排放量(Z)",因 2013 年用水量和废水排放数据尚不可得,文中采用灰色系统预测计算得到,且经过检验;所有经济数据均折算成 1998 年价格。

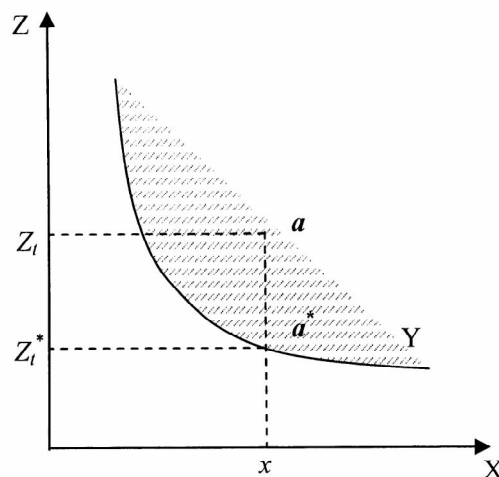


图 1 环境效率截面图示

Figure 1 Schematic diagram of the environmental efficiency

文中的原始数据来自于 1999~2013 年《中国统计年鉴》和省级层面的统计年鉴,2013 年数据来源于各省的《国民经济和社会发展统计公报》。在所有计算之前,对数据进行单位根检验和协整检验,验证变量数据是平稳的,可以进行实证分析。

1.2 研究方法

1.2.1 环境效率的界定

Reinhard 等(1999)扩展了环境效率的概念,提出在既定技术水平条件下,普通产出(资本、劳动力等)和产出保持不变,可以实现的最小化有害投入与当前的有害投入之间的比率。文中依据该定义(图 1),假定在等产量面 Y 上(图中阴影所示),任何生产点的产出均为 Y,即 a 点与 a* 点的产出相等。X 轴表示普通要素投入,Z 轴表示有害要素投入,可以看出在 a 点的有害投入量为 Z_t ,a* 点的有害投入量是 Z_t^* 。两点的产出相同,普通投入量相同,而有害投入量却不同,a* 点是有效率的点。

那么环境效率 EE 可以用公式表示为:

$$EE = \frac{|Z_t^*|}{|Z_t|}, \text{ 即 } \ln EE_t = \ln Z_t^* - \ln Z_t \quad (1)$$

环境效率高表示现有技术条件下污染物可减少的程度比较低,此时只有通过进一步提高技术水平才能更大幅度地减少污染物排放;环境效率低表示即使不提高技术水平,也可以通过充分利用现有技术而大幅度减少污染物的排放,从而改善环境质量。为了分析经济生产给环境带来的负的外部性,文中将环境污染作为一种"污染投入"来分析对经济产出的影响,即文中将生产所需投入分为两种:正常投入和污染投入,正常投入包括资本、劳动力和水资源,污染投入为排放的污水。

构建形如 SFA 模型的总量生产函数: $Y_t = f(X_{it}, Z_t; \beta) e^{V_t - U_t} \quad (t=1, 2, \dots; i=1, 2, \dots)$ (2)

其中, Y_t 表示某省在 t 期的产出量, X_{it} 表示某省在 t 期 i 种正常投入量, Z_t 表示某省在 t 期的污染投入量。 β 是待估参数向量。 V_t 是随机误差,独立于 U_t ,且 $V_t \sim N(0, \sigma^2 v)$; U_t 表示无效率状态,且 $U_t \sim N(\mu_t, \sigma^2)$ 。为了更准确定位 U_t ,可以表示为: $U_t = \beta(t) \times \mu$,并且 $\beta(t) = \exp(-\eta \times (t - T))$, T 为变量数量。 η 为待估参数,只要 η 不为 0,就能判定技术无效率是随时间改变的。假定某省的生产函数形如 Trans-log 生产函数:

① 永续盘存法计算资本存量的公式如下: $K_t = (1 - \sigma) K_{t-1} + I_t$

K_t 表示某省在第 t 年的资本存量, I_t 表示该省当年的新增投资总额, σ 表示资本折旧率。不同的资本折旧率可以估算出不同的资本存量,在比较多种折旧率后,9.6% 更适合我国的实际情况,因此文中选取资本折旧率为 9.6%。

$$\ln Y_t = \beta_0 + \sum \beta_i \ln X_{it} + \beta_z \ln Z_t + 0.5 \sum_i \sum_j \beta_{ij} \ln X_{it} \ln X_{jt} + \sum \beta_{iz} \ln X_{it} \ln Z_t + 0.5 \beta_{zz} (\ln Z_t)^2 + V_t - U_t \quad (3)$$

