

# 基于数据包络分析的土地利用生态效率评价

游和远<sup>1</sup>, 吴次芳<sup>1</sup>, 林 宁<sup>2</sup>, 沈 萍<sup>1</sup>

(1. 浙江大学土地科学与不动产研究所, 杭州 310029; 2. 杭州市国土资源局萧山分局, 杭州 311200)

**摘 要:** 土地利用变化会对土地生态产生一定影响, 土地利用生态效率可以从投入产出解释土地利用的生态影响, 帮助实现土地利用成本最小化时生态价值的最大化。该文首先选用数据包络分析 (DEA) 的 CCR-I 模型, 并确定土地利用投入产出指标, 对 31 个省市区进行土地利用生态效率评价计算, 获得土地利用生态效率值。其次基于土地利用生态效率值阐述土地利用生态效率的空间分布规律。最后依据优化原则优化设计 DEA 有效下土地利用投入与土地利用产出, 并计算得到固定土地面积与 GDP 下实现 DEA 有效的调控因子改变值。研究表明, 土地利用生态效率评价是可行的, 土地生态效率在空间分布上与地区土地利用特征有一定的关系, 土地利用可以通过投入产出优化实现土地利用生态效率 DEA 有效。

**关键词:** 土地利用, 生态分析, 区域规划, 生态效率, DEA, 空间分布, 效率优化

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.03.057

中图分类号: F301.24

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-03-0309-07

游和远, 吴次芳, 林 宁, 等. 基于数据包络分析的土地利用生态效率评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 309—315.  
You Heyuan, Wu Cifang, Lin Ning, et al. Assessment of eco-efficiency of land use based on DEA[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 309—315. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

生态效率 (Eco-efficiency) 的核心思想是提供最大化价值的同时最小化消耗与污染<sup>[1]</sup>。土地利用作为人类最基本的活动, 已经被作为对象进行效率的审视。然而这种对土地利用效率的审视在过去和现在更多是基于土地资源稀缺性进行经济社会效率评价, 对土地利用生态效率的评价基本上缺失。尽管目前研究已经意识到土地利用与土地生态之间的重要关系<sup>[2]</sup>, 但是土地生态作为土地利用前提或者结果, 只是土地利用与土地生态复杂关系的一部分。土地利用生态效率基于过程耦合土地利用与生态影响, 从投入产出思考土地利用的资源消耗与生态价值, 丰富了土地利用与土地生态复杂关系的研究。土地利用生态效率最终可以帮助土地利用的生态影响与资源强度降低到一个至少与土地估计承载能力一致的水平, 从而保障土地利用的可持续性。

目前土地生态效率研究文献比较有限。Wilkins 认为生态效率关注于农业生产与土地管理的效率与可持续, 土地利用管理的生态效率提高需要构建高复合型的生产系统。法律、价格、补贴等制度的安排可以提高土地生态效率, 建立起农业生产对应成分之间紧密联系对于提高土地生态效率也有重要作用<sup>[3]</sup>。Sorvari, Antikainen 等对污染土地管理中的土地修复生态效率进行研究, 并就 4 个样本区域不同方式的土地修复中生态效率的差别与特

征进行总结<sup>[4]</sup>。Reith, Guidry 对位于路易斯安那的农业可持续联合体试验区进行生态效率分析, 多样化的土地利用是进行生态效率分析的依据<sup>[5]</sup>。Cheng Bihai, Wang Qing 等运用生态足迹模型对 1986—2004 年湖北省耕地生态效率进行测算, 并与其他国家进行了比较<sup>[6]</sup>。有部分学者对生态效率的普遍性问题进行了解释, 开始将生态效率用于部分领域的研究。Huppes, Ishikawa 集中阐述了为什么要探讨生态效率问题, 他们认为生态效率对于公共政策制定与私人的选择都有指导性的作用<sup>[7]</sup>。Ehrenfeld 则对生态效率发挥决策作用所需要的生态效率指示标志与工具进行构建<sup>[8]</sup>。Shonnard, Kicherer, Saling 从绿色工程的视角阐述了 BASF (巴斯夫) 生态效率工业应用的方法、案例及意义<sup>[9]</sup>。诸大建、邱寿丰尝试借鉴德国环境经济账户中的生态效率指标, 并根据中国实际情况, 构建了适合度量中国循环经济发展的生态效率指标<sup>[10]</sup>。张妍、杨志峰建立城市物质代谢生态效率的度量模型, 并以深圳市为例, 核算城市水、能量和废物代谢通量以及代谢的生态效率<sup>[11]</sup>。从文献来看, 对土地利用的生态效率研究未成体系, 单独对土地利用生态效率进行思考仍然空缺。Barba-Gutiérrez, Adenso-Díaz, Lozano 尝试运用数据包络模型 (DEA) 从投入产出的视角分析生态效率<sup>[12]</sup>, 本研究借鉴此模型, 通过构建土地利用生态效率评价模型, 分析中国 31 个省市区 (港、澳、台除外) 的土地利用生态效率现状并阐述其空间分布规律, 然后给出优化土地利用生态效率的方案。

## 1 研究方法

### 1.1 土地利用生态效率评价 DEA 模型选择

数据包络分析 (data envelopment analysis, DEA) 是

收稿日期: 2009-02-08 修订日期: 2011-02-01

基金项目: 国家科技支撑计划 (2006BAJ11B03)

