

最小累积阻力模型在城市土地生态适宜性 评价中的应用 ——以厦门为例

刘孝富*, 舒俭民, 张林波

(中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 将城市土地景观动态模拟为生态保护用地和城镇用地扩张两个过程, 建立了以两个过程最小累积阻力差值为基础的城市土地生态适宜性评价方法, 可用公式 $MCR_{\text{差值}} = MCR_{\text{生态保护用地扩张}} - MCR_{\text{城市用地扩张}}$ 表示。当被评价单元的 $MCR_{\text{差值}} < 0$ 时, 应被划分为适宜生态的用地; 当 $MCR_{\text{差值}} > 0$, 应被划分为适宜建设的用地; 而当 $MCR_{\text{差值}} = 0$ 时, 为适宜建设用和适宜生态用地之间的分界线。以厦门为例, 选取已有的城镇用地和生态保护用地作为扩张源, 分别从地形、景观类型、水文地质、生态价值、生态敏感性、生态功能 6 个方面建立了阻力因子评价体系, 并运用最小累积阻力差值法将厦门市划分为禁止开发、限制开发、重点开发、优化开发 4 个适宜性分区, 各区的面积分别为 525.3、455.0、340.8、243.9 km², 生态适宜用地面积总和为 980.3 km², 建设适宜用地面积总和为 584.7 km²。

关键词: 城市生态; 生态适宜性; 最小累积阻力模型; 厦门

Research on applying minimal cumulative resistance model in urban land ecological suitability assessment: as an example of Xiamen City

LIU Xiaofu*, SHU Jianmin, ZHANG Linbo

Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: Assumed two processes of town land and ecological protected land expanding to simulate urban landscape dynamic, this paper established an ecological suitability assessment method based on minimum cumulative resistance margin, which can be expressed by using the formula of $MCR_{\text{margin}} = MCR_{\text{ecological protected land expansion}} - MCR_{\text{urban land expansion}}$. When one pixel's $MCR_{\text{margin}} < 0$, it should be divided into eco-appropriate land; Instead, when $MCR_{\text{margin}} > 0$, it should be classified as the land suitable for construction; and when $MCR_{\text{margin}} = 0$, it should be regard as the watershed between eco-appropriate and construction suitable land. As an example of Xiamen, this paper selected the existing town land and eco-protected land as the sources of expanding, and established a system to calculate resistance from six aspects: terrain, land use, hydrogeology, ecological value, ecological sensitivity, and ecological function. Based on the mentioned method, this paper divided Xiamen into four developmental zones: prohibited, restricted, key and optimized areas, which were 525.3 km², 455.0 km², 340.8 km², 243.9 km², respectively. The land suitable for eco-protection was 980.3 km², while suitable for construction was 584.7 km².

Key Words: urban ecology; ecological suitability; minimum cumulative resistance model; Xiamen City

20 世纪以来, 随着城市化进程的加快, 城镇用地得到了前所未有的扩张, 这种扩张迎合了人口与经济的

基金项目: 中国环境科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务专项资助项目 (2007kyyw28)

收稿日期: 2008-10-06; **修订日期:** 2008-12-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuxf@craes.org.cn

快速增长,但如果这种态势毫无限制的蔓延下去,大量的森林、农田、河湖将面临消失,城市土地将不能实现可持续发展。在这种情况下,城市的决策者迫切要知道,在城市市域范围内哪些区域可用于城市建设的发展,而哪些区域对维护区域生态安全起着重要作用必须得到保护,城镇用地扩张的生态边界线到底在哪?土地的生态适宜性评价因研究土地生态重要性与其合理用途的关系,为解答上述问题指明了方向。

近年来,专家学者针对城市土地生态适宜性评价展开了大量研究,研究方法可归纳为地图叠加法和逻辑规则组合法两种。地图叠加法,是一种通过加权叠加将单因素适宜度值整合为适宜度综合值,并通过情景分析等手段进行等级划分的方法^[1]。如陈松林等通过坡度、海拔、温度、土壤有机质含量、土壤质地、pH 值等几个要素的加权叠加对福州市晋安区进行了适宜性分区^[2]。逻辑规则组合法是依靠评价因子之间的逻辑组合来划分适宜度的方法。如陈雯^[3]、史培军^[4]等基于土地的生态保护价值和经济开发价值之间逻辑组合,刘毅、李天威等^[5]基于生态功能分区和建设适宜性之间逻辑组合,将城市土地划分为禁止、限制、重点、优化 4 个开发区^[5]。

