DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201512009

村镇用地扩张损益模型及土地适宜性评价
——以五大连池镇为例

刘宇舒,赵天宇

(哈尔滨工业大学 建筑学院,哈尔滨 150001)

摘 要:为科学辨识土地自然和社会经济属性,综合评定其适建水平、质量高低及其限制状况,立足于损益分析视角以五大连池为例,借助RS与GIS技术,从空间区位、自然地理、社会经济、生态保护4个方面构建17个因子的用地扩张阻力赋值体系,应用最小累积阻力模型模拟村镇建设用地扩张与生态用地覆盖过程,探讨空间土地利用动态演变的潜在趋势,据此通过损益模型划定镇域空间适建类型,进行土地适宜性评价.结果表明,五大连池镇Ⅰ类(高适宜建设区)、Ⅱ类(较为适宜建设区)、Ⅲ类(较为不适宜建设区)、Ⅳ类(不适宜建设区)用地面积为41.01、138.97、387.85、492.26 km^2,分别占镇域面积的3.86%、13.11%、36.59%、46.44%,划分结果可为镇域土地适宜性评价及空间管制规划提供辅助判别的技术方法.

关键词:损益分析;土地扩张趋势模拟;用地适宜性;最小累积阻力模型;五大连池镇

中图分类号:TU984 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2017)04-0167-06

Profit and loss model of land expansion and land suitability evaluation in the villages and towns: a case study in Wudalianchi town

LIU Yushu, ZHAO Tianyu

(School of Architecture, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Land suitability evaluation is an important tool for identifying ecological attributes and potential development of lands and guiding the development rationally. Taking wudalianchi town for instance, this paper constructed seventeen factors of resistance valuation system, standing on profit and loss analysis, using RS and GIS, and applying minimum cumulative resistance model in space region, physical geography, social economy and ecological protection four aspects. The results showed: type Ⅰ (highly suitable construction region), type Ⅱ (relatively suitable construction region), type Ⅲ (relatively unsuitable construction region), type Ⅳ (unsuitable construction region). The areas of these types are 41.01 km^2, 138.97 km^2, 387.85 km^2 and 492.26 km^2, and the percentages of these types are 3.86%, 13.11%, 36.59% and 46.44%. The results can provide a technology method for township construction land suitability and space regulating planning.

Keywords: profit and loss analysis; land expanding trend simulation; land suitability; minimum cumulative resistance; wudalianchi town

城镇化快速发展时期,村镇建设用地因人口与经济的驱动作用出现了前所未有的扩张,生态环境的恶化与土地资源的供需失衡接踵而至,严重影响了严寒地区农村地域作为国家重要的生态保障与粮食生产的主体功能.镇域土地适宜分区旨在宏观辨识土地的生态属性与发展潜力,在维持生态服务水平的基础上判别土地利用等级,是破解当前村镇建设的生态负效应,保障城镇化健康发展的技术解决措施和空间管控依据.

当前,土地适宜性评价主要有地图叠加法及其修正模型、逻辑规则组合法两种.其中,地图叠加法是由美国宾西法尼亚大学McHarg[1]提出,是以因子分层分析和地图叠加技术为核心的土地利用规划方法,后经国内学者运用层次分析法[2]、主成分分析法[3]、模糊评价[4]、不确定性和灰色系统关联度[5]等方法对模型进行了一定的修正.而逻辑规则组合法是由JU[6]首先应用于土地适宜性评价,是以因子间的逻辑关系分析与组合为判断准则划分土地利用类别的技术方法.陈雯等[7-8]、刘毅等[9]在评价单元的划分、评价指标的选择、分类矩阵规则的建立等方面进行了延展与深化.两种方法均可归于土地单元垂直生态过程的因子叠加分析(前者应用数学叠加,后者应用逻辑叠加),更为注重土地自身的生态属性与结构,而在一定程度上忽视了土地单元的水