作者简介: 游和远 (1983—), 男, 浙江温州人, 博士, 主要从事土地利用管理与土地生态研究。杭州 浙江大学土地科学与不动产研究所, 310029。

Email: youheyuan@gmail.com

衡量相对效率的一种重要而有效的方法，DEA 通过线性规划处理多投入产出变量的效率计算，并组合效率相对有效的同类型评价单元（DMU）形成效率前沿，从而进一步分析计算效率较差的 DMU 的效率优化空间。本研究中选择 DEA 的 CCR-I 模型作为土地利用效率评价的基础平台。式（1）对  $h_p$  的计算给出了土地利用生态效率值的大小，式（2）则可以计算土地生态效率非有效地区的松弛变量与剩余变量，所得结果将用于土地利用生态效率实现 DEA 有效的优化中。

假设有  $n$  个 DMU，各个  $DUM_p$  通过投入  $X_{ip}$  生产出  $Y_{jp}$ ，则第  $p$  个 DMU 的效率值如下

$$\begin{aligned} \text{Max } h_p &= \frac{\sum_{j=1}^s U_j Y_{jp}}{\sum_{i=1}^m V_i X_{ip}} \\ \text{S.T. } \frac{\sum_{j=1}^s U_j Y_{jk}}{\sum_{i=1}^m V_i X_{ik}} &\leq 1 \quad \forall k, k=1,2,\dots,n \\ U_j &\geq \varepsilon > 0 \quad \forall j, j=1,2,\dots,s \\ V_i &\geq \varepsilon > 0 \quad \forall i, i=1,2,\dots,m \end{aligned} \tag{1}$$

式中， $X_{ik}$  为第  $k$  个 DMU 第  $i$  项投入； $Y_{jk}$  为第  $k$  个 DMU 第  $j$  项产出； $V_i$  为第  $i$  项投入权重； $U_j$  为第  $j$  项产出权重； $h_p$  为第  $p$  个 DMU 的效率值（相对效率）； $\varepsilon$  为非阿基米德无穷小量。

将式（1）转为线性方程式，并根据线性规划对偶理论，进一步获得对偶式方程（式（2））。

$$\begin{aligned} \text{Min } \lambda_p - \varepsilon &\left[ \sum_{i=1}^m S_i^- + \sum_{j=1}^s S_j^+ \right] \\ \text{S.T. } \lambda_p X_{ip} - \sum_{k=1}^n \theta_k X_{ik} &= S_i^- \\ \sum_{k=1}^n \theta_k Y_{jk} - Y_{jp} &= S_j^+ \\ \theta_k &\geq 0, \quad k=1,2,\dots,n \\ S_i^- &\geq 0, \quad i=1,2,\dots,m \\ S_j^+ &\geq 0, \quad j=1,2,\dots,s \end{aligned} \tag{2}$$

式中： $\lambda_p$  为第  $P$  个 DMU 乘数； $\theta_k$  为第  $k$  个 DMU 参考集的权重； $S_i^-$  为松弛变量； $S_j^+$  为剩余变量。

1.2 土地利用生态效率评价投入产出指标确定

土地利用的投入产出指标是评价土地利用生态效率的基础。在确定了需要评价的 31 个 DMU 后，需要提供能够基于 DMU 同类型的投入产出指标。本研究最终确定地均劳动力投入、地均能源投入、地均水资源投入、地均资金投入作为 DMU 的土地利用投入。确定土地利用产出就相对复杂，对土地利用生态效率评价涉及到土地利用的期望产出与非期望产出，考虑到评价数据的可获取性，研究中选取地区生产总值（GDP）代表土地利用的期望产出；确定 COD 排放量、SO<sub>2</sub> 排放量、氨氮排放量、废水排放量、烟尘排放量为土地利用非期望产出。由于

CCR-I 模型要求产出指标必须与投入指标正相关，所以视土地利用非期望产出为期望产出的伴随量，最终确定土地利用生态效率评价产出指标为 COD-GDP 负荷、SO<sub>2</sub>-GDP 负荷、氨氮-GDP 负荷、废水-GDP 负荷、烟尘-GDP 负荷。见表 1，投入项个数+产出项个数<DMU 个数/2，满足 CCR 模型要求。

表 1 土地利用生态效率评价投入产出指标  
Table 1 Input-output index in assessment of eco-efficiency of land use

指 标		指标说明
投入 指标	地均劳动力投入/(人·hm <sup>2</sup> )	劳动力总量/土地面积。考虑到数据的收集，以 15~64 岁人口作为劳动力计算依据，因此该值会大于实际劳动力数量
	地均能源投入/(t·hm <sup>2</sup> )	能源消费总量/土地面积
	地均水资源投入/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>2</sup> )	用水消耗总量/土地面积
	地均资金投入/(万元·hm <sup>2</sup> )	资金投入量/土地面积。以城乡全社会固定资产投资标识土地利用中的资金投入量
产出 指标	COD-GDP 负荷/(万元·t <sup>-1</sup> )	GDP/COD 排放量
	SO <sub>2</sub> -GDP 负荷/(万元·t <sup>-1</sup> )	GDP/ SO <sub>2</sub> 排放量
	氨氮-GDP 负荷/(万元·t <sup>-1</sup> )	GDP/氨氮排放量
	废水-GDP 负荷/(万元·t <sup>-1</sup> )	GDP/废水排放量
	烟尘-GDP 负荷/(万元·t <sup>-1</sup> )	GDP/烟尘排放量

2 数据来源

31 个省市区的 15~65 岁人口数来自中国统计年鉴（2007），抽样调查数据按 0.907%进行折算；除西藏外的 30 个省市区的能源消费总量来自《中国能源统计年鉴》（2007），西藏数据用《西藏自治区能源发展“十一五”规划》中 2004 年的常规能源消耗量代替；用水消耗总量来自《中国环境统计年鉴》（2007）；城乡全社会固定资产投资来自中国统计年鉴（2007）。土地面积采用《中国区域经济统计年鉴》（2007）数据；COD、SO<sub>2</sub>、氨氮、废水、烟尘的排放强度来自《中国环境年鉴》（2007）。

