基于数据包络分析法的吉林省土地利用生态效率时空演化规律研究

谢曼曼，李秀霞

（吉林师范大学 旅游与地理科学学院，吉林 四平 136000）

摘　要：[目的] 分析吉林省土地利用生态效率时空演化规律，提出土地利用优化方案。[方法] 利用数据包络分析(DEA)的 CCR-I 模型，对 2002—2011 年吉林省 9 个地市(州)的土地利用生态效率进行评价。[结果] (1) 2002—2011 年吉林省松原、白城、延边 3 个地市(州)土地利用生态效率均为 DEA 有效；而长春、吉林、四平、辽源、通化、白山这 6 个地市的土地生态效率呈波动式变化；(2) 吉林省的土地利用生态效率呈现中部低而东、西部高的空间分布规律. [结论] 氨氮、COD、二氧化硫、废水、烟尘等排放量是影响土地利用生态效率低下的主要因素。

关键词：土地利用生态效率；数据包络分析(DEA)；时空演化；吉林省

文献标识码：　　**文章编号**：1000-288X(2015)03-0225-06　　**中图分类号**：F301.24

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.03.048

Research on Spatiotemporal Evolution Regulation of Eco-efficiency of Land Utilization in Jilin Province Based on Data Envelopment Analysis

XIE Manman, LI Xiuxia

(*Faculty of Tourism and Geographical Sciences, Jilin Normal University, Siping, Jilin* 13600, *China*)

Abstract: [Objective] To analyze the spatiotemporal evolution regulation of eco-efficiency of land utilization in order to put forward an optimization scheme on land utilization in Jilin Province. [Methods] The eco-efficiency of land utilization of the nine cities and areas in Jilin Province during 2002 to 2011 were evaluated based on the CCR-1 model of the data envelopment analysis(DEA). [Results] (1) In terms of DEA, the eco-efficiency of land utilization in Songyuan, Baicheng, Yanbian of Jilin Province are all effective, while the data in Changchun, Siping, Jilin, Liaoyuan, Tonghua and Baishan cities of Jilin Province were fluctuant. (2) The eco-efficiency of land utilization in the center area of Jilin Province is low while the efficiency in the east and west area is relatively high. [Conclusion] The emissions of ammonia nitrogen, COD, sulfur dioxide, waste water and dust are the main influencing factors related to the eco-efficiency of land utilization.

Keywords: eco-efficiency of land utilization; data envelopment analysis(DEA); spatiotemporal evolution; Jilin Province

土地资源是人类一切能够利用的资源中最宝贵的资源。随着中国经济发展和城市化进程加快，土地在创造巨大经济财富的同时，资源快速消耗和环境急剧退化，制约了社会经济持续发展，因此，土地利用生态效率成为人们研究的重点。

国外生态效率研究起步较早，1992 年就提出生态效率一词，认为生态效率(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[1]。之后生态效率评价成为人们研究的重点，Huppes 等[2]探讨了研究生态效率的必要性，Ehrenfeld[3]构建生态效率评价的指标体系，Barba-Gutierrez 等应用包络模型(DEA)对生态效率进行评价，欧洲环境署(EEA)采用“生态危险度”以及“资源使用率”等指标，定量评价土地利用生成效率[4]，Reith，Guidry[5]对位于路易斯安那的农业可持续联合体实验区进行土地生态效率评价，Sorvari Antikainen 等[6]对土地

收稿日期：2014-07-20　　修回日期：2014-09-02

资助项目：吉林省科技厅项目“吉林省西部土地生态安全与土地资源利用优化研究”(201115086)；吉林省科技发展计划项目(20120691)；吉林省科技厅项目(201201080)

第一作者：谢曼曼(1990—)，女(汉族)，河南省焦作市人，硕士，研究方向为自然资源保护与利用。E-mail：xieman0214@sina.com。

通信作者：李秀霞(1964—)，女(汉族)，博士，教授，硕士生导师，房地产估价师，土地估价师，主要从事土地利用与开发研究。E-mail：jykxzz@163.com。

