

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.06.015

基于多维产出 ZSG-DEA 模型的中国水资源污染 综合分配效率测算

赵良仕,冷明祥,孙才志

(辽宁师范大学海洋可持续发展研究院,辽宁 大连 116029)

摘要:利用考虑多维产出的零和收益-数据包络分析(ZSG-DEA)模型测算2000—2017年中国大陆31个省级行政区(以下简称省)在水资源污染排放总量固定下的污染综合分配效率及生产、生活与生态3个维度的产出效率,并基于效率最大化原则对2017年各省污染排放额度进行调整。结果表明:31个省污染综合分配效率的平均值由2000年的0.322上升至2017年的0.364,生产维度产出效率是拉动污染综合分配效率提升的主要动力;2000—2017年31个省污染综合分配效率的平均值为0.341,生态产出过量与生活维度产出不足导致污染综合分配效率处于较低水平;污染综合分配效率、生态维度产出效率与生活维度产出效率受经济发展水平影响较小,而生产维度产出效率受经济发展水平影响较大;污染综合分配效率分布由大到小为东部、西部、中部,生产维度产出效率分布由大到小为东部、中部、西部,生态维度产出效率分布由大到小为西部、中部、东部,生活维度产出效率分布由大到小为西部、东部、中部;各省污染排放调整额度与污染综合分配效率呈正相关关系,北京、天津、上海、浙江、青海与西藏等20个效率较高的省可增加污染排放额度,河北、安徽、河南、江西与湖北等11个效率较低的省需降低污染排放额度。

关键词:水资源;分配效率;多维产出;ZSG-DEA模型;时空特征

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)06-0094-09

Calculation of comprehensive allocation efficiency of water resources pollution in China based on ZSG-DEA model considering multi-dimensional outputs//ZHAO Liangshi, LENG Mingxiang, SUN Caizhi(*Institute of Marine Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China*)

Abstract: This study used the zero sum gains-data envelopment analysis(ZSG-DEA) model, with consideration of multi-dimensional outputs, to estimate the pollution comprehensive allocation efficiency and the output efficiencies of production, life, and ecological dimensions of 31 provincial administrative regions(hereinafter referred to as provinces) in the Chinese mainland from 2000 to 2017 under the fixed total amount of water pollution discharge. Based on the principle of efficiency maximization, the pollution emission quota of each province in 2017 was readjusted. Results are as follows: the annual mean value of pollution comprehensive allocation efficiency of 31 provinces increased from 0.322 in 2000 to 0.364 in 2017, and the production dimension output efficiency was the main factor to promote the pollution comprehensive allocation efficiency; the mean value of pollution comprehensive allocation efficiency of 31 provinces from 2000 to 2017 was 0.341, and the excessive ecological dimension output and insufficient life dimension output led to a low value of pollution comprehensive allocation efficiency; the pollution comprehensive allocation efficiency, ecological dimension output efficiency, and life dimension output efficiency were less affected by the economic development level, while the production dimension output efficiency was seriously affected by the economic development level. Moreover, the eastern region had the highest value of pollution comprehensive allocation efficiency, followed by the western and central regions; the eastern region also had the highest value of production dimension output efficiency, followed by the central and western regions; the

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(41701616);辽宁省社会科学规划基金(L17CJY004);大连市高层次人才创新支持计划(青年科技之星)(2019RQ145)

作者简介:赵良仕(1985—),男,副教授,博士,主要从事水资源经济研究。E-mail: liangshizhao@lnnu.edu.cn

通信作者:孙才志(1970—),男,教授,博士,主要从事水资源经济与海洋经济研究。E-mail: suncaizhi@lnnu.edu.cn

western region had the highest value of ecological dimension output efficiency, followed by the central and eastern regions; and the western region also had the highest value of life dimension output efficiency, followed by the eastern and central regions. There was a positive correlation between the adjustment amount of pollution emission and the pollution comprehensive allocation efficiency. Twenty provinces with higher efficiencies, including Beijing, Tianjin, Shanghai, Zhejiang, Qinghai, and Tibet, could increase the pollution emission quota, while 11 provinces with lower efficiencies, including Hebei, Anhui, Henan, Jiangxi, and Hubei should reduce the amount of pollution emission quota.

Key words: water resources; allocation efficiency; multi-dimensional output; ZSG-DEA model; spatiotemporal characteristics

水资源是关乎国计民生的基础性自然资源和战略性经济资源,也是维持生态环境良性发展的关键性要素^[1]。中国人均水资源拥有量不足世界平均水平的 1/3^[2],伴随着经济的持续高速发展,中国废水排放量日益增加,严重的水污染导致中国水资源供需矛盾更加尖锐^[3]。2016 年 11 月国务院出台了《“十三五”节能减排综合工作方案》,明确提出到 2020 年将全国废水中主要污染物化学需氧量(COD)和氨氮的排放总量分别控制在 2 001 万 t、207 万 t 的目标,旨在通过控制污染物排放总量达到减排的效果,维护我国的水资源安全。科学有效地分配各省市的污染排放额度是实现总量控制目标的重要前提。考虑到中国各省市的发展水平存在较大差异,若按照人均排放量、累计排放量等指标公平无偏向地分配污染排放额度,经济欠发达省市会因缺乏减排动力而导致污染排放量持续增加^[4]。因此,有必要探究中国各省市在污染排放总量固定下的水资源效率,并按照效率最大化原则分配各省市的水资源污染排放额度,这对实现污染排放总量控制的目标与建立完善水资源污染排放交易制度具有重要的指导意义。

