

快速城市化地区土地利用变化的动力学模拟

——以南京市江宁区为例

张云鹏¹, 孙燕², 王小丽³, 蔡玉萍⁴

(1. 南京工业大学 测绘学院, 江苏 南京 210009; 2. 南京财经大学 公共管理学院, 江苏 南京 210046;
3. 江苏省土地勘测规划院, 江苏 南京 210024; 4. 江苏佳事得房地产土地评估有限公司, 江苏 南京 210029)

摘要: 研究土地利用结构变化的模拟是实现区域土地科学规划与利用的重要技术支持。运用系统动力学方法构建了快速城市化地区土地利用模拟的动力学模型。并以南京市江宁区为研究区, 对江宁区 2006—2020 年的土地利用结构变化进行了模拟。研究结果表明, 基于系统动力学的土地利用结构变化模拟方法, 能够较好地根据区域发展特征进行土地利用变化模拟。

关键词: 快速城市化; 土地利用; 动力学模拟; 南京市江宁区

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2012)06-0152-06

中图分类号: F301.2

Dynamic Simulation of Landuse Change in Areas Experiencing Rapid Urbanization

—A Case Study of Jiangning District of Nanjing City

ZHANG Yun-peng¹, SUN Yan², WANG Xiao-li³, CAI Yu-ping⁴

(1. College of Geomatics Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing, Jiangsu 210009, China; 2. College of Public Administration, Nanjing University of Finance & Economics, Nanjing, Jiangsu 210046, China; 3. Jiangsu Land Surveying and Planning, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 4. Jiangsu Jiashide Real Estate Appraisal Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210029, China)

Abstract: Simulation of the changes of land use structure is one of the most important components in land use planning. In this study, a dynamic model of land use change was constructed based on dynamic modeling theory, and the thorough knowledge of the land use change and the driving forces. Taken Jiangning District of Nanjing City as an example, the scenarios of land use were simulated between 2006 and 2020. The simulation results showed that the model predicted well the past and future land use structure change in the study area.

Keywords: rapid urbanization area; land use; dynamics simulation; Jiangning District of Nanjing City

随着我国进入经济社会转型期, 经济社会结构正在发生剧烈的变化, 这也促使土地利用面临更加深刻的变化^[1-2]。土地资源供需失衡及各类用途间的激烈竞争已经成为这一变化过程中的关键矛盾。在这种背景下, 通过建立土地利用变化模型, 科学把握土地利用变化状况, 制定合理的土地利用调控策略, 对于促进区域土地资源的合理利用与有效保护、区域经济社会的可持续发展具有重要意义。目前, 国内外学者对土地利用变化模拟的研究已经逐渐发展为多方面、多角度、多层次的研究体系^[3-8]。研究的方法逐渐分成了两类: 一是“自下而上”的基于微观作用的微观离散系统动力学模型, 二是“自上而下”的基于微分方程的宏观系统动力学模型^[9-12]。其中, “自上而下”的基

于微分方程的宏观系统动力学模型的可以反映复杂系统结构、功能与动态行为之间的相互作用关系, 通过分析土地利用驱动因素, 建立基于微分方程的系统动力学数量模型, 能够从宏观上反映土地系统的复杂行为^[13-15]。许多学者已致力于应用系统动力学模型来开展城市、环境以及土地利用等方面的研究^[16-20]。

“快速城市化”是近些年来以来我国许多地区土地利用的典型特征, 其突出的表现是, 在城市化和工业化的带动下, 城镇用地快速扩张导致耕地大量流失, 传统以农业用地为主的土地利用格局发生明显变化^[21]。本研究选取长江三角洲地区典型的快速城市化地区——南京市江宁区为研究区域, 尝试运用系统动力学理论, 构建适用于快速城市化地区土地利用模

收稿日期: 2012-04-17

修回日期: 2012-08-05

资助项目: 国家自然科学基金项目“土地利用情景模拟模型研究”(40901183); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 张云鹏(1980—), 男(汉族), 河北省石家庄市人, 博士, 讲师, 主要研究方向为地理时空建模与应用。E-mail: zhangyunpeng@njut.edu.cn.

通信作者: 孙燕(1981—), 女(汉族), 山东省淄博市人, 博士, 工程师, 主要从事资源、环境方面的研究。Email: nj_sunyan@163.com.