其中, i, j 仅表示不同种类的正常投入, 且当 $i = j$, 有 $\beta_{ij} = \beta_{ji}$ 。式子(3)所示, 此时点 (X_{it}, Z_t, Y_t) 生产无效率。无效率点移动到同产出的最优效率点时, 即在不改变 X_{it} 的投入情况下(假定此时的有害投入由 Z_t 减少到 Z_t^*), 那么生产点将沿着等产量面移动到生产前沿上, 此时, $Y_t = f(X_{it}, Z_t^*)$, 即:

$$\ln Y_t = \beta_0 + \sum \beta_i \ln X_{it} + \beta_z \ln Z_t^* + 0.5 \sum_i \sum_j \beta_{ij} \ln X_{it} \ln X_{jt} + \sum \beta_{iz} \ln X_{it} \ln Z_t^* + 0.5 \beta_{zz} (\ln Z_t^*)^2 + V_t \quad (4)$$

因为两点产出量相等, 因此(3)式等价于(4)式, 二式相减。由(3)式可得:

$$0.5 \beta_{zz} (\ln EE_t)^2 + (\beta_z + \sum \beta_{iz} \ln X_{it} + \beta_{zz} \ln Z_t) \ln EE_t + U_t = 0 \quad (5)$$

可以解得环境效率的表达式:

$$\ln EE_t = \frac{-(\beta_z + \sum \beta_{iz} \ln X_{it} + \beta_{zz} \ln Z_t) + ((\beta_z + \sum \beta_{iz} \ln X_{it} + \beta_{zz} \ln Z_t)^2 - 2\beta_{zz} U_t)^{0.5}}{\beta_{zz}} \quad (6)$$

1.2.2 灰色关联分析

灰色关联分析方法, 就是把两个系统的因素之间发展趋势的相似或相异程度作为衡量因素间关联程度的一种方法, 其表征的数值称为“灰色关联度”。

假定有 $X_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n))$ 为参考时间序列, 用于反映系统行为特征; 影响系统行为因素的序列为比较序列, 令 $X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n))$; ρ 为分辨系数, 且 $0 < \rho < 1$, 一般取 $\rho = 0.5$ 。则二者在其中某点 k 的关联系数为:

$$\xi_i(k) = \frac{\min |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max |X_0(k) - X_i(k)|}{|X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max |X_0(k) - X_i(k)|} \quad (7)$$

灰色系统理论提出了对各个不同系统的因素进行灰色关联度分析, 探求它们之间各个时期的数值关系, 因此, 灰色关联分析对于一个系统发展变化态势提供了量化的度量, 但由于信息过于分散不便进行整体比较, 因此可以计算其平均值用来表示比较序列和参考序列之间的关联度:

$$\gamma(X_0, X_k) = \frac{1}{n} \xi_i(K) \quad (8)$$

在环境效率影响因素分析部分, 文中运用灰色关联分析研究各个因素对环境效率的影响。因为关联系数是两个变量在每个时刻的关联程度值, 而信息过于分散不便于进行整体性比较。因此有必要将各个时刻的关联系数集为一个值, 文中参照常用的方法求其平均值, 作为比较数列与参考数列间关联程度的数量表示, 并进行排序比较。

2 实证研究

2.1 环境效率估算

运用极大似然估计方法得出待估参数, 通过计算得到历年环境效率, 可以看出全国各省的环境效率水平普遍有所提升, 但不同地区的环境效率水平差异较大(表1)。

从时间序列来看, 1998-2013年, 中国省级环境效率水平有所提升, 平均值从1998年的0.41上升至2013年的0.71, 地区差异略微缩减(图2)。多数东部省份如北京、天津、山东、浙江、广东等地的环境效率一直保持较高水平; 东北三省和中部大部分省份的环境效率起点较低但是增速较快; 西部省份如新疆、青