地图叠加法中因子权重的确定和逻辑规则组合法中的逻辑规则制定都存在人为主观性较强的问题^[6],这些方法在保证评价结果客观性方面具有一定的难度;而且这两种方法只强调土地景观单元的垂直过程,即将景观单元生态因子叠加起来,只不过前者是数学叠加,后者是逻辑叠加,它们都忽略了景观水平过程^[7-10]。在强调评价结果客观性和景观水平过程的趋势下,有必要探究一种新的城市土地生态适宜性评价方法,这已成为景观生态学未来发展和完善的一个方向^[11-12]。本文以厦门市为例,以构建景观水平过程的生态适宜性评价方法为基本出发点,采用最小累积阻力模型进行了城市土地生态适宜性分区,为进一步深入开展城市土地生态适宜性研究提供一点思路与初步探索。

1 研究区概况

厦门市位于北纬 24°23′—24°25′、东经 117°53′—118°26′,地处我国福建省东南部。厦门是闽南“金三角”经济、文化的中心,国际海运交通的要道,是一个发展中的现代化国际性港口风景城市。本文以厦门陆域范围为研究对象,辖思明、湖里、集美、海沧、同安和翔安 6 个行政区,陆地总面积 1565 km²。

2 研究方法

2.1 最小累积阻力模型概述

最小累积阻力模型指物种在从源到目的地运动过程中所需耗费代价的模型,它最早由 Knaapen 于 1992 年提出^[13],经国内俞孔坚^[7,14-15]等人的修改用下式表示:

$$MCR = f \min \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i$$

式中, MCR 是被称之为最小累积阻力值, D_{ij} 表示物种从源 j 到景观单元 i 的空间距离; R_i 表示景观单元 i 对某物种运动的阻力系数。 Σ 表示单元 i 与源 j 之间所穿越所有单元的距离和阻力的累积。 $\min$ 表示被评价的斑块对于不同的源取累积阻力最小值。 f 表示最小累积阻力与生态过程的正相关关系。该模型可通过 ARCGIS 中的 cost-distance 模块实现。

最小累积阻力值反映了物种运动的潜在可能性及趋势,通过单元最小累积阻力的大小可判断该单元与源单元的“连通性”和“相似性”,通常源斑块对于生态过程是最适宜的,因此通过“连通性”和“相似性”的横向比对,就可划分出土地的生态适宜性。最小累积阻力模型虽起源于物种扩散过程的研究,但并不局限于特定的具体的生态过程,近些年来该模型已经应用到了模拟城市土地演变过程。如陈燕飞等运用该模型模拟了南宁城镇用地扩张^[16];彭福晋应用该模型分别模拟了城镇用地和生态保护用地的扩张趋势^[17]。因此如果将城市土地的景观动态模拟为从“源”到“汇”克服阻力做功的水平过程,就可运用该模型进行生态适宜性评价。

2.2 模型假设与理论分析

2.2.1 模型假设

(1) 本文将城市土地的用途划分为两大类,适宜建设的用地和适宜生态的用地,生态保护用地是最适宜的生态用地,城镇用地是最适宜的建设用地。

(2)为实现生态效益最大化,生态保护用地需最大限度的扩张;为实现社会效益最大化,城镇用地需最大限度的扩张。这两个过程不是孤立的而是相互联系的,其中一个生态过程受另外一个生态过程的制约。建设用度和生态用地的平衡就主要表现为这两个过程的平衡。

(3)生态保护用地的扩张,受土地生态重要性的刺激和推进;城镇用地的扩张,受土地生态重要性的约束,因此从生态角度上讲,同一土地单元对于不同的过程分别起着阻碍或刺激作用。

(4)同一单元阻碍和刺激作用的大小的比较,可通过相同标准下两个过程的最小累积阻力值大小的比较而得到。

2.2.2 适宜性分区模型构建

图1中A、B分别表示城镇用地和生态保护用地扩张斑块源,P、L分别表示城镇用地和生态保护用地扩张最小累积阻力曲线,C表示两个过程最小累积阻力相等的像素单元。在AC之间,生态保护用地扩张最小累积阻力大于城镇用地扩张最小累积阻力,表示这区间的斑块相对更“靠近”城镇用地扩张源,因此应作为建设用度适宜区;反之,BC之间斑块应作为生态用地适宜区。

基于上述分析,本文建立了以两个景观过程最小累积阻力差值为基础的城市土地生态适宜性评价方法,用下式表示:

$$MCR_{\text{差值}} = MCR_{\text{生态保护用地扩张}} - MCR_{\text{城市用地扩张}}$$

当被评价单元的 $MCR_{\text{差值}} < 0$,应该被划分为适宜生态用地; $MCR_{\text{差值}} > 0$ 时,应被划分为适宜建设的用地;当 $MCR_{\text{差值}} = 0$ 时,为适宜建设的用地和适宜生态用地之间的分界线。