拟的动力学模型,是对土地利用研究方法的一种新的尝试。

1 研究区概况与数据处理

1.1 研究区概况

南京市江宁区位于长江南岸,南京市南部,东与句容市接壤,东南与溧水县毗连,南与安徽省当涂县衔接,西南与安徽省马鞍山市相邻,西与安徽省和县及南京市浦口区隔江相望。江宁区从东西南三面环抱南京,地理位置在北纬 $31^{\circ}38' - 32^{\circ}13'$,东经 $118^{\circ}31' - 119^{\circ}04'$ 。距离南京市区 7 km,地处长江经济高速发展带。江宁区主要地貌类型包括低山丘陵和平原,境内河道主要有秦淮河和长江 2 大水系。自改革开放以来,江宁区经济增长迅速,国内生产总值从 1978 年的 19 018 万元增长到 2006 年的 278.0 亿元,近 20 a 间增长了 146 倍。江宁区是中国快速城市化进程中新城建设的典型代表。

1.2 数据来源与处理

采用的空间数据包括研究区 20 世纪 90 年代中后期(1997 年)、21 世纪前期(2000 年)和 21 世纪中期(2003,2006 年),共计 4 期 Landsat 的 TM 遥感影像数据,图像的分辨率为 30 m。以 ENVI 4.3 为平台,对遥感图像进行的判读解译。根据遥感影像分类情况,将江宁区的土地利用类型共分为 5 个大类,即:耕地、园林地、其他农用地、建设用地和未利用地。

在得到 1997—2006 年研究区土地利用现状图的基础上,采用 ArcGIS 空间分析 Tabulate Areas 模块对任意两期的土地利用现状图进行矩阵运算,可以求得反映土地利用类型相互转移定量关系的转移矩阵,包括:(1)研究时段内由一种土地利用类型转变为其它土地利用类型的面积,即转出的面积;(2)研究时段内由其它土地利用类型转变为此土地利用类型的面积,即转入面积。

社会经济数据资料主要来自《新中国五十年(江苏篇)》、《南京市统计年鉴》、《江苏省国民经济和社会发展统计公报》、《南京市国民经济和社会发展统计公报》、《江宁区国民经济和社会发展统计公报》、《南京市江宁区国民经济和社会发展“第十一个五年”规划纲要》、《南京市市政公用事业“十一五”规划纲要(江宁部分)》和《南京市城市建设“十一五”规划纲要》等。

2 研究方法

基于系统动力学理论基础,研究假设某种土地利用类型占总土地面积的比例为 Y ,平均增长率为 R ,则土地利用类型的动力学方程为:

$$\frac{dY}{dt} = RY \quad (1)$$

区域土地利用变化受自然、政策调控、社会经济等作用力的驱动,表现为区域内各种土地利用类型数量的增长(或减少)和相互之间的不断转化。考虑到区域的各种土地利用类型之间的关系,以一个区域为背景,则区域土地利用变化的动力学方程为

$$\frac{dY_i}{dt} = r_i Y_i - \sum_{j=1, j \neq i}^n r_{j \rightarrow i} Y_j + \sum_{j=1, j \neq i}^n r_{i \rightarrow j} Y_j \quad (2)$$

式中: t ——单位时间; Y_i ——第 i 类土地利用类型占土地总面积的比例; n ——区域内土地利用类型的个数; r_i ——第 i 种土地利用类型的平均增长率; $r_{i \rightarrow j}$ ——第 j 种土地利用类型对第 i 种土地利用类型增长的贡献率; $r_{j \rightarrow i}$ ——第 i 种土地利用类型对第 j 种土地利用类型增长的贡献率。公式(2)右边的 2 项——某时间段内第 i 种土地利用类型对区域土地总面积的成功占有量和第 j 种土地利用类型转化对第 i 种土地利用类型的替代量。

模型中区域的概念是将区域内各种土地利用类型作为一个系统,受各种驱动力因素的影响,系统内的各种土地利用类型之间相互转化,但各种土地利用类型的总和并不发生变化。此外,区域内不同的土地利用类型遵循统一的区域发展目标,区域内的各种土地利用类型之间转化关系受土地利用总体规划、经济发展目标等因素制约。

