柴达木盆地工业绿色发展效率评价

兰月媛，丁生喜

（青海大学财经学院，西宁 810016）

摘要：基于超效率NSBM（网络的基于松弛值测算模型），构建体现工业经济、生态效益、社会福利的工业绿色发展效率指标体系，测算2010—2021年柴达木盆地工业绿色发展状况。结果表明：工业绿色发展整体效率并未实现DEA（数据包络分析）有效，且实现DEA有效的年份均为弱DEA有效；“十三五”规划阶段环境经济效率与环境福利效率具备一致性；工业绿色发展模式主要为“高-高”“低-低”型，发展不均衡、不稳定。

关键词：柴达木盆地；工业绿色发展；非期望产出；超效率NSBM（网络的基于松弛值测算模型）

中图分类号：F427 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2025)07－0179－05

工业绿色发展不仅是中国重要的政策导向，也是推动中国由制造大国向制造强国、保障经济持续高质量发展的必经之路。《“十四五”工业绿色发展规划》中明确指出，要坚持以碳达峰碳中和为目标，进一步推进工业绿色发展，并对“十四五”期间工业绿色发展做出具体规划。然而由于中国工业长期以来的“高投入、高能耗、低效益”与“先污染、后治理”的粗放式发展模式，目前在能源结构上依然以煤炭为主，能源使用效率尚未实现显著提升，尽管已有一些努力，但关键区域和主要行业的污染问题仍未得到彻底的解决。因此，继续加快推进工业绿色发展进程、进一步摆脱资源依赖的低效发展模式、继续依托绿色创新技术改造是经济可持续发展的关键一环。工业绿色发展涉及“经济-环境-社会”3大系统，并作为可持续发展的重要一步，厘清其深刻内涵、构建科学评价指标体系、合理评价其发展状况，对于实现工业经济持续高质发展、生态环境保护、居民生活质量提升等具有重要意义。作为中国3大内陆盆地之一，柴达木盆地具有独特的经济与生态地位。柴达木盆地钾盐资源、矿藏资源丰富，是中国西部的重要资源工地，不仅是青海省也是中国西部最具活力的经济增长极之一。而根据国家主体功能区划分的要求与青海省区域发展的总体格局，2014年青海省近9成国土面积被列入限制开发和禁止开发区域，2016年青海省“3个最大”省情定位被提出。鉴于此，本文以柴达木盆地为研究对象，测度柴达木盆地工业绿色发展效率，探析其时间演变态势，以期为柴达木盆地工业绿色发展提供借鉴，为其他资源型城市提供参考。

目前关于工业绿色发展的研究成果颇多，主要包含定义、评估方法、发展历程、影响因素等多个方面。

关于工业绿色发展内涵的研究，主要历经了3个阶段：第1阶段，偏重生态发展。而弱化了工业发展，苏利阳等[1]基于工业绿色化与绿色产业化构造工业绿色发展业绩指数以衡量工业绿色发展过程，该指数关注了产业能耗、污染强度等，忽略了工业发展的实际情况；第2阶段，重视生态效益和工业经济的双赢，目前国内大部分学者基于此理解测度工业绿色发展状况，所涉及指标大多为工业经济发展、生态保护与治理、政府绿色政策支持[2-3]；随着可持续发展理念的不断推进，学界关于工业绿色发展内涵的理解逐渐步入第3阶段，注重工业经济、生态效益与社会福利的同步提升，引入社会福利的相关指标[4]。基于上述对工业绿色发展内涵的理解，本文将工业绿色发展定义为以创新驱动为主要特征，以提高人类福祉为最终目标，兼顾工业经济可持续增长、生态环境优化、社会福利提升的新型工业发展方式[5-6]。

关于工业绿色发展的测度大体上可以划分为两类，一是根据其发展内涵构建相应评价指标体系，运用主观法、客观法或主客结合法对其发展水平进行测度[7-8]，二是根据其最优投入产出比计算生

收稿日期：2024-10-12

基金项目：国家社会科学基金（21XMZ044）

作者简介：兰月媛（2001—），女，畲族，江西吉安人，硕士研究生，研究方向为区域经济绿色发展；通信作者丁生喜（1971—），女，青海西宁人，教授，硕士研究生导师，研究方向为区域经济发展与城镇化。