2.3 参数选择

2.3.1 数据源

本次评价以厦门市2006年数据作为研究的基础数据,包括四季度TM多光谱遥感数据;土地利用矢量数据(比例尺1:10 000);DEM数据(比例尺1:10 000);土壤类型矢量数据(比例尺1:50 000);降水量分布、自然保护区、森林公园、风景名胜区数据、基本农田、红树林、自然灾害隐患空间分布矢量数据(比例尺1:100 000)。

2.3.2 过程源的确定

城镇用地的扩张源为现有的城镇用地;生态保护用地扩张源为生物多样性较丰富、生态功能较强的地区,对于厦门来说指自然保护区、风景名胜区、森林公园、饮用水源涵养区和红树林自然湿地。

2.3.3 阻力面的确定

为使两个过程在同一个标准下进行,需建立相同的阻力评价体系,不同的是分值的赋予应该是相反的。本文从地形、景观类型、水文地质、生态价值、生态敏感性以及生态功能6个方面建立景观过程阻力评价体系,前三者是针对土地固有生态属性而言,后三者针对土地的外延生态属性而言。一般情况下,土地的地形越复杂、水文地质灾害越频繁、生态价值越大、敏感性越强,生态功能越高就越不利于城镇用度的发展而越有利于生态保护用度的发展。在评价单因素的阻力时,将阻力分为5个等级,分别用5,4,3,2,1表示,阻力分值的赋予通过专家打分方式获得。在对生态价值进行评价时,采用以归一化植被指数NDVI和空间各像元距离水体像元的距离为基准的分类矩阵法来分析^[4,18]。在对生态敏感性进行分析时,参考《SL 190—2007:土壤侵蚀分类分级标准》^[19]所提供的分值和权重,采用坡度、植被覆盖度、土壤类型、降水4个要素进行评价。在对生态功能进行分析时将某些发挥着重要生态功能的区域,如基本农田保护区、水源保护区、自然保护区、风景名胜区、森林公园等筛选出来进行特别评价,这些土地对于城镇用度的发展有着严格的限制。景观过程阻力值的

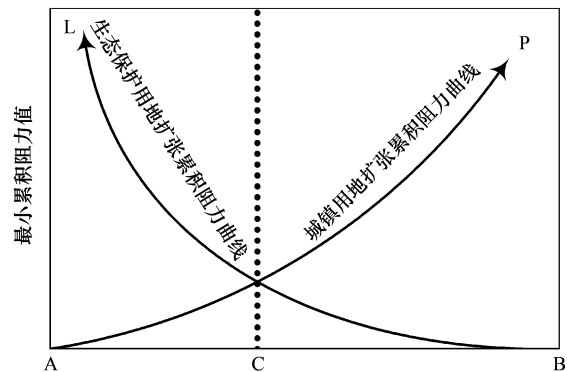


图1 适宜性分区模型

Fig. 1 Model of suitability zoning

赋予见表 1 和表 2。

表 1 景观过程阻力赋值体系 I
Table 1 System I of Landscape process resistance assignment

固有生态 属性因子 Inherent ecological factors	生态保护用地扩张阻力值 Resistance value of ecological protected land expansion	1	2	3	4	5
	城镇用地扩张阻力值 Resistance value of urban land expansion	5	4	3	2	1
	地形地貌 Topography	中低山	高丘陵	低丘陵	台地	平原
	景观类型 Type of landscape	有林地、湖泊水 库、荒草地	疏林地、耕地	灌木林地、园地	交通设施、水利 设施、工矿用地	城镇用地、农村居 民点
	水文地质 Hydrogeology	经常被洪水淹 没区	—	洪水发生频率 在 10—100a	—	洪水发生频率在 100a 以上
		严重不良地质 作用区	—	轻微不良地质 作用区	—	无不良地质作 用区