目前已有大量研究利用数据包络分析法(data envelopment analysis, DEA)从投入产出角度对水资源效率进行测算。马海良等^[5]以 GDP 为产出要素,基于投入导向的 DEA 模型测算了中国水资源经济效率;廖虎昌等^[6]采用 DEA 模型测算了中国西部 12 个省市的水资源经济效率。在利用水资源进行生产的过程中,必然伴随着污染等非期望产出。为体现污染排放对水资源效率所产生的负面影响^[7],李俊鹏等^[8]将废水排放总量作为非期望产出,利用松弛测度(slack-based measure, SBM)-DEA 模型测算了中国各省市的水资源环境效率;Jin 等^[9]利用考虑非期望产出的超效率 SBM 模型测算了中国 30 个省市的工业水资源环境效率。当下“以人为本”的绿色发展理念成为社会发展的共识,绿色发展理念涵盖生产、生活与生态三大系统^[10-11]。因此有必要将生活维度纳入水资源效率评价体系之中,修正以往水资源效率研究中的偏差。基于此,孙才志

等^[12-18]选取教育、医疗与科技等指标构造了社会发展指数,在此基础上测算了综合考虑经济、社会与环境产出的水资源绿色效率,为水资源综合效率的测算提供了借鉴。但从测算水资源效率的模型看,孙才志等^[12-18]将社会发展指数与 GDP 同归为水资源利用的期望产出,仅从期望产出与非期望产出两个维度对水资源综合效率进行评价。在现实中,生产与生活是相互独立的两个不同维度,生产维度侧重于物质的增长,而生活维度侧重于人的发展^[19],故将生产与生活同归于期望产出一个维度的处理方法不能完全体现水资源综合利用的现状。

有关水资源效率的研究虽已取得较多成果,但均未考虑水资源污染排放总量固定的情况,无法为各省市间污染有效分配提供指导。此外,传统 DEA 模型假设各省市之间是相互独立的,无法评价总量固定前提下的效率问题^[20]。针对传统 DEA 模型所存在的缺陷,Lins 等^[21]将零和博弈理论和 DEA 模型相结合提出了零和收益-数据包络分析模型(zero sum gains, ZSG)-DEA,该模型在碳排放总量固定前提下的碳排放权分配效率研究方面得到了广泛的应用。郑立群^[22]以碳排放量作为投入要素,利用投入导向的 ZSG-DEA 模型对中国碳减排责任进行分摊;姚晔等^[23]基于 ZSG-网络 DEA 模型,探究了在 2030 年碳减排目标约束下实现中国各省市与各行业环境生产技术效率最大化的减排路径;Fang 等^[24]在预测 2030 年中国碳排放额度的基础上,运用 ZSG-DEA 模型给出了各省市碳排放额度的分配方案;李小胜等^[25]利用改进的 ZSG-DEA 模型评价了 2012 年中国大陆 30 个省市的碳排放效率,并基于比例分配法对各省市的碳排放额度进行重新调整。

基于绿色发展理念,本文将水资源利用的产出系统扩展为生产、生活与生态 3 个维度,将污染综合分配效率定义为,在生态产出即水资源污染排放总量固定前提下,水资源、劳动力与资本等投入要素与 GDP、生活指数以及污水排放等产出要素的比值。运用可考虑多维产出的 ZSG-DEA 模型测算 2000—2017 年中国除香港、澳门和台湾地区外的大陆 31 个省级行政区(以下简称省)的污染综合分配效率,

并在效率最大化原则下对 2017 年各省污染排放额度进行重新分配。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 考虑多维产出的 ZSG-DEA 模型

在利用水资源进行生产的过程中,期望产出与非期望产出往往联合产生。根据 Luenberger 的短缺函数思想^[26],Chung 等^[27]建立评价非期望产出效率的方向性距离函数,可以在不同的假设下考虑期望和非期望的联合产出。为将生活产出作为一个单独的维度纳入水资源效率的评价体系中,本文借鉴冯晨鹏等^[20]利用 DEA 模型处理多维非期望产出的方法,将水资源利用的产出类型分为生产、生活和生态产出,构造了一个可处理多维产出的 DEA 模型。进一步借鉴 Lins 等^[21]提出的 ZSG-DEA 模型,构造了可考虑多维产出的 ZSG-DEA 模型,用以评价水资源污染排放总量固定下的污染综合分配效率。

假设共有 K 个省,每个省有 N 个投入、 S 个生产产出、 V 个生活产出、 Q 个生态产出,则 k 省考虑多维产出的 ZSG-DEA 模型为

$$D_k(x, y, h, b; g_y, g_h, g_b) = \max[a_y \beta_y + a_h \beta_h + a_b \beta_b : (y + \beta_y g_y, h + \beta_h g_h, b - \beta_b g_b) \in P(x)] \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{j=1, j \neq k}^K \lambda_j x_{ij} \leq x_{ik} & (i = 1, 2, \dots, N) \\ \sum_{j=1, j \neq k}^K \lambda_j y_{rj} \geq y_{rk} + \beta_y g_{yrk} & (r = 1, 2, \dots, S) \\ \sum_{j=1, j \neq k}^K \lambda_j h_{vj} \geq h_{vk} + \beta_h g_{hvk} & (v = 1, 2, \dots, V) \\ \sum_{j=1, j \neq k}^K \lambda_j b_{qj} \left(1 + \frac{\beta_b g_{bqk}}{\sum_{j=1, j \neq k}^K b_{qj}}\right) = b_{qk} + \beta_b g_{bqk} & (q = 1, 2, \dots, Q) \\ \lambda_j, \beta_y, \beta_h, \beta_b \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $D_k(x, y, h, b; g_y, g_h, g_b)$ 为方向性距离函数; x, y, h, b 分别为投入、生产、生活和生态产出向量; g_y, g_h, g_b 分别为 k 省生产、生活和生态方向向量; $P(x)$ 为生产可能性集合; $\beta_y, \beta_h, \beta_b$ 分别为在当前技术下,保持 k 省的投入不变,生产与生活维度产出可能增加的比例以及生态维度产出可能减少的比例; a_y, a_h, a_b 为对应的权重, $a_y + a_h + a_b = 1$; $x_{ik}, y_{rk}, h_{vk}, b_{qk}$ 分别为 k 省第 i 个投入、第 r 个生产产出、第 v 个生活产出、第 q 个生态产出值; $x_{ij}, y_{rj}, h_{vj}, b_{qj}$ 分别为 j 省第 i 个投入、第 r 个生产产出、第 v 个生活产出、第 q 个生态产出值; $g_{yrk}, g_{hvk}, g_{bqk}$ 分别为 k 省第 r 个生产产出、第 v 个生活产出、第 q 个生态产出方向向量分