产效率与资源利用效率，由于数据包络分析（data envelopment analysis，DEA）不需明确投入与产出指标具体函数关系，具有较强的客观性，以及可以有效处理多投入、多产出问题，备受学者青睐，成为评价工业绿色发展效率的主流方法之一。然而大多数学者多采用包含非期望产出的改进 DEA 模型[9-10]，将决策单元的整个系统视为一个“黑箱”，忽视了系统内部作用对整个体系的影响。部分学者采用网络 DEA 模型[6,11]、两阶段 SBM（slacks-based measure）模型[12-13]、三阶段 SBM-DEA 模型[14]以弥补这一缺憾，在测算整体效率的同时也能兼顾各子阶段的效率。在研究尺度上，多以全国[15]、省域[16]、流域[17]等宏观、中观视角为主。

总体而言，第一，关于工业绿色发展状况的测度多从经济与环境层面展开，工业社会福利提升的关注度略有不足；第二，多数学者进行效率测度时对生产内部网络结构考虑不足；第三，在研究对象选择上大体为全国、中东部省域、流域等重点地带，针对肩负生态重任的西部重要工业基地柴达木盆地的研究还比较缺乏。鉴于此，聚焦于柴达木盆地，在研究指标体系中引入社会福利的相关指标，运用考虑非期望产出的网络超效率 SBM 模型，对柴达木盆地工业绿色发展效率进行评价，以期把握柴达木盆地近 12 年工业绿色发展状况。

1　研究区域概况与数据来源

1.1　研究区域

柴达木盆地位于青藏高原东北部，是中国重要的能源和矿产资源富集区之一，已探明矿点多达 200 余处，各种资源储量潜在价值达 17.2 万亿元，是中国西部的资源工业基地，具备强劲的工业发展潜力。2022 年，海西州第二产业增加值占比高达 70%，工业作为推动当地经济发展的重要力量，对青海省经济发展，乃至缩小东西发展差距具有重要意义。然而受制于柴达木盆地特殊自然地理环境，当地生态系统结构简单、抗干扰能力差，生态环境十分脆弱，对当地资源开发、工业发展提出了更为严苛的条件。为此，亟须对柴达木盆地工业绿色发展状况进行测度评价。柴达木盆地隶属于青海省海西蒙古族藏族自治州，占全州面积 78.76%，州内工业经济活动主要集中于柴达木盆地，考虑其经济与现实意义，使用数据均为海西蒙古族藏族自治州数据。

1.2　数据来源

选取 2010—2021 年青海省海西蒙古族藏族自治州（后文简称海西州）的时间序列数据，数据主要来源于 2011—2022 年的《海西州统计年鉴》《青海省统计年鉴》、2010—2021 年的《海西州国民经济和社会发展统计公报》。工业三废综合指数由工业固体废物生成量、工业废水排放量与工业 SO_2 排放量，利用熵权-TOPSIS（逼近理想解排序）法模型计算得出。少数缺失数据采用插值法补齐。

2　研究方法与评价指标

2.1　研究方法

采用考虑非期望产出的网络超效率 SBM 模型计算柴达木盆地工业绿色发展效率。该模型可以将非期望产出、超效率与系统内部网络结构考虑在内，使评价结果更准确，其具体模型如下：

$$\rho=\min\frac{\sum_{k=1}^{K}\omega^{k}\left[1+\frac{1}{m_k}\left(\sum_{i=1}^{m_k}\frac{s_i^{k-}}{x_{i0}^{k}}\right)\right]}{\sum_{k=1}^{K}\omega^{k}\left[1-\frac{1}{p_k+q_k}\left(\sum_{p=1}^{p_k}\frac{s_p^{k\mathrm{g}+}}{y_{p0}^{k}}+\sum_{q=1}^{q_k}\frac{s_q^{k\mathrm{b}+}}{u_{q0}^{k}}\right)\right]}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}x_0^k\geqslant X^k\lambda^k+s^{k-}\\ y_0^k\leqslant Y^k\lambda^k-s^{k\mathrm{g}+}\\ u_0^k\geqslant U^k\lambda^k+s^{k\mathrm{b}+}\\ Z^{(k,h)}\lambda^h=Z^{(k,h)}\lambda^k\\ \varepsilon\leqslant 1+\frac{1}{p_k+q_k}\left(\sum_{p=1}^{p_k}\frac{s_p^{k\mathrm{g}+}}{y_{p0}^{k}}+\sum_{q=1}^{q_k}\frac{s_q^{k\mathrm{b}+}}{u_{q0}^{k}}\right)\\ \sum_{j=1}^{N}\lambda_j^k=\sum_{k=1}^{K}\omega^k=1\\ \lambda^k,s^{k-},s^{k\mathrm{g}+},s^{k\mathrm{b}+},\omega^k\geqslant 0\end{cases}\tag{1}$$