该动力学方程的实质为指数增长模式,其特点是随着时间的推移,模拟数值将会无限增长,由于自然、社会经济以及政策等各土地利用类型的约束,这在现实生活中是不可能的。因此,这里参考 Logistic 模型,假设 $R(Y)$ 是 $Y(t)$ 的减函数。

$$R(Y) = R - sY \quad (s > 0) \quad (3)$$

为了明确 s 的物理意义,引入最大容量即 Y_m ,即自然、社会经济以及政策等各土地利用类型的最大约束。则当 $Y = Y_m$,土地利用类型的增长率应为零,即

$$0 = R - sY_m \quad (s = R/Y_m) \quad (3)$$

$$\text{所以, } R(Y) = R - sY = R(1 - Y/Y_m) \quad (4)$$

其中,因子 $(1 - Y/Y_m)$ 体现了区域自然、社会经济以及政策等对土地利用类型增长的阻滞作用。以上假设只针对 $R > 0$ 的情况,当 $R < 0$ 时,相应地阻滞因子调整为 $(Y/Y_m - 1)$,即,

$$r(Y) = sY - r = r(Y/Y_m - 1)。$$

根据以上分析,将模型修正为

$$\frac{dY_i}{dt} = r_i Y_i - \sum_{j=1, j \neq i}^n r_{j \rightarrow i} M(i) - \sum_{j=1, j \neq i}^n [r_{i \rightarrow j} Y_j M(j)] \quad (5)$$

$$M(i) = \begin{cases} 1 - \frac{Y_i}{Y_m(i)} & (r_i > 0) \\ \frac{Y_i}{Y_m(i)} - 1 & (r_i < 0) \end{cases}$$

式中： $Y_m(i)$ ——自然、社会经济以及政策等对第 i 种土地利用类型最大约束。

3 结果与分析

3.1 研究区土地利用变化特征分析

根据 1997—2006 年的 TM/ETM 土地利用解译结果显示,这一期间耕地面积大幅下降,所占比例从 48.83%下降至 36.08%,减少了 12.75%;相反,园林地、其他农用地和建设用地面积呈上升趋势,园林地增

加了 2.47%,其他农用地增加了 5.9%,建设用地增加了 7.98%;未利用地面积在近 10 a 持续减少,所占比例从 9.68%降至 6.09%,减少了 3.59%。

1997—2006 年江宁区土地利用转移情况详见表 1。表 1 数据显示,研究期间耕地面积的流向主要为建设用地和其他农用地,而耕地面积的补充来源主要为未利用地。园林地在研究期间有接近 1/2 的面积流向建设用地,而园林地面积增长的主要依靠耕地和未利用地的转入。研究期间大部分其他农用地面积流向了耕地和建设用地,其他农用地面积的补充则主要依靠耕地。建设用地面积的增长主要依靠耕地用途转用以及未利用地开发。研究期间未利用地面积主要流向耕地和建设用地。

表 1 南京市江宁区 1997—2006 年土地利用转移面积矩阵及转移比例

1997 年	2006 年					1997—2006 年净减少
	耕地	园林地	其他农用地	建设用地	未利用地	
耕地	A	0	4889	8368	9475	204
	B	0.00	21.32	36.48	41.31	0.89
	C	0.00	19.65	21.38	26.98	31.99
园林地	A	565	0	521	1 085	18
	B	25.81	0.00	23.80	49.57	0.82
	C	80.45	0.00	4.84	1.74%	12.97
其他农用地	A	615	294	0	736	19
	B	36.96	17.67	0.00	44.23	1.14
	C	76.49	4.76	0.00	1.92	16.83
建设用地	A	776	106	210	0	29
	B	69.22	9.46	18.73	0.00	2.59
	C	69.32	7.94	5.38	0.00	17.36
未利用地	A	920	788	1 841	2 373	0
	B	15.54	13.31	31.09	40.07	0.00
	C	75.56	6.67	7.04	10.74	0.00
1997—2006 年净增加		2 876	6 077	10 940	13 669	270