修复生态效率进行研究，Cheng Bihai 等[7]利用生态足迹对湖北省耕地生态效率进行测算。

国内土地利用效率评价研究起步相对较晚，彭建等[8]通过构建生态、社会、经济与环境四方面的土地利用效益评价指标体系，利用层次分析法对南京江宁区的土地利用进行了综合评价。王棚宇等[9]运用功效系数法对武汉市的城市土地利用效益进行了评价。王筱明[10]将熵权法与综合评价法有机结合，对济南市土地利用综合效益进行了评价。张凤伟[11]等利用 BP 人工神经网络模型对辽阳市城市土地利用效益进行评价。另有一些研究应用数据包络分析方法(DEA)对城市(镇)土地利用的经济效率及综合效率进行了评价[12-18]。

综上所述，目前土地生态效率评价尚处于初期阶段，尚未形成体系，尤其从时空演化视角进行研究相对薄弱。因此，本文利用数据包络分析(DEA)的 CCR-I 模型，对 2002—2011 年吉林省 9 个地市(州)的土地利用生态效率进行评价，探讨其时空变化规律，提出优化设计方案，旨在为提高吉林省土地利用生态效率提供技术支撑。

1 研究区域概况

吉林省位于 40°52′—46°18′N，121°38′—131°19′E，处于俄罗斯、日本、韩国、朝鲜、蒙古与中国东北部组成的东北亚几何中心地带，是中国重要的老工业基地和商品粮基地。面积 1.87×10^5 km^2，占全国 2%，地形地貌形态差异明显，地势由东南向西北倾斜，呈现明显的东南高、西北低的特征；以中部大黑山为界，可分为东部山地和中西部平原两大地貌区。截至到 2013 年年末，总人口为 2.75×10^7 人，地区生产总值(GDP)1.30×10^{12} 元，一、二、三产业结构比为 11.6∶52.8∶35.6，对经济增长的贡献率分别为 5.0%，57.5%和 37.5%[19]。吉林省现辖长春、吉林、四平、通化、白山、辽源、白城、松原 8 个地级市和延边朝鲜族自治州。

随着中国社会经济的发展，吉林省社会经济处于快速发展和转型时期，经济结构非农化程度在逐步提高，社会资金投入持续加大，城市扩张加剧，不断蚕食农田，使土地城市化远远快于人口城市化，土地集约利用率低下，土地环境受到严重污染。

2 研究方法及数据来源

2.1 DEA 模型的选择

数据包络分析方法(data envelopment analysis，DEA)，是由著名的运筹学家 A. Charnes 和 W. W. Cooper 等在“相对效率评价”概念基础上发展起来一种系统分析方法。本研究选择 DEA 的 CCR-I 模型作为土地利用生态效率评价的基础平台。CCR 模型是利用投入与产出的比例来评估效率，借用包络的概念将所有的决策单元(DMU)的投入和产出投射到超平面中，寻找产出最高或者投入最少的“有效前沿面”。凡是落在有效前沿面的 DMU 称 DEA 有效，落在有效前沿面以内的 DMU 称 DEA 无效，同时用投影方法指出非 DEA 有效和弱 DEA 有效的原因及其改进的方向和程度[20]。式(1)对 h_p 的计算给出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，所得结果为实现 DEA 优化服务。

假设将对 n 个地区的土地利用效率进行评价，每个 DMU_P 通过投入 X_{ip} 生产出 Y_{jp}，则第 p 个 DMU 的效率值如下：

$$\max h_p=\frac{\sum_{j=1}^{s}U_jY_{jp}}{\sum_{i=1}^{m}V_iX_{ip}} \tag{1}$$

$$S.T\ \frac{\sum_{j=1}^{s}U_jY_{jk}}{\sum_{i=1}^{m}V_iX_{ik}}\quad(\leqslant1\ \forall k,k=1,2,3,\cdots,n) \tag{2}$$