3 结果和分析

3.1 土地利用生态效率计算

以 DEA-SOLVER 为计算平台<sup>[13]</sup>，选择 CCR-I 模型对收集的数据进行计算，得到 31 个省市区的土地利用生态效率（表 2）。

根据计算结果，按降序对土地利用生态效率值进行排序，31 个省市区的序列为西藏、青海、内蒙古、新疆、云南、甘肃、陕西、北京、四川、贵州、吉林、山西、黑龙江、福建、重庆、山东、广东、浙江、辽宁、天津、海南、河北、河南、湖北、江西、宁夏、安徽、湖南、广西、江苏、上海。土地利用生态效率值从西藏的 1.0000 下降到上海的 0.0110；西藏  $\theta=1$ ， $S_i^-=S_j^+=0$ ，土地利用生态效率为 DEA 有效。西藏的土地利用生态效率 DEA 有效表明在西藏土地利用实现了 COD-GDP 负荷等 5 个指标现有产出水平下最小化了地均劳动力投入等 4 个投入，而其他非生态效率有效地区则需要通过改变投入与产出

以达到土地利用生态效率的 DEA 有效。

表 2 31 省市区（港、澳、台除外）土地利用生态效率  
Table 2 Eco-efficiency of land use in 31 provinces  
(except Hong Kong, Macau, Taiwan)

省 (市、区)	土地利用 生态效率值	省 (市、区)	土地利用 生态效率值	省 (市、区)	土地利用 生态效率值
北京	0.0760	安徽	0.0188	四川	0.0701
天津	0.0301	福建	0.0435	贵州	0.0555
河北	0.0269	江西	0.0228	云南	0.1137
山西	0.0532	山东	0.0391	西藏	1.0000
内蒙古	0.2099	河南	0.0267	陕西	0.0800
辽宁	0.0306	湖北	0.0233	甘肃	0.0931
吉林	0.0533	湖南	0.0162	青海	0.4454
黑龙江	0.0485	广东	0.0316	宁夏	0.0197
上海	0.0110	广西	0.0141	新疆	0.1277
江苏	0.0121	海南	0.0280		
浙江	0.0309	重庆	0.0414		

按照降序，土地利用生态效率值变化速率从大变小。从西藏（1.0000）变化到云南（0.1137），仅仅跨越了青海、内蒙古与新疆 3 个省（区），而土地利用生态效率值约下降了 90%（以西藏为基准）；从甘肃（0.0931）变化到山西（0.0532），跨越了陕西、北京、四川、贵州、吉林 5 个省（市），而土地利用生态效率值下降幅度约为 4%（以西藏为基准）；从黑龙江（0.0485）变化到上海则跨越了 18 个省（区市），而土地利用生态效率值下降幅度约为 4%（以西藏为基准）。从结果看，土地利用生态效率从较高值迅速的下降；31 个省市区中土地利用生态效率最优 DMU（西藏）相对其他优势明显；除西藏落在效率前缘面上，其他 30 个省市区都落在效率前缘面的右侧，且以迅速远离效率前缘面的离散状态分布；大部分省市区的都集中在土地利用生态效率较低的区间，土地利用生态效率较低是中国 31 个省市区土地利用中主流的现实状态。

3.2 土地利用生态效率空间分布

为了考察土地利用生态效率空间分布规律，对 31 个省市区的土地利用生态效率进行分区定等。分区定等标准如下：[1.0000, 0.0900)，土地利用生态效率高效区；[0.0900, 0.0400)，土地利用生态效率亚高效区；[0.0400, 0.0200)，土地利用生态效率中效区；[0.0200, 0.0000]，土地利用生态效率低效区。土地利用生态效率空间分布结果见图 1。

土地利用生态效率高效区分布在中国的西南、西北、华北部。土地利用生态高效区包括西藏、青海、内蒙古、新疆、云南、甘肃，这些省份属于中国经济发展较落后的地区，土地利用的技术、规模与强度都要相对落后于其他省份，地均劳动力投入、地均能源投入、地均水资源投入、地均资金投入相比其他区不会占有优势。土地利用生态效率高效区涵盖了主要的西部地区。

土地利用生态效率亚高效区主要分布在中国的东

北、西北、华北、西南部，覆盖了陕西、北京、四川、贵州、吉林、山西、黑龙江、福建、重庆。土地利用生态效率亚高效区以经济发展水平处于中等水平的省市为主，其中北京例外。与中等经济发展水平相适应的是土地利用的技术、规模与强度都要相对优于土地利用生态效率高效区，土地利用投入与土地利用生态效率高效区的省市区已经有较大区别。

土地利用生态效率中效区分布在东部与南部沿海和华中、华北、东北。土地利用生态效率中效区包括山东、广东、浙江、辽宁、天津、海南、河北、河南、湖北、江西。土地利用生态效率中效区由经济发展处于中上水平的省市构成；这些省份地均劳动力投入、地均能源投入、地均水资源投入、地均资金投入强度在中国属于高水平，土地利用的集约节约水平处于 31 个省市区前列。

土地利用生态效率低效区分布在中国的东中部与西部。土地利用生态效率低效区由宁夏、安徽、湖南、广西、江苏、上海 6 省市区份构成，分布相对分散，在空间上形成类“△”三角形分布。安徽、江苏、上海组成一个“△”的角；湖南、广西则构成另外一个“△”的角；宁夏是“△”的一个顶角。土地利用生态效率低效区覆盖中国的经济最发达地区，如上海、江苏；也同样包含了经济相对落后的宁夏与广西。土地利用生态效率低效区没有表现出与土地利用发达程度的必然联系，因此任何一种经济发展条件下都有可能导致土地利用生态效率的低下。

