中国城市土地利用效率的空间分异

杜 丹 宁[1,2]

(1. 曼彻斯特大学 机械航空与土木工程学院，曼彻斯特 M139 PL，英国；2. 天津理工大学 管理学院，天津 300384)

摘 要：[目的] 对新型城镇化进程中城市土地的利用效率的空间分异性及成因进行分析，为提升新型城镇化发展质量和促进经济增长提供理论依据和参考。[方法] 选取新型城镇化过程中的城市土地作为研究对象，将城市土地的利用分成 2 个阶段，运用改进的两阶段 DEA 和 Tobit 模型对城市土地的利用效率的空间分异性和成因进行分析。[结果] 我国城市土地利用存在空间分异性，土地的空间关联性对其影响显著，虽然城市土地利用效率不断在提升，但总体上利用效率相对较低。[结论] 我国土地利用效率较低的原因主要包括：(1) 经济发展是导致土地利用存在空间分异的主要原因；(2) 没有重视土地的社会属性和自然环境的保护；(3) 现阶段人力资本因素对提升土地利用效率的程度大于技术因素。

关键词：土地利用；效率分析；改进的两阶段 DEA；新型城镇化

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2016)06-0315-06 **中图分类号**：F293.2

文献参数：杜丹宁. 中国城市土地利用效率的空间分异[J]. 水土保持通报，2016，36(6)：315-320. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.053

Spatial Variation of Urban Land Use Efficiency in Process of New-type Urbanization

DU Danning[1,2]

(1. *School of Mechanical Aerospace and Civil Engineering, University of Manchester, Manchester, M139PL, UK*; 2. *School of Management, Tianjin University of Technology, Tianjin* 300384, *China*)

Abstract: [Objective] To explore the spatial variation of urban land use efficiency in the process of new-type urbanization, and to provide theoretical basis for economic growth and urbanization quality promotion. [Methods] Urban land in the process of new-type urbanization was taken as research subject, and the process was divided into two stages. Improved two-stage DEA model and Tobit model were used to analyze the spatial variation of urban land use efficiency and the related reasons. [Results] There is spatial variation for urban land use, which is the outcome of obvious land spatial correlation. Urban land use efficiency is relatively at a low level, although it is continually getting improved. [Conclusion] The reasons mainly include the followings: (1) economic development is the main cause for spatial variation of urban land use efficiency; (2) secondly, social attributes of land and protection of natural resources are neglected; (3) thirdly, at present, the contribution of human capital to the enhancement of land use efficiency is greater than the one of technical factors.

Keywords: land use; efficiency analysis; improved two-stage DEA; new-type urbanization

2013 年召开的中国中央城镇化会议从 4 个视角(人口、经济、空间和社会)提出了未来新型城镇化的 5 大任务。其中关于新型城镇化过程中的土地利用方面尤为重要。进入 21 世纪后，中国城市化进程明显加快，1997—2014 年中国耕地总面积呈减少趋势，且减少量的增长率基本上和净减少率持平，说明农村耕地减少的速度和城市用地增加的速度相近。1997—2014 年中国的城市建设用地的比例和总量上都在不断地增加，这也是城市化进程必不可少的一步，但是与此同时城市其他用途的土地比例也在不断的增加，而这部分土地作为城市土地，却没有被有效利用。随着城镇化和工业化进程的加快，城市经济已经成为国民经济的重要载体。而城市土地又是城市经济活动的物质载体[1]，城市土地的快速扩张成为现阶

收稿日期：2016-02-04 **修回日期**：2016-04-11

第一作者：杜丹宁(1993—)，女(汉族)，山东省聊城冠县人，硕士研究生，主要研究方向为技术经济与资源管理研究。E-mail：danning_du@126.com。

段中国土地变化的重要特征[2]。因此,本研究对新型城镇化进程中城市土地利用效率的空间分异性以及其成因进行分析,为提升新型城镇化发展质量,促进经济增长,以及解决农村耕地的"抛荒"问题提供理论依据。

目前,国内学者对土地利用效率的研究主要集中在以下两个方面:(1)城市土地利用效率。方创琳等[3]通过投入产出的指标算法测量了地级市的城市化效率,指出土地利用的效率是重要的组成部分;梁流涛等[4]研究中国地级以上城市土地利用效率的空间分异特征,指出我国地级以上城市土地利用效率总体不高,在空间分布上效率值与其经济发展水平不平衡;李永乐等[5]利用GIS空间分析、泰尔指数分解和面板数据模型方法系统研究了1999—2011年中国31个省份城市土地利用效率的时空特征、地区差距及其影响因素。结果表明,中国3大区域城市土地利用效率的差距逐渐减小,呈现出持续收敛的态势。组内差距成为城市土地利用效率差距变动的主导因素;黄珂等[6]运用3阶段的DEA研究中国17个城市群农地城市流转效率指出中国城市群农地城市流转综合效率平均水平较高,但城市群间差异较大,环境因素对效率影响显著。(2)有关土地利用效率研究方法。现有文献中关于土地利用效率的研究方法主要有以下5种方法:面板数据模型、生命周期评价、灰色预测模型、成本收益分析和数据包络分析。面板数据模型主要是针对三维数据的实证研究,而本研究只是涉及二维(时间,变量)的数据,因此,此方法不适合本研究。生命周期评价对数据的连续性和数据量的多少要有一定的限制,一般的为40个截面数据,而本研究的主体仅有15 a的数据,难以满足其需求。灰色预测模型是揭示其数据内在的运行规律,而本文主要研究外界对土地利用导致的后果,并且这个利用的程度也在变化,因此,本方法也不适合本研究。对中国土地利用有效性的研究多数学者采用成本收益方法,然而成本收益方法仅仅关注了其对经济方面的效应,没有对其社会方面和生态方面进行描述土地利用的收益,并且这些收益也难以测量,其效率评价存在片面性。综上所述,根据本文的研究主体为以土地利用的有效性为指标的空间分异性研究,而且其数据为15 a的二维数据,本文选取数据包络分析进行效率分析。

在既有研究基础之上,结合新型城镇化过程中城市土地利用现状,本文从土地利用效率视角出发,将城市土地的利用分成两个阶段,运用改进的两阶段DEA方法检验城市土地利用的有效性。首先,选取改进版的两阶段DEA比black box DEA具有以下优势:(1)改进的两阶段DEA方法比传统的黑盒子的DEA方法在测量政策的有效性方面更加有效;(2)解决本文前后2个阶段不相互独立的关系;(3)第二阶段的输入不只是第一阶段的输出,还可考虑其他输入。其次,在分析中国新型城镇化过程中城市土地的利用效率较低的过程中,放弃常规的因素分析方法,选用Tobit回归模型从土地利用的视角分析如何利用土地才能提高其利用效率。