收稿日期:2015-12-02
基金项目:"十二五"农村领域国家科技计划课题"严寒地区绿色村镇体系及其关键技术"(2013BAJ12B01)
作者简介:刘宇舒(1987—),女,博士研究生;
赵天宇(1961—),男,教授,博士生导师
通信作者:赵天宇,hit_tyzhao@aliyun.com

平生态过程,同时对分区界限的划分并不敏感.此外,也有学者采用“生态位适宜度模型”、“最小距离模型”、“潜力-阻力模型”等[10-12]对上述传统方法进行改进,多应用于市域尺度,乃至更大的区域尺度.本文试图应用损益分析,通过村镇用地水平扩张过程的模拟构建镇域尺度的土地适宜性分区模型.一方面,应用遥感与地理信息技术,在借鉴地图叠加法的基础上优化了指标选择与处理技术;另一方面,镇域土地扩展趋势模拟兼顾了土地单元的水平生态过程;此外,构建的分区模型可以有效地降低分区界线判定的主观性与模糊性.

1 村镇用地扩张损益模型

损益分析是研究收益与成本净结果一种社会经济学方法,常用于国民经济评价与环境经济评估领域,通过估算一个项目、一个规划或一个政策所引起的环境影响的经济净价值,判断项目的可行性,并提出预防或者减轻不良环境影响的对策和措施[11].其中,环境过程与经济过程的平衡点即为两者优势过程的转折分界,是判断可行性的关键性节点.土地适宜性评价是划分生态用地与建设用地开发适宜性等级的空间管制方法,两者相互联系,互为制约.因此,借鉴损益分析理论,可以将土地扩张趋势理解村镇建设用地扩张与生态用地覆盖对空间土地利用的竞争性控制与侵占过程.运用最小累积阻力模型(minimum cumulative resistance,MCR)分别模拟村镇建设用地扩张与生态用地覆盖过程,通过计算两者的差值表面($MCR_{差值}=MCR_{建设用地扩张}-MCR_{生态用地覆盖}$)的平衡面($MCR_{差值}=0$)寻求两者优势过程的转折分界,判断其是否适合建设,即适宜建设($MCR_{差值}>0$)和不适宜建设($MCR_{差值}<0$)的分区界限(如图1),并根据GIS空间分析的突变点将土地进一步划分为Ⅰ类(高适宜建设区)、Ⅱ类(较为适宜建设区)、Ⅲ类(较为不适宜建设区)、Ⅳ类(不适宜建设区).

2 研究区域概况

五大连池镇位于黑龙江西北部,地处小兴安岭与松嫩平原接壤的岗阜状丘陵地区,东、北、西地势相对较高,中南部地势相对较低,以独特的火山地貌和矿泉资源的闻名于世,地理坐标介于E125°42′~127°37′,N48°16′~49°12′.辖区内共有1个镇,1个乡,1个林场,5个农场,总人口56 730人,劳动力18 000人,人口密度53人/km^2,劳动力密度17人/km^2,面积约为1 060 km^2,其在市域区位如图1所示.

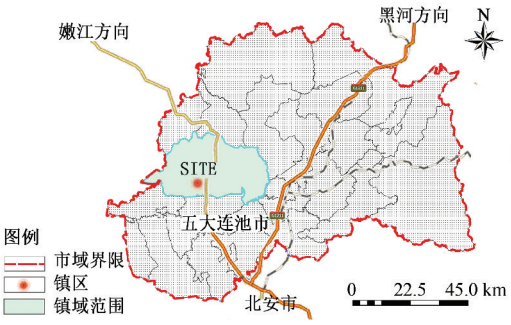


图1 五大连池镇区位图

Fig.1 Location map of Wudalianchi town

3 数据来源与预处理

本文以五大连池镇2010年TM遥感数据(分辨率30 m)、DEM数据(1∶250 000),土地利用矢量数据(1∶50 000),五大连池世界地质公园总体规划图、地质图、土壤图、居民点分布和服务设施图、地质遗迹和文化遗产分布图等专题图件为基础数据,通过影像的预处理、地图配准、数字化构建五大连池镇土地适宜性评价的基础数据库.