表1 中国省级环境效率估算结果

Table 1 Estimation results of regional environmental efficiency of China

地区	1998	2000	2005	2010	2013	平均值
北京	0.89	0.9474	0.88	0.81	0.98	0.89
天津	0.84	0.8489	0.89	0.92	0.93	0.89
河北	0.50	0.6800	0.60	0.80	0.78	0.64
山西	0.44	0.5547	0.67	0.65	0.66	0.62
内蒙古	0.12	0.1803	0.74	0.53	0.62	0.50
辽宁	0.24	0.5746	0.77	0.84	0.85	0.75
吉林	0.37	0.7648	0.75	0.74	0.74	0.71
黑龙江	0.10	0.3190	0.69	0.84	0.86	0.61
上海	0.70	0.8742	0.93	0.94	0.95	0.90
江苏	0.76	0.7948	0.67	0.83	0.83	0.76
浙江	0.83	0.7490	0.83	0.86	0.86	0.84
安徽	0.34	0.5227	0.69	0.89	0.75	0.64
福建	0.69	0.5583	0.23	0.74	0.92	0.49
江西	0.30	0.3563	0.71	0.90	0.90	0.65
山东	0.62	0.6605	0.84	0.83	0.85	0.79
河南	0.54	0.2971	0.53	0.64	0.68	0.52
湖北	0.84	0.9173	0.77	0.74	0.73	0.86
湖南	0.20	0.3327	0.40	0.67	0.71	0.47
广东	0.73	0.7615	0.79	0.86	0.86	0.80
广西	0.27	0.3139	0.27	0.38	0.59	0.35
海南	0.21	0.3072	0.30	0.40	0.68	0.38
重庆	0.26	0.1727	0.31	0.40	0.60	0.34
四川	0.29	0.2048	0.35	0.57	0.61	0.41
贵州	0.12	0.2693	0.52	0.61	0.52	0.45
云南	0.14	0.3675	0.48	0.54	0.20	0.40
陕西	0.28	0.3700	0.46	0.56	0.67	0.47
甘肃	0.11	0.2254	0.43	0.52	0.48	0.38
青海	0.03	0.1859	0.18	0.30	0.43	0.26
宁夏	0.41	0.6247	0.69	0.80	0.65	0.69
新疆	0.17	0.4656	0.28	0.28	0.42	0.34

注: 由于篇幅所限, 仅展示部分运算结果, 如需全部分年份计算结果可向作者索取。

海、甘肃、四川、云南等地的环境效率尽管有所增长但水平偏低。

从横向省级层面来看,整体环境效率均有所提高,大部分东部沿海地区的环境效率显著高于西部内陆地区的环境效率(图3)。1998年,环境效率大于0.8的省份有:北京、天津、浙江、湖北,环境效率小于0.5的省份有15个;2005年,环境效率大于0.8的省份数量上升为5个,环境效率小于0.5的省份数量下降至10个;2010年,环境效率大于0.8的省份数量上升为11个,环境效率小于0.5的省份数量下降至4个,其中环境效率最小的省是新疆;2013年,环境效率大于0.8的省份数量为11个,环境效率小于0.5的省份数量仍为4个,但环境效率最小的省是云南。