1 研究方法

1.1 改进的两阶段DEA模型

数据包络分析方法(data envelopment analysis,DEA)是由Cooper和Rhodes在1978年共同提出的基于相对效率的多投入多产出分析法。DEA具有非参数估计、可计算出投入产出的权重、剔除主观因素影响、数据不需要统一的无量纲化处理等优势,被应用到很多领域,例如:金融机构效率[7],企业经营发展效率分析[8],公共政策、事业管理[9]等。传统DEA模型将内部过程看作"黑箱",对其内部过程不作深入的讨论,不利于找到导致其无效的根源。Fare和Grosskopf提出了网络DEA的概念,将复杂的业务流程进行分解,考察每一阶段对生产系统整体效率的影响,并在随后提出了基于网络生产系统的DEA模型的基本架构,两阶段生产系统的DEA模型是网络DEA的特例。两阶段的DEA模型的第一阶段产出要直接的作为第二阶段的投入要素。在第一阶段中要求产出最大化,但在第二阶段的评价过程中,要求投入的越少越好,而这个产出和投入都是指中间要素。因此第一阶段产出最大化的DMU为最优的DMU,但是在第二阶段的评价时,第一阶段的最优DMU未必能具有同样的效率水平,这就导致了第二阶段的无效或低效,从而影响整体的效率值。也就是说,由于中间要素的存在,传统的两阶段DEA无法调整投入要素和产出要素使其成功的投影在有效的前沿面上。为了解决这一矛盾,大量的研究集中于两阶段DEA的改进,Kao等[10]发展一种全新的两阶段DEA模型,将一个两阶段过程分解为求2个生产效率值的子过程,这就可以获得每个阶段的总体效率值,依据一定的权重加总可得知总的效率值;Pendharkar等[11]在DEA的分析框架之下应用贝叶斯网络分类法对其进行扩展;Chen等[12]在两阶段DEA的基础上设计采用乘法设定,但是还无法调整投入产出要素投射到有效的前沿面。本文为了解决上述问题引入"虚拟阶段",在"虚拟阶段"中放宽作为第一阶段产出要素的中间要素要以不变的权重全部作为第二阶段投入要素的限定,允许在可变权重下将中间

要素进行第二次赋权以作为第二阶段的投入要素。为了实现“虚拟阶段”,本研究引入“虚拟中间要素”。通过“虚拟阶段”可以使得第一阶段和第二阶段的前沿面相互映射,进而完善两阶段 DEA 的逻辑结构。

1.2　Tobit 模型

由于本研究所选择的因变量是土地利用效率,其取值范围为[0,1],并且存在选择性行为,因此传统回归方程无法进行回归分析。对于该回归分析主要有 2 种方法:Heckman 回归分析和 Tobit 回归分析。Heckman 模型将整个回归分析分成 2 个方程:主方程和选择方程,其主要目的是对研究对象的选择性行为进行回归分析。Tobit 模型更加专注因变量有下限、上限或者存在极限值这类问题的研究。Tobit 认为受限因变量的重点主要有 2 个方面,一方面是受限因变量和其他变量之间的关系,另一方面是这种关系的假设检验问题。在这样的问题的研究中,解释变量不仅影响受限变量的概率,也影响非受限因变量的规模大小。因此,本文选取 Tobit 对中国城市土地利用效率空间分异性的原因进行分析。

2　中国城镇化过程中城市土地利用效率的空间分异研究

2.1　变量选取与数据来源

2.1.1　*变量选取*　(1) 输入变量。本研究体为新型城镇化过程中城市土地的利用效率分析,其研究主体为城市土地,因此,选取的输入变量为新型城镇化过程中城市土地量。(2) 中间变量。运 Haulux 用的研究理论,将中国新型城镇化过程中的城市土地利用分成 2 个阶段,第一个阶段为规划阶段,第二个阶段为生产阶段。第一阶段的产出即为土地的空间关联程度。根据柯布道格拉斯生产函数可知,生产过程中除了基本的土地之外还需要技术、人力和资本 3 方面的投入。因此,选取人力、技术和资本 3 方面作为除了空间关联程度之外的中间变量,中间变量详见表 1。(3) 输出变量。张明斗等[13]研究中国城市土地利用率的动态测度及影响因素时选取区域绿化覆盖率和城镇恩格尔系数作为输出变量。本文在上述研究的基础上,选取社会经济、社会生活和自然环境 3 个方面的变量,输出变量结果详见表 2。

表 1　模型中间变量

变量名称	符号	变量意义
空间关联程度	M_1	土地的利用规划
人 力	M_2	新型城镇化过程中人口的增加
技 术	M_3	技术效率,运用 black box 测量结果中的技术效率
资 本	M_4	城市的资本存量

表 2　模型输出变量

项 目	变量名称	符号	变量意义
社会经济	城市经济总量	O_1	城市经济的总量表明一个城市总体经济发展水平
	城市经济结构	O_2	经济结构的优化是判断一个区域经济可持续发展的重要指标之一,O_2 为第二产业占比和第三产业占比的比值
社会生活	城镇的恩格尔系数	O_3	恩格尔系数是食品支出总额占消费支出总额的比重,表明人们的富裕程度。
	人均住房面积	O_4	表明人民的居住环境,O_4 为总的住房面积/城市人口数
自然环境	区域绿化覆盖率	O_5	表明人们居住的自然环境舒适度
	地均工业废弃物排放率	O_6	表明人们居住的城市环境舒适度
	人均铁路和公路的长度/km	O_7	表明人们的出行方便程度,O_7 为铁路和公路的总里程/城市人口数

2.1.2　*数据来源*　本研究数据来源于两方面:统计年鉴的数据和作者计算数据。变量输入变量 I_1,中间变量 M_4 和输出变量 O_5,O_6 来自于 2001—2015 年的《中国城市统计年鉴》。中间变量 M_2 和输出变量 O_1 来自于 2001—2015 年的《中国统计年鉴》。中间变量 M_1,M_3 和输出变量 O_2,O_4,O_7 来自于作者根据相关统计年鉴的数据计算而得。

2.2　聚类分析

为了避由于空间因素所造成的虚假回归,将全国省份进行分类分析。传统的将中国分成东、中、西 3 个经济区域,只是考虑到了区域经济因素的影响,而没有考虑到不同区域的各省市自治区相似的内部经济结构因素的影响。因此,运用聚类分析将全国 31 个省市自治区进行分类。其聚类分析的结果详见表 3。