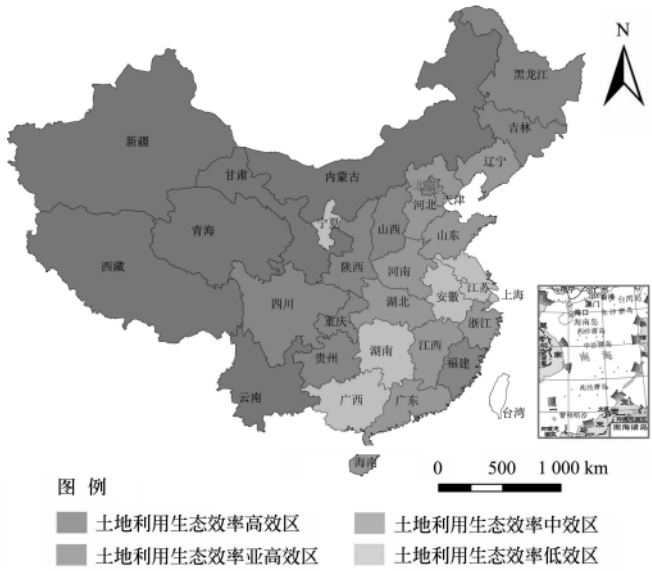


图 1 土地利用生态效率空间分布  
Fig.1 Spatial distributing of ecological efficiency of land use

3.3 土地利用生态效率优化设计

土地利用生态效率优化将按照下面 3 条原则进行：1) DMU 落在效率前缘面上是 DEA 有效的充分必要条件；2) 土地利用生态效率优化优先考虑污染物的排放控制与减少，在优化中将固定部分次要指标因子；3) 在实现 DEA 有效中，资源约束条件不纳入考虑，即现实的客观条件不约束土地利用过程中的投入产出与实现 DEA 有效的投

入产出改变，在文中指所涉及的表 1 中的投入产出指标。

在 31 个被评价的 DMU 中，只有西藏为 DEA 有效，即通过 CCR-I 模型进行相对效率计算仅得到西藏落在效率前缘面，31 个 DMU 中西藏的土地利用基于土地利用投入获得的土地生态产出最高。因此若让其他 30 个 DMU 土地利用生态效率为 DEA 有效，需要调整其土地利用生态效率的投入产出，从而使得它们同样可以落在效率前缘面。下面给出通过调整土地利用投入与调整土地利用产出优化 30 个非 DEA 有效的 DMU 的方案，从而使得 30 个 DUM 土地利用生态效率为 DEA 有效。

表 3 给出了减少投入中每个 DUM 需要减少的地均劳动力投入 ( $S_1^-$ )、地均能源投入 ( $S_2^-$ )、地均水资源投入 ( $S_3^-$ )、地均资金投入 ( $S_4^-$ )。除西藏外，其他 30 个省市都需要减少 3 个土地利用投入指标的量以实现 DEA 有效。对  $S_1^-$ 、 $S_2^-$ 、 $S_3^-$ 、 $S_4^-$  进行单独分析。 $S_1^-$  (地均劳动力投入减少量) 最高值是北京为 0.5132，其次是上海为 0.2151，再次是天津，3 个市都是人口高度密集，劳动力

高度集中的直辖市，地均劳动力投入过剩； $S_1^-$  最后的 3 个为宁夏 (0.0069)、新疆 (0.0010)、西藏 (0.0000)，该 3 个自治区属于人口密度较低、劳动力分布稀疏的地区，西藏地均劳动力投入已经达到相对最优，而宁夏、新疆的地均劳动力投入减少幅度也很小。 $S_2^-$  (地均能源投入减少量) 减少幅度最大的前 3 位为北京、上海、天津；最小的 3 位为新疆、广西、西藏，其中西藏为 0。 $S_3^-$  (地均水资源投入减少量) 除新疆需要减少投入外，其他省市都不需要调整。 $S_4^-$  (地均资金投入减少量) 按照降序排序，从高到低为北京、上海、天津、山东、浙江、广东、重庆、辽宁、江苏、福建、陕西、河南、山西、河北、吉林、四川、云南、内蒙古、安徽、湖北、贵州、江西、海南、青海、湖南、黑龙江、甘肃、宁夏、广西、新疆、西藏。综合分析， $S_1^-$ 、 $S_2^-$ 、 $S_3^-$ 、 $S_4^-$  中除  $S_3^-$  外， $S_1^-$ 、 $S_2^-$ 、 $S_4^-$  在多数省份为实现 DEA 有效，需要减少投入；而减少投入量的大小则与经济发展水平适应的土地利用程度成一定的正相关。

表 3 31 省市区 (港、澳、台除外) 土地利用生态效率优化设计  
Table 3 Inputs and outputs optimization of land use in 31 provinces (except Hong Kong, Macau, Taiwan)