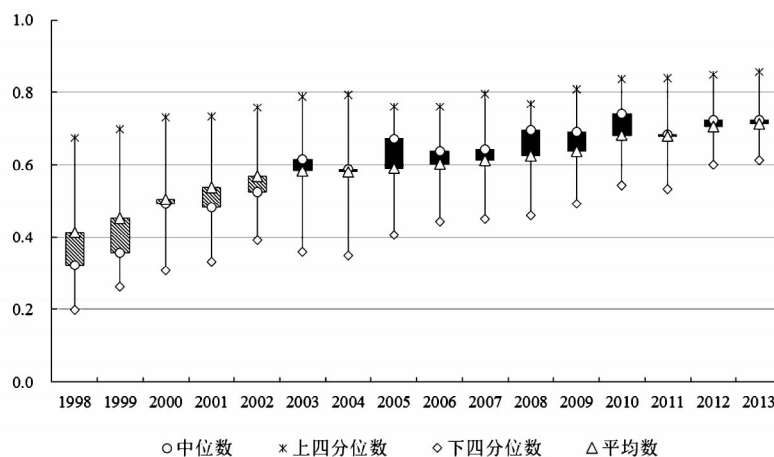


图2 中国环境效率发展趋势

Figure 2 Tendency of environmental efficiency in China

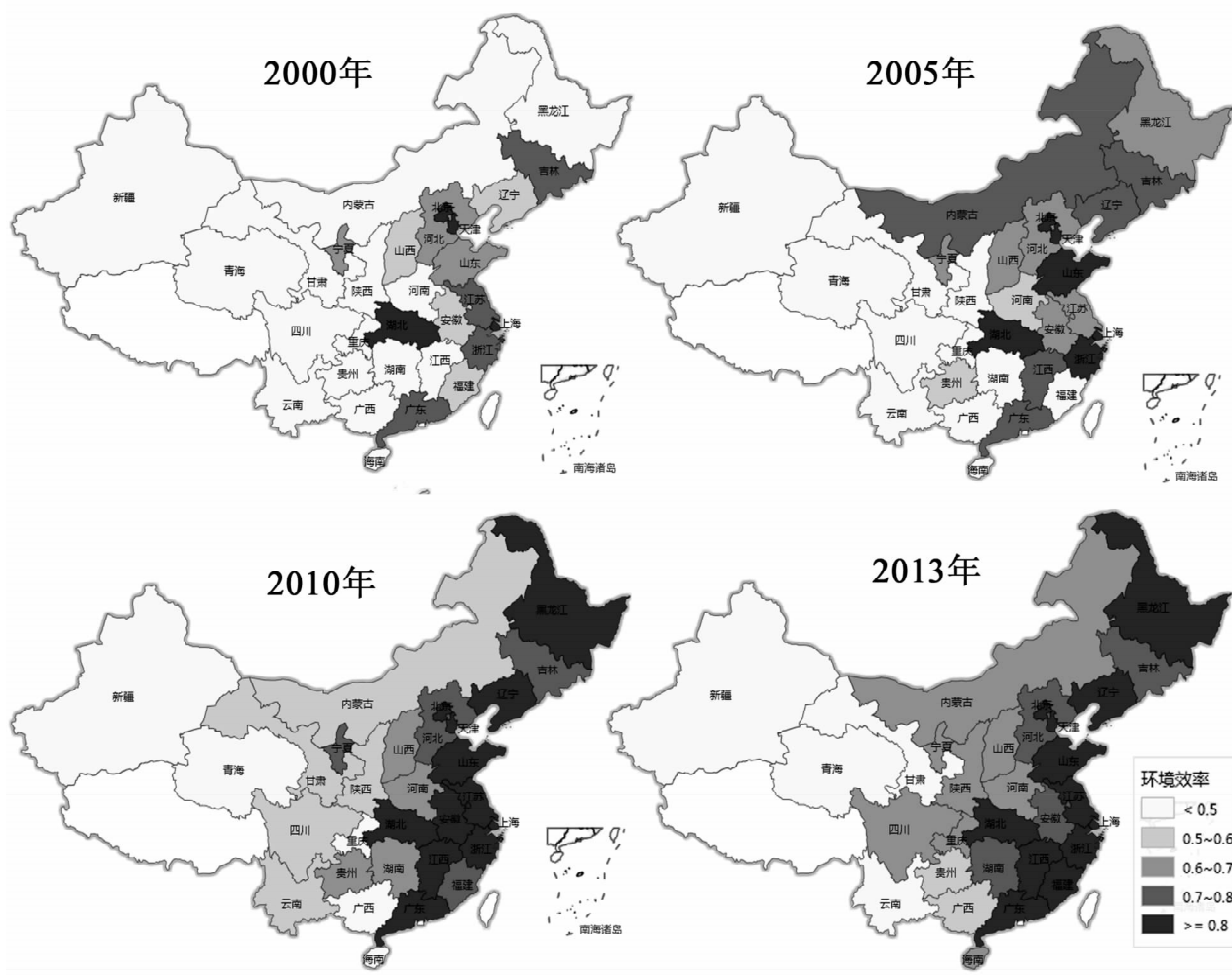


图3 中国各省环境效率分布情况

Figure 3 Distribution of environmental efficiency in China

2.2 影响因素分析

为探求环境效率背后的影响因素,文中对1998-2013年中国30个省的面板数据进行灰色关联分析,分别计算各个地区的环境效率与经济发展水平、环境污染治理力度、水资源消耗与排污等变量之间的动态

综合关联度(图4)。

其中,经济发展水平用"人均地方生产总值"来表示,并已折算成以1998年为基期的可比价格;环境保护监管强度和污染治理力度用"人均污染治理投资"、"每万人拥有环保系统人数"、"治理废水投资占污染治理投资比重"来表示;用"人均用水量"、"人均排水量"来表示水资源的使用和排放情况。