注:表中 A 行表示 1997 年的 i 种土地利用类型转变为 2006 年的 j 种土地利用类型的面积,即原始转移矩阵 A_{ij} ;表中 B 行表示 1997 年 i 种土地利用类型转变为 2006 年 j 种土地利用类型的百分比($B=A_{ij}/\sum_{i=1}^n A_{ij}$);表中 C 行表示 1997 年 j 种土地利用类型转变为 2006 年 i 种土地利用类型的百分比($C=A_{ij}/\sum_{j=1}^n A_{ij}$)。

1997—2006 年土地利用类型贡献度详见表 2。表 2 数据显示,未利用地对耕地面积的减少起阻滞作用,其余的土地利用类型加速了耕地面积的减少。耕地和未利用地支持了园林地面积的增加,其他农用地和建设用地则起阻碍作用。各种用地类型对建设用地的持续增长的作用均为正,其中耕地的贡献度较大。未利用地面积持续减少的主要原因为建设用地和其他农用地的占用。

表 2 南京市江宁区 1997—2006 年土地利用贡献度

土地利用类型	耕地	园林地	其他农用地	建设用地	未利用地
耕地	0.00	21.56	38.65	43.36	-3.57
园林地	111.21	0.00	-5.84	-25.18	19.80
其他农用地	83.58	2.45	0.00	-5.67	19.64
建设用地	69.33	7.80	4.19	0.00	18.68
未利用地	12.67	13.62	32.24	41.47	0.00

3.2 模型参数率定

在综合考虑研究区土地利用结构现状以及合理的发展趋势的条件下,着重考虑区域土地资源的代际公平,对于模型参数值设置并分析各种参数值的可行性进行分析,以对模型各参数进行率定。

3.2.1 耕地 江宁区耕地面积自1997年以来持续减少,平均速率为 -2.09% ,其中2000—2003年下滑速率最大,为 -6.71% ,2003—2006年速率放缓,为 -1.53% 。

根据相关规划,江宁区建成区面积将继续扩大,建设用地面积将不断增长,耕地面积在土地总量中所占比例最大,这不可避免的要占用部分耕地。因此,据此趋势,可以预测江宁区未来10~15a耕地面积将继续下降,由于近年来国家及地方对耕地保护意识以及相关措施的实施,预计下降速率应有所下降。根据《南京市江宁区国土资源与环境保护“十一五”规划》(以下简称“十一五”规划),规划至2010年江宁区耕地面积为 $58\,458\text{ hm}^2$ ，“十一五”期间耕地面积共计减少 $3\,727\text{ hm}^2$,年均增长率为 -1.06% ,小于2003—2006年的速率,此数值作为未来10~15a的平均增长率应该是较为合适的。

根据1997—2006年的土地利用结构现状,耕地转出的主要用途是建设用地占用以及园林地用途转用。如果按照“十一五”规划,5a内将有 $4\,500\text{ hm}^2$ 的耕地被转化为建设用地, $1\,243\text{ hm}^2$ 的耕地被转化为园林地,共计减少 $5\,743\text{ hm}^2$ 。考虑到实现的可能性,降为90%应该是可以实现,即 $r_{4\rightarrow 1}=109.34\%$, $r_{2\rightarrow 1}=30.02\%$ 。最大约束值参考对于基本农田保护的要求, $Y_m=30\%$ 较为合适。

3.2.2 园林地 根据“十一五”规划,规划期间江宁区的绿化覆盖率达到30%以上,森林覆盖率将提高至25%,城镇人均公共绿地面积应达到 $14\text{ m}^2/\text{人}$,至2010年园林地面积为 $29\,747\text{ hm}^2$,年均增长率约为1.99%。如果按照园林地占土地总面积的比例来计算森林覆盖率,则2006年江宁区的森林覆盖率为16.48%。如果按照25%的目标来计算,那么5a内江宁区森林面积将增加 $13\,000\text{ hm}^2$,实现难度较大。通过计算,我们认为将平均增长率定为1%,至2020年实现25%的森林覆盖率是较为合适的。

3.2.3 其他农用地 其他农用地主要包括农村道路等农村生产基础设施以及坑塘等土地。1997—2006年,江宁区其他农用地面积共计增长 $9\,276\text{ hm}^2$,年均增长 $1\,030\text{ hm}^2$ 。说明近10a,江宁区的农业生产条件得到了极大改善。江宁区在未来10~15a内,其他农用地在数量上不会有较大变动。根据“十一五”规