4 研究方法与过程

最小累积阻力模型是度量研究区内“源”克服不同对象行进阻抗力的耗费成本累积,是一种用以测度空间运动过程的功能循环计算方法[12],能有效的模拟生态用地覆盖与村镇建设用地扩张的水平运动过程,其计算方程式为

$$C_i=\sum(D_i\times F_i),(i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m) \tag{1}$$

式中:D_i为从空间某一个像元i到“源”的实地距离;F_i为空间中某一像元j的阻力值;C_i为像元i到源的累积耗费值;n为像元总数.

$$A=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}(C_i+C_{i+1}), \tag{2}$$

$$A=\frac{\sqrt{2}}{2}\sum_{i=1}^{n}(C_i+C_{i+1}). \tag{3}$$

式中:C_i表示第i个像元的耗费值;C_{i+1}指沿运动方向上第$i+1$个像元的耗费值;A是指通过某一阻力表面到“源”的累积耗费距离.当通过某一代价表面沿着像元的垂直或者水平方向运动时采用式(2);当通过某一代价表面沿着像元的对角线方向运动时采用式(3)[13].

应用最小累积阻力模型分别对村镇建设用地扩张($MCR_{建设用地扩张}$)与生态用地覆盖($MCR_{生态用地覆盖}$)过程进行模拟,构建两者的差值表面($MCR_{差值}$)的关键在于建立相同的指标体系与等级划分标准,使其在同一个评价平台上进行运算.同时考虑到适宜性

评价的结果是对镇域空间土地综合属性的梯度分区,具有量纲一的特性,因此采用 1,3,5,7,9 的难易等级对其进行分级.一般情况下,地形复杂性、生态价值水平、自然保护等级等指标越高越不利建设开发而有利用生态保护,其生态用地覆盖过程阻力赋值等级为 1,3,5,7,9;空间区位条件、居民点等级、产业发展潜力等指标越高越不利于生态保护而有利于建设开发,其建设用地扩张过程阻力赋值等级为 1,3,5,7,9.

4.1 “建设用地-生态用地”源地的辨识

“源地”是用地扩张过程的动力聚集地,不同的水平扩张过程源地不同.村镇建设用地扩张过程选择镇、村庄的建设用地作为扩张“源”.生态用地覆盖过程选择生境条件较好的自然保护区、自然森林公园、重要水源地、大型林地斑块作为覆盖“源”,见表 1.

表 1　五大连池镇重要的源地提取

Tab.1　Important source of land in Wudalianchi town

级别	编号	名称
一级斑块	1	五池斑块
	2	三池斑块
	3	二池斑块
	4	小孤山林场南侧湿地斑块
	5	大庆油田农场南侧水域、沼泽斑块
二级斑块	6	西侧药泉林场斑块
	7	北侧林地斑块
	8	老黑山南侧林地斑块
	9	南焦得布林场斑块
	10	小孤山林场斑块
	11	北焦得布林场斑块

4.2 “建设用地-生态用地”扩张与覆盖过程阻力评价

土地单元的异质性与复杂性决定了“源”向周边扩张克服阻力的差异性.依据五大连池特殊的地域特征选取空间区位、自然地理、社会经济、生态保护 4 个方面 17 个指标构建用地扩张的指标体系,并通过德尔菲法与层次分析法确定其权重.其中,生态健康指数采用遥感影像解译的归一化的植被指数 NDVI 获得;生态服务指数是采用谢高地等对中国生态系统单位面积的生态价值系数,通过构建基于单元格的价值累积归一化后获得;土壤类型是参考《SL190-2007:土地侵蚀分类分级标准》进行分级;高速公路 30~50 m 是建筑控制区,其没有出入口的沿线邻域土地价值较低[14],建设用地扩张阻力赋值较高;地形起伏度、坡度通过 DEM 数据的地形分析采用自然间断点分级法进行分级,其评价因子属性等级划分与赋值,见表 2.值得说明的是,不同类型的村镇依据其地域与气候特点、人口与经济条件、资源与环境特性选择与之相适应的指标项,如以粮食生产为主导的村镇,与农业生产相关的指标(耕地资源指数、土壤质地、耕作层厚度、灌溉水、劳作出行距离等)应有所考虑;而以生态功能为主导的村镇,应增补生态相关的指标(水土保持指数、生态脆弱指数、生物多样性指数等).