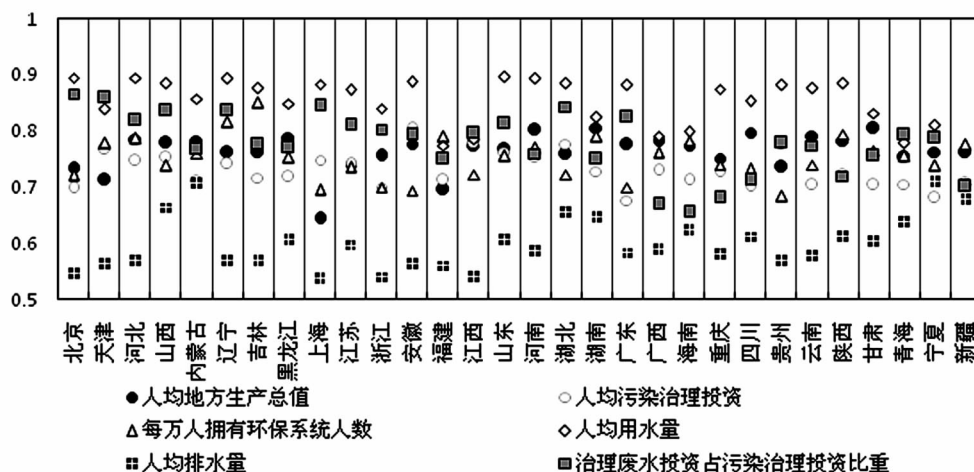


图4 中国30个省灰色关联度结果

Figure 4 Grey correlation analysis of 30 provinces of China

如图4所示,全国30个省的六个变量与各省的环境效率之间的关联度在0.5~1之间。从全国情况来看,人均用水量与环境效率的关联度较大,尤其是水资源短缺的省份,说明这些地区水资源消耗已经对环境效率产生较大影响;多数省份的治理废水投资占污染治理投资比重对环境效率也有较大影响;无一省份的人均生产总值与环境效率的关联度排在首位,表明虽然经济发展对环境效率有正的拉动作用,但也不是影响最大的,因此不能片面追求经济增长;每万人拥有环保系统人数与环境效率的关联度处于中间位置,甚至在个别省份处于首要位置,这一指标可以在一个侧面表征环境监管,这与前文所述一致,说明加大环境保护的人力投入、加强环境监管是十分必要的;多数省份的人均排水量与环境效率关联度较低,其背后原因可能是由于部分地区污水治理效果较好,如北京、天津、上海等地;也可能是由于水资源富集地区水环境容量较大,因此排水对环境效率的影响较小。

3 讨论

基于前文分析,可看出环境效率水平与其影响因素存在地域上的特征。平均环境效率水平较高的地区,如上海、北京、天津、广东等省份多为东部经济发达地区,经济发展水平对环境效率的影响均排序在四之后,而对其影响较大的因素多是水资源和环保投资中的治理废水投资的比重,这些地区的废水排放对环境效率的影响较小,说明这些省份的污水治理工作取得了一定的成绩,而且经济发展对环境效率的拉动作用比较有限。平均环境效率水平较低的地区,如青海、新疆、甘肃、海南、广西等省份多处于西部地区,经济发展水平对环境效率的影响仍排在前两位,而水资源因素对环境效率的影响没有东部地区那么大,环境保护人力投入对这些地区影响较大,废水排放量对这些省份的环境效率的影响也远高于东部经济发达地区。

除了前文灰色关联分析中所选取的指标以外,还有其他可能因素对各省的环境效率产生影响,例如人均水资源占有量、产业结构等。可以看出用水量因素影响较大的省份,多是人均水资源占有量较低的省份,即表明这些省份多是水资源短缺地区;而农业是我国耗水最大的生产部门,消耗水资源约占全国用水量的60%,必然加剧内陆省份的水资源短缺情况;工业发展和城镇化进程也会造成废水排放量的增加,对地区的环境效率也可能产生影响。但是这些因素的影响可能是更为长期的、历史积累的、间接的,不适合在灰色关联度模型中进行动态分析,因此文中暂时没有量化研究。由于每个省的环境效率水平和其影响因素的关联度排序不同,因此不同地区应采取不同的政策手段和发展方式来促进环境效率的提高。对于那些人均用水量对环境效率影响大的省份,尤其是水资源严重缺乏地区,控制用水、节约用水的措施是非常重要的,例如北京市、内蒙古、河南、重庆、贵州、宁夏等;废水投资占污染治理投资比重对环境效率的影