量值; λ_j 为 j 省强度变量。

进一步将污染综合分配效率从生产、生活与生态 3 个维度产出进行分解,探究污染综合分配效率变化的来源。效率分解的基本原理为利用 ZSG-DEA 模型中的参数测算出 3 个维度的最佳产出额度,将生产、生活维度的实际产出额度与最佳产出额度的比值分别作为生产维度产出效率(E_y)和生活维度产出效率(E_h);将生态维度的最佳产出额度与实际产出额度的比值作为生态维度产出效率(E_b)。效率分解公式如下:

$$E_y = \frac{y}{y + \beta_y g_y} \quad (3)$$

$$E_h = \frac{h}{h + \beta_h g_h} \quad (4)$$

$$E_b = \frac{b - \beta_b g_b}{b} \quad (5)$$

式中: y, h, b 分别为生产、生活、生态维度的实际产出额度; g_y, g_h, g_b 分别为生产、生活、生态维度的产出分量。

1.2 比例分配模型

在测算出水资源污染排放总量固定下的污染综合分配效率的基础上,借鉴 Gomes 等^[28]提出的比例分配法,在效率最大化原则下对各省污染排放额度进行调整。根据比例分配法,某一污染综合分配效率较低省要实现效率的提升就必须消减一定数量的污染排放;为保持污染排放总量不变,另一污染综合分配效率较高的省需以自己初始污染排放量为权重,按比例接受一定数量污染排放的增加。 k 省从 j 省得到的污染排放量 Δf_{kj} 为

$$\Delta f_{kj} = \frac{f_k f_j (1 - E_j)}{\sum_{k=1, k \neq j}^K f_k} \quad (6)$$

式中: f_k 和 f_j 分别为 k 省和 j 省污染排放; E_j 表示 j 省污染综合分配效率。在各省污染排放量的比例调整结束后, k 省从其余省分配到的污染排放量 Δf_k 为

$$\Delta f_k = \sum_{j=1, j \neq k}^K \left[\frac{f_k f_j (1 - E_j)}{\sum_{k=1, k \neq j}^K f_k} \right] - f_k (1 - E_k) \quad (7)$$

式中 E_k 为 k 省污染综合分配效率。基于式(7)对 31 个省同时进行污染排放量的比例调整,污染综合分配效率较高的省 Δf_k 为正值,表示可增加污染排放量;污染综合分配效率较低的省 Δf_k 为负值,表示需减少污染排放量;所有省 Δf_k 之和为 0。由此实现水资源污染排放总量固定下的污染综合分配效率的最大化。

1.3 指标选取与数据来源

以 2000—2017 年 31 个省的投入产出数据为研

研究对象。所有数据来源于2001—2018年《中国统计年鉴》、31个省的统计年鉴和《中国环境统计年鉴》。投入产出指标解释如下:

1.3.1 投入指标

a. 水足迹^[29-35]:

$$F_w = F_{wde} + F_{wcs} + F_{wip} + F_{wvp} \quad (8)$$

式中: F_w 为总水足迹; F_{wde} 为生活和生态水足迹,引用《中国水资源公报》中生活与生态用水的数据; F_{wcs} 为农畜产品水足迹,为各种农畜产品消费量与其虚拟水含量的乘积; F_{wip} 为工业生产水足迹,以工业用水量代替; F_{wvp} 为灰水足迹,将其视为污染排放,不包含在水足迹投入之中。

b. 劳动力:以31个省的社会从业人员数量衡量生产过程中投入的劳动力数量。

c. 固定资产投资:以2000年为基期的固定资产投资作为31个省的资本投入^[36-38]。

1.3.2 产出指标

a. GDP:选取以2000年为基期的国内生产总值作为31个省在生产维度的产出,代表在水资源利用过程中所创造的经济价值。

b. 灰水足迹^[31]:灰水足迹指为稀释水体中的污染使其达到排放标准所需的水资源量,计算公式为

$$F_{wvp} = \max\left(\frac{\rho_c}{\rho'_c}, \frac{\rho_n}{\rho'_n}\right) \quad (9)$$

式中: ρ_c 、 ρ_n 分别为废水中的COD和氨氮的质量浓度; ρ'_c 、 ρ'_n 表示COD和氨氮质量浓度的排放标准。借鉴GB 8978—1996《污水综合排放标准》中的二级排放标准, $\rho'_c = 120 \text{ mg/L}$ 、 $\rho'_n = 25 \text{ mg/L}$ 。

c. 生活指数^[12-18]:在生活维度产出方面,借鉴代金辉等^[39]、彭远春等^[40]关于社会生活发展水平评价的研究,选取与人民生活密切相关的医疗(每千人口卫生技术人员数)、教育(每10万人口高等学校在校生数)、科技(发明专利授权数)、文化(人均拥有公共图书馆藏量)、环境(人均公园绿地面积)、城镇化水平(城镇人口比例)等6个指标的综合熵值作为水资源综合利用在生活维度的产出,代表在水资源综合利用的过程中对人民生活质量的改善与提升程度。对原始数据进行标准归一化处理,使得不同单位和量级的指标能够进行比较。生活指数越大,表明人们的生活质量越高。