4.3 应用阻力评价制作“建设用地-生态用地”扩张与覆盖过程的成本表面

借助 ArcGIS 平台的数理统计与空间分析功能,根据“建设用地-生态用地”扩张与覆盖过程阻力评价指标体系,分别制作单因子成本栅格,并使用“重分类”工具进行指标分级的重新赋值(1、3、5、7、9 或 9、7、5、3、1),进而根据各因子的权重进行多因子叠加,从而分别得到两个过程的成本表面,如图 2、3 所示.由生态用地阻力成本表面可以看出,中部五池水域片区的生态扩张乏力,邻域扩张阻力较大,南北向镇域公路附近出现了明显的阻力塌陷,显示出了东西向生态连通性的障碍.由村镇建设用地扩张阻力成本表面可以看出,南侧镇区附近的建设阻力较小,较易形成建设聚集区,南北沿公路向东扩张的趋势明显,中部沿公路西侧与西南侧居民点,分布离散且面积较小,对阻力成本的整体趋势影响不大,仅降低了局部累积阻力.

4.4 “建设用地-生态用地”扩张与覆盖过程模拟

针对“源”与阻力成本表面 2 个图层,通过 ArcGIS 的 Cost-Distance 模块的循环计算功能,进行生态用地与建设用地扩张模拟,获得各源地的最小累积阻力表面(如图 4、5 所示),用以判别“源”的最小耗费方向与潜在扩张趋势.由此可以看出,生态用地扩张在西南侧出现了明显的中断,连通耗费较大,东南、东北、南北向也出现不同程度的阻力塌陷,而建设用地扩张受生态用地的制约呈现明显的条带形态依附于主要镇域道路.

4.5 应用损益模型进行土地适宜性分区与修正

应用损益模型,通过构建村镇建设用地扩张与生态用地覆盖过程差值(MCR 差值)进行土地适宜性分区.其中 0 值点为控制建设区与适宜建设区的分界点.差值大于 0 的分区更为适宜用做生态保护用地,差值小于 0 的分区更为适宜用作村镇建设用地,差值表面如图 6 所示.依据村镇空间管制的弹性要求与分类引导需求,有必要对村镇建设用地与生态保护用地做进一步划分.在差值与栅格数目关系中,突变点表征了前后土地单元的阻碍或刺激作用骤变,可作为分区的阈值[15],由此将镇域划分为 4 个等级,分别为Ⅰ类(适宜建设区)、Ⅱ类(较为适宜建设区)、Ⅲ类(较不适宜建设区)、Ⅳ类(不适宜建设区).

根据村镇用地扩张损益模型及适宜性评价分

区，Ⅰ类用地主要集中于研究区南部和中部偏东、纵穿南北的条带型区域内；Ⅳ类用地主要集中于重要的林地、水源地、湿地，是重要生态功能保育与地质遗迹地.地表水源保护区（五池）、风景名胜区（特级）、基本农田保护区、地质灾害危险区、基本农田保护区作为国家政策重点的保护对象，其用地范围应完整划为Ⅳ类用地不适宜建设区.此外，Ⅰ类（适宜建设区）、Ⅱ类（较为适宜建设区）的分区界限是根据突变点定量划分，未充分考虑五大连池镇实际的人口、用地规模与经济发展水平，应根据实际情况适当调整，弹性控制.由此得出最终的五大连池镇适宜性评价结果，Ⅰ类（适宜建设区）、Ⅱ类（较为适宜建设区）、Ⅲ类（较不适宜建设区）、Ⅳ类（不适宜建设区）面积为 41.01、138.97、387.85、492.26 km^2，分别占镇域面积的 3.86%、13.11%、36.59%、46.44%，如图 7 所示.