式中：ρ 为非导向的考虑非期望产出的 NSBM 模型的整体效率；k 为各子阶段；ω^k 为各子阶段权重值；m_k、p_k、q_k、ξ_k 分别为第 k 个阶段的投入、期望产出、非期望产出与中间产品；X、Y、U、$Z^{(k,h)}$ 分别对应决策单元的投入、期望产出、非期望产出与阶段 k 到阶段 h 间的中间产出矩阵；s_i^{k-}、$s_p^{k\mathrm{g}+}$、$s_q^{k\mathrm{b}+}$ 为投入、期望与非期望产出的松弛变量；x_0^k、y_0^k、u_0^k 分别为被评价决策单元的 m 维投入变量、p 维期望产出变量和 q 维非期望产出变量；λ^k 为 k 阶段的模型权重。

由于设定的网络结构为两阶段模型，所以各子阶段效率为

$$\rho^1=\frac{1+\frac{1}{m_1}\left(\sum_{i=1}^{m_1}\frac{s_i^{1-*}}{x_{i0}^{k}}\right)}{1-\frac{1}{\zeta}\left(\sum_{\zeta=1}^{\zeta_k}\frac{s_i^{1+*}}{z_{\zeta 0}}\right)}\tag{2}$$

$$\rho^2=\frac{1+\frac{1}{\zeta}\left(\sum_{\zeta=1}^{\zeta_k}\frac{s_i^{1+*}}{z_{\zeta 0}}\right)}{1-\frac{1}{p_2+q_2}\left(\sum_{p=1}^{p_2}\frac{s_p^{\mathrm{g}+*}}{y_{p0}}+\sum_{q=1}^{q_2}\frac{s_q^{\mathrm{b}+*}}{u_{q0}}\right)}\tag{3}$$

式中:s_i^{1-*}、s_p^{g+*}、s_q^{b+*}为式(1)中最优的投入、期望产出与非期望产出的松弛变量。

2.2 指标体系构建

工业绿色发展要求追求经济效益、生态环境与社会福利的有机统一,而采用网络 DEA 方法,多将工业绿色发展分解为工业生产与环境治理两个子系统,忽视了工业绿色发展对社会福利的影响。因此,本文使用考虑非期望产出的网络超效率 SBM 模型,参考王喜平和李艳梅[6]的研究,引入非经济福利因素的投入产出指标,将工业绿色发展过程划分为工业生产和生态治理与社会福利提升两个子阶段。

第 1 阶段为工业生产阶段,劳动力、资本、技术与能源要素被工业部门投入,从而得到非期望产出(工业三废)和期望产出(工业增加值与新产品销售收入),得到环境经济效率;第 2 阶段为生态治理与社会福利提升阶段,第 2 阶段投入为第 1 阶段的期望产出,引入政府环境治理投资与居民医疗支出,计算出最终非期望产出(医疗机构入院人数)和期望产出(工业固体废物综合利用率),获得环境福利效率。

综上所述,构建的两阶段工业绿色发展效率评价指标体系见表 1。其系统网络结构如图 1 所示。

表 1 工业绿色发展效率评价指标体系

阶段	类别	一级指标	二级指标	单位
第 1 阶段	投入	劳动力投入	工业从业人员	人
		资本投入	工业固定资产投资	万元
		技术投入	规上工业企业 R&D 经费支出	万元
		能源投入	工业能源消耗总量	万 t 标准煤
	产出	环境污染	工业三废综合指数	—
		工业经济发展	工业增加值	万元
			规上工业新产品销售收入	万元
第 2 阶段	投入	工业经济发展	工业增加值	万元
			规上工业新产品销售收入	万元
		环境治理投资	环保支出占财政支出比重	%
		医疗支出	居民人均医疗保健支出	元
	产出	生态治理效益	工业固体废物综合利用率	%
		社会福利产出	医疗机构入院人数	人

3 结果分析

3.1 全局工业绿色发展效率

根据考虑非期望产出的两阶段超效率网络 SBM 模型,利用 MaxDEA 9.0 软件对海西州 2010—2021 年工业绿色发展整体效率及工业生产和生态治理与社会福利提升两个子阶段效率进行测算。评价结果及各年份效率排名见表 2。各年份效率趋势变化如图 2 所示。