表 2 景观过程阻力赋值体系 II
Table 2 System II of Landscape process resistance assignment

	生态保护用地扩张阻力(城镇 用地扩张阻力)	距最邻近水体距离/m					
		0—50	>50—100	>100—150	>150—200	>200	
生态价值 Ecological value	DNVI	>0.8—1.0	1(5)	1(5)	2(4)	2(4)	2(4)
		>0.6—0.8	1(5)	2(4)	2(4)	3(3)	3(3)
		>0.4—0.6	2(4)	3(3)	3(3)	4(2)	4(2)
		>0.2—0.4	2(4)	3(3)	4(2)	4(2)	4(2)
		0.0—0.2	3(3)	4(2)	5(1)	5(1)	5(1)
		生态保护用地扩张阻力	1	2	3	4	5
外延生态 属性因子 Derivative ecological factos	城镇用地扩张阻力	5	4	3	2	1	
	生态敏感性 Ecologica sensitivity	坡度/(°) (权重 30%)	>35	>25—35	>15—25	>8—15	0—8
		植被覆盖率/% (权重 30%)	0—20	>20—40	>40—60	>60—85	>85—100
		土壤侵蚀敏 感性	风沙土	潮土	红、黄壤	—	水稻土
		土壤类型 (权重 25%)	—	—	—	—	—
		降水/mm (权重 15%)	>1500	>1100—1500	—	—	—
生态功能 Ecological functions	生态保护用地扩张阻力	1	2	3	4	5	
	城镇用地扩张阻力	5	4	3	2	1	
	生态功能区	自然保护区、 风景名胜区、 森林公园、 饮用水源一 级保护区	红树林、 基本农田、 饮用水源二 级保护区	—	—	其它区域	
		—	—	—	—	—	

由于本次评价采用的是相对评价法,阻力值是无量纲的,因此本文借鉴生态学中的最小限制因子定律思想,采用取极值的方法确定最终的景观阻力。生态保护用地扩张阻力 = min(地形地貌、景观类型、水文地质、生态价值、生态敏感性、生态功能);而城镇用地扩张阻力 = max(地形地貌、景观类型、水文地质、生态价值、生态敏感性、生态功能)。

3 研究结果

3.1 最小累积阻力表面的计算

运用 ARCGIS 中的 cost-distance 模型分别计算两个过程的最小累积阻力表面(图 2 和图 3)。并用生态保

护用地扩张最小累积阻力减去城镇用地扩张最小累积阻力,得到两种阻力的差值表面(图4)。

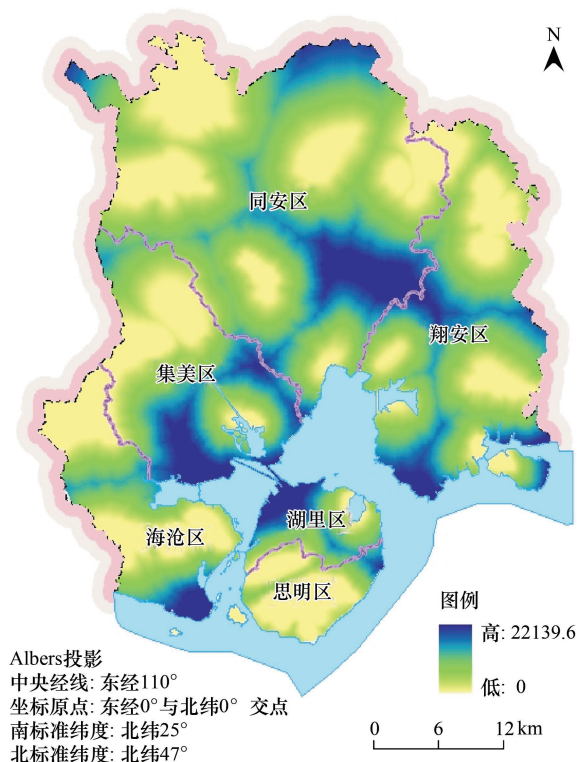


图2 生态保护用地扩张最小累积阻力表面

Fig.2 Minimal accumulated resistance Surface of ecological protected land expansion

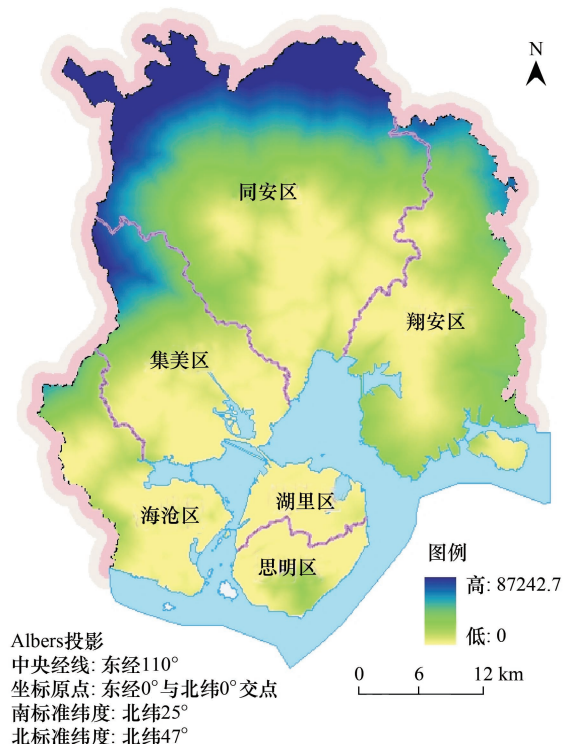


图3 城镇用地扩张最小累积阻力表面

Fig.3 Minimal accumulated resistance Surface of urban land expansion

图中数据为两个氮处理两个生长季下的均值

3.2 分区阈值的确定

如前所述,按照差值的正负关系可以将厦门市土地划分为两大类,小于0的部分作为适宜生态用地;大于0的部分作为适宜建设用地。生态适宜用地可进一步划分为禁止开发区和限制开发区,建设适宜用地可进一步划分为重点开发区和优化开发区。分区阈值由MCR差值与面积曲线的突变点来确定^[10,20]。