省 (市、区)	投入优化				产出优化				
	$S_1^-$ / (人·hm <sup>2</sup> )	$S_2^-$ / (t·hm <sup>2</sup> )	$S_3^-$ / (m <sup>3</sup> ·hm <sup>2</sup> )	$S_4^-$ / (万元·hm <sup>2</sup> )	$S_1^+$ / (万元·t <sup>-1</sup> )	$S_2^+$ / (万元·t <sup>-1</sup> )	$S_3^+$ / (万元·t <sup>-1</sup> )	$S_4^+$ / (万元·t <sup>-1</sup> )	$S_5^+$ / (万元·t <sup>-1</sup> )
北京	0.5132	2.6704	0	1.4534	0	5 874.7412	2 571.4286	0.2642	5 904.7619
天津	0.1844	1.1300	0	0.4338	11.4351	2 608.2863	0	0.0750	2 777.7778
河北	0.0607	0.2960	0	0.0612	0	1 421.9872	129.9435	0.0279	1 635.3198
山西	0.0748	0.4489	0	0.0644	0	1 045.0814	181.5718	0.0115	1 248.0401
内蒙古	0.0187	0.1835	0	0.0429	3.4367	1 424.3190	496.1059	0	1 673.6422
辽宁	0.0568	0.3183	0	0.1038	0	1 206.6638	286.2319	0.0250	1 406.3618
吉林	0.0515	0.1762	0	0.0611	15.8837	937.5000	0	0.0120	1 147.9592
黑龙江	0.0217	0.0820	0	0.0111	0	983.6847	75.0000	0.0053	1 210.0575
上海	0.2151	1.5251	0	0.6414	0	2 841.8954	321.8391	0.1170	2 746.0815
江苏	0.0465	0.2005	0	0.0949	3.2909	1 919.3989	0	0.0697	2 000.0000
浙江	0.0916	0.3785	0	0.2038	0	2 142.7432	289.4737	0.0771	2 020.2429
安徽	0.0462	0.0838	0	0.0339	0	1 088.4305	432.4324	0.0270	1 232.4324
福建	0.0779	0.2282	0	0.0875	0	1 505.3763	571.4286	0.0545	1 473.6842
江西	0.0302	0.0533	0	0.0247	20.8371	968.6740	0	0.0214	1 050.0000
山东	0.1527	0.6263	0	0.2475	0	2 412.6984	528.5714	0.0629	2 658.2011
河南	0.0944	0.2448	0	0.0770	0	1 446.0654	577.5862	0.0367	1 671.3362
湖北	0.0432	0.1245	0	0.0296	0	965.2471	277.1084	0.0257	1 033.2060
湖南	0.0283	0.0683	0	0.0160	0	638.1572	92.5578	0.0077	710.2735
广东	0.0990	0.3261	0	0.1150	0	2 004.2517	150.0000	0.0785	1 740.9091
广西	0.0141	0.0273	0	0.0067	19.9746	507.2464	0	0.0112	561.4035
海南	0.0348	0.0603	0	0.0199	28.3879	755.6936	0	0.0340	519.4805
重庆	0.0881	0.2254	0	0.1074	0	1 121.7949	144.7368	0.0391	1 230.8024
四川	0.0735	0.1709	0	0.0518	10.3976	974.0991	0	0.0215	1 109.1549
贵州	0.0677	0.2117	0	0.0257	18.9146	1 026.1868	0	0.0148	1 163.7931
云南	0.0755	0.1749	0	0.0445	51.6929	1 594.2029	0	0.0395	1 814.8148
西藏	0	0	0	0	0	0	0	0	0
陕西	0.0940	0.2157	0	0.0804	33.7759	1 344.2460	0	0.0237	1 540.0844
甘肃	0.0275	0.0858	0	0.0079	0	1 090.8120	692.3077	0.0109	1 216.1172
青海	0.0169	0.1106	0	0.0166	0.2932	708.3147	0	0.0075	820.5953
宁夏	0.0069	0.0772	0	0.0079	16.8804	576.7538	0	0.0096	652.5573
新疆	0.0010	0.0360	12.4107	0	12.6614	986.7216	0	0.0096	1 142.4731

注： $S_1^-$  为地均劳动力投入减少量， $S_2^-$  为地均能源投入减少量， $S_3^-$  为地均水资源投入减少量， $S_4^-$  为地均资金投入减少量； $S_1^+$  为 COD-GDP 负荷增加量， $S_2^+$  为 SO<sub>2</sub>-GDP 负荷增加量， $S_3^+$  为氨氮-GDP 负荷增加量， $S_4^+$  为废水-GDP 负荷增加量， $S_5^+$  为烟尘-GDP 负荷增加量。

表 3 给出了增加产出中每个 DUM 需要增加的 COD-GDP 负荷 ( $S_1^+$ )、 $SO_2$ -GDP 负荷 ( $S_2^+$ )、氨氮-GDP 负荷 ( $S_3^+$ )、废水-GDP 负荷 ( $S_4^+$ )、烟尘-GDP 负荷 ( $S_5^+$ )。除西藏外,其他 30 个省市都需要增加 4 个土地利用产出指标的量以实现 DEA 有效。对  $S_1^+$ 、 $S_2^+$ 、 $S_3^+$ 、 $S_4^+$ 、 $S_5^+$  进行单独分析。 $S_1^+$  (COD-GDP 负荷增加量) 有 14 个省市不为 0,从高到低为云南、陕西、海南、江西、广西、贵州、宁夏、吉林、新疆、天津、四川、内蒙古、江苏、青海。 $S_2^+$  ( $SO_2$ -GDP 负荷增加量) 除西藏为,都不为 0,  $S_2^+$  最大为北京,最小的非 0 为广西,非 0 的  $S_2^+$  区间为 [5874.7412, 507.2464], 显然  $SO_2$ -GDP 负荷的不足不仅在土地利用的强度与效率较低的地区存在,在土地利用强度与效率较高的地区也同样存在。 $S_3^+$  (氨氮-GDP 负荷增加量) 有 17 个省市不为 0, 最大值为北京 (2 571.4286), 最小值 (非 0) 为黑龙江 (75.0000)。 $S_4^+$  (废水-GDP 负荷增加量) 除内蒙古与西藏外,都需要增加。而增加量最多的 6 个省市为北京、上海、广东、浙江、天津、江苏与山东,集中环渤海地区、长三角与珠三角等经济发达,土地利用充分地区。 $S_5^+$  (烟尘-GDP 负荷增加量) 除西藏外,都需要增加。 $S_5^+$  的绝对值主要集中在 [1000, 2000] 区间,烟尘-GDP 负荷增加量较大。综上分析,若要实现土地利用生态效率的 DEA 有效,大约有一半的被评价省市需要增加  $S_1^+$  与  $S_3^+$  产出,而绝大部分省市则需要需要增加  $S_2^+$ 、 $S_4^+$ 、 $S_5^+$  产出,提高  $SO_2$ -GDP、废水-GDP 负荷、烟尘-GDP 负荷。

