

# 基于最小累积阻力模型的珠海市生态适宜性评价

李健飞<sup>1</sup> 李 林<sup>1</sup> 郭 烁<sup>1\*</sup> 杜世宏<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081; <sup>2</sup>北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871)

**摘 要** 城市景观具有空间异质性特点, 城市建设用地或生态需求用地向周围扩张的过程中受到的阻力值不同, 土地单元刺激和推进生态需求用地的扩张强度不同. 为比较同一土地单元推进和阻碍作用的大小, 可以在相同标准下, 通过最小累积阻力值来比较两者大小, 找出2种景观过程的平衡点, 根据生态学最小限制因子原理, 并以2个扩张过程的最小累积阻力差值作为评价城市土地生态适宜性的方法. 本文选取珠海市为研究对象, 以遥感影像、野外调查和统计资料为数据源, 采用相对评价法对珠海城市的生态适宜性进行评价, 在 ArcGIS 支持下, 选取景观类型、生态价值、土壤侵蚀敏感性、地质灾害敏感性以及生态功能5类指标, 采用最小累积阻力模型对珠海市进行生态适宜性评价. 结果表明: 珠海市土地生态适宜程度的5个区域分别为禁止建设区、限制建设区、适宜建设区、重点建设区以及基本农田, 分别占总面积的10.1%、32.9%、36.3%、2.3%和18.4%; 中心城区土地生态适宜程度的4个等级分别为禁止建设区、限制建设区、适宜建设区和重点建设区, 分别占中心城区面积的11.6%、25.6%、52.4%和10.4%. 研究提出了珠海城市可持续发展框架, 一方面要严格控制中心城区规模, 另一方面要大力发展金湾、斗门次级中心城, 完善公共基础设施以缓解珠海东西部发展极不平衡的现状.

**关键词** 城市景观; 生态适宜性; 最小阻力模型; 珠海市

**Assessment on the ecological suitability in Zhuhai City, Guangdong, China, based on minimum cumulative resistance model.** LI Jian-fei<sup>1</sup>, LI Lin<sup>1</sup>, GUO Luo<sup>1\*</sup>, DU Shi-hong<sup>2</sup> (<sup>1</sup>College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China; <sup>2</sup>Institute of Remote Sensing and GIS, Peking University, Beijing 100871, China).

**Abstract:** Urban landscape has the characteristics of spatial heterogeneity. Because the expansion process of urban constructive or ecological land has different resistance values, the land unit stimulates and promotes the expansion of ecological land with different intensity. To compare the effect of promoting and hindering functions in the same land unit, we firstly compared the minimum cumulative resistance value of promoting and hindering functions, and then looked for the balance of two landscape processes under the same standard. According to the ecology principle of minimum limit factor, taking the minimum cumulative resistance analysis method under two expansion processes as the evaluation method of urban land ecological suitability, this research took Zhuhai City as the study area to estimate urban ecological suitability by relative evaluation method with remote sensing image, field survey, and statistics data. With the support of ArcGIS, five types of indicators on landscape types, ecological value, soil erosion sensitivity, sensitivity of geological disasters, and ecological function were selected as input parameters in the minimum cumulative resistance model to compute urban ecological suitability. The results showed that the ecological suitability of the whole Zhuhai City was divided into five levels: constructive expansion prohibited zone (10.1%), constructive expansion restricted zone (32.9%), key construction zone (36.3%), priority development zone (2.3%), and basic cropland (18.4%). Ecological suitability of the central area of Zhuhai City was divided into four levels: constructive expansion prohibited zone (11.6%), constructive expansion restricted zone (25.6%), key construction zone (52.4%), priority development zone

国家自然科学基金项目(31370480)和高等学校学科创新引智计划项目(B08044)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31370480) and 111 Project (B08044).

2015-03-19 Received, 2015-10-09 Accepted.

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guoluo@muc.edu.cn

(10.4%). Finally, we put forward the sustainable development framework of Zhuhai City according to the research conclusion. On one hand, the government should strictly control the development of the urban center area. On the other hand, the secondary urban center area such as Junchang and Doumen need improve the public infrastructure to relieve the imbalance between eastern and western development in Zhuhai City.