2 结果与分析

基于2000—2017年31个省水资源投入产出数据,运用考虑多维产出类型的ZSG-DEA模型测算了在水资源污染排放总量固定下的污染综合分配效率

及生产、生活与生态3个维度的产出效率。

2.1 时间演变特征

从时间演变特征来看(图1),2000—2017年31个省污染综合分配效率的平均值呈上升趋势,由2000年的0.322上升至2017年的0.364,增长幅度为13%,表明中国水资源投入要素与生产、生活与生态维度产出要素的匹配程度有了一定水平的提升。从3个维度产出效率的结果来看,31个省生产维度产出效率的平均值由2000年的0.639上升至2017年的0.923,增幅高达44.4%,这与中国经济持续高速发展的现状是对应的;31个省生态维度产出效率的平均值由2000年的0.368略降至2017年的0.363,下降了1.35%,说明污染排放相对于水资源投入要素而言仍是过量的,污染减排工作仍不可放松;31个省生活维度产出效率的平均值由2000年的0.212上升至2017年的0.235,仅上升了10.8%,表明中国近年来实行的惠民政策取得了一定成效,但政策的实施力度需进一步加强。综合考虑4种效率的变化状况可知,污染综合分配效率的提升主要由生产维度产出效率拉动的,生态维度产出效率与生活维度产出效率对污染综合分配效率的拉动能力不足。因此,今后在水资源利用的过程中应更加注重生态环境的整治与人民生活质量的提高,全方面均衡地促进污染综合分配效率的提升。

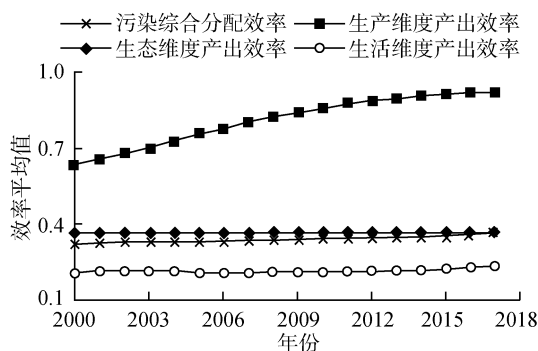


图1 2000—2017年31个省污染综合分配效率及各维度产出效率的年平均

Fig.1 Annual mean values of pollution comprehensive allocation efficiency and output efficiencies of various dimensions of 31 provinces from 2000 to 2017

2000—2017年31个省污染综合分配效率的平均值为0.341,整体水平不高,仍有较大的提升空间,说明中国用水量、劳动力与资本等投入要素与GDP、生活指数以及污染排放等产出要素的匹配度较低。从3个维度产出效率的结果来看,31个省生产维度、生态维度与生活维度产出效率的平均值分别为0.809、0.366与0.219,生产维度产出效率最高,说明生产维度的产出与投入要素的匹配程度较

高,但未达到最优水平,仍具有一定的提升空间;生态维度产出效率与生活维度产出效率处于较低水平,上升空间极大,表明污染排放过量与生活产出不足的问题十分严重。因此,为促进中国污染综合分配效率的提升,在促进生产发展的同时,更应该关注生态环境的治理与人民生活质量的提升。

2.2 空间分布特征

图2为2000—2017年各省污染综合分配效率与3个维度产出效率的平均值。整体上看,污染综合分配效率、生态维度产出效率与生活维度产出效率在各省间的分布特征大致相同,而与生产维度产出效率不同。具体来看,污染综合分配效率排名居于前列的有北京、上海、西藏与青海等省,效率值均高于0.370;广西、湖南、广东与河南等省的排名较为靠后,效率值均低于0.316。从各维度产出效率的结果来看,生产维度产出效率较高的有广东、江苏、山东与浙江等省,这些省主要为经济发达的东部沿海省,效率值均在0.950以上,而西藏、宁夏、青海与甘肃等西部经济欠发达省的生产维度产出效率较低,不足最优水平的50%;生活维度产出效率居于前列的有西藏、青海、北京与天津等省,均高于0.280,而四川、湖南、广西与广东等省则居于末位,生活维度产出效率不足0.180;生态维度产出效率在各省之间的差距较小,均处于0.350~0.400之间,北京、天津、西藏与青海等省的生态维度产出效率相对较高,而广东、山东、江苏与浙江等省生态维度产出效率相对较低。综合来看,污染综合分配效率、生态维度产出效率与生活维度产出效率较高的省大致可分为2类,一类包括北京、上海等省,这些省除了经济发展水平较高之外,还具有科学技术水平高、产业结构合理与城市化率高的特征,且污染排放较少,人民物质精神生活水平也更高,高生产、生态与生活产出效率使得这些省污染综合分配效率较

高;另一类包括西藏与青海等省,这些省虽然经济发展水平较低,生产维度产出效率远落后于其他省,但第二产业占比较低,具有良好的生态环境,人口相对较少,人均可获得的生活维度产出略高于其他省,因而具有较高的生态维度产出效率与生活维度产出效率,这在一定程度上弥补了生产维度产出效率较低的劣势,所以这些省污染综合分配效率也相对较高。经济发展水平的高低并不能决定污染综合分配效率的高低,在水资源利用的过程中,应追求实现生产、生态与生活3个维度的均衡发展。

为探究污染综合分配效率及各维度产出效率的空间分异特征,按照区位分布将中国大陆划分为东部、中部与西部三大区域,2000—2017年各区域污染综合分配效率、生产维度产出效率、生态维度产出效率以及生活维度产出效率的平均值如表1所示。整体来看,2000—2017年污染综合分配效率呈现东部大、西部居中、中部小的空间分布特征,表明东部地区用水量、劳动力与资本等投入与GDP、生活指数以及污染排放等产出要素的匹配程度最高,而中部地区的匹配程度最差。从各维度产出效率分解的结果来看,生产维度产出效率呈现东部大、中部居中、西部小的空间分布特征;生态维度产出效率呈现西部大、中部居中、东部小的空间分布特征;生活维度产出效率呈现西部大、东部居中、中部小的空间分布特征。东部地区的生产维度产出效率处于较高水平,但存在污染排放过量与生活维度产出不足的问题,生态维度产出效率位居三大区域末位,污染排放过量问题尤为严重;中部地区的生产维度产出效率与生态维度产出效率处于中间水平,生活维度产出效率居于末位,应加大惠民政策的实施力度,促进人民生活质量的提升,同时不可忽视生产的发展与生态的保护;西部地区的生态维度产出效率与生活维度产出效率均高于东部和中部地区,但生