表 3 全国省份聚类分析

类 别	省市自治区名称	特 点
Cluster 1	安徽、福建、广东、黑龙江、湖南、辽宁、内蒙古、浙江、吉林、重庆、山东、江苏	各方面相对较高，工业化的特征突出，城市化率相对较高
Cluster 2	北京、上海、天津	第三产业的比重最高，城市化率很高
Cluster 3	云南、贵州、甘肃、海南	各方面都相对较差
Cluster 4	广西、河北、河南、湖北、江西、宁夏、青海、陕西、山西、四川、新疆	工业产值接近全国平均水平，但是城市化率不高，且经济发展水平相对不足

注：将重庆市并归到四川省内计算，西藏自治区在此不做研究。

2.3 实证估计及结果分析

2.3.1 基于 additive two stage DEA 的全国土地利用效率空间分异性分析 运用 additive two stage DEA 对全国城市土地的利用效率进行分析，其分析结果详见表 4，并结合已有研究成果中的城市土地利用效率分类标准进行分析[3]。

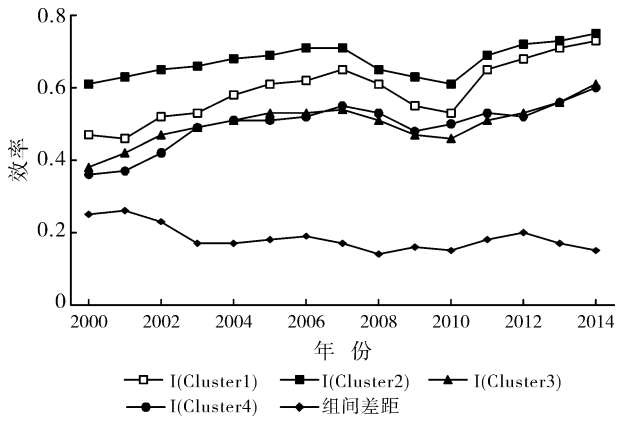
表 4 全国城市土地利用效率空间分异性分析

省区	2000 年		2003 年		2006 年		2009 年		2012 年		2014 年	
	I	*R*	*I*	*R*	*I*	*R*	*I*	*R*	*I*	*R*	*I*	*R*
安徽	0.54	15	0.66	14	0.82	6	0.70	7	0.81	4	0.83	3
福建	1.00	1	1.00	1	0.67	10	0.61	13	0.67	12	0.72	7
广东	1.00	1	1.00	1	1.00	1	1.00	1	1.00	1	1.00	1
黑龙江	0.61	11	1.00	1	0.85	4	0.62	12	0.68	11	0.71	8
湖南	0.70	7	0.74	10	0.60	15	0.62	12	0.75	8	0.72	7
辽宁	0.68	9	0.91	3	0.65	12	0.70	7	0.78	6	0.65	10
内蒙古	0.49	17	0.63	17	0.65	12	1.00	1	0.78	6	0.65	10
浙江	1.00	1	1.00	1	0.77	7	0.65	10	0.78	6	1.00	1
吉林	0.69	8	0.73	11	0.61	14	0.65	10	0.69	10	0.74	6
西藏	0.35	20	0.65	15	0.45	22	0.69	8	0.72	9	0.52	16
山东	0.80	5	0.78	9	0.70	9	0.76	5	0.79	5	0.83	3
北京	0.67	10	0.62	18	0.76	8	0.83	3	0.84	3	0.68	9
上海	1.00	1	1.00	1	1.00	1	1.00	1	1.00	1	1.00	1
江苏	1.00	1	0.88	5	1.00	1	1.00	1	1.00	1	0.86	2
天津	0.86	3	0.79	8	0.83	5	0.92	2	0.86	2	0.74	6
云南	0.98	2	1.00	1	0.77	7	0.64	11	0.63	15	0.56	14
贵州	0.56	14	1.00	1	0.54	18	0.56	15	0.61	17	0.63	12
甘肃	0.53	16	0.63	17	0.61	14	0.62	12	0.66	13	0.63	12
海南	1.00	1	0.80	7	0.63	13	0.72	6	0.65	14	0.59	13
广西	1.00	1	0.93	2	0.56	17	0.82	4	0.76	7	0.65	10
河北	0.60	12	0.82	6	0.59	16	0.54	16	0.65	14	0.78	5
河南	0.46	19	0.68	12	0.48	20	0.47	18	0.52	20	0.53	15
湖北	0.71	6	0.82	6	0.66	11	0.60	14	0.61	17	0.63	12
江西	0.59	13	0.74	10	0.48	20	0.67	9	0.61	17	0.63	12
宁夏	0.70	7	0.61	19	0.95	2	1.00	1	0.56	19	0.53	15
青海	1.00	1	1.00	1	0.56	17	0.45	20	0.46	21	0.43	17
陕西	0.53	16	0.64	16	0.46	21	0.46	19	0.42	22	0.52	16
山西	0.47	18	0.67	13	0.63	13	0.54	16	0.57	18	0.82	4
四川	0.54	15	0.64	16	0.51	19	0.53	17	0.62	16	0.64	11
新疆	0.83	4	0.90	4	0.87	3	1.00	1	0.78	6	0.68	9

注：*I* 为由 additive two stage DEA 计算的效率；*R* 为效率值的排序。

根据表 4 可以得出以下结论:(1) 在同一个年份,各个省份之间土地的利用效率不同;(2) 在同一个省份,在不同的年份里,其土地的利用效率也不相同。这就表明中国的城市土地利用效率存在空间的分异性。总体上中国城市土地的利用效率参差不齐,有些省份的土地利用效率相对有效($I=1.00$),而有些地区的土地利用效率相对无效($I<1.00$),且大部分省份的土地利用相对无效,大多都在(0.35,0.80)之间其效率值较低(最低为 0.35)。在一些省份中其前期土地的利用效率较高,而后期其土地的利用效率较低。例如,山东的土地利用率从 2000—2006 年是降低的,2007 开始其效率开始上升,呈现"U"形曲线状态。造成上述现象的原因主要有 2 个:自然环境的恶化、区域经济发展的影响。(1) 由于本文选取的输出变量为经济、社会和环境 3 个方面,在后期由于对环境的保护不当会导致土地利用效率的降低。(2) 由于各个省份之间存在相互的联系、经济发展结构的相似性,它们之间会相互影响。因此,本研究在聚类分析的基础上运用 additive two stage DEA 对各个不同的 Cluster 进行测量,可以避免由于空间关联和经济发展程度造成的误差。

2.3.2　基于 additive two stage DEA 和聚类分析的土地利用效率空间分异性分析　运用 additive two stage DEA 对聚类分组之后的全国城市土地的利用效率进行分析,其分析结果如图 1 所示。