**Key words:** urban landscape; ecological suitability; minimum cumulative resistance model; Zhuhai City.

中国的城市正处在从单纯关注经济增长到关注社会、环境的可持续发展的关键转型期,分析城市化过程对社会的影响,寻求具有中国特色的社会、人口、资源与生态环境相协调的发展模式,建设“生态文明”、“精明增长”的城市,是关系到人类社会健康发展的关键问题.城市是受人类活动干扰最为剧烈的生态系统,它的建设发展是人类社会发展的必然趋势<sup>[1-2]</sup>.区域城市化是城市扩展的影响过程,其实质是区域自然生态系统和农业生态系统向城市生态系统不断转化的过程,这一过程在快速城市化条件下导致城市景观结构剧烈变化、地表生态环境容量下降、城市景观组分在不同水平下发生剧烈变化.不同景观组分之间复杂的相互作用除受城市建设用地扩张的影响外,还受自然资源环境条件、区域生产经营、生态保护和生态环境容纳量等因素的综合制约<sup>[3-5]</sup>.合理的生态规划在可持续发展以及资源合理配置中显得尤为重要<sup>[6-7]</sup>.然而,传统的景观格局指数并不能运用到所有的研究区域和研究目的,很多学者也在尝试运用新的景观分析指数和模型进行城市生态评价的研究<sup>[8-9]</sup>.在新模型的构建中,尺度问题、优先限制条件、实际相互作用以及主要的生态过程等都是必须考虑的因素<sup>[10-11]</sup>.最小累积模型(minimum cumulative resistance, MCR)指物种从“源”到“汇”这一运动过程中所耗费的代价,用于保护性物种的栖息地规划,后来结合 ArcGIS 中的费用距离,用作景观生态安全格局研究<sup>[12-13]</sup>.近年来,诸多学者应用 MCR 模拟城镇空间拓展与划分用地格局,其理论思维体现在生态用地空间保护、建设用地空间需求两者博弈关系的日益多元方面<sup>[14-15]</sup>.

当前,珠海城市的发展不可避免地伴随着土地利用结构和边界及相应的景观斑块的变化.本文借助遥感、地理信息系统的技术手段,利用最小累积阻力模型分别对珠海市全市和中心城区进行生态适宜性评价,以期更科学地把握城市景观格局变化与生态系统功能之间的关系,为土地资源保护和利用规划提供数据支持,避免低效的、不合理的土地开发,实现土地资源的可持续发展.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

珠海市位于广东省南部、珠江口西岸(21°48'—22°27' N, 113°03'—114°19' E),下辖香洲、斗门、金湾 3 个行政区,共 15 个镇和 8 个街道,总面积 7653 km<sup>2</sup>,其中陆地面积 1687 km<sup>2</sup>.濒临南海,东与香港水路相通,南与澳门陆地相连,西邻新会市、江门市,北与中山市接壤,有大小近海与远海岛屿 144 个,有“百岛之城”的美称.珠海属亚热带海洋气候,温暖湿润,森林以常绿季雨林和季风性常绿阔叶林为主,地势自西北向东南倾斜,地貌主要为低山丘陵,是降水资源和热量资源都较丰富的区域.珠海市的中心城区位于香洲区,总面积 252 km<sup>2</sup>,辖狮山街、梅华街、翠香街、吉大街、前山街、拱北街、香湾街、湾仔街、唐家湾镇和南屏镇等 10 个镇级行政单位,狮山街是珠海市政府驻地,梅华街是香洲区行政中心,其周围区域构成的中心城区是珠海市的经济、文化和政治中心.

### 1.2 数据来源

本研究资料主要包括:珠海市历年统计年鉴,数字地形图,基本农田规划图,土壤类型分布图,地形、地貌分布图,年降水量等值线图,地质灾害图,1999、2005、2009 年 Landsat-TM/ETM 影像以及 2012 年 QuickBird 高分辨率遥感影像.为了获得准确的遥感解译训练区信息,于 2009 年 10 月和 2011 年 3—4 月结合实地 GPS 定位,进行 2 次野外调查.利用 Envi 5.0 进行图像预处理,为增加反映城市化进程的元素,减少划分过细带来的数据冗余和细节干扰,以自然属性的相似性和人为利用方式下的趋同性为原则,把全市以及中心城区的土地利用划分为以下 7 种景观类型:耕地、林地、草地、建设用地、水域、滩涂、裸地,精度验证 Kappa 系数都达到 0.8 以上.对珠海中心城区 QuickBird 高分遥感影像进行分类,共 3 级 14 类,一级 6 类(植被、水体、裸地、建筑、道路、农田),二级是把植被细分为林地、草地、灌丛、城区绿地 4 类,水体进一步分为河流、沟渠、湖泊、池塘 4

类;分类精度验证 Kappa 系数达 0.87.