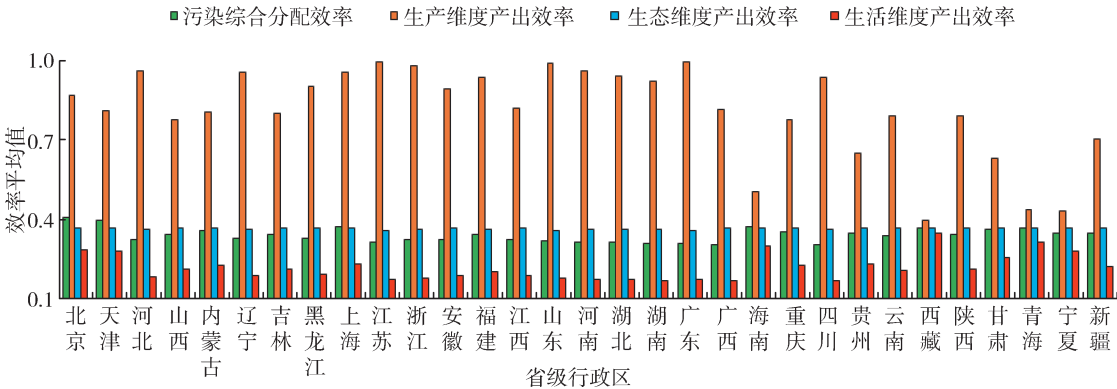


图2 2000—2017年各省污染综合分配效率及各维度产出效率的平均值
Fig.2 Mean values of pollution comprehensive allocation efficiency and output efficiencies of various dimensions from 2000 to 2017 for different provinces

产维度产出效率与东部、中部地区存在较大差距,应加快产业结构升级与科技水平的提升,提高经济发展水平。

表 1 2000—2017 年三大区域污染综合分配效率及各维度产出效率的平均值

Table 1 Mean values of pollution comprehensive allocation efficiency and output efficiencies of various dimensions from 2000 to 2017 for three regions

区域	污染综合分配效率	生产维度产出效率	生态维度产出效率	生活维度产出效率
东部	0.347	0.903	0.364	0.217
中部	0.326	0.876	0.366	0.190
西部	0.345	0.679	0.367	0.240

3 效率最大化下污染排放分配方案

在测算出 31 个省水资源污染排放总量固定下的污染综合分配效率的基础上,依据比例分配方法对各省污染排放量进行调整。污染综合分配效率较低的省因单位污染排放所带来的生产与生活效益较少,应减少污染排放额度;而污染综合分配效率较高的省其单位污染排放可以带来更多的生产与生活效益,这些省应以各自的污染排放量为权重,按比例获得低效省的部分污染排放额度。基于上述方法可确定各省污染排放的最优额度,在保持污染排放总量不变的前提下,实现整体污染综合分配效率的提升,由此产生最佳的生产与生活效益,促进水资源的绿色可持续利用。

鉴于对未来投入产出指标的预测存在较大的不确定性,本文以 2017 年为例,在效率最大化原则下对 31 个省污染排放额度进行重新分配(表 2)。2017 年各省在水资源污染排放总量固定前提下污染综合分配效率的均值仅为 0.364,具有较大的提升空间。在对各省污染排放额度进行重新分配后发现,污染排放额度可增加的有北京、天津、上海、浙江、青海与西藏等 20 个省。从污染排放额度可增加量的角度来看,辽宁、陕西与吉林为可增加量最多的 3 个省,分别可增加 1.074 亿 m³、1.054 亿 m³ 与 1.052 亿 m³;从污染排放可增加量占初始排放额度比例的角度来看,比例最高的 4 个省分别为北京、天津、上海与海南,可增排比例分别为 11.3%、10.7%、8.7%、8.7%。这些省污染综合分配效率较高,在现有的生产技术条件下,基本不存在污染减排的压力。重新分配后污染排放额度需要减少的为河北、安徽、河南、江西、湖北等 11 个省。从污染排放额度需减少量的角度来看,广东、四川与江苏为需减排最多的 3 个省,分别需减排 4.971 亿 m³、2.424 亿 m³ 与 2.391 亿 m³;从污染排放需减少量占

表 2 2017 年各省污染综合分配效率及排放量分配结果
Table 2 Pollution comprehensive allocation efficiencies and results of pollution emission allocation for different provinces in 2017

省级行政区	污染综合分配效率	初始灰水足迹/亿 m ³	分配后灰水足迹/亿 m ³	灰水足迹调整量/亿 m ³	调整比例/%
北 京	0.428	6.817	7.587	0.770	11.3
天 津	0.423	7.717	8.540	0.824	10.7
河 北	0.332	40.567	40.099	-0.468	-1.2
山 西	0.385	16.267	17.282	1.015	6.2
内蒙古	0.402	12.475	13.509	1.034	8.3
辽 宁	0.377	21.133	22.208	1.074	5.1
吉 林	0.393	14.542	15.594	1.052	7.2
黑龙江	0.373	20.683	21.659	0.976	4.7
上 海	0.406	11.817	12.849	1.032	8.7
江 苏	0.325	62.017	59.625	-2.391	-3.9
浙 江	0.340	34.883	34.944	0.061	0.2
安 徽	0.330	41.300	40.705	-0.595	-1.4
福 建	0.345	32.908	33.176	0.267	0.8
江 西	0.327	43.292	42.444	-0.847	-2.0
山 东	0.335	43.400	42.932	-0.468	-1.1
河 南	0.336	35.892	35.756	-0.136	-0.4
湖 北	0.329	43.275	42.521	-0.754	-1.7
湖 南	0.323	47.983	46.636	-1.348	-2.8
广 东	0.324	83.408	78.437	-4.971	-6.0
广 西	0.334	37.992	37.685	-0.307	-0.8
海 南	0.402	6.517	7.081	0.564	8.7
重 庆	0.371	21.058	21.987	0.928	4.4
四 川	0.316	56.258	53.835	-2.424	-4.3
贵 州	0.361	22.708	23.449	0.740	3.3
云 南	0.351	27.558	28.076	0.518	1.9
西 藏	0.378	2.083	2.221	0.138	6.6
陕 西	0.387	16.367	17.421	1.054	6.4
甘 肃	0.399	11.033	11.919	0.886	8.0
青 海	0.388	4.792	5.144	0.352	7.4
宁 夏	0.370	8.350	8.798	0.448	5.4
新 疆	0.382	16.558	17.531	0.973	5.9