按照减少土地利用投入与增加土地利用产出实现 DEA 有效的土地利用生态效率优化途径获得了各个省市的地均劳动力、地均能源投入、地均水资源投入、地

均资金投入与 COD-GDP 负荷、 $SO_2$ -GDP 负荷、氨氮-GDP 负荷、废水-GDP 负荷、烟尘-GDP 负荷调整量。为了能够剥离出 9 个投入产出指标中更易于实现调控的因子,考虑到 31 个 DMU 的土地面积是固定的,对表 3 中获得的数据进行分析,计算得到实现 DEA 有效条件下,固定土地面积下的劳动力投入、能源投入、水资源投入、资金投入减少量。COD-GDP 负荷、 $SO_2$ -GDP 负荷、氨氮-GDP 负荷、废水-GDP 负荷、烟尘-GDP 负荷的增加实现可以通过提高 GDP 产出达到,也可以通过 COD 排放量、 $SO_2$  排放量、氨氮排放量、废水排放量、烟尘排放量的减少实现。土地利用生态效率在考虑土地 GDP 产出的同时,在当前的社会经济背景下,实现污染物的排放控制与减少更加重要。因此对表 3 中获得的数据进行分析,计算得到实现 DEA 有效条件下,固定 GDP 下的 COD 排放量、 $SO_2$  排放量、氨氮排放量、废水排放量、烟尘排放量减少量。计算公式如下,计算结果见表 4。

固定土地面积下的投入减少计算

$$\Delta I_{ik} = L_k \cdot S_{ik}^- \quad i=1,\cdots,4; k=1,\cdots,31 \tag{3}$$

式中,  $\Delta I_{ik}$  为第  $k$  个 DMU 第  $i$  个投入固定土地面积下减少量;  $L_k$  为第  $k$  个 DMU 土地面积;  $S_{ik}^-$  为第  $k$  个 DMU 第  $i$  个投入松弛变量。

固定 GDP 下的产出减少计算

$$\Delta O_{jk} = O_{jk} - G_k / (Y_{jk} + S_{jk}^+) \quad j=1,\cdots,5; k=1,\cdots,31 \tag{4}$$

式中,  $\Delta O_{jk}$  为第  $k$  个 DMU 第  $j$  个投入固定 GDP 下减少量;  $O_{jk}$  为第  $K$  个 DMU 第  $j$  个投入指标构成中非 GDP 因子量;  $G_k$  为第  $k$  个 DMU 的 GDP;  $Y_{jk}$  为第  $K$  个 DMU 第  $j$  个投入指标值;  $S_{jk}^+$  为第  $k$  个 DMU 第  $j$  个产出剩余变量。

表 4 固定土地面积与 GDP 下调控因子改变值  
Table 4 Alternative value of regulation factor under fixed land area and GDP

省 (市、区)	固定土地面积下的投入减少				固定 GDP 下的产出减少				
	劳动力投入/人	能源投入/t	水资源投入/m <sup>3</sup>	资金投入/万元	COD/t	SO <sub>2</sub> /t	氨氮/t	废水/t	烟尘/t
北京	842 145	4 382 442	0	2 385 111	0	168 543	5 346	837 308 694	36 827
天津	216 832	1 328 917	0	510 093	5 231	241 497	0	298 776 141	65 387
河北	1 139 766	5 556 212	0	1 147 888	0	1 472 954	5 060	776 694 642	658 044
山西	1 169 538	7 014 728	0	1 006 273	0	1 433 922	6 008	205 605 641	1 027 804
内蒙古	2 215 162	21 712 155	0	5 073 590	6 198	1 524 302	10 891	0	633 783
辽宁	834 611	4 678 137	0	1 526 035	0	1 185 893	13 789	777 637 705	652 119
吉林	973 202	3 332 109	0	1 155 281	56 432	369 370	0	210 934 421	384 761
黑龙江	986 411	3 727 607	0	504 119	0	457 628	2 803	103 926 811	491 726
上海	136 384	967 034	0	406 700	0	473 919	2 738	1 616 762 536	85 669
江苏	477 336	2 057 576	0	973 508	12 987	1 216 453	0	3 238 536 870	346 321
浙江	932 153	3 853 237	0	2 074 619	0	798 116	6 535	2 061 110 399	148 217
安徽	644 767	1 168 890	0	472 812	0	532 619	18 562	703 925 173	264 511
福建	946 232	2 770 065	0	1 062 234	0	426 415	15 229	1 339 399 345	106 604
江西	504 789	889 580	0	411 522	85 004	595 026	0	522 352 075	196 162
山东	2 398 743	9 840 065	0	3 889 594	0	1 899 486	15 412	1 423 364 889	523 192
河南	1 577 157	4 088 159	0	1 285 834	0	1 542 427	31 594	1 254 901 893	731 368
湖北	802 845	2 313 613	0	549 393	0	694 478	16 450	1 092 825 821	251 471