划,至2010年其他农用地面积为 $24\,735\text{ hm}^2$,年均增长率约为 -0.36% ,此数值作为未来15a的平均增长率较为合适。预计在未来10~15a江宁区的其他农用地面积不低于15%。

3.2.4 建设用地 江宁区紧邻南京市区,随着江宁开发区、南京禄口机场、沪宁高速公路等一系列软、硬件设施的建设和完善,江宁区以东山新市区为核心,沿机场高速、宁杭高速、沪宁高速和宁马高速四条轴线为新的经济增长带,远期逐渐发展成环绕南京都市发展区的禄口、滨江和汤山3个新城。全区形成由一个新市区、三个新城和一般镇共同组成的布局合理、功能互补、层次分明、规模适度的城镇体系。依此来看,江宁区建设用地面积在未来10~20a将继续增长,增长速度不会低于各阶段增长率。1997—2006年江宁区建设用地面积平均增长率为7.43%,其中,1997—2000年平均增长率为4.78%,2000—2003年平均增长率为5.76%,2003—2006年平均增长率为8.15%。参考“十一五”规划,将建设用地年均增长率约为3%。

根据“十一五”规划,与1996年相比,到2004年,江宁区建设用地增加34.7%,除水利设施用地外,居民点及工矿用地和交通用地都提前超过了规划指标,对农地保有量形成一定的威胁。江宁区已经形成以江宁经济技术开发区、江宁科学园和滨江经济技术开发区为主导的开发园区体系,开发园区的规模不断扩大,但与昆山、张家港、江阴等“苏南第一方阵”的城市相比,全区单位土地面积上的投入与产出较低,土地集约度也不高。因此,江宁区在城市扩展的同时,应该注重耕地保护政策,尽量少占优质耕地。从长远来看,应把重点放在建设用地的挖潜利用上,注重土地节约集约利用。目前,江宁区建设用地占土地总面积的24.59%,预计在未来10~15a江宁区的建设用地面积不应超过30%。

3.2.5 未利用地 江宁区未利用地面积在10~15a将继续下降。根据“十一五”规划,至2010年未利用地面积为 $6\,197\text{ hm}^2$,年均增长率约为 -6.82% ,年均减少 $1\,239\text{ hm}^2$ 。2006年江宁区未利用地占土地总面积的0.06%,共计 $9\,582\text{ hm}^2$, -6.82% 的平均增长率是不现实的。综合考虑各方面实现的可行性,将未来10~15a江宁区的未利用地平均增长率定为 -2% ,最大约束定为0.02%。

根据以上的分析,将模式中的各类参数数值进行确定(表3—4)。以2006年各地类的面积比例为初值,对江宁区各土地利用类型的面积比例进行模拟。

表 3 研究区模拟初值及增长率 %

项目	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5
Y_0	36.08	16.48	16.77	24.59	6.09
r_i	-1.06	1.00	-0.36	3.00	-2.00
Y_m	30	25	15	30	2

注: Y_1 — Y_5 分别为耕地、园林地、其他农用地、建设用地和未利用地占总土地总面积的比例。下同。 Y_0 为 2006 年各土地利用类型占总土地面积的比例; r_i 为各土地利用类型的平均增长率; Y_m 为研究区自然、社会经济以及政策等对各土地利用类型最大约束。

表 4 研究区土地利用贡献率 %

Y_j	Y_i				
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5
Y_1	0.00	30.02	-53.90	109.34	-0.94
Y_2	39.23	0.00	-0.58	-4.02	65.36
Y_3	372.00	-3.39	0.00	95.21	-363.81
Y_4	83.93	2.36	9.53	0.00	4.18
Y_5	0.82	48.21	45.73	5.25	0.00

注:表中列表示第 j 种土地利用类型转化为第 i 种土地利用类型的比例,即 $r_{j \rightarrow i}$ 。

3.3 模拟结果与检验

3.3.1 模拟结果与分析 利用确定的各类用地之间的土地利用贡献度和模拟期内各土地利用类型变化的最大约束条件,对南京市江宁区土地利用结构变化状况进行动力学模拟和预测(表 5)。从模拟结果来看,2006—2020 年南京市江宁区各类用地的变化均控制在最大约束条件内,同时各类用地变化率呈现出由急变缓的趋势,这主要是由于各类用地在模型中相互竞争约束的条件,产生的变化逐渐趋缓的生长曲线特征。江宁区的土地利用特征仍表现出城镇用地迅速,耕地面积减少,园林地小幅增加,其他农用地、未利用地继续减少的态势。