响大的地区,需要加大环境保护投资中废水治理的投资比例,保证财力支持,例如天津、江西、青海等; 每万人拥有环保系统人数对环境效率影响较大的地区,需要加大环境保护人力投入,例如福建、新疆等; 人均废水排放量对环境效率影响较大的地区,尤其是水环境破坏严重的地区,需要加强废水治理力度,从而提高地区的环境效率。

4 结论

(1) 从时间序列来看,1998 ~ 2013 年我国平均环境效率水平从 0.41 上升到 0.71,各省环境效率均有增长,并且地区差异略微缩减。

(2) 从横向省级层面来看,我国环境效率水平呈现明显的地区差异。我国大部分东部沿海地区的环境效率显著高于西部内陆地区的环境效率。

(3) 影响环境效率的因素,也随着各地的具体发展情况呈现地区差异。除了水资源使用对全国普遍影响较大以外,对东部地区多数省份的环境效率影响较大的因素是水资源和环保投资中的治理废水投资的比重; 而对于西部地区多数省份的环境效率影响较大的因素多是经济发展水平和环境保护人力投入,废水排放量对这些省份的环境效率的影响也远高于东部经济发达地区。

(4) 对于不同地区的不同影响因素和现实情况,实施有针对性的环境保护和节水治污措施,或加大资金投入比重,或加大人力投入。对于全国普遍情况而言,节约用水相关措施是十分必要的。

参考文献

- [1] 陈遵一. 基于 DEA 方法的安徽城市工业生态效率评价 [J]. 商业时代, 2012(4): 139 - 140.
- [2] Reinhard S, Lovell C A K, Thijssen G. Econometric estimation of technical and environmental efficiency: an application to Dutch dairy farms [J]. American Journal of Agricultural Economics, 1999, 81(1): 44 - 60.
- [3] Reinhard S, Knox Lovell C A, Thijssen G J. Environmental efficiency with multiple environmentally detrimental variables: estimated with SFA and DEA [J]. European Journal of Operational Research, 2000, 121(2): 287 - 303.
- [4] 李胜文, 李新春, 杨学儒. 中国的环境效率与环境管制 - 基于 1986 - 2007 年省级水平的估算 [J]. 财经研究, 2010(2): 61 - 65.
- [5] Song M, Guan Y. The environmental efficiency of Wanjiang demonstration area: A Bayesian estimation approach [J]. Ecological Indicators, 2014, 36: 59 - 67.
- [6] Zhang D Z, Zhang D M. A Study of Environmental Management Efficiency Using the DEA Method [J]. Journal of Management Research (09725814), 2013, 13(1): 11 - 24.
- [7] 谭雪, 曹艳秋, 石磊, 等. 东北三省环境效率比较研究: 1999 - 2010 [J]. 生产力研究, 2013(4): 115 - 118.
- [8] Aldanondo - Ochoa A M, Casasnovas - Oliva V L, Arandia - Miura A. Environmental efficiency and the impact of regulation in dryland organic vine production [J]. Land Use Policy, 2014, 36: 275 - 284.
- [9] 白彩全, 黄芽保, 宋伟轩, 等. 省域金融集聚与生态效率耦合协调发展研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(9): 1 - 7.
- [10] 何枫, 陈荣, 何炼成. SFA 模型及其在我国技术效率测算中的应用 [J]. 系统工程理论与实践, 2004(5): 46 - 50.

Environmental efficiency of China from water and wastewater perspective

TAN Xue, YANG Zhe, HUANG Xiaoxiao, MA Zhong, SHI Lei

(School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: Based on the background that spatial - temporal distribution of water resources in our country is uneven, per capita water resources is limited, and water and wastewater are huge, and from the perspective of water use and wastewater discharge, we estimated the environmental efficiency in 30 regions in China from 1998 to 2013. Firstly, the stochastic frontier analysis (SFA) was applied to find out a great variation in the environmental efficiency among regions. It showed that environmental efficiency in eastern area was generally higher than that in western area. Then, we used grey correlation analysis to research the reasons behind the regional differences, and discovered that water resource, economic development, and environmental protection and supervision played different roles. Based on the results, ordination analysis was also applied to provide some reference on improving the environmental efficiency and pollution treatment.

Key words: environmental efficiency; water; wastewater; stochastic frontier analysis; grey correlation analysis