整体来看,12 年间柴达木盆地工业绿色发展效率平均值为 0.763,总体上未实现 DEA 有效,提升空间较大。考察期内,实现 DEA 有效的年份仅有 5 年,占样本总数 41.67%,且均为弱 DEA 有效,表明多数年份在工业生产、生态治理与社会福利提升两阶段均存在投入冗余或产出不足的状况,部分年份在工业生产、生态治理与社会福利提升上虽然实现良好协调,但在某阶段仍存在效率改进的空间。从变化趋势上来看,2010—2021 年柴达木盆地全局工业绿色发展效率表现为波浪式变动,经历“三降四升”,“十二五”规划期间整体效率从弱 DEA 有效逐步下降至 0.4 左右,“十三五”规划开启后总体呈现逐步改善趋势,有 4 年实现了弱 DEA 有效。

3.2 阶段工业绿色发展效率

由图 2 可以看出,柴达木盆地 2016—2021 年环境经济效率与环境福利效率走势基本一致,但在 2010—2015 年二者并不具备一致性,意味着在“十二五”规划期间柴达木盆地并未实现环境效益、社会福利与工业经济的协调发展。具体来看,2011—2014 年,环境经济效率稳步下跌,年均下降 37.36%,可能原因是此阶段柴达木循环经济试验区

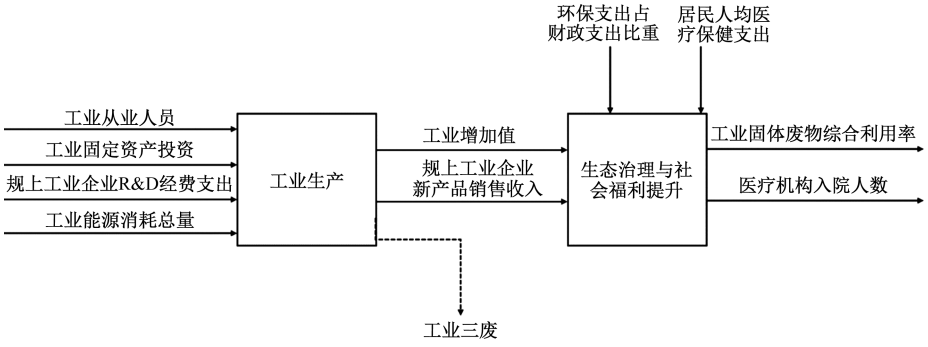

图 1 系统网络结构

表 2　2010—2021 年海西州工业绿色发展整体效率及两阶段效率

年份	整体(工业绿色发展效率)	排名	第 1 阶段(环境经济效率)	第 2 阶段(环境福利效率)
2010	0.622	8	0.824	0.604
2011	1.131	1	1.458	0.995
2012	1.027	3	1.093	0.988
2013	0.650	7	0.644	0.835
2014	0.399	11	0.358	0.897
2015	0.482	10	0.147	3.537
2016	0.356	12	0.612	0.415
2017	1.032	2	1.244	0.904
2018	0.825	6	0.935	0.844
2019	0.594	9	0.791	0.622
2020	1.021	5	0.868	1.163
2021	1.021	4	0.947	1.088
均值	0.763	—	0.827	1.074