初始排放额度比例的角度来看,比例最高的 3 个省仍为广东、四川与江苏,需减排比例分别为 6.0%、4.3% 与 3.9%。在当前的生产技术条件下,上述省面临较大的减排压力,亟须通过调整产业结构,提高污染处理技术等方式减少污染的排放。

基于上述方法在效率最大化原则下对各省的污染排放额度进行调整,确定各省在当前生产技术条件下污染排放的最优额度。探究各省水资源污染排放总量固定下的污染综合分配效率,并在此基础上确定污染排放的最优额度的意义在于,可基于此建立全国统一的水资源污染排放交易制度,污染排放额度盈余的省可出售部分污染排放额度获得经济收益,而污染排放额度不足的省为了满足经济发展的需要,可以通过购买其他省盈余的污染排放额度来保障自身经济发展的权力。依据水资源污染排放交易制度,可通过增加污染综合分配效率较低省的

产成本,促进其积极主动开展减排工作,又可灵活地实现全国水资源污染排放总量控制的目标,推动水资源的绿色可持续利用。

4 结 论

a. 在时间演变特征方面,31个省污染综合分配效率的平均值由2000年的0.322上升至2017年的0.364,生产维度产出效率的平均值由2000年的0.639上升至2017年的0.923,生态维度产出效率的平均值由2000年的0.368略降至2017年的0.363,生活维度产出效率的平均值由2000年的0.212上升至2017年的0.235,污染综合分配效率的提升主要由生产维度产出效率拉动的;2000—2017年31个省污染综合分配效率的平均值为0.341,整体水平不高,生产维度产出效率、生态维度产出效率、生活维度产出效率的平均值分别为0.809、0.366、0.219,生态维度产出过量与生活维度产出不足导致污染综合分配效率处于较低水平。因此,今后在水资源利用的过程中,在保证生产发展的同时,更应该关注生态环境的治理与人民生活质量的提升,促进水资源的绿色可持续利用。

b. 在空间分异特征方面,污染综合分配效率、生态维度产出效率与生活维度产出效率受经济发展水平的影响较小,其高值区在经济发达与欠发达省均有分布,生产维度产出效率受经济发展水平的影响较大,在水资源利用的过程中,应实现生产、生态与生活3个维度的均衡发展。2000—2017年中国大陆污染综合分配效率呈现东部大、西部居中、中部小的空间分布特征;生产维度产出效率呈现东部大、中部居中、西部小的空间分布特征;生态维度产出效率呈现西部大、中部居中、东部小的空间分布特征;生活维度产出效率呈现西部大、东部居中、中部小的空间分布特征。东部地区需继续加强污染减排工作,中部地区应采取措施积极促进人民生活质量的提升,西部地区应加快升级产业结构与提升科学技术水平,提高经济发展的水平。

c. 基于效率最大化原则对各省水资源污染排放额度进行调整后发现,北京、天津、上海、浙江、青海与西藏等20个污染综合分配效率较高的省可增加污染排放额度,河北、安徽、河南、江西、湖北等11个污染综合分配效率较低的省需降低污染排放额度。基于此分配方案可建立全国统一的水资源污染排放交易制度,排放额度不足的省通过购买其他省多余的排放额度来保障其经济发展的权力,既可促进效率较低的省积极开展减排工作,又可灵活实现全国水资源污染排放总量控制的目标。

参考文献:

- [1] 赵霞,杜军凯,牛存稳,等. 中国水资源与经济社会发展匹配度的动态分析[J]. 人民长江,2018,49(23):68-73. (ZHAO Xia, DU Junkai, NIU Cunwen, et al. Dynamic analysis on matching degree of water resources and economic and social development in China[J]. Yangtze River, 2018, 49(23): 68-73. (in Chinese))
- [2] 张陈俊,章恒全,陈其勇,等. 中国用水量变化的影响因素分析:基于LMDI方法[J]. 资源科学,2016,38(7):1308-1322. (ZHANG Chenjun, ZHANG Hengquan, CHEN Qiyong, et al. Factors influencing water use changes based on LMDI methods[J]. Resources Science, 2016, 38(7): 1308-1322. (in Chinese))
- [3] 汪克亮,刘悦,史利娟,等. 长江经济带工业绿色水资源效率的时空分异与影响因素:基于EBM-Tobit模型的两阶段分析[J]. 资源科学,2017,39(8):1522-1534. (WANG Keliang, LIU Yue, SHI Lijuan, et al. Yangtze River Economic Zone spatial and temporal disparities in industrial green water resource efficiency and influencing factors based on two-step analysis of EBM-Tobit model[J]. Resources Science, 2017, 39(8): 1522-1534. (in Chinese))
- [4] 李小红,宋马林. “十二五”时期我国碳排放额度分配评估及效率研究[J]. 经济科学,2015(5):58-69. (LI Xiaosheng, SONG Malin. Assessment and efficiency of carbon emission quota allocation in China during the 12th Five Year Plan Period[J]. Economic Science, 2015(5): 58-69. (in Chinese))
- [5] 马海良,黄德春,张继国,等. 中国近年来水资源利用效率的省际差异:技术进步还是技术效率[J]. 资源科学,2012,34(5):794-801. (MA Hailiang, HUANG Dechun, ZHANG Jiguo, et al. The provincial differences of China's water use efficiency in recent years: technological progress or technical efficiency[J]. Resources Science, 2012, 34(5): 794-801. (in Chinese))
- [6] 廖虎昌,董毅明. 基于DEA和Malmquist指数的西部12省水资源利用效率研究[J]. 资源科学,2011,33(2):273-279. (LIAO Huchang, DONG Yiming. Utilization efficiency of water resources in 12 western provinces of China based on the DEA and Malmquist TFP index[J]. Resources Science, 2011, 33(2): 273-279. (in Chinese))
- [7] 马海良,丁元卿,王蕾. 绿色水资源利用效率的测度和收敛性分析[J]. 自然资源学报,2017,32(3):406-417. (MA Hailiang, DING Yuanqing, WANG Lei. Measurement and convergence analysis of green water utilization efficiency[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(3): 406-417. (in Chinese))
- [8] 李俊鹏,郑冯忆,冯中朝. 基于公共产品视角的水资源