由MCR差值表面可获得差值与栅格数目的关系图(图5)。从图5可以看出像素值小于0的部分在A点有一个突变过程;像素值大于0的部分在B点有一个突变过程。当某类用地扩张穿越突变点时,突变点所在单元的阻碍或者刺激作用发生骤然变化,因而突变点前后的土地应归于不同的类型,可将A点和B点对应的最小累积阻力差值作为分区的阈值。厦门市城市土地生态适宜性的分区间见表3所示。

表3 厦门市生态适宜性分区阈值区间

Table 3 Threshold range for ecological suitability zoning of Xiamen City

城市土地适宜性分区 Suitability zoning of urban land	生态适宜性分区 Suitability zoning	像素值区间 Pixel value range
适宜生态的用地 eco-appropriate land	禁止开发区	-78567.9—-11441.29
	限制开发区	> -11441.29—0
适宜建设的用地 Land suitable for construction	重点开发区	0—4788.27
	优化开发区	>4788.27—18571.8

3.3 生态适宜性分区结果

根据表3中的分区间,对差值表面进行重分类,得到厦门市生态适宜性分区结果(图6)。

禁止开发区面积为525.3km²,占厦门市域面积的33.6%,分布在厦门市的北部,呈“拱形”,构成了厦门

的生态屏障带。限制开发区面积为 455.0 km², 占厦门市域面积的 29.1%, 处于禁止开发区与重点开发区之间, 为厦门市生态缓冲区。重点开发区 243.9 km², 占厦门市域面积的 21.8%, 处于限制开发区和优化开发区中的之间, 为厦门市城市建设缓冲区。优化开发区面积为 340.8 km², 占厦门市域面积的 15.6%, 为限制开发区和禁止开发区以外的已经具有一定开发强度的土地。

生态用地适宜面积总和为 980.3 km², 占厦门市域总面积的 62.6%, 建设用地适宜面积总和为 584.7 km², 占厦门市域总面积的 28.4%。

4 结论与分析

4.1 最小累积阻力模型丰富了城市土地生态适宜性评价研究

城市土地的生态适宜性评价是城市规划、管理的重要组成部分, 在日益强调景观生态过程与景观格局关系的时代, 以景观过程模型为基础的生态适宜性评价方法越来越受到研究者的重视。本文以描述生态过程的最小累积阻力模型建立了土地生态适宜性评价流程, 构建了以最小累积阻力差值表面进行生态适宜性分区模式, 此种方法的提出进一步丰富了生态适宜性评价的研究工作。

4.2 最小累积阻力模型在城市土地生态适宜性评价中具有优越性

以往的生态适宜性评价方法由于只强调评价单元垂直过程, 使得离现有城镇用地较远的区域误被作为城市优先发展方向, 而最小累积阻力模型考虑了距离和阻力两种因素, 就可有效地避免上述情况的发生。