$$U_j\geqslant\varepsilon>0\quad(\forall j,j=1,2,3,\cdots,s)$$

$$V_i\geqslant\varepsilon>0\quad(\forall i,i=1,2,3,\cdots,m)$$

式中：X_{ik}——第 k 个 DMU 第 i 项投入；Y_{jk}——第 k 个 DMU 第 j 项产出；V_i——第 i 项投入权重；U_j——第 j 项产出权重；h_p——第 p 个 DMU 的效率值(相对效率)；ε——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，进一步获得对偶方程见式(5)。

$$\mathrm{Min}\lambda_p-\varepsilon\left[\sum_{i=1}^{m}s_i^-+\sum_{j=1}^{s}s_j^+\right] \tag{3}$$

$$S.T.\ \lambda_pX_{ip}-\sum_{k=1}^{n}\theta_kX_{ik}=s_i^- \tag{4}$$

$$\sum_{k=1}^{n}\theta_kY_{jk}-Y_{jk}=s_j^+ \tag{5}$$

$$\theta_k\geqslant0,k=1,2,3,\cdots,n$$

$$s_i^-\geqslant0,i=1,2,3,\cdots,m$$

$$s_j^+\geqslant0,i=1,2,3,\cdots,s$$

式中：λ_p——第 p 个 DMU 乘数；θ_k——第 k 个 DMU 参考集的权重；s_i^-——松弛变量；s_j^+——剩余变量。那么判断区域土地利用生态效率的原则为：(1) 当 $\theta=1$ 且 $s_i^-=s_j^+=0$ 时，则称为该地区的土地利用生态效率为 DEA 有效，即它在原投入的基础上所获得的产出已经达到最优；(2) 当 $\theta=1$ 且 $s_i^+\neq0$ 或 $s_j^-\neq0$

时,则称该地区的土地利用生态效率为弱有效,即对于原投入可以减少原投入而保持原产出不变,或在原投入不变的情况下可以将产出提高;(3) 当 $\theta<1$ 时,则称该地区的土地利用生态效率为 DEA 无效,即对于原投入可以按 θ 比例减少而保持原产出不变。

2.2　评价指标及数据选取

土地利用投入与产出指标是土地利用生态效率评价的基础,在确定了需要评价的 9 个 DMU 之后,需要提供能够基于 DMU 同类型的投入产出指标。本文结合吉林省地域特点,借鉴游和远等[21]的土地利用生态效率评价指标体系,将地均劳动力投入、地均能源投入、地均供水投入、地均资金投入作为 DMU 的土地利用投入;将地区生产总值(GDP)代表土地利用的期望产出,将 COD 排放量、SO_2 排放量、氨氮排放量、废水排放量、烟尘排放量为确定为土地利用的非期望产出。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_2-GDP 负荷、氨氮-GDP 负荷、废水-GDP 负荷、烟尘-GDP 负荷(见表 1)。

表 1　土地利用生态效率评价投入产出指标

指标类型	指 标	指标说明
投入(资源)指标	地均劳动力投入(人/hm^2)	劳动力/土地面积。考虑数据收集问题,劳动力人数以 18－60 岁的人口数量作为劳动力的计算依据,基本与实际符合
	地均能源投入(t/hm^2)	能源消费总量/土地面积。以原油、煤炭、天然气等主要能源的消耗量进行标准化处理作为能源消费总量
	地均水资源投入(m^3/hm^2)	供水量/土地面积。水资源供给以社会总供水量为依据
	地均资金投入(10^4 元/hm^2)	资金投入量/土地面积。以城乡全社会固定资产总额作为土地利用中的资金投入
产出(环境)指标	废水-GDP 负荷(10^4 元/t)	GDP/废水排放量。废水排放量以生产废水和生活废水之和为参考依据,以下同
	SO_2-GDP 负荷(10^4 元/t)	GDP/二氧化硫排放量
	氨氮-GDP 负荷(10^4 元/t)	GDP/氨氮排放量
	COD-GDP 负荷(10^4 元/t)	GDP/COD 排放量
	烟尘-GDP 负荷(10^4 元/t)	GDP/烟尘排放量