到 2020 年,耕地与建设用地规模将趋同,所占比例约为 30%。随着江宁城市功能、产业发展将提升到一个新的水平,建设用地需求量也将进一步增大。在此背景下,江宁区城市建设用地的需求与农业、生态空间保护的矛盾将依然存在。

表 5 南京市江宁区土地利用结构模拟结果 %

年份	耕地	园林地	其他农用地	建设用地	未利用地
2006	36.08	16.48	16.77	24.59	6.09
2007	35.52	17.09	17.02	25.25	5.08
2008	35.03	17.52	17.13	25.82	4.42
2009	34.54	17.86	17.18	26.38	3.92
2010	34.23	18.06	17.19	26.74	3.64
2015	32.13	19.09	17.03	29.13	2.39
2020	30.35	19.74	16.77	31.15	1.72

3.3.2 模拟结果检验 模拟结果可靠性直接影响到模型的科学性和应用范围,采用的模型参数来自于南京市江宁区 1997—2006 年实际土地利用结构变化情况,为了较好地检验模型的模拟有效性和可行性,即采用 2009 年南京市江宁区 ETM 土地利用解译数据对模拟结果进行检测。从精度检测结构看,2009 年的遥感解译结果与模型模拟结果最大差异度为建设用地,差异值 0.67(表 6),说明基于系统动力学的土地利用模拟模型的精度是可以接受的。

表 6 南京市江宁区 2009 年土地利用结构模拟结果检验

项目	耕地	园林地	其他农用地	建设用地	未利用地
模拟值/%	34.54	17.86	17.18	26.38	3.92
ETM 解译值/%	34.12	18.11	16.97	27.05	3.75
差异度	-0.42	0.25	-0.21	0.67	-0.17

4 结论

根据对预测江宁区 2006—2020 年的土地利用结构变化情况的模拟结果可以看出,未来 15 a,江宁区的土地利用特征仍表现出城镇用地增长迅速,耕地面积减少,园林地小幅增加,其他农用地、未利用地面积继续减少的态势。到 2020 年,耕地与建设用地规模将趋同,所占比例约为 30%。江宁区城市建设用地的需求与农业、生态空间保护的矛盾将依然存在。

值得注意的是,本研究所构建的动力学模型,是在假设研究区各土地类型在研究时段内以指数方式增减的,一般适用于一定时段内土地利用类型变化剧烈的快速城市化地区。而对于模型模拟各参数值得率定,亦是对特定情景下的土地利用发展特征进行的假设。

与传统方法比较,动力学模型具有建模过程比较灵活、易于操作的特点,尤其是可以通过调整参数或者参数值,以模拟特定条件下的土地利用变化过程。因此,在与其发展期望不同的条件下,可以通过调整参数,利用动力学模型模拟获得多样的土地利用变化结果。但区域土地利用变化受多种驱动力因素的影响,而相同的驱动力因素在不同的时间点、不同的区域、不同的时期对区域土地利用变化会产生不同的影响,因此,驱动因素对区域土地利用结构的各种影响值如何准确定量,是今后研究的重点和难点。

[参 考 文 献]

- [1] 黎治华,高志强,高伟,等. 中国 1999—2009 年土地覆盖动态变化的时空特点[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 312-322.