注:I 为由 additive two stage DEA 计算的效率;组间差距为效率最大和最小之间的效率之差。

图 1　全国分类城市土地利用效率空间分异性分析

根据图 1 分析结果可知,同一组内土地的利用效率总体上在提升,不同组之间土地的利用效率存在很大的差别,组间的差距逐渐变小,但是总体上土地的利用效率相对较低。可以说明中国新兴城镇化过程中城市土地的利用效率存在空间分异性。该差异的存在也表明在我国土地利用过程中,有必要实施差异化的土地利用政策,才能有效提升中国整体土地利用效率。从 2007 开始,Cluster1—4 共 4 组城市的土地利用效率都开始减小,直到 2010 年才逐渐开始上升。可能的原因在于由于受到经济危机的影响,中国土地的总体经济产量不高所导致,这也在一定程度上说明,中国的土地利用效率在很大程度上与经济发展程度相关。

3　新型城镇化过程中城市土地利用效率的空间分异原因分析

根据 additive two stage DEA 的实证结果可知,中国新型城镇化过程中土地利用效率存在空间分异性,即不同地域的土地利用效率不同,而且总体的利用效率不高。选取 Tobit 模型分析中国新型城镇化过程中土地利用效率不高和存在空间分异性的原因。本研究的数据来源于 2 个部分,解释变量和控制变量的数据来源于第 4 部分的数据,I 为第 4 部分的实证结果。实证结果详见表 5。通过上述的 Tobit 分析可得:(1) 经济方面。从全国数据来看,经济方面的经济生产总量(7.68)和经济结构(8.01)对土地的利用效的影响最大;从各个不同的分组之间可见经济总量和经济结构对其影响的程度各不相同,经济总量(Cluster1 为 7.67;Cluster2 为 2.36;Cluster3 为 9.65;Cluster4 为 8.87),经济结构(Cluster1 为 7.93;Cluster2 为 3.96;Cluster3 为 6.92;Cluster4 为 6.82)。Cluster2 除外,这主要是 Cluster2 的城市为北京、上海和天津,其经济发展相对发达,经济结构相对合理,提升空间相对较小,对土地利用效率的拉动作用也相对较小。(2) 社会生活方面。社会环境因素对土地的利用有显著的影响作用,城市人口密度增加对城市土地利用效率产生负面影响。城市的生活和文化环境对人才的引进有重要的影响,这也可以间接的影响经济发展,从而对土地利用产生影响。(3) 自然环境方面。自然环境因素在土地利用的重要程度相对较低。通过 Cluster2 可以看出,当经济的发达程度相对较高时,人们才会越来越多的关注环境因素。新型城镇化规划指出在新型城镇化建设过程中,要尽可能减少对自然的干扰和损害,集约利用土地、水、化石能源等资源,人们要转变发展观念才能更好的提升土地的利用效率。(4) 控制变量方面。控制变量对土地的利用效率的影响较大,影响的大小程度为土地空间关联程度、人力、技术和资本存量(10.21,8.85,8.03,6.33)。可见中国对土地的利用总体上还是粗放的增长方式(人力资本的作用程度大于技术的作用程度)。各个组之间还有差别,Cluster2 的技术因素作用程度大于人力和资本存量因素;

Cluster3 的人力资本的作用程度大于资本存量因素，这主要是因为 Cluster3 主要以旅游和畜牧业为主，其人力资本更重要；Cluster4 的资本存量因素作用程度大于人力因素。

表 5 Tobit 模型回归结果

系数	全国(Z 值)	Cluster1(Z 值)	Cluster2(Z 值)	Cluster3(Z 值)	Cluster4(Z 值)
β_0	0.17** (13.33)	0.15* (−2.36)	0.18*** (18.30)	0.26** (27.39)	0.35*** (−11.03)
β_1	7.68*** (−14.792)	7.67*** (−5.033)	2.36*** (−7.101)	9.65*** (−13.890)	8.87*** (−8.440)
β_2	8.01*** (1.82)	7.93*** (3.09)	3.96*** (4.65)	6.92*** (−10.12)	6.82*** (−9.64)
β_3	6.83** (12.36)	5.63** (−8.97)	9.34* (−8.64)	4.62* (−10.27)	3.36*** (13.33)
β_4	6.22*** (−10.21)	4.58*** (12.66)	5.36** (−14.52)	4.56** (9.54)	3.43*** (−18.77)
β_5	5.01*** (−9.63)	6.63*** (−5.45)	9.65*** (4.57)	5.62*** (23.45)	3.52*** (18.96)
β_6	5.76*** (13.23)	5.32*** (15.42)	6.96* (−19.68)	4.03* (20.21)	4.23*** (−12.02)
β_7	6.87** (15.36)	5.63*** (22.31)	8.66*** (36.52)	7.06** (10.78)	6.68*** (9.65)
λ_1	10.21** (−12.36)	10.85*** (8.97)	11.24** (−8.64)	12.04*** (−10.27)	11.67*** (−13.33)
λ_2	8.85*** (28.74)	8.01*** (−32.12)	3.87** (19.68)	9.51** (24.51)	9.23*** (19.99)
λ_3	8.03*** (−26.22)	9.02*** (24.12)	(9.55***)(19.68)	7.58** (20.12)	7.49*** (−20.01)
λ_4	6.33*** (13.33)	6.54*** (−15.04)	4.25*** (−18.73)	7.25* (26.35)	8.47*** (−9.85)
R^2	0.86	0.92(0.92)	0.78	0.86	0.90
Adj-R^2	0.82	0.88(0.88)	0.74	0.84	0.87
D-W	1.998	1.901(1.901)	2.011	2.023	2.004
F 值	186.36	178.99 (178.99)	136.25	258.73	188.38
p 值	0.000	0.001(0.001)	0001	0.003	0.000

注：*，**，*** 分别表示在 10%，5%和 1%的显著性水平下显著。D-W 为杜宾-瓦森检验值，R^2 为模型拟合度；Adj-R^2 为调整后的模型拟合度。

4 讨论与结论

首先，中国城市土地利用存在空间分异，土地的空间关联性对其利用效率的影响显著，虽然土地利用效率在不断的提升，但从总体上来看，城市土地的利用效率相对较低。各个区域(即不同的 Cluster)的利用效率不同，但其组类之间的差距逐渐缩小。

其次，新型城镇化过程中土地利用效率存在空间分异性和效率相对较低的原因主要有 3 方面：(1) 由于经济的发展本身为城市土地利用的重要一方面，并且城市经济程度也会影响到人们的社会生活水平。因此，经济发展是导致土地利用存在空间分异的主要原因。(2) 在城市土地利用的过程中，没有重视土地的社会生活和自然环境的保护，通过 Cluster 2 和其他 Cluster 的比较可以看到，在经济不发达的地区提升土地利用的主要手段是促进经济的发展，而在经济发展程度较高的地区，促进土地利用效率的方法为提高土地的社会属性和自然环境的保护和利用。(3) 现阶段人力资本因素对提升土地利用效率的程度大于技术因素。由于现阶段影响土地利用的主要因素为经济发展，而现阶段中国还处于粗放的经济发展方式，因此从整体来看，人力因素比技术因素更重要。因此，转变经济增长方式也是提升土地利用效率的方法之一。