数据中各项指标数据均来自 2003—2012 年《吉林省统计年鉴》《四平市统计年鉴》《白城市统计年鉴》《松原市统计年鉴》《吉林市统计年鉴》《长春市统计年鉴》《辽源市统计年鉴》《白山市统计年鉴》《通化市统计年鉴》《延边州统计年鉴》。

3　结果与分析

3.1　土地利用生态效率的测算

以数据包络分析软件 Deap2.1 为计算平台,选择 CCR-I 模型对收集的数据进行计算,得到吉林省 9 个地级市(州)2002—2011 年的土地利用生态效率及各年的平均值(表 2)。

3.2　土地利用生态效率时间演化规律

根据表 2 可以看出,松原、白城、延边 3 个地市(州)在 10 年间土地生态效率均为 DEA 有效,表明在这 3 个地区实现了二氧化碳-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量,以达到土地利用生态效率的 DEA 有效。

表 2　2002－2011 年吉林省各区域生态效率

地区	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	各年均值
长春	0.805	0.791	0.641	0.674	0.503	0.515	0.498	0.424	0.396	0.466	0.571
吉林	0.673	0.685	0.787	0.654	0.605	0.684	0.860	0.647	0.921	0,721	0.724
四平	0.815	0.760	0.785	1.000	1.000	1.000	1.000	0.844	0.810	0.754	0.877
辽源	0.732	0.394	0.332	0.390	0.352	0.391	0.772	0.407	0.440	0.490	0.470
通化	0.725	0.820	0.395	0.360	0.391	0.372	0.817	0.305	0.406	0.717	0.531
白山	1.000	1.000	1.000	0.943	0.856	0.631	0.447	0.809	1.000	1.000	0.869
松原	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
白城	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
延边	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
均值	0.860	0.830	0.771	0.780	0.745	0.733	0.882	0.715	0.775	0.794	0.783

长春、吉林、四平、辽源、通化、白山这 6 个城市的土地生态效率在 0.4～1，呈波动式变化。其中，长春、辽源分别在 0.805～0.466 和 0.732～0.49，呈现波动式下降；吉林在 0.673～0.721，呈现波动式小幅上升；四平在 0.815～0.754，在 2005—2008 年间连续 4 a 达到了 DEA 有效，以此为中心基本成对称分布，呈现“倒 U”型的变化规律。通化、白山在 0.725～0.717和 1～0.447～1，先降后升，基本呈现“U”型。总之，吉林省 9 个地市(州)在 2002—2012 年这 10 年间整体变化不大，各年平均值约为 0.783。

3.3 土地利用生态效率空间演化规律

为了了解吉林省 9 个地市(州)的土地利用生态效率空间的分布规律，对其进行分区定等。分区标准如下：[1.00，0.8)为土地利用生态高效区；[0.80，0.6)为土地利用生态效率中高效区；[0.6，0.4)为土地利用生态效率中低效区；0.4 以下为土地利用生态效率低效区。根据表 2 利用 ArcGIS 软件制作 2002 年、2007 年、2011 年的吉林省土地利用生态效率空间分布图(图 1)。