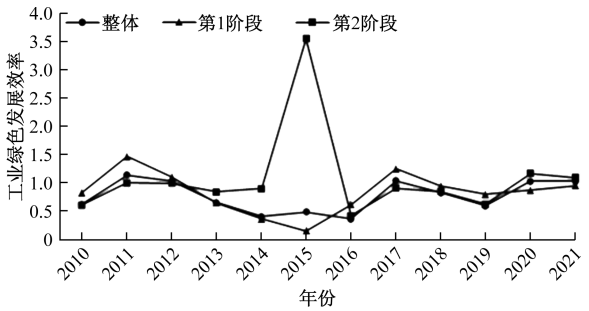

图 2　2010—2021 年柴达木工业绿色发展整体效率与两阶段效率变动情况

仍处于初级建设中，人力、资本、能源与创新投入均未达到最优状态，新产品销售产出不足，而此阶段环境福利效率发展较为平稳，效率均值为 0.929，接近 DEA 有效状态，表明此阶段环境经济效率下跌是导致工业绿色发展效率下降的主要原因；2015 年，两阶段效率差距陡然加大，环境经济效率落入谷底，环境福利效率升至峰顶，二者相差 3.389：环境经济效率的持续落跌表明单纯生产规模的增加，而忽视创新技术的投入并不能带来产出规模与创新绩效的提高，反而还会加大环境压力，降低工业生产效率；环境福利效率的陡然提升，部分原因是“营改增”政策导致该年财政总支出数据核减，同时，“十二五”期间海西州环保工作存在环保责任落实不力、环保基础设施建设滞后和环境违法行为突出等问题，导致环保支出逐年大幅增加。上述因素共同导致 2015 年海西州政府环保支出占比大幅增加，突显了政府环境治理投资在工业经济效益转化为生态环境效益与社会福利绩效中的重要作用。

以工业绿色发展两阶段效率均值 0.827 和 0.850(考虑到除 2015 年陡然增加外，其余时段第 2 阶段效率变动较平稳，因此剔除 2015 年数据对第 2 阶段效率求均值以代表近 12 年柴达木盆地环境福利平均水平)为分界线，将 2010—2021 年柴达木盆地工业绿色发展模式划分为 4 类，即高工业生产高生态与社会福利增进、高工业生产低生态与社会福利增进、低工业生产低生态与社会福利增进、低工业生产高生态与社会福利增进，如图 3 所示。结果表明，柴达木盆地工业发展模式有 5 年属于“高-高”型、4 年属于“低-低”型，分别占样本总数 41.67%、33.33%，表明 2010—2021 年柴达木盆地工业绿色发展存在不均衡、不稳定的问题。值得注意的是，整体工业绿色发展效率大于 1 的年份均分布在第Ⅰ、Ⅱ象限，表明工业生产阶段在工业绿色发展中具有重要地位。与此同时，2010 年环境经济效率接近于平均水平，但由于此阶段环境福利效率较低，2010 年整体工业绿色发展效率仅为 0.621，低于平均水平，表明只追求单阶段高效率并不能带来较高的工业绿色发展效率，因此，在柴达木工业绿色发展过程中，需要注重三系统的协调发展。

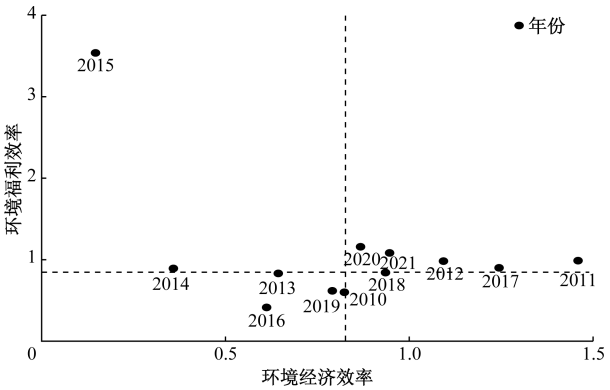

图 3　柴达木环境经济效率与环境福利效率二维分布

4　结论与启示

4.1　结论

近 12 年柴达木盆地工业绿色发展效率整体并未实现 DEA 有效，且实现 DEA 有效的年份均为弱 DEA 有效，变动呈现波浪式变动趋势；“十三五”规划阶段环境经济效率与环境福利效率才具备一致性，“十二五”规划期间柴达木盆地并未实现环境效益、社会福利与工业经济的协调发展；柴达木工业绿色发展模式主要为“高-高”“低-低”型，发展不均衡、不稳定，且整体工业绿色发展效率大于 1 的年份均分布在第Ⅰ、Ⅱ象限，表明工业生产阶段在工业

绿色发展中具有重要地位。

4.2 政策启示

(1)加大技术投入,积极引入数字化技术。一方面,企业应当加强技术投入,增强自身创新创造能力,提高科研成果工业转化率,警惕通过单一增加劳动、技术与能源投入以追求工业规模扩张而损害生态与社会利益;另一方面,政府应当加强创新驱动战略规划以及政策指引,为绿色技术研发及应用提供有力资金与政策支撑,激励企业增强创新驱动能力。与此同时,数字化技术的引入有助于优化生产要素配置,减少生产冗余,提高生产效率。

(2)重视工业发展对社会福利的影响,构建合理全面的工业绿色发展测度体系,发展以增强社会福利为目标的工业绿色经济,促进工业经济、生态环境与社会福利的同步提升。2020 年与 2021 年环境福利效率均高于环境经济效率,且均表现为 DEA 有效,表明柴达木盆地当前工业生产效率较低,但具备生态治理与社会福利提升优势,因此进一步发展以增强社会福利为目标的工业绿色产业,是进一步提升整体工业绿色发展效率的必然要求。

参考文献

[1] 苏利阳,郑红霞,王毅. 中国省际工业绿色发展评估[J]. 中国人口·资源与环境,2013,23(8):116-122.