表 2 生态用地覆盖与村镇建设用地扩张评价因子、阻力赋值及权重表

Tab.2 Evaluation factors, score and weight of ecological land cover and village construction land

1 级指标	2 级指标	指标分级（第 1 行为生态用地扩张阻力，第 2 行为建设用地扩张阻力）					权重
		1 9	3 7	5 5	7 3	9 1	
空间区位	与公路的距离	0~0.03 km，>2 km	0.03~0.05 km，1~2 km	0.50 m~1.00 km	0.25~0.50 km	0.05~0.25 km	0.060
	与镇的距离	>4 km	3~4 km	2~3 km	1~2 km	0~1 km	0.080
	与主要村落聚集区的距离	>1.2 km	0.9~1.2 km	0.6~0.9 km	0.3~0.6 km	0~0.3 km	0.060
自然地理	地形起伏度	60~121 m	30~60 m	12~30 m	5~12 m	0~5 m	0.024
	坡度	25%~32%	15%~25%	10%~15%	5%~10%	0~5%	0.060
	地貌类型	湖区	低山	残丘	台地	平原	0.024
	土壤类型	砂粉土、粉土	砂壤土、粉黏土、壤黏土	面砂土、壤土	粗砂土、细砂土、黏土	石砾、沙	0.012
	土地利用类型	湖泊、河流、水库水面/内陆滩涂/沼泽地/风景名胜及特殊用地/有林地	灌木林地/其他林地/沟渠/坑塘水面	天然牧草/其他草地	裸地/水田/旱地	建制镇/村庄/公路用地/农村道路	0.056
社会经济	人口密度	三级	-	二级	-	一级	0.042
	居民点等级	基层村级	-	中心村级	-	镇区	0.042
	产业发展潜力	三级	-	二级	-	一级	0.014
	储运支撑能力	三级	-	二级	-	一级	0.014
	风景资源等级	一级	二级	三级	-	-	0.056
	旅游设施接待等级	三级服务点	二级服务点	一级服务点	-	服务中心	0.056
生态保护	生态价值指数	0.80~1.00	0.60~0.80	0.40~0.60	0.20~0.40	0~0.20	0.160
	生态健康指数	0.60~0.78	0.45~0.60	0.30~0.45	0.15~0.30	0~0.15	0.120
	自然保护等级	特级保护区	一级保护区	二级保护区	-	-	0.120