最小累积阻力模型只需要建立源点和阻力表面, 而无需花大量的时间和精力放在各评价因子的权重赋值

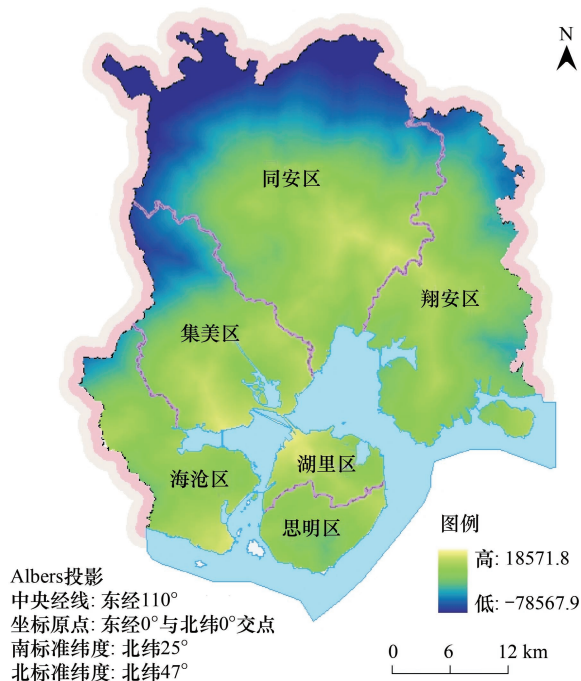


图4 最小累积阻力差值表面

Fig. 4 Margin of Minimal accumulated resistances

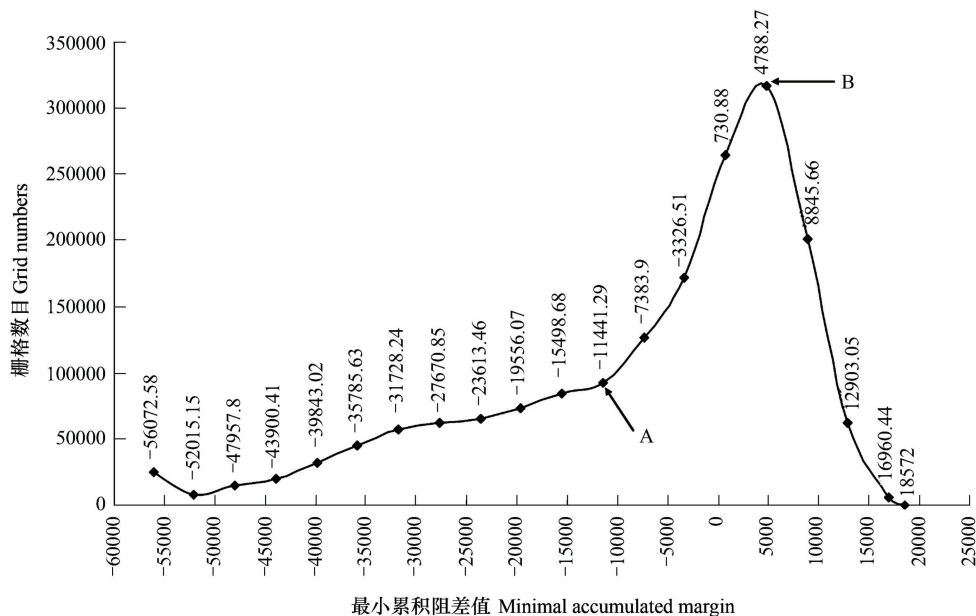


图5 最小累积阻力差值与栅格数目的关系

Fig. 5 Relationship of grid numbers and minimal accumulated margin

上,本文所采用的差值与面积曲线关系分区方法也减少了传统情景分析分类法带来的工作量。因此这种方法具有较强的可操作性。

与其他方法相比,最小累积阻力差值模型法只有阻力的确定不可避免的需要专家打分法外,其它步骤都是通过计算机完成,减少了人为主观性,因此在一定程度上保证了评价结果的客观性。从厦门市的分区结果可以看出,禁止开发区和限制开发区面积占到厦门总面积的 62.7%,与国外一些较著名的宜居城市大多辟有约 2 倍于城市建成区面积的城郊森林地带,如温哥华、悉尼、库里蒂巴、华盛顿等城市持平,该分区在确立了厦门市城市用地发展空间的同时,保护了厦门市绝大部分的生态组分,表明以最小累积阻力模型建立的城市土地生态适宜性评价流程是可行的。

综上所述,最小累积阻力模型法即强调了单元空间格局,又具有较强的可操作性,是一种较客观地城市土地生态适宜性评价方法。

5 不足与展望

5.1 前提假设的宏观性

本文将城市土地的用途划分为两个大类,即建设用地区和生态用地,并用城镇用地扩张和生态保护用地扩张两个过程来模拟了土地演变潜在的趋势,明确了城市区域范围内适宜建设用地和适宜生态用的面积和范围。对于土地的具体的用途,本文所指土地的生态适宜性显得比较模糊,也就是说本文只能说明被评价的土地在用于城市开发建设和生态保护方面哪个相对更重要,而不能说明这块土地到底适合作为居民用地、工业用地,还是仓储用地等。

本文逻辑前提的宏观性,决定了成果应用的局限性。因此为使该方法更好地服务于土地利用决策,为城市规划和城市决策者提供可靠而详实理论依据,未来的研究需根据各个尺度的实际情况,采用相应的模型进行适宜性划分,依据区划结果明确宏观适宜性与微观适宜性之间的耦合关系,逐步实现该方法从土地的宏观用途应用向微观用途应用的转变,从而构建更细尺度的土地适宜性客观蓝图。

5.2 阻力因子选择与赋值的主观性

虽然阻力因子的确定无碍于运用最小累积阻力模型开展城市土地生态适宜性评价研究,但由于阻力因子的选择与赋值是影响最终结果的重要因素,因此本文所建立的阻力评价指标体系值得商榷。