根据以上研究结果，可得出我国提高土地利用效率的一些政策建议：

(1) 实现土地利用效率优化在对策选择上主要是投入要素的控制和合理配置，促进产业结构优化升级，提高固定资产使用效率，适当控制城市用地规模，优化劳动力配置。同时还需要根据不同区域城市、不同等级城市投入要素的冗余特点采取差别化的措施。

(2) 从理论上讲，在市场经济发展和深化的过程中，由于市场本身固有的弱点和缺陷，会导致城市土地利用的低效率，区域的文化价值因素能够促进土地利用效率的提升。分析结果显示，在新型城镇化建设过程中，要尽可能减少对自然的干扰和损害，集约利用土地、水、化石能源等资源，人们要转变发展观念才能更好的提升土地的利用效率。

(3) 区位条件对城市土地利用效率的影响系数很小。经济发达的东部地区并没有实现土地利用的高效率。根据实证结果可知，各个地区研究结果表明都要根据自己的实际情况提升土地的利用效率。例如，Cluster 2 组的省份要发展技术因素；Cluster3 的省份要多多考虑人力资本的作用，Cluster3 省份要以旅游和畜牧业为主，其人力资本更重要；Cluster 4 的省份还是要考虑资本存量因素。

(下转第 325 页)

贵州省喀斯特阔叶林降雨截留分配特征

周秋文[1]，马龙生[1]，颜 红[1]，蔡明勇[2]，戴 丽[1]

(1. 贵州师范大学 地理与环境科学学院，贵州 贵阳 550001；2. 环境保护部 卫星环境应用中心，北京 100094)

摘 要：[目的] 对贵州省喀斯特阔叶林降雨截留分配特征进行研究，为喀斯特地区水土保持和森林生态功能分析提供参考。[方法] 以贵州喀斯特阔叶林的降雨分配特征为研究对象，利用 2015 年 9 月至 2016 年 3 月间野外实测的 25 场降水数据对森林林冠层、灌木层的降雨截留分配特征进行研究。[结果] 观测期内降雨以小雨和中雨为主，降雨总量为 208.25 mm；树干流总量为 21.83 mm，占降雨总量的 10.48%，变化范围为 0～14.3%；林间穿透雨总量为 186.89 mm，占降雨总量的 89.7%。灌木层截留总量为 34.86 mm，占降雨总量的 16.74%；林冠截留的总量为 22.58 mm，占同期降雨的 10.84%。当林外降雨量大于 1.15 mm 时，研究区内开始产生树干流，且树干流与林外降雨量呈线性正相关关系；灌木截留量随着降雨量的增大而增大，但林冠层截留率与降雨量之间没有明显的相关关系。[结论] 喀斯特阔叶林对降雨具有较强的截留和再分配作用，对区域水量平衡和水土保持具有重要影响。

关键词：森林降雨；截留；阔叶林；喀斯特

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2016)06-0321-05 **中图分类号**：S715.3

文献参数：周秋文，马龙生，颜红等. 贵州省喀斯特阔叶林降雨截留分配特征[J]. 水土保持通报，2016，36(6)：321-325. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.054

Distribution Characteristics of Rainfall Interception by Broad Leaved Forest in Typical Karst Area of Guizhou Province

ZHOU Qiuwen[1], MA Longsheng[1], YAN Hong[1], CAI Mingyong[2], DAI Li[1]

(1. *School of Geography and Environment Science, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou* 550001, *China*; 2. *Satellite Environment Center of MEP, Beijing* 100094, *China*)

Abstract: [Objective] Rainfall distribution characteristics of broad leaved forest in typical karst area were studied for considering contribution to soil and water conservation and forest ecological function analyze in karst area. [Methods] The rainfall distribution characteristics of broad leaved forest in Guizhou karst area were studied using the method of in situ observation. During the observation period, there were 25 rainfall recorded, and most of them were light or moderate rain. [Results] During the observation period, the total rainfall was 208.25 mm, the total amount of stem flow was 21.83 mm, which accounted for 10.48% of the total rainfall, and the variation range was 0～14.3%. Penetrating rain was 186.89 mm, which accounted for 89.7% of the total rainfall. The total amount of shrub layer interception was 34.86 mm, accounted for 16.74% of total rainfall. Canopy interception amount was 22.58 mm, which accounted for 10.84% of rainfall. When the rainfall was more than 1.15 mm in the study area, the stem flow occured and showed well positive linear correlation with rainfall. The shrub interception amount increased with the rainfall, but there was no significant linear correlation between the canopy interception rates and rainfall. [Conclusion] In general, broad leaved forest in karst area has a strong interception and redistribution effects on the rainfall, which can effectively influence the regional water balance and soil erosion.

Keywords: **forest rainfall; interception; broad-leaved forest; karst area**

收稿日期：2016-05-22 **修回日期**：2016-08-07

资助项目：贵州省科学技术基金项目“基于稀疏样点的喀斯特复杂地形区土壤水分空间估算方法研究”(黔科合 J 字[2015]2118 号)；贵州省科技合作计划项目(黔科合 LH 字[2015]7776 号)；贵州师范大学博士科研启动基金项目

第一作者：周秋文(1986—)，广西自治区桂林市人，博士，副教授，主要从事水资源水环境遥感研究。E-mail：zouqiuwen@163.com。

通讯作者：蔡明勇(1986—)，山东省东明县人，工程师，主要从事水文水资源遥感、生态水文建模研究。E-mail：caimingyong@126.com。

森林与水的关系是当今森林生态学研究的核心问题之一[1]。森林是陆地生态系统的重要组成部分，其面积占陆地总面积的33%，具有良好的水土保持功能[2]。研究森林截留与降水的关系，有助于刻画生态系统中降水的传输过程与机制，进而揭示其对生态系统结构、能量代谢和生产力的影响。森林不仅能够提供凝结核，影响降水的产生，并且森林冠层作为降水后第一个作用层，对大气降水的重新分配具有重要意义[3-4]。因此，研究林区植被与降雨分配之间的关系，降水发生后的林冠层截留、树干流和穿透雨的比例构成，对掌握区域水文循环过程和水量平衡具有极其重要的作用[5]。喀斯特地区是典型的生态脆弱区，其土壤贫薄，保水保肥能力差，成土速度十分缓慢，植被生长受制于恶劣的自然环境[6-7]，因此研究该区域森林与降水的作用关系更有现实意义。当前，已有学者[8-12]对森林与降雨的关系展开了研究并取得了相应的成果。其中对森林降雨研究主要从大气降雨，林冠截留，树干流等几个方面进行。如周佳宁等[13]对三峡库区典型森林植被对降雨再分配的影响的研究；李道宁等[14]对江西省大岗山主要森林类型降雨再分配特征的研究。但对喀斯特阔叶林降雨分配研究报道较少。虽然喀斯特地区植被长势相对较差，森林面积小，但是喀斯特森林的存在，仍然在涵养水源、防止水土流失方面具有重要的生态意义。因此，本研究以贵州省典型喀斯特阔叶林为例，通过野外试验观测的方法，结合室内分析，对喀斯特阔叶林的林冠层和灌木层降雨截留分配特征进行分析，以丰富喀斯特森林生态水文过程研究的内容，为喀斯特地区水土保持和森林生态功能分析提供参考。