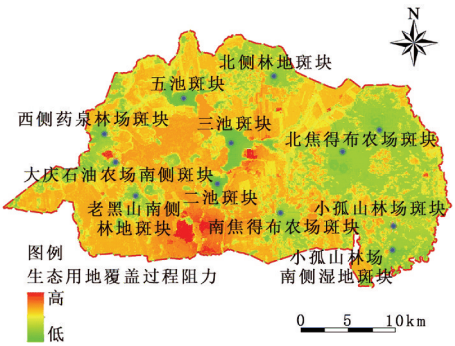


图 2 生态用地覆盖成本表面

Fig.2 Ecological land cover cost surface

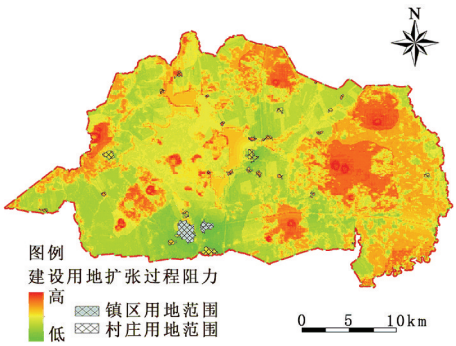


图 3 建设用地扩张成本表面

Fig.3 Construction land expansion cost surface

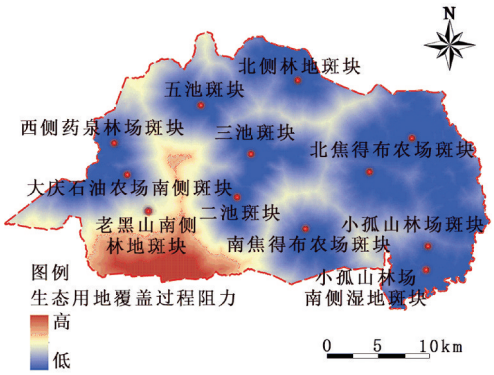


图 4　生态用地覆盖模拟

Fig.4　Simulation of ecological land cover

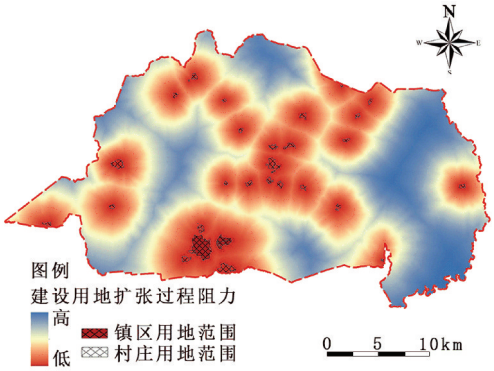


图 5　建设用地扩张模拟

Fig.5　Simulation of construction land expansion

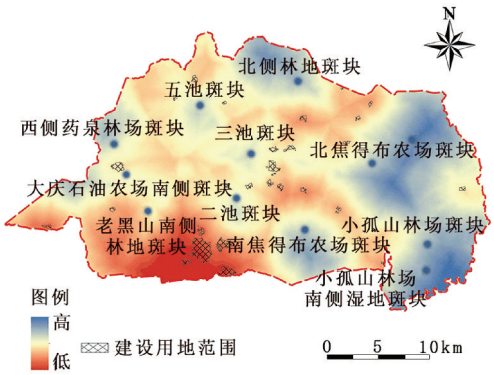


图 6　最小累积阻力差值表面

Fig.6　Margin of minimum cumulative resistance surface

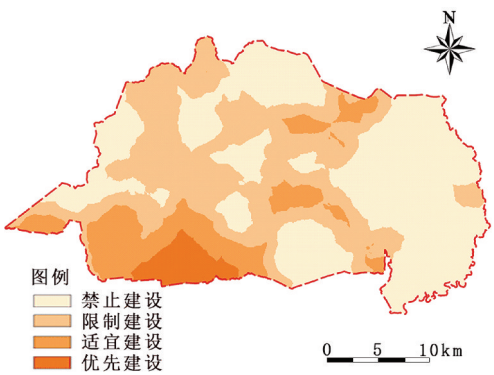


图 7　土地适宜性分区

Fig.7　Suitability zoning of land suitability

5　结　论

1)提出了“损益分析”方法应用于适宜性分区模型思路,以建立土地利用的互斥关系对象为前提,以统一互逆的评价准则为基础,建立镇村建设用地扩张与绿色生态用地覆盖过程的比较、竞争关系评判.利用差值平衡点、突变点为关键分区的阈值判断建设用地合理的分区类型,弥补了目前评价方法分区依赖主观判断,界定模糊的缺陷.

2)运用最小累积阻力模型对村镇建设用地扩张与生态用地覆盖过程进行模拟,定量地计算出分析出用地演变的最佳方向与最短路径,做到以尽可能少的土地获得最佳的效益.同时,简便的运算方式和适度的数据需求,使得模型具有普遍的实用性与可操作性.但应该指出的是,上述探讨内容仍存在不足,本文村庄与乡镇的扩张机制的差异性有待进一步的讨论,并在模拟过程中予以修正.由于既有标准的缺乏与基础数据获取的限制,构建的阻力评价指标体系,难免存在疏漏且因子间可能出现重复现象.同时,阻力评价赋值采用了 1、3、5、7、9 的等距的标度划分方式有待进一步的完善与深化.