接上页

省 (市、区)	固定土地面积下的投入减少				固定 GDP 下的产出减少				
	劳动力投入/人	能源投入/t	水资源投入/m <sup>3</sup>	资金投入/万元	COD/t	SO <sub>2</sub> /t	氨氮/t	废水/t	烟尘/t
湖南	600 262	1 446 408	0	338 256	0	840 718	10 568	496 847 645	411 719
广东	1 773 982	5 845 027	0	2 060 789	0	1 165 357	5 933	438 6529 393	189 364
广西	334 280	646 186	0	158 285	357 310	912 588	0	987 913 146	386 281
海南	123 147	213 195	0	70 200	20 846	15 372	0	188 523 321	4 211
重庆	725 598	1 857 699	0	885 137	0	832 377	2 899	947 098 244	187 952
四川	3 566 693	8 290 344	0	2 512 363	70 830	1 195 473	0	974 690 480	544 182
贵州	1 192 659	3 729 092	0	453 309	36 968	1 452 265	0	148 193 080	246 456
云南	2 974 269	6 893 924	0	1 753 066	80 134	528 887	0	356 598 080	196 329
西藏	0	0	0	0	0	0	0	0	0
陕西	1 933 719	4 438 418	0	1 654 734	78 713	980 747	0	284 905 145	330 233
甘肃	1 248 931	3 902 321	0	358 116	0	526 304	17 397	82 012 748	142 616
青海	1 214 127	7 932 964	0	1 192 568	257	121 772	0	35 979 806	65 441
宁夏	45 498	512 809	0	52 711	35 254	372 580	0	96 535 423	105 192
新疆	164 954	5 988 203	2066259302	0	31 062	525 003	0	114 014 534	258 847

4 结 论

1) 本研究中给出了基于 DEA 的土地利用生态效率评价模型,并对中国的 31 个省市区进行了实证研究。研究表明,31 个被评价对象中,仅西藏的土地利用生态效率为 DEA 有效,绝大部分省市区的土地利用生态效率较低。从土地利用生态效率空间分布来看,土地利用生态效率高地区绝大部分分布在经济发展水平相对落后的西部,土地利用生态效率空间分布与土地利用区的经济发展水平存在着一定的反向关联。因此合理安排投入,并优化土地利用产出实现土地利用生态效率 DEA 有效就很有必要。

2) 本研究中给出了基于投入改变与基于产出改变的土地利用生态效率优化方案,同时从优化可操作性与生态目的性出发提出了固定土地面积和 GDP 因子给出调控因子优化的方案,最终得到了研究中涉及的劳动力投入、能源投入、水资源投入、资金投入的减少量和 COD、SO<sub>2</sub>、氨氮、废水、烟尘的减少量。

3) 文中在土地利用生态效率优化设计的原则中,给出了实现 DEA 有效的过程中资源约束条件不纳入考虑的前提。其实在已有的 DEA 模型中,现实的资源与技术约束仍然不能作为约束条件进入到 DEA 的计算程式中。以水资源投入为例,这个缺陷的存在,导致无法进一步结合中国的水资源分布进行水资源投入的优化,这个缺陷在未来研究中有待进一步改进。

[参 考 文 献]

[1] WBCSD. Eco-efficiency: creating more value with less impact[EB/OL]. [http://www.wbcsd.org/DocRoot/BugWjalu0wHL0IMoiYDr/eco\\_efficiency\\_creating\\_more\\_value.pdf](http://www.wbcsd.org/DocRoot/BugWjalu0wHL0IMoiYDr/eco_efficiency_creating_more_value.pdf), 2008-11-01.

[2] 吴次芳, 徐保根. 土地生态学[M]. 北京: 中国大地出版社, 2003.

[3] Wilkins R J. Eco-efficient approaches to land management: a

case for increased integration of crop and animal production systems[J]. Philosophical transactions of the royal society B, 2008, 363(1491): 517—525.

[4] Sorvari J, Antikainen R, Utriainen E. Estimating eco-efficiency in soil remediation-studies on four model sites [EB/OL]. <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=48954>, 2008-12-07.

[5] Reith C C, Guidry M J. Eco-efficiency analysis of an agricultural research complex[J]. Journal of Environmental Management, 2003(68): 219—229.

[6] Cheng Bihai, Wang Qing, Liu Jianxing. Comparative analysis on eco-efficiency of arable land ecological footprint in Hubei[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2006, 11(4): 1052—1085.

[7] Huppes G, Ishikawa M. Why Eco-efficiency?[J]. Journal of Industrial Ecology, 2005, 9(4): 2—5.

[8] Ehrenfeld J R. Eco-efficiency: Philosophy, Theory, and Tools [J]. Journal of Industrial Ecology, 2005, 9(4):6—8.

[9] Shonnard D R, Kicherer A, Saling P. Industrial applications using BASF Eco-efficiency analysis: Perspectives on green engineering principles[J]. Environment Science and Technology, 2003, 37(23): 5340—5348.

[10] 诸大建, 邱寿丰. 作为我国循环经济测度的生态效率指标及其实证研究[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(1): 2—5. Zhu Dajian, Qiu Shoufeng. Eco-efficiency indicators and their demonstration as the circular economy measurement in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(1): 2—5. (in Chinese with English abstract)

[11] 张妍, 杨志峰. 城市物质代谢的生态效率[J]. 生态学报, 2007, 27(8): 3124—3131. Zhang Yan, Yang Zhifeng. Eco-efficiency of urban material metabolism[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(8): 3124—3131. (in Chinese with English abstract)

[12] Barba-Gutiérrez Y, Adenso-Díaz B, Lozano S. Eco-efficiency of electric and electronic appliances: A data envelopment analysis[J]. Environmental Modeling and Assessment, 2008(1): 11—19.