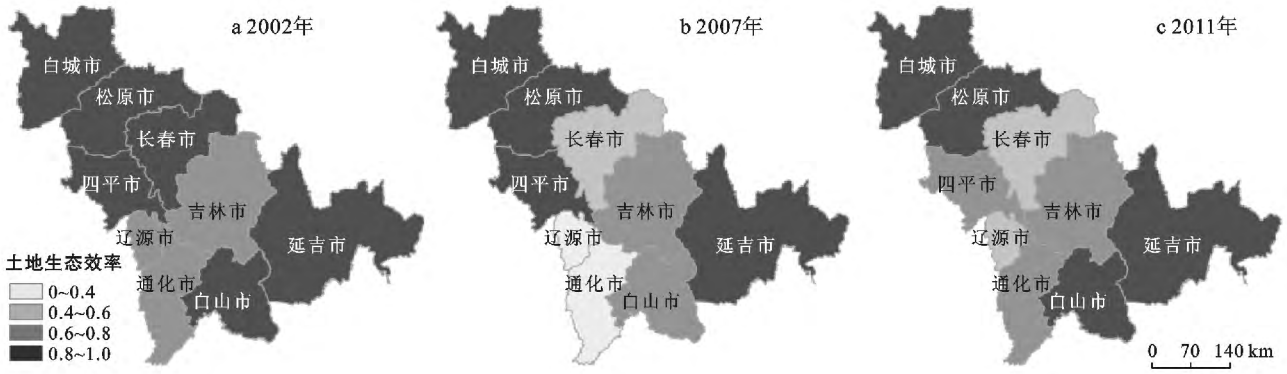


图 1 2002，2007，2011 年吉林省土地利用生态效率空间分布

从图 1 可以看出 2002 年吉林省松原市、白城市、延边市、长春市、四平市、白山市为土地利用生态效率高效区，而吉林、辽源、通化则在土地利用生态效率中亚高效区；2007 年吉林省松原、白城、延边、四平这 4 个市为土地利用生态效率高效区，吉林、白山为亚高效区，长春为土地利用中效区，辽源和通化为土地利用生态效率低效区；2011 年吉林省松原、白城、延边、白山为土地利用生态效率高效区，吉林、通化、四平 3 市为土地利用生态效率亚高效区，长春市，辽源市为土地利用生态效率中效区。

总之，吉林省土地利用生态效率空间存在差异性，中部的长春市、吉林市、四平市、辽源市土地利用生态效率明显低于东部的延边朝族自治州、白山市、通化市以及西部的白城市、松原市，呈现出中部低而东、西部高之势。主要是吉林省东西部经济相对落后，土地利用的强度、规模和技术都要相对于落后其中部地区，地均劳动力、能源和资金相对投入也少；而吉林省中部相对经济比较发达，经济发展主要是高投入，高产出所导致的土地利用低效，今后要向“低消耗、低污染、高效益”的集约型经济增长模式转变，使其可以实现土地利用健康有序的发展。

3.2.3 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进行改善；(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。

到 2011 年，在吉林省 9 个被评价的 DMU 中，松原市、白城市、延边市、白山市均为 DEA 有效，均落在效率前缘面，说明土地利用投入获得的土地生态产出最高。若让其他 5 个 DMU 土地利用生态效率为 DEA 有效，则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。表 3 得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^-)、地均供水量投入(S_3^-)、地均资金投入(S_4^-)的投入量以实现其生态效率有效。对 4 个投入指标量进行单独分析。S_1^- 最高值为长春市 254.541，长春市作为吉林省的省会，大量的外来人口涌入，人口密度大，劳动力高度集中，地均劳动力投入量过剩；S_2^- 和 S_3^- 减幅较大的是吉林市，分别为 3.218 和 55.125，主要因为吉林市是吉林省的化工基地，在经济发展过程中能源和水资源的需求量大，因此，今后要优化产业结构，转变经济增长方式，减少生产过程中的能源投入量和水资源投入量，达到土地利用生态效率 DEA 有效；S_4^- 最大值为通化

市 1.492,主要是因为通化是钢铁城市,相对资金投入增加。

废水-GDP 负荷、SO_2-GDP 负荷、氨氮-GDP 负荷、COD-GDP 负荷、烟尘-GDP 负荷的增加实现可以通过提高 GDP 产出来实现,也可以通过 COD、废水、SO_2、氨氮、烟尘等的排放量减少实现。土地利用生态效率的核心思想是做到土地 GDP 产出最大化的同时实现资源消耗和污染物排放量最小。因此,对表 3 进行分析,计算得到实现 DEA 有效条件下,废水、SO_2、氨氮、COD、烟尘的排放最小量:长春市最应控制 COD、SO_2、氨氮的排放量,其次是吉林市、四平市、辽源、通化市,可以看出这与城市的土地利用强度呈明显的正相关,说明其经济增长是高投入、高能耗、高产出的外延式增长模式。因此,今后优化土地利用结构,提高土地利用率,优化产业结构,减少对资本和资源的依赖和污染物的排放,转变经济增长方式,坚持把科技创新作为推动经济发展的根本动力,走"科技创新型和资本、资源集约型"道路。