- 利用效率提升路径研究[J]. 资源科学, 2019, 41(1): 98-112. (LI Junpeng, ZHENG Fengyi, FENG Zhongchao. Study on the improvement path of water resource utilization efficiency from the perspective of public products[J]. Resources Science, 2019, 41(1): 98-112. (in Chinese))
- [9] JIN W, ZHANG H, LIU S, et al. Technological innovation, environmental regulation, and green total factor efficiency of industrial water resources [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 211: 61-69.
- [10] 周亮, 车磊, 周成虎. 中国城市绿色发展效率时空演变特征及影响因素[J]. 地理学报, 2019, 74(10): 2027-2044. (ZHOU Liang, CHE Lei, ZHOU Chenghu. Spatio-temporal evolution and influencing factors of urban green development efficiency in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(10): 2027-2044. (in Chinese))
- [11] 车磊, 白永平, 周亮, 等. 中国绿色发展效率的空间特征及溢出分析[J]. 地理科学, 2018, 38(11): 1788-1798. (CHE Lei, BAI Yongping, ZHOU Liang, et al. Spatial pattern and spillover effects of green development efficiency in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(11): 1788-1798. (in Chinese))
- [12] 孙才志, 马奇飞, 赵良仕. 基于 GWR 模型的中国水资源绿色效率驱动机理[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 1022-1035. (SUN Caizhi, MA Qifei, ZHAO Liangshi. Analysis of driving mechanism based on a GWR model of green efficiency of water resources in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 1022-1035. (in Chinese))
- [13] 孙才志, 马奇飞. 中国省际水资源绿色效率空间关联网络研究[J]. 地理研究, 2020, 39(1): 53-63. (SUN Caizhi, MA Qifei. Spatial correlation network of water resources green efficiency between provinces of China[J]. Geographical Research, 2020, 39(1): 53-63. (in Chinese))
- [14] 孙才志, 马奇飞, 赵良仕. 中国东、中、西三大地区水资源绿色效率时空演变特征与收敛性分析[J]. 地理科学进展, 2018, 37(7): 901-911. (SUN Caizhi, MA Qifei, ZHAO Liangshi. Temporal and spatial evolution of green efficiency of water resources in China and its convergence analysis[J]. Progress in Geography, 2018, 37(7): 901-911. (in Chinese))
- [15] 孙才志, 马奇飞, 赵良仕. 基于 SBM-Malmquist 生产率指数模型的中国水资源绿色效率变动研究[J]. 资源科学, 2018, 40(5): 993-1005. (SUN Caizhi, MA Qifei, ZHAO Liangshi. Green efficiency changes for water resources in China based on SBM-Malmquist model [J]. Resources Science, 2018, 40(5): 993-1005. (in Chinese))
- [16] 孙才志, 马奇飞, 李素娟. 中国水资源绿色效率 TFP 变化趋势预测[J]. 人民黄河, 2018, 40(2): 42-48. (SUN Caizhi, MA Qifei, LI Sujuan. Prediction of water resources green efficiency TFP in China [J]. Yellow River, 2018, 40(2): 42-48. (in Chinese))
- [17] 孙才志, 郜晓雯, 赵良仕. “四化”对中国水资源绿色效率的驱动效应研究[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2018, 18(1): 57-67. (SUN Caizhi, GAO Xiaowen, ZHAO Liangshi. Driving effect of “Four Modernizations” on green efficiency of water utilization in China [J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2018, 18(1): 57-67. (in Chinese))
- [18] 孙才志, 姜坤, 赵良仕. 中国水资源绿色效率测度及空间格局研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(12): 1999-2011. (SUN Caizhi, JIANG Kun, ZHAO Liangshi. Measurement of green efficiency of water utilization and its spatial pattern in China [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(12): 1999-2011. (in Chinese))
- [19] 张军涛, 翟婧彤. 中国“三生空间”耦合协调度测度[J]. 城市问题, 2019(11): 38-44. (ZHANG Juntao, ZHAI Jingtong. Measurement of coupling coordination degree of “three living space” in China [J]. Urban Problems, 2019(11): 38-44. (in Chinese))
- [20] 冯晨鹏, 王慧玲, 毕功兵. 存在多种非期望产出的非径向零和收益 DEA 模型我国区域环境效率实证研究[J]. 中国管理科学, 2017, 25(10): 42-51. (FENG Chenpeng, WANG Huiling, BI Gongbing. Non-radial ZSG-DEA model with multiple undesirable outputs: an empirical study for regional environmental efficiencies in China [J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(10): 42-51. (in Chinese))
- [21] LINS M P E, GOMES E G, SOARES DE MELLO J C C B, et al. Olympic ranking based on a zero sum gains DEA model [J]. European Journal of Operational Research, 2003, 148(2): 312-322.
- [22] 郑立群. 中国各省区碳减排责任分摊: 基于零和收益 DEA 模型的研究[J]. 资源科学, 2012, 34(11): 2087-2096. (ZHENG Liqun. Sharing the carbon emission reduction responsibility across Chinese provinces: a zero sum gains DEA model [J]. Resources Science, 2012, 34(11): 2087-2096. (in Chinese))
- [23] 姚晔, 夏炎, 范英, 等. 基于环境生产技术效率的中国 2030 年区域减排目标路径研究[J]. 资源科学, 2017, 39(12): 2335-2343. (YAO Ye, XIA Yan, FAN Ying, et al. The pathway of Chinese regional carbon emission in 2030: a research based on ZSG environmental production technology efficiency [J]. Resources Science, 2017, 39(12): 2335-2343. (in Chinese))
- [24] FANG K, ZHANG Q, LONG Y, et al. How can China achieve its intended nationally determined contributions by