- [13] Cooper W W, Lawrence M, Tone K. Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications,

References, and DEA-Solver Software[M]. Boston: Kluwer Academic, 2000.

## Assessment of eco-efficiency of land use based on DEA

You Heyuan<sup>1</sup>, Wu Cifang<sup>1</sup>, Lin Ning<sup>2</sup>, Shen Ping<sup>1</sup>

(1. *Institute of Land Science and Property Management, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China;*

2. *Subbureau of Xiaoshan, Hangzhou Bureau of Land and Resources, Hangzhou 311200, China*)

**Abstract:** Land use change will impact land ecology. The eco-efficiency of land use can reflect the ecology effect of land use by input-output analysis, which can minimize cost of land use and maximize ecological value. Firstly, CCR-I model based on data envelopment analysis (DEA) was selected, and the input-output index of land use was ascertained, then the ecological efficiency value of land use was calculated. Secondly, spatial distribution pattern of eco-efficiency of land use was analyzed by using the ecological efficiency value of land use. Thirdly, in order to insure DEA-efficiency of eco-efficiency, the inputs and outputs optimization of land use in 31 provinces were designed based on optimization principles. And the alternative value of regulation factor under fixed land area and GDP were acquired. The results indicated that the assessment of eco-efficiency of land use was feasible. There is a relationship between the spatial distribution pattern of eco-efficiency of land use and regional land use characteristics. The land use can achieve the DEA-efficiency of eco-efficiency by input-output optimization.

**Key words:** land use, ecological analysis, regional planning, eco-efficiency, data envelopment analysis (DEA), spatial distribution, efficiency optimization

游和远, 等. 基于数据包络分析的土地利用生态效率评价 (图1)

You Heyuan, et al. Assessment of eco-efficiency of land use based on DEA (Figure 1)

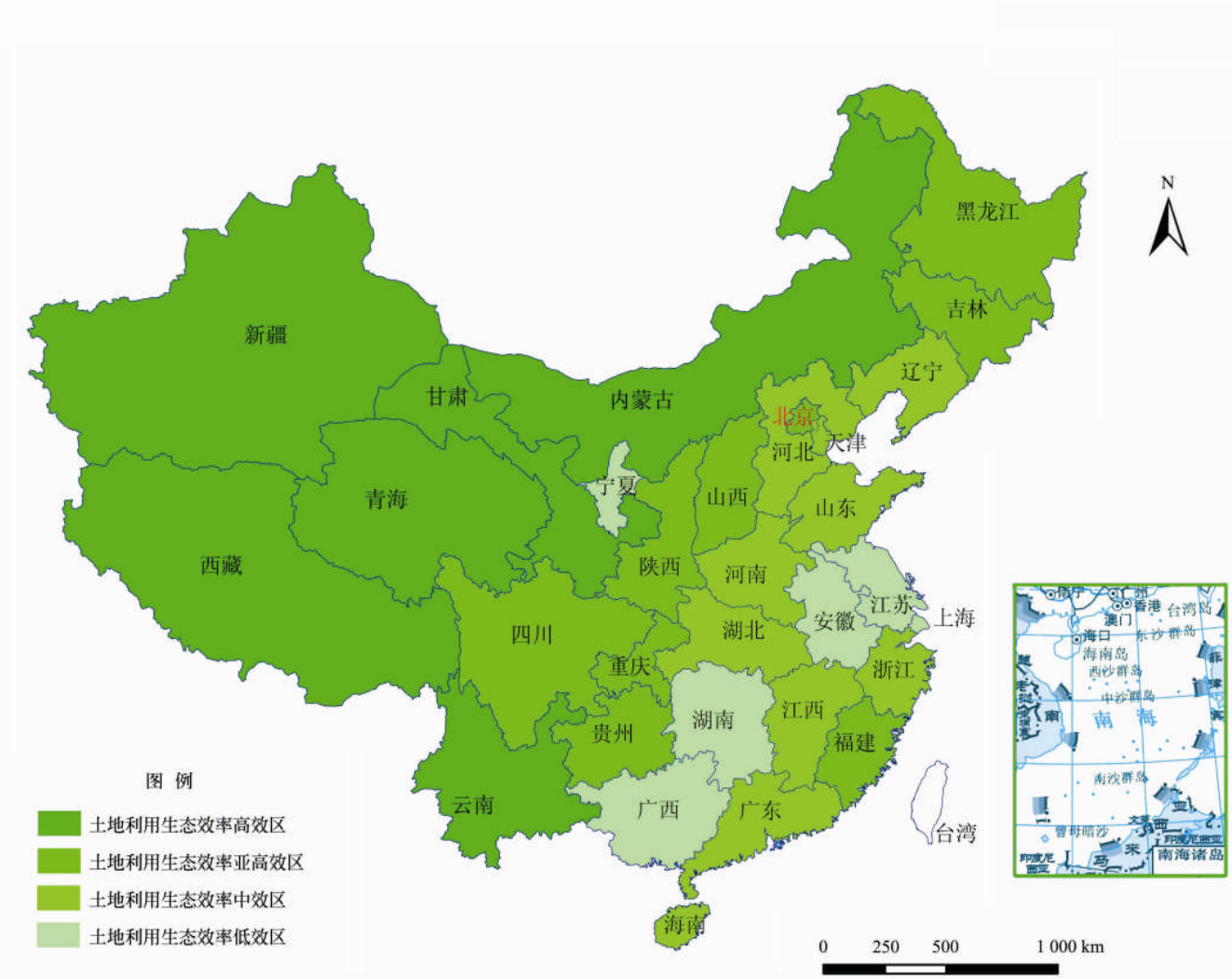


图1 土地利用生态效率空间分布

Fig.1 Spatial distributing of ecological efficiency of land use