1 研究区概况

研究地点为位于贵州省贵阳市花溪区的贵州师范大学地理与环境生态试验站(106°27′E，26°21′N)，平均海拔1 200 m。该地区具有高原季风湿润气候的特点，根据花溪气象站1961—2015年的观测资料，年平均气温为15 ℃，标准差为0.7 ℃，年均雨量1 124 mm，标准差为198 mm。试验站内土壤主要为石灰土，植被类型丰富，以乔木为主，主要乔木树种为冬青、麻栎、女贞、枫香等，区内零星分布有马尾松。乔木平均胸径为15 cm，平均树高12 m，郁闭度为0.85。

2 研究方法

2.1 样地设置

该试验区样地面积为10 m×10 m，样地内乔木树种有香叶(*Lindera communis*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、白栎(*Quercus fabri*)、冬青(*Ilex chinensis*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、云南樟(*Cinnamomum glanduliferum*)、棕榈(*Trachycarpus fortunei*)等。为确保植被截留分配观测的整体性和代表性，灌木层和乔木层的观测，均在该样地内进行。在其中选择典型的地段设置降雨收集装置，用以观测大气降雨、树干流、林间穿透雨、灌木层截留、林冠截留。在离样地30 m外架设自动气象站1台，设置雨量筒1个，用于监测大气降雨。样地内放置树干流收集桶3个，林间穿透雨收集桶4个，灌木层截留收集桶5组(灌木上与灌木下收集桶为1组)，共放置19个收集降雨的装置。

2.2 测定方法

(1) 大气降水(林外降雨)测量方法。在距样地30 m的空旷地架设ONSET公司生产的WatchDog 2 900 ET小型自动气象站，以测定大气降雨。该小型自动气象站降雨观测高度为距地面1.5 m，分辨率为0.25 mm ±2%。同时在附近放置1个PVC材料制作，直径为20 cm，高度为40 cm的自制雨量筒作为备用和参考。

(2) 树干流的测量方法。选择具有代表性的树干，在其树干1.5 m处，用软管缠绕在树干四周，固定好软管的位置，并用玻璃胶密封接口处，以确保树干流能全部进入下端放置的降雨收集桶内。

(3) 林间穿透雨测量方法。在林间选择一块相对空旷的地点，架设规格为20 cm×100 cm的集水槽来收集降雨，集水槽角度为5°，较高一端高度为1.3 m，集水槽较低的一端通过软管与收集桶连接。穿透雨率等于林间穿透雨量除以林外降雨量；林冠层截留量等于林外降雨量减去穿透雨量；林冠层截留率等于林冠层截留量除以林外降雨量。

(4) 灌木层截留量测定方法。在样地内随机选择4处灌木丛，在每处灌木下方放置一个雨量筒，在灌木层上方对应位置放置1个同规格的雨量筒，用于监测灌木截留。灌木层截留量等于灌木层上方降雨量减灌木层下方降雨量；灌木层截留率等于灌木层截留量除以灌木层上方降雨量。

3 结果与分析

3.1 大气降雨特征

在观测时段内共记录到大气降雨25次(期间部分场次降雨由于试验条件限制未采集到)，林外降雨总量为208.25 mm，降雨量最小值为0.8 mm，最大值为58.6 mm，平均降雨量为8.33 mm。雨量级以小雨($p \leqslant 10$ mm)居多，达到18场，占降雨总次数的

75.2%,占降雨总量的 25.8%;中雨(10 mm＜p＜25 mm)6 场,占降雨总次数的 24%,占降雨总量的 46%;暴雨(p＞50 mm)1 场,占降雨总场数的 4%,降雨量占降雨总量的 28.1%;观测期内未记录到大雨(25 mm＜p＜50 mm)。10 月降雨强度最大,为 119.30 mm,占观测期内降雨总量的 57.29%,9 月和 3 月降雨量相近,分别为 38.85 和 39.27 mm,分别占降雨总量的 18.66%和 18.86%。12 月降雨量最小,为 3.50 mm,占降雨总量的 1.69%(图 1)。

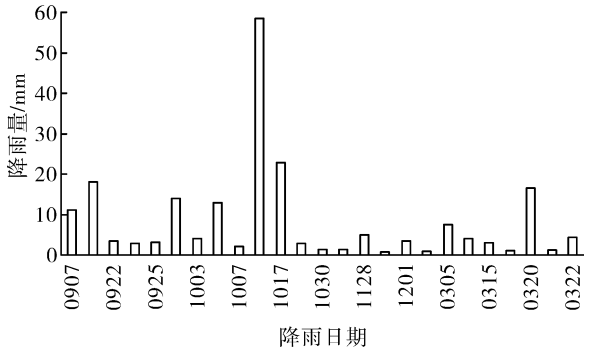


图 1　研究区降雨分布特征

3.2　树干流特征

在观测的 25 场降雨中,测得树干流总量为 21.83 mm,占降雨总量的 10.5%。单次降雨的树干流变化范围为 0～5.99 mm,变化率为 0%～14.3%。采集的 25 场降雨中,产生树干流的降雨有 23 场,当林外降雨 p≥1.15 mm 时,样地内云南樟会产生树干流,这与常学向等[15]的研究结果有所差异。由于树干流受到多方面因素的影响,如降雨量的大小、雨强、树种以及树干的生长形态等,本文与其研究结果的差异可能是研究区气候条件和植被生长状态等方面的不同所导致。通过对不同月份的树干流观测数据研究发现,10 月测得的树干流流量最大,12 月流量最小。分析原因是由于 10 月的降雨量相对其他月份较大,导致了树干流相应增大,充分说明树干流大小主要受降雨量大小影响。此外,9 月的树干流测得流量比 3 月大,但 9 月的林外降雨小于 3 月,可能的原因是,9 月虽然总降水量少,但是单场降雨量大,消耗于冠层吸附的降雨比例较少,更多比例降雨得以形成树干流;而 3 月发生的 8 场降雨中,只有 1 场降雨量超过 10 mm,在小雨情况下,大部分降雨消耗于冠层截留,因此树干流较小。此外,9 月是树木生长期,林冠层比 3 月茂盛,林冠截留效果较好,也是造成 9 月树干流小于 3 月的原因之一。从图 2 可以看出,喀斯特阔叶林中,树干流量总体随降雨量增大而增大,但当降雨量增加到一定程度后,树干流量增加的趋势减缓(图 2)。回归分析结果表明,树干流量与林外降雨量存在一定函数关系:$y=5.82\exp(-14.57/x)$,显著性检验结果表明(p＜0.000 1),置信度达到 99.99%以上。随着降雨量增大,树干流率呈先增大后减小趋势(表 1)。主要原因可能是由于当降雨量总体较小时(小雨、中雨),随着降雨量增加,更多的降雨得以被林冠层拦截,并通过阔叶林的枝、叶到达树干,形成较大的树干流率。当降雨量增加到一定程度后(大雨、暴雨),阔叶林叶面的承载能力接近饱和,经叶面导流到树干的雨水接近稳定值,若降雨量继续增大(树干流量无明显增加),则导致树干流率减小。