- 2030? a multi-criteria allocation of China's carbon emission allowance [J]. Applied Energy, 2019, 241: 380-389.
- [25] 李小红,李月,李燕. 中国省际碳排放额度分配方法研究[J]. 财贸研究,2018,29(10):32-39. (LI Xiaosheng, LI Yue, LI Yan. Allocation of CO₂ emissions allowance over provinces in China[J]. Finance and Trade Research, 2018,29(10):32-39. (in Chinese))
- [26] LUENBERGER D G. Microeconomic theory[M]. Boston: McGraw-Hill,1995:73-75.
- [27] CHUNG Y H,FARE R,GROSSKOPF S. Productivity and undesirable outputs: a directional distance function approach [J]. Journal of Environmental Management, 1997,51(3):229-240.
- [28] GOMES E G,LINS M P E. Modeling undesirable outputs with zero sum gains data envelopment analysis models [J]. Journal of the Operational Research Society,2008,59(5):616-623.
- [29] 赵良仕,孙才志,邹玮. 基于空间效应的中国省际经济增长与水足迹强度收敛关系分析[J]. 资源科学,2013,35(11):2224-2231. (ZHAO Liangshi,SUN Caizhi,ZOU Wei. Convergence between economic growth and water footprint intensity at the provincial scale in China[J]. Resources Science, 2013, 35 (11): 2224-2231. (in Chinese))
- [30] 程先,孙然好,陈利顶,等. 基于农牧业产品和生活用水的京津冀地区水足迹时空特征研究[J]. 生态学报,2018,38(12):4461-4472. (CHENG Xian,SUN Ranhao, CHEN Liding, et al. Spatial and temporal patterns of the water footprint in the Beijing-Tianjin-Hebei region with consideration of crop and animal products and domestic water[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38 (12): 4461-4472. (in Chinese))
- [31] 孙克,聂坚. 基于引力模型的省域灰水足迹空间关联网络分析[J]. 水资源保护,2019,35(6):29-36. (SUN Ke, NIE Jian. Spatial correlation network analysis of provincial grey water footprint based on gravity model[J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (6): 29-36. (in Chinese))
- [32] 刘静,余钟波,基于水足迹理论的中国水资源压力评价[J]. 水资源保护,2019,35(5):35-39. (LIU Jing, YU Zhongbo. Water resources pressure assessment in China based on water footprint theory [J]. Water Resources Protection,2019,35(5):35-39. (in Chinese))
- [33] 薛英岚,陈岩,曾维华. 流域上下游水资源与水污染冲突评估:基于水足迹-粗糙集理论[J]. 水利经济,2020,38(6):43-49. (XUE Yinglan, CHEN Yan, ZENG Weihua. Assessment of conflicts of water resources and pollution between upstream and downstream in a basin based on water footprints and rough sets [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38 (6): 43-49. (in Chinese))
- [34] 孙才志,郑靖伟. 基于 MRIO 与 SNA 的中国水资源空间转移网络分析[J]. 水资源保护,2020,36(1):9-17. (SUN Caizhi,ZHENG Jingwei. Analysis of China's water resources spatial transfer network based on MRIO and SNA[J]. Water Resources Protection,2020,36(1):9-17. (in Chinese))
- [35] 孙才志,王中慧. 中国与“一带一路”沿线国家农产品贸易的虚拟水量流动特征[J]. 水资源保护,2019,35(1):14-19. (SUN Caizhi, WANG Zhonghui. Characteristics of virtual water volume flow of agricultural products trade between China and countries along “Belt and Road” [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (1): 14-19. (in Chinese))
- [36] 赵良仕,孙才志,刘凤朝. 环境约束下中国省际水资源两阶段效率及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境,2017,27(5):27-36. (ZHAO Liangshi,SUN Caizhi, LIU Fengchao. Two-stage utilization efficiency of the interprovincial water resources under environmental constraint and its influence factors in China [J]. China Population,Resources and Environment,2017,27(5):27-36. (in Chinese))
- [37] 赵志博,赵领娣,王亚薇,等. 不同情景模式下雄安新区的水资源利用效率和节水潜力分析[J]. 自然资源学报,2019,34(12):2629-2642. (ZHAO Zhibo, ZHAO Lingdi, WANG Yawei, et al. Analysis of water resources utilization efficiency and water saving potential in Xiong'an New Area under different scenarios [J]. Journal of Natural Resources,2019,34(12):2629-2642. (in Chinese))
- [38] 章恒全,蔡晓莹,黄元龙,等. 中国绿色水资源利用效率的时空分布差异[J]. 水利经济,2020,38(3):1-6. (ZHANG Hengquan,CAI Xiaoying,HUANG Yuanlong, et al. Spatial and temporal distribution differences of green efficiency in utilization of water resources in China [J]. Journal of Economics of Water Resources,2020,38(3):1-6. (in Chinese))
- [39] 代金辉,马树才,刘宏岩. 社会发展水平统计指标体系的构建与评价[J]. 统计与决策,2018,34(1):30-33. (DAI Jinhui,MA Shucan,LIU Hongyan. Construction and evaluation of statistical index system for social development level [J]. Statistics & Decision, 2018, 34 (1): 30-33. (in Chinese))
- [40] 彭远春. 我国社会建设指标体系研究[J]. 统计与决策,2013(20):20-23. (PENG Yuanchun. Research on the index system of social construction in China [J]. Statistics & Decision,2013(20):20-23. (in Chinese))

(收稿日期:2020-07-09 编辑:施 业)