[2] 刘晶,张尧. 金融科技、强环境规制与区域工业绿色发展[J]. 财经理论与实践,2022,43(2):123-131.

[3] 邓宗兵,李莉萍,魏剑雄,等. 中国工业绿色发展的时空格局及障碍因子[J]. 科技管理研究,2023,43(2):134-143.

[4] 傅为忠,边之灵. 区域承接产业转移工业绿色发展水平评价及政策效应研究:基于改进的 CRITIC-TOPSIS 和 PSM-DID 模型[J]. 工业技术经济,2018,37(12):106-114.

[5] 史丹. 中国工业绿色发展的理论与实践:兼论十九大深化绿色发展的政策选择[J]. 当代财经,2018(1):3-11.

[6] 王喜平,李艳梅. 可持续发展视角下工业绿色发展测度及其差异演化[J]. 工业技术经济,2020,39(7):83-91.

[7] 李旭辉,王经伟,吴权,等. "双碳"目标下中国五大重点区域工业绿色发展水平差异及成因识别[J]. 经济地理,2023,43(8):103-112.

[8] 王韶华,王菲,张伟. 数字经济赋能中国工业绿色发展的效应与机制[J]. 科技管理研究,2024,44(7):187-196.

[9] 唐晓华,迟子茗. 工业智能化提升工业绿色发展效率的实证研究[J]. 经济学家,2022(2):43-52.

[10] 唐更华,叶冠锋,皮亚彬. 工业数字化、人机协同与工业绿色发展效率提升[J]. 陕西师范大学学报(哲学社会科学版),2024,53(2):94-107.

[11] 谢宜章,吴菁琳,王晓玉,等. 政府环境治理效率综合测度及时空演变:基于全局技术共同前沿 RAM 网络 DEA 模型的实证研究[J/OL]. 经济地理,1-20[2024-09-28]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1126.K.20230921.1030.002.html.

[12] 蔺雪芹,边宇,王岱. 京津冀地区工业碳排放效率时空演化特征及影响因素[J]. 经济地理,2021,41(6):187-195.

[13] 申晨,辛雅儒,贾妮莎,等. OFDI 对工业绿色全要素生产率的影响机制:基于两阶段 Super-SBM-Malmquist 指数模型的分析[J]. 中国管理科学,2024,32(5):229-240.

[14] 张辽,黄蕾琼. 中国工业企业绿色技术创新效率的测度及其时空分异特征:基于改进的三阶段 SBM-DEA 模型分析[J]. 统计与信息论坛,2020,35(12):50-61.

[15] 蔺鹏,孟娜娜. 新型数字基础设施建设对中国工业绿色发展效率增长的影响研究[J]. 科研管理,2023,44(12):50-60.

[16] 杨一鸣,吴群,王健. 长三角地区地方政府差别化价格供地对工业绿色发展的影响研究:基于全局和局部双重视角[J]. 中国土地科学,2023,37(9):51-61.

[17] 吴传清,张冰倩. 长江经济带制造业绿色发展效率研究[J]. 学习与实践,2022(5):32-40.

Efficiency Evaluation of Industrial Green Development in Qaidam Basin

LAN Yueyuan, DING Shengxi

(School of Finance and Economics, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: Based on the super-efficiency NSBM(network slack based modle) model, an industrial green development efficiency index system reflecting the industrial economy, ecological benefits and social welfare was constructed, and the industrial green development status of Qaidam Basin from 2010 to 2021 was calculated. The results show that the overall efficiency of industrial green development is not effective with DEA (data envelopment analysis), and the years with effective DEA are all weak with DEA. In the 13th Five-Year Plan period, the environmental economic efficiency and environmental welfare efficiency were consistent. The industrial green development model was mainly "high-high" and "low-low", and the development is uneven and unstable.

Keywords: Qaidam Basin; green industrial development; undesired outputs; ultra-efficient NSBM(network slack based model)