- [2] Long Hualou, Liu Yangsui, Wu Xiuqin, et al. Spatio-temporal dynamic patterns of farmland and rural settlements in Su-Xi-Chang region: Implications for building a new countryside in coastal China[J]. *Land Use Policy*, 2009, 26(2): 322-333.
- [3] 吕春艳, 王静, 何挺, 等. 土地资源优化配置模型研究现状及发展趋势[J]. *水土保持通报*, 2006, 26(2): 21-26.
- [4] 裴彬, 潘韬. 土地利用系统动态变化模拟研究进展[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(9): 1060-1066.
- [5] 邓祥征, 林英志, 黄河清. 土地系统动态模拟方法研究进展[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(10): 2123-2129.
- [6] 杨梅, 张广录, 侯永平. 区域土地利用变化驱动力研究进展与展望[J]. *地理与地理信息科学*, 2011, 27(1): 95-100.
- [7] 鲁春阳, 杨庆媛, 靳东晓. 中国城市土地利用结构研究进展及展望[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(7): 861-868.
- [8] 黄秋昊, 蔡运龙. 国内几种土地利用变化模型述评[J]. *中国土地科学*, 2005, 19(5): 25-30.
- [9] 陈睿, 吕斌. 城市空间增长模型研究的趋势、类型与方法[J]. *经济地理*, 2007, 27(2): 240-245.
- [10] Batty M. Agents, cells, and cities: New representational models for simulating multiscale urban dynamics [J]. *Environment and Planning*, 2005, 37(1): 1373-1394.
- [11] Batty M. Fifty Years of Urban Modeling: Macro-Statics to Micro-Dynamics[M]// Sergio A, Denise A, Paolo G, et al, *The Dynamics of Complex Urban Systems: An Interdisciplinary Approach*. Mendrisio: Physica-Verlag Heidelberg and Accademia di Architettura, 2008: 1-20.
- [12] 沈体雁. CGE 与 GIS 集成的中国城市增长情景模拟框架研究[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(11): 1153-1163.
- [13] 何春阳, 史培军, 陈晋, 等. 基于系统动力学模型和元胞自动机模型的土地利用情景模型研究[J]. *中国科学(D): 地球科学*, 2005, 53(5): 464-473.
- [14] Grootde R. Function-analysis and valuation as a tool to assess land use conflicts in planning for sustainable, multi-functional landscapes[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 75(3): 175-186.
- [15] 郁亚娟, 郭怀成, 刘永. 城市生态系统的动力学演化模型研究进展[J]. *生态学报*, 2007, 27(6): 2603-2614.
- [16] 郑新奇, 赵璐, 胡业翠. 土地利用总体规划指标时空分配[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(4): 297-305.
- [17] 谢正磊, 许学工, 孙强. 基于 Patch Dynamics 模式的土地覆被变化预测: 以北京市为例[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2008, 44(3): 452-458.
- [18] 孙娴, 林振山, 孙燕. 我国耕地总量的动力预测及其建议[J]. *自然资源学报*, 2005, 20(2): 200-205.
- [19] 孙燕, 林振山, 金晓斌, 等. 中国耕地保有量的动力预测模型及对策[J]. *地理科学*, 2008, 28(3): 337-342.
- [20] 张衍广, 林振山, 梁仁君. 基于 EMD 分析的山东省土地承载力的动力学预测[J]. *地理科学*, 2008, 28(2): 219-223.
- [21] 陈红顺, 夏斌. 快速城市化地区土地利用变化及驱动因素分析: 以广东省东莞市为例[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(1): 54-59.

(上接第 151 页)

- [24] Shannon C E, Wiener W. *The Mathematical Theory of Communication*[M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949.
- [25] Simpson E H. Measurement of diversity[J]. *Nature*, 1949, 163(688): 688-690.
- [26] Pielou E C. The measure of diversity in different types of biological collections[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, 13(12): 131-144.
- [27] 陈芳清, 卢斌, 王祥荣. 樟村坪磷矿废弃地植物群落的形成与演替[J]. *生态学报*, 2001, 21(8): 1347-1353.
- [28] 郝蓉, 白中科, 赵景逵, 等. 黄土区大型露天煤矿废弃地植被恢复过程中的植被动态[J]. *生态学报*, 2003, 23(8): 1470-1476.
- [29] 许丽, 樊金栓, 汪季, 等. 阜新矿区孙家湾矸石山阳坡物种多样性研究[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(4): 246-252.
- [30] Wang Youbao, Liu Dengyi, Zhang Li, et al. Patterns of vegetation succession in the process of ecological restoration on the deserted land of Shizishan copper tailings in Tongling City[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2004, 46(7): 780-787.
- [31] 张岩, 袁建平, 刘宝元. 土壤侵蚀预报模型中的植被覆盖与管理因子研究进展[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(8): 1033-1036.