表 3　2011 年 5 个城市的土地利用生态效率优化设计

地区	城市	投入优化				产出优化/(10^4 元·t^{-1})				
		S_1^-/(人·hm^{-2})	S_2^-/(t·hm^{-2})	S_3^-/(m^3·hm^{-2})	S_4^-/(10^4 元·hm^{-2})	S_1^+	S_2^+	S_3^+	S_4^+	S_5^+
东部地区	通化市	0.28	3.10	0	1.49	0.04	0	211.96	0	12.57
中部地区	长春市	254.54	0.65	53.45	0	0.40	1 905.32	1 535.78	7 318.51	0
	吉林市	0	3.22	55.13	1.32	0.08	556.60	159.59	0	0
	四平市	0.41	2.35	0	0	0.06	114.77	359.93	664.86	0
	辽源市	0	2.42	17.94	1.15	0	0	122.38	830.89	44.85

注:S_1^- 代表地均劳动力投入减少量;S_2^- 代表地均能源投入减少量;S_3^- 代表地均供水量投入减少量;S_4^- 代表地均资金投入减少量;产出中的 S_1^+ 代表废水-GDP 负荷增加量;S_2^+ 代表二氧化硫-GDP 负荷增加量;S_3^+ 代表氨氮-GDP 负荷增加量;S_4^+ 代表 COD-GDP 负荷增加量;S_5^+ 代表烟尘-GDP 负荷增加量。

4　结论与建议

4.1　结 论

(1) 从时间上看,2002—2011 年吉林省的松原、白城、延边 3 个地市(州)土地利用生态效率均为 DEA 有效;而长春、吉林、四平、辽源、通化、白山这 6 个城市的土地利用生态效率在 0.4～1,呈波动式变化,但整体变化不大,各年平均值约为 0.783。

(2) 从空间上看,吉林省的土地利用生态效率存在空间差异性,位于中部的长春、吉林、四平、辽源这 4 市土地利用生态效率明显低于东部的延边、白山、通化以及西部的白城、松原,呈现出中部低而东、西部高之势。

(3) 从优化设计上看,工业生产以及城市生活中的氨氮、COD、二氧化硫、废水、烟尘排放量是影响长春、吉林、四平、辽源、通化土地利用生态效率低下的主要因素,今后应控制 COD、SO_2、氨氮的排放量,减少地均劳动力投入量、地均能源投入量、地均供水投入量、地均资金投入量。

4.2　建 议

(1) 松原、白城、延边、白山应在原有经济发展基础上,加快经济发展速度,提高经济发展效率,加大技术投入,调整产业结构,培育壮大战略性新兴产业,发展现代服务业,加快发展精品旅游产业,将资源优势转化为经济发展动力,走"资本集约型和劳动力集约型"道路。

(2) 长春、吉林、四平、辽源、通化今后应优化产业结构,提高土地利用效率,减少对资本和资源的依赖以及污染物的排放,转变经济增长方式,坚持把科技创新作为推动经济发展的根本动力,走"科技创新型和资本、资源集约型"道路。

[参 考 文 献]

[1] WBCSD. Eco-efficiency: creating more value with less impact[EB/OL]. (2008-11-01). http://www.wbcsd.org/DocRoot/Bug Wjalu0wHL0IMoiYDr/eco_efficiency_creating_more_value.

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

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

[4] 廖红,朱坦. 生态经济效率环境管理发展的关系探讨[J]. 上海环境科学,2002,21(7):448-451.