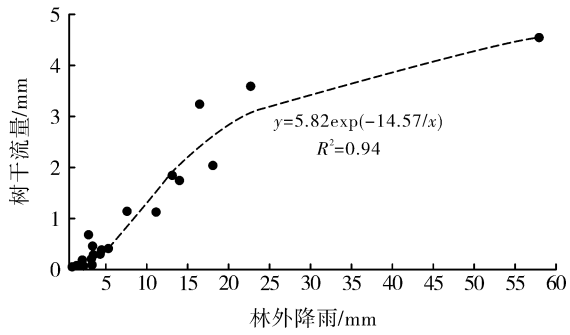


图 2　树干流量与林外降雨的关系

表 1　林冠层、灌木层对降雨的再分配特征

场次降雨量/mm	测定次数	林冠截留		树干流		林间穿透雨		灌木层截留	
		截留量/mm	截留率/%	树干流量/mm	树干流率/%	穿透雨量/mm	穿透雨率/%	截留量/mm	截留率/%
＜1.0	2	0.68	37.86	0.00	0.00	1.03	57.67	0.48	26.79
1.15～1.46	4	1.98	37.47	0.09	1.70	3.98	75.32	2.05	38.80
2.23～3.18	5	4.78	34.00	1.03	7.00	10.97	77.00	4.81	34.00
3.50～4.46	5	4.20	21.00	1.53	8.00	18.21	92.00	4.78	24.00
5.10～7.64	2	2.60	20.00	1.43	11.00	11.44	90.00	3.89	31.00
11.15～14.01	3	7.13	19.00	4.54	12.00	30.81	81.00	9.62	25.00
16.56～18.15	2	0.00	0.00	5.17	15.00	31.28	90.00	2.10	6.00
22.93～58.60	2	1.21	1.48	8.04	10.00	79.05	96.96	7.39	9.06
合 计	25	22.58	10.84	21.83	10.48	186.77	86.69	34.86	16.74

3.3 林间穿透雨特征

研究期间观测到的林间穿透雨总量为186.77 mm,占整个研究期间记录降雨总量的89.7%。2015 年 9,10,11,12 月和 2016 年 3 月,穿透雨总量分别为 32.53,110.56,5.45 mm,2.84 和35.38 mm,穿透率分别为 84%,93%,74%,81%,90%。可以看出,2015 年 10 月穿透雨量最高,穿透率也最大,2015 年 9 和 12 月穿透率相近。10 月降水量大,降雨强度大,故穿透雨量相应较大,所以穿透雨率较大。11 月穿透雨率最小,10 月穿透雨率最大,因为 10 月的降雨量比较大,雨强比较大,所以穿透雨率比较大。12 月的降雨量小于 11 月的降雨量,而其穿透雨率则大于 11 月的穿透雨率,原因可能是,进入 12 月后,林冠层树叶凋落比 11 月更明显,林冠截留效果较 11 月差,更多的降雨穿过树叶间空隙直接进入林内,因此其穿透雨率比 11 月大。穿透雨量(P)与林外降雨量(X)具有较好的线性关系,呈正相关的关系,穿透雨量随着降雨量的增大而逐渐增大。穿透雨率与林外降雨量总体呈对数函数关系,但由于受到穿透雨量、降雨大小和植被的生长状态等因素的影响,与林外降雨的线性相关性减弱。

3.4 灌木层截留特征

观测期内,灌木层截留总量为 34.86 mm,占降雨总量的 16.74%。单场降雨的灌木层截留量在 0～4.27 mm,截留率在 0%～67%。当降雨量＞0.99 mm 时,灌木层开始产生穿透雨。10 月截留量最大,为 16.64 mm,12 月截留量最小,为 1.47 mm。这是因为 12 月的时候大多数灌木枝叶已经凋落,导致了截留能力减弱,截留量最小,但是 12 月截留率最大,为 42%,9 月截留率最小,为 19%。当降雨量由 0.08 mm 增加至 3.50 mm 时,灌木层截留率从 52%下降至 11%,随着降雨量继续增加,截留率在 0%～40%上下波动。降雨量较大时截留率比较小的原因可能是,灌木的叶片比较小且光滑,能吸附水的表面积不大,能承接的雨量很小。总体而言,灌木层截留量随降雨的增大而增大(图 3)表现为:$y=\ln(0.61+0.72x)$ 的函数关系,显著性检验结果表明($p<0.000\ 1$),置信度达到 99.99%以上。但截留率与降雨量之间没有明显的线性相关关系。

3.5 乔木林冠截留特征

观测期内林冠截留总量为 22.58 mm,占同期降雨量的 10.84%,单次降雨的林冠截留率在 0%～63%,林冠截留量在 0～2.61 mm。其中 10 月的截留量最大,达 10.47 mm,12 月截留量最小,为 1.10 mm。林冠截留量随着降雨的增大而发生一定波动(表 1)。当降雨量为 0.08～2.23 mm 时,林冠截留量从 0.5 mm 增加至 0.73 mm;当降雨为 2.23～3.50 mm时,林冠截留量从 0.73 mm 减少至 0 mm;当降雨量为 3.50～13.06 mm 时,林冠截留量增加至最大值 2.61 mm;当降雨量为 13.06～22.93 mm 时,林冠截留增量为 0 mm;当降雨量超过 50 mm 后,林冠截留量又增加至 1.21 mm。总体而言,在降雨量较小的时候,林冠截留量随降雨量增大,但是当降雨量到达一定程度后,截留量相应减小。造成这种波动的主要原因可能是,当降雨量到达一定程度后,冠层叶片充分湿润,形成不利于雨滴附着的光滑面,导致截留能力减弱;此外,由于观测时间较短,降雨场次较少,此现象也有可能是观测误差导致。林冠截留率大致随林外降雨量增加而较少,但是相关性不高。林外降雨与林冠截留率呈负相关的原因是,林冠层截留能力是有限的,林外降雨达到一定程度后,林冠层截留能力趋于饱和,林外降雨量持续增加的情况下,截留量趋于稳定,相比之下,截留率减小。