参考文献

[1] MCHARG I L. Design with nature[M]. New York: Natural History Press,1969.

[2] 梁涛, 蔡春霞, 刘民, 等. 城市土地的生态适宜性评价方法——以江西萍乡市为例[J]. 地理研究, 2007, 26(4):782-788.DOI:10.3321/j.issn:1000-0585.2007.04.015.
LIANG Tao, CAI Chunxia, LIU Min, et al. Study on methodology of ecological suitability assessment of urban landuse: an example of Pingxiang[J]. Geographical Research, 2007, 26(4):782-788. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0585.2007.04.015.

[3] 潘竟虎, 刘扬, 石培基. 基于主成分分析和 GIS 的统筹市域土地利用分区研究——以甘肃天水市为例[J]. 土壤,2011, 43(4):637-643.
PAN Jinghu, LIU Yang, SHI Peiji. Research on overall planning of land use division in Tianshui based on PCA and GIS[J]. Soils, 2011, 43(4):637-643.

[4] 林爱文, 庞艳. 农村居民点用地整理适宜性的递阶模糊评价模型[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2006, 31(7):624-627.
LIN Aiwen, PANG Yan. Hierarchical Fyzzy evaluation model the suitability ewaluation readjustment of village land use[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(7):624-627.

[5] 周建飞, 曾光明, 黄国和, 等. 基于不确定性的城市扩展用地生态适宜性评价[J]. 生态学报,2007, 27(2):774-783.
ZHOU Jianfei, ZENG Guangming, HUANG Guohe, et al. The ecological suitability evaluation on urban expansion land based on uncertainties[J]. Acta Ecologica Sinica,2007, 27(2):774-783.

[6] JU Jingsha. A primary integration matrices approach to sustainability

orientated land use planning[R]. Stuttgart: Institute of Regional Development Planning, 1998.

[7] 陈雯, 孙伟, 段学军, 等. 苏州地域开发适宜性分区[J]. 地理学报, 2006, 61(8): 839-846. DOI: 10.3321/j.issn:0375-5444.2006.08.006.
CHEN Wen, SUN Wei, DUAN Xuejun, et al. Regionalization of regional potential development in suzhou city[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(8): 839-846. DOI: 10.3321/j.issn:0375-5444.2006.08.006.

[8] 陈雯, 孙伟, 段学军, 等. 以生态-经济为导向的江苏省土地开发适宜性分区[J]. 地理科学, 2007, 27(3): 312-316. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0690.2007.03.004.
CHEN Wen, SUN Wei, DUAN Xuejun, et al. Regionalization of potential land use in Jiangsu province under eco-economic approach[J]. Scientia Geographica Sinica, 2007, 27(3): 312-316. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0690.2007.03.004.

[9] 刘毅, 李天威, 陈吉宁, 等. 生态适宜的城市发展空间分析方法与案例研究[J]. 中国环境科学, 2007, 27(1): 34-38. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6923.2007.01.009.
LIU Yi, LI Tianwei, CHEN Jining, et al. Ecologically feasible space for urban development: a methodology and case study on Dalian municipality, northeastern China[J]. China Environmental Science, 2007, 27(1): 34-38. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6923.2007.01.009.

[10] 欧阳志云, 王如松, 符贵南. 生态位适宜度模型及其在土地利用适宜性评价中的应用[J]. 生态学报, 1996, 16(2): 113-119.
OUYANG Zhiyun, WANG Rusong, FU Guinan. Ecological niche suitability model and its application in land suitability assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 1996, 16(2): 113-119.

[11] 霍斯特西伯特著, 蒋敏元译. 环境经济学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002.