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

[7] 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.

[8] 彭建,蒋依依,李正国,等. 快速城市化地区土地利用效益评价:以南京市江宁区为例[J]. 长江流域资源与环境,2005,14(3):304-308.

[9] 王棚宇,王秀兰. 基于功效系数法的城市土地利用效益评价:以武汉市为例[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2008,8(1):79-81.

[10] 王筱明. 基于熵权法的济南市土地利用效益评价研究[J]. 水土保持研究,2008,15(2):96-98.

[11] 张凤伟,任家强,李楠,等. 基于 BP 人工神经网络的城市土地利用效益评价研究:以辽阳市为例[J]. 价值工程,2011,6(18):7-8.

[12] 郑新奇,王筱明. 城镇土地利用结构效率的数据包络分析[J]. 中国土地科学,2004,18(2):35-39.

[13] 刘坚,黄贤金,赵彩艳,等,基于 DEA 模型的城市土地利用结构效应分析:以江苏省为例[J]. 江苏农业大学学报,2005,27(3):330-334.

[14] 宋戈,高楠. 基于 DEA 方法的城市土地利用经济效益分析:以哈尔滨市为例[J]. 地理科学,2008,28(2):185-188.

[15] 龚长兰. 基于 DEA 方法的四川城市土地利用效率研究[D]. 四川 雅安:四川农业大学,2008.

[16] 王文刚,宋玉祥,庞笑笑,等. 基于数据包络分析的中国区域土地利用效率研究[J]. 经济问题探索,2011,(8):60-65.

[17] 宫继萍,石培基,潘竟虎. 基于 DEA 方法的兰州市城市土地利用经济效益分析[J]. 水土保持通报,2011,31(5):163-166.

[18] 张群,张雯,李飞雪. 基于信息熵和数据包络分析的区域土地利用结构评价:以常州市武进区为例[J]. 长江流域资源与环境,2013,9(22):1149-1155.

[19] 吉林省 2013 年国民经济和社会发展统计公报. 中国互联网新闻中心.

[20] 杨斌. 2000—2006 年中国区域生态效率研究[J]. 经济地理,2009,29(7):1197-1202.

[21] 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[J]. 农业工程学报,2011,27(3):309-315.

(上接第 224 页)

截留容量的确定是极其困难的,在野外试验条件下,必须具备较为丰富的实测资料才能做到近似确定。就是说,资料越多,获得的截留容量信息就越丰富,从而得到的降雨量与截留容量之间的关系才越真实可靠。如果根据两者的关系曲线建立经验公式,林分的固有特征必定反映在公式的参数中。

[参 考 文 献]

[1] 周晓峰. 中国森林与生态环境[M]. 北京:中国林业出版社,1999:87-90.

[2] 马雪华. 森林水文学[M]. 北京:中国林业出版社,1993:70-73.

[3] 余新晓,张志强,陈丽华,等. 森林生态水文[M]. 北京:中国林业出版社,2004:24-33.

[4] 张永涛,杜强, 陈凯,等. 泰山典型林分的林冠截留特征[J]. 中国水土保持科学,2010,8(6):103-107.

[5] 张淑琢,范世香. 森林植被截留降雨实验与模拟[J]. 水利科技与经济,2009,15(10):857-859.

[6] 薛建辉,郝奇林,吴永波,等. 三种亚高山森林群落林冠截留量及穿透雨量与降雨量的关系[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2008,32(3):9-13.

[7] 高雁,宋丹丹,程银才,等. 雪松对降雨截留容量的试验研究[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2013,37(1):160-162.

[8] 范世香,高雁,程银才,等. 林冠对降雨截留能力的研究[J]. 地理科学,2007,27(2):200-204.

[9] 中野秀章. 森林水文学[M]. 李云森,译. 北京:中国林业出版社,1983,58-78.

[10] 赵士洞. 森林生态系统定位研究技术规范[M],北京:科学出版社,1995,155-156.