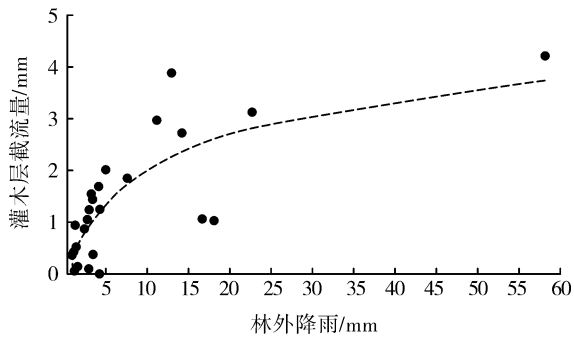


图 3 灌木层截留量与林外降雨的关系

4 结论

(1) 观测期降雨以小雨、中雨为主,降雨总量为 208.25 mm,最大降雨发生在 2015 年 10 月,降雨量为 119.30 mm,占观测期内降雨总量的 57.29%。观测期内,研究区林冠截留的总量为 22.58 mm,占同期降雨量的 10.84%,林冠截留率波动范围在 0%～63%,林冠截留量在 0～2.61 mm,林间穿透雨总量为 186.89 mm,占降雨总量的 89.7%;灌木层截留总量为 34.86 mm,占降雨总量的 16.74%,单场降雨灌木层截留率波动范围在 0%～67%,截留量在0～4.27 mm。

(2) 研究区内,当样地林外降雨量 $p\geqslant 1.15$ mm 时,乔木开始产生树干流,且树干流与林外降雨量呈线性正相关;总体上,灌木层截留量随着降雨量的增大而增大,但灌木、林冠层截留率与降雨量无显著线

性相关性。树干流量、林间穿透雨量、林间穿透雨率与林外降水呈正相关关系。

[参 考 文 献]

[1] 高甲荣,肖斌,张东升,等.国外森林水文研究进展评述[J].水土保持学报,2001,10(5):60-65.

[2] 罗海波,钱晓刚,刘方,等.喀斯特山区退耕还林(草)保持水土生态效益研究[J].水土保持学报,2003,17(4):31-35.

[3] 袁嘉祖,朱劲伟.森林降水效应评述[J].北京林学院学报,1984,15(4):47-48.

[4] 万师强,陈灵芝.东灵山地区大气降水特征及森林树干流[J].生态学报,2000,20(1):61-67.

[5] 田野宏,满秀玲,刘茜,等.大兴安岭北部白桦次生林降雨再分配特征研究[J].水土保持学报,2014,28(3):109-110.

[6] 何师意,冉景丞,袁道先.西南岩溶地区植被喀斯特效应[J].地球学报,2001,22(2):159-164.

[7] 王世杰,季宏兵,欧阳自远,等.碳酸盐岩风化成土作用的初步研究[J].中国科学(D):地球科学,1999,2(5):441-449.

[8] 赵海蓉,帅伟,李静,等.华西雨屏区几种典型人工林降雨截留分配特征[J].水土保持学报,2014,28(6):94-100.

[9] 王新平,康尔泗,张景光,等.荒漠地区主要固沙灌木的降水截留特征[J].冰川冻土,2004,26(1):89-93.

[10] 成向荣,黄明斌,邵明安,等.黄土高原农牧业交错带人工乔灌木林冠截留[J].生态学杂志,2009,28(7):1213-1217.

[11] 卢晓强,杨万霞,丁访军,等.茂兰喀斯特地区森林降水分配的水化学特征[J].生态学杂志,2015,34(8):2115-2122.

[12] 黄承标,谭卫宁,覃文更,等.木论喀斯特森林水土流失规律研究[J].水土保持研究,2012,19(4):34-37.

[13] 周佳宁,王彬,王云琦,等.三峡库区典型森林植被对降雨再分配的影响[J].中国水土保持科学,2014,12(4):28-36.

[14] 李道宁,王兵,蔡体久,等.江西省大岗山主要森林类型降雨再分配特征[J].应用生态学报,2014,25(8):2193-2200.

[15] 常学向,赵爱芬,王金叶,等.祁连山林区大气降水特征与森林对降水的截留作用[J].高原气象,2002,21(3):275-280.

(上接第 320 页)

[参 考 文 献]

[1] 刘传明,李红,贺巧宁.湖南省土地利用效率空间差异及优化对策[J].经济地理,2011,30(11):1890-1896.

[2] 吴得文,毛汉英,张小雷,等.中国城市土地利用效率评价[J].地理学报,2011,66(8):1111-1121.

[3] 方创琳,关兴良.中国城市群投入产出效率的综合测度与空间分异[J].地理学报,2011,66(8):1011-1022.

[4] 梁流涛,赵庆良,陈聪.中国城市土地利用效率空间分异特征及优化路径分析:基于 287 个地级以上城市的实证研究[J].中国土地科学,2013,27(7):48-54.

[5] 李永乐,舒帮荣,吴群.中国城市土地利用效率:时空特征、地区差距与影响因素[J].经济地理,2014,34(1):133-139.

[6] 黄珂,张安录,张雄.中国城市群农地城市流转效率研究:基于三阶段 DEA 与 Tobit 模型的实证分析[J].经济地理,2014,34(11):74-80.

[7] Puri J, Yadav S P. A fuzzy DEA model with undesirable fuzzy outputs and its application to the banking sector in India[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(14):6419-6432.

[8] Toloo M, Kresta A. Finding the best asset financing alternative: A DEA-WEO approach[J]. Measurement, 2014, 55(9):288-294.

[9] Mar-Molinero C, Prior D, Segovia M M, et al. On centralized resource utilization and its reallocation by using DEA[J]. Annals of Operations Research, 2014, 221(1):273-283.

[10] Kao C, Hwang S N. Efficiency decomposition in two-stage data envelopment analysis:an application to non-life Insurance companies inTaiwan[J]. European Journal of Operational Research, 2008,185(1):418-429.

[11] Pendharkar P C, Rodger J A. The relationship between software development team size and software development cost[J]. Communications of the ACM, 2009,52(1):141-144.

[12] Chen Yao, Crook W D, Li Ning, et al. Additive efficiency decomposition in two-stage DEA[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 196(3):1170-1176.

[13] 张明斗,周亮,杨霞.城市化效率的时空测度与省际差异研究[J].经济地理,2012,32(10):42-48.