本文中阻力因子的选择主要考虑了空间差异和可操作性原则,通过多个专家决策的方式确定,暂且选择地形地貌、景观类型、水文地质、生态价值、生态敏感性以及生态功能六个因素建立阻力评价体系。由于生态学本身缺乏标准,且相关土地生态重要性的研究还没有达成统一的认识,因此本文选择的阻力评价因子难免有遗漏,因子间也可能存在重复,其选择的科学性和客观性有待深入研究。

本文采用 5 个等级来评价单项阻力,分别用 1—5 来表示,等级的划分的标准同样采用专家咨询的方式产生。由于这种赋值方式较为主观和牵强,直接影响了评价结果的客观性,因此,在今后的研究过程中还需逐步克服等级划分非此即彼的主观线性思路,适当考虑引入模糊数学及非线性数学的方法对改进阻力赋值方式。

5.3 适用范围的局限性

最小累积阻力模型能付诸实践的前提条件是存在过程源,该过程围绕源处于不断的发展当中。因此将该

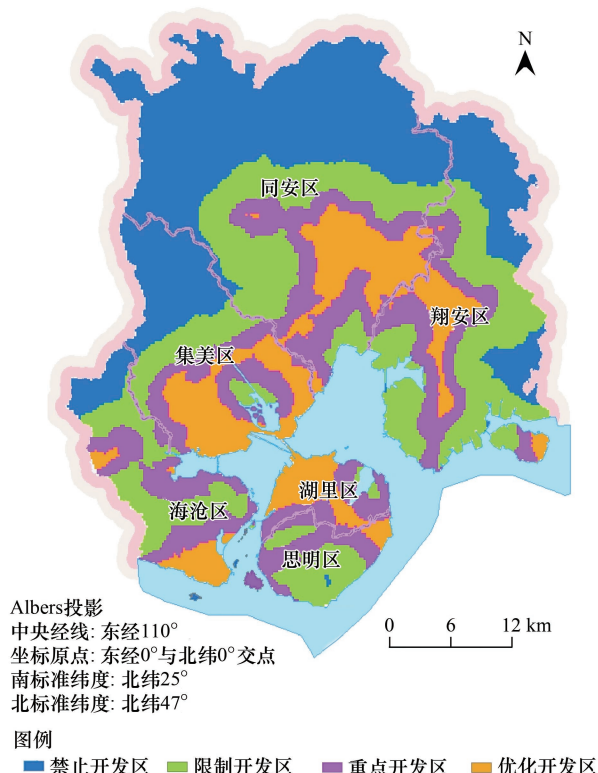


图 6 厦门市生态适宜性分区图

Fig. 6 Map of ecological suitability zoning of Xiamen City

模型应用于城市土地生态适宜性评价时,只适用于具有一定开发程度且处于不断发展的区域。但该模型能确定城市扩张的规模,因此该模型可以和其它城市开发选址方法相结合,使其在城市规划决策中发挥更大的作用。

References:

- [1] Chen J H, Wang J R. Analysis ecological applicability of land usage in regional environmental impact assessment(REIA). *Environmental Protection Science*, 2002, 28(04): 52-54.
- [2] Chen S L, Liu Q, Yu S, Lin Z L. The evaluation of land resource suitability in Jinan district of Fuzhou supported by GIS. *Geo-information Science*, 2002, 12(1): 61-65.
- [3] Chen W, Duan X J, Chen J L, Xu G. The methods of spatial development function regionalization. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(53-58).
- [4] Shi P J, Gong P. Method and practice of studying on the land-use and land-cover change. Beijing: Science Press, 2000.
- [5] Liu Y, Li T W, Chen J N, Zhang L B, Wang W, Tong Q Y, Lu C Y. Ecologically feasible space for urban development: a methodology and case study on Dalian municipality, northeastern China. *China Environmental Science*, 2007, 27(1): 34-38.
- [6] Chen Y F, Sun D Y, Lu G F. Application of catastrophe progression method in ecological suitability assessment: A case study on Zhenjiang new area. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2587-2594.
- [7] Yu K J. Landscape ecological security patterns in biological conservation. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1): 8-15.
- [8] Li W F, Wang Y L, Jiang Y Y, Li G C. Spatial approaches to ecological regulation in urban areas: a case in Shenzhen. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9): 1823-1831.
- [9] Yu K J, Huang G, Li D H, Liu H L. Construction and organization of the landscape networks: discussion on the landscape ecological planning of the Beijing Shihua-Cave scenic area. *Urban Planning Forum*, 2005, 14(3): 76-81.
- [10] Yu K J, Li D H, Duan T W. Landscape approaches in biodiversity conservation. *Biodiversity*, 1998, 7(3): 13-23.
- [11] Chen Y F, Du P F, Zheng X J, Liu H L. Evaluation on ecological applicability of land construction in Nanning city based on GIS. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2006, 46(6): 801-804.
- [12] Wu J G. The key research topics in landscape ecology. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9): 2074-2076.
- [13] Kaaapen J P, scheffer M. H. B. Estimating habitat isolation in landscape. *Landscape and Urbain Planning*, 1992, 23: 1-16.
- [14] Chen L X, Fu B J, Xu J Y, Kong J. Location-weighted landscape contrast index: a scale independent approach for landscape pattern evaluation based on "Source-Sink" ecological processes. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2406-2413.
- [15] Li X Y, Ma K M, Fu B J, Niu S K. The regional pattern for ecological security (RPES): designing principles and method. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5): 1055-1062.
- [16] Chen Y F, Du P F. Analysis on urban land expanding based on minimum cumulative resistance model, 2007.
- [17] Peng J F. Apply minimum camulative resistance model to simulate landuse change — as an example of Yangzhang. Jiangsu Province. Beijing: Peking University, 2000.
- [18] Ju J. A primary integration matrices approach to sustainability orientated landuse planning in China. Stuttgart: Instiut für Raumondnun, 1998.
- [19] Soil and Water Division of Ministry of Water Resources of the Peoples Republic of China. Standards for classification and gradation of soil erosion (SL190 — 2007), 1996.
- [20] Li J H, Liu X H. Research of the nature reserve zonation based on the least-cost distance model. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(2): 217-224.

参考文献:

- [1] 程吉宏,王晶日. 区域环境影响评价中土地使用生态适宜性分析. *环境保护科学*, 2002, 28(4): 52-54.
- [2] 陈松林,刘强,余珊,林志奎. 福州市晋安区土地适宜性评价. *地球信息科学*, 2002, 12(1): 61-65.
- [3] 陈雯,段学军,陈江龙,许刚. 空间开发功能区划方法. *地理学报*, 2004, 59(S1): 53-58.
- [4] 史培军,宫鹏. 土地利用/覆盖变化研究的方法与实践. 北京: 科学出版社, 2000.
- [5] 刘毅,李天威,陈吉宁,张林波,王维,佟庆远,吕春英. 生态适宜的城市发展空间分析方法与案例研究. *中国环境科学*, 2007, 27(1): 34-38.
- [6] 陈云峰,孙殿义,陆根法. 突变级数法在生态适宜度评价中的应用——以镇江新区为例. *生态学报*, 2006, 26(8): 2587-2594.
- [7] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. *生态学报*, 1999, 19(1): 8-15.
- [8] 李卫锋,王仰麟,蒋依依,李贵才. 城市地域生态调控的空间途径——以深圳市为例. *生态学报*, 2003, 23(9): 1823-1831.
- [9] 俞孔坚,黄刚,李迪华,刘海龙. 景观网络的构建与组织——石花洞风景名胜景观生态规划探讨. *城市规划学刊*, 2005, 14(3): 76-81.
- [10] 俞孔坚,李迪华,段铁武. 生物多样性保护的景观规划途径. *生物多样性*, 1998, 7(3): 13-23.
- [11] 陈燕飞,杜鹏飞,郑筱津,林瑾. 基于 GIS 的南宁市建设用地生态适宜性评价. *清华大学学报(自然科学版)*, 2006, 46(6): 801-804.
- [12] 邬建国. 景观生态学中的十大研究论题. *生态学报*, 2004, 24(9): 2074-2076.
- [14] 陈利顶,傅伯杰,徐建英,巩杰. 基于“源-汇”生态过程的景观格局识别方法——景观空间负荷对比指数. *生态学报*, 2003, 23(11): 2406-2413.
- [15] 黎晓亚,马克明,傅伯杰,牛树奎. 区域生态安全格局:设计原则与方法. *生态学报*, 2004, 24(5): 1055-1062.
- [16] 陈燕飞,杜鹏飞. 基于最小累积阻力模型的城镇用地扩展分析. *和谐城市规划——中国城市规划年会论文集*, 2007.
- [17] 彭晋福. 应用最小累积阻力模型模拟土地利用变化——以江苏省扬中市为例. 北京: 北京大学, 2000.
- [19] 中华共和国水利部水土保持司. 土壤侵蚀分类分级标准 (SL190 — 2007), 1996.
- [20] 李纪宏,刘雪华. 基于最小费用距离模型的自然保护区功能分区. *自然资源学报*, 2006, 21(2): 217-224.