[12] 吴昌广, 周志翔, 王鹏程, 等. 基于最小费用模型的景观连接度评价[J]. 应用生态学报, 2009, 20(8): 2042-2048.
WU Changguang, ZHOU Zhixiang, WANG Pengcheng, et al. Evaluation of landscape connectivity based on least-cost model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(8): 2042-2048.

[13] 岳德鹏, 王计平, 刘永兵, 等. GIS与RS技术支持下的北京西北地区景观格局优化[J]. 地理学报, 2007, 62(11): 1223-1231.
YUE Depeng, WANG Jiping, LIU Yongbing, et al. Landscape pattern optimization based on RS and GIS in northwest of Beijing[J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(11): 1223-1231.

[14] 黄大全, 张文新. 三明市建设用地开发适宜性评价[J]. 农业工程学报, 2008, 28(S1): 202-207.
HUANG Daquan, ZHANG Wenxin. Suitability evaluation of construction land development in Sanming City of Fujian Province[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(S1): 202-207.

[15] 俞孔坚, 李迪华, 段铁武. 生物多样性保护的景观规划途径[J]. 生物多样性, 1998, 6(3): 13-23. DOI: 10.3321/j.issn: 1005-0094.1998.03.008.
YU Kongjian, LI Dihua, DUAN Tiewu. Landscape approaches in biodiversity conservation[J]. Chinese Biodiversity, 1998, 6(3): 13-23. DOI: 10.3321/j.issn:1005-0094.1998.03.008.

(编辑 张 红)

(上接第141页)

[7] YU Bo, LI Fengchen, KAWAGUCHI Y. Numerical and experimental investigation of turbulent characteristics in a drag-reducing flow with surfactant additives[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2004, 25(6): 961-974. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2004.02.029.

[8] NAKA Y, NUKA S, SHIMURA M. Dual-plane stereoscopic PIV measurements of turbulence statistics in drag-reducing pipe flows with surfactant additive[C]//Proceedings of the 65th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics. San Diego, California: APS, 2012, 57.

[9] LIU Lei, LI Xiaobai, TONG Li, et al. Effect of surfactant additive on vertical two-phase flow[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, 115: 1-10. DOI: 10.1016/j.petrol.2014.02.004.

[10] ZHOU T, LEONG K, YEO K. Experimental study of heat transfer enhancement in a drag-reducing two-dimensional channel flow[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(7/8): 1462-1471. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.09.023.

[11] KAWAGUCHI Y, SEGAWA T, FENG Ziping, et al. Experimental study on drag-reducing channel flow with surfactant additives-spatial structure of turbulence investigated by PIV system[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2002, 23(5): 700-709. DOI: 10.1016/S0142-727X(02)00166-2.

[12] CHO S H, TAE C S, ZAHEERUDDIN M. Effect of fluid velocity, temperature, and concentration of non-ionic surfactants on drag reduction[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(3): 913-918. DOI: 10.1016/j.enconman.2006.08.021.

[13] LINDNER P, BEWERSDORFF H, HEEN R, et al. Drag-reducing surfactant solutions in laminar and turbulent flow investigated by small-angle neutron scattering and light scattering[C]//Proceedings of the Trends in Colloid and Interface Science IV. Berlin: Springer, 1990: 107-112. DOI: 10.1007/BFb0115534.

[14] LI Peiwen, KAWAGUCHI Y, YABE A. Feasibility study of new heat transportation system with drag-reducing surfactant additives[C]//Proceedings of Symposium on Energy Engineering in the 21st Century (SEE2000). Hong Kong: Begell House, 2000: 716-722.

[15] OHLENDORF D, INTERTHAL W, HOFFMANN H. Surfactant systems for drag reduction: physico-chemical properties and rheological behaviour[J]. Rheologica Acta, 1986, 25(5): 468-486. DOI: 10.1007/BF01774397.

(编辑 张 红)