1.3 评价方法

最小阻力模型(MCR)最早由 Knaapen 等<sup>[11]</sup>于 1992 年提出.MCR 可以通过对比不同方向的阻力分区分析城镇适宜发展的大概方向,目前,模型的应用主要集中在最小累积阻力面和功能分区.公式为:

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

式中:MCR 为最小累积阻力值; $f$  为一个未知的正函数,它表示生态适宜性与最小累积阻力的正相关关系; $\min$  为某景观单元对不同的源取累积阻力最小值; $D_{ij}$  为源到景观单元  $i$  的空间距离; $R_i$  为景观单元  $i$  对运动过程的阻力系数.

从用途来说,城市土地可以分为两大类,即生态需求用地和城市建设用地,生态需求用地是最适合生态系统发展的用地,城市建设用地是最适宜城市开发的建设用地.为比较同一土地单元推进和阻碍作用的大小,可以在相同标准下,通过最小累积阻力值来比较两者<sup>[16]</sup>.本研究以 2 个扩张过程的最小累积阻力差值作为评价城市土地生态适宜性的方法,公式如下:

$$MCR_p = MCR_{ex} - MCR_{ux}$$

式中: $MCR_p$  为 2 个扩张过程的最小累积阻力差值; $MCR_{ex}$  为生态需求用地扩张的最小累积阻力; $MCR_{ux}$  为城市建设用地扩张的最小累积阻力.像元值的  $MCR_p < 0$ ,适宜用作生态用地; $MCR_p > 0$  时,适宜作为城市建设用地; $MCR_p = 0$  为划分适宜生态用地和建设用地的分界点.

2 珠海市生态适宜性评价

2.1 评价模型

2.1.1 过程源的确定 珠海市的“源”区指红树林自然湿地、饮用水源涵养地、自然保护区、森林公园、风景名胜区.具体包括斗门区的黄杨山自然保护区、香洲区的凤凰山自然保护区、淇澳岛红树林生态保护区、珠海渔女、白莲洞、石景山、圆明新园、共乐园、白藤湖、尖峰山森林公园、南屏镇的竹仙洞、横琴岛的三叠泉风景区、石博园,以及分布在各个区的河水饮用水源一级保护区、水库饮用水源一级保护区等.生态需求“源”的总面积 336.45 km<sup>2</sup>,占珠海总面积 21.3%.城市建设用地的扩张源为现有的城市建设用地,面积为 198.38 km<sup>2</sup>,占总面积 12.6%.

2.1.2 阻力面的确定 从生态扩张的角度来讲,阻力值反映的是不同景观单元对于生态空间扩张的阻

力或适宜程度,国外学者做了很多有关阻力值界定的研究,其中 Knaapen 等<sup>[11]</sup>认为,阻力值的确定是在对物种行为特征方面综合调查研究的基础上给出的一个较为合理的相对值,以此反映不同阻力因子间的差异.本研究分别从景观类型、生态价值、地质灾害敏感性、土壤侵蚀敏感性、生态功能 5 个方面建立阻力评价体系.在确定单因素的阻力时,分别用 1、2、3、4、5 来表示阻力的 5 个等级,这些阻力的分值可按照专家打分的方式设定<sup>[16-19]</sup>.生态功能区主要选择对城市建设用地发展严格限制的区域,如自然保护区、饮用水源保护区、基本农田保护区等.评价生态价值时,采用分类矩阵法,即以空间各斑块距离最邻近水体的距离与标准化植被指数 NDVI 为基准<sup>[20-21]</sup>.这 2 个景观过程阻力值的设置如表 1.本研究主要是为了找出 2 种景观过程的平衡点,采用相对评价法,取极值以确定景观阻力.城市建设用地扩张阻力为景观类型、土壤侵蚀敏感性、地质灾害敏感性、生态功能、生态价值的最大阻力值(max);而生态需求保护用地扩张阻力为景观类型、土壤侵蚀敏感性、地质灾害敏感性、生态功能、生态价值的最小阻力值(min).

2.2 模型分析结果

2.2.1 计算阻力差值 通过计算得出珠海市城市建设用地扩张和生态需求用地扩张 2 个过程的最小累积阻力(图 1).城市建设用地扩张的阻力主要受自然保护区、森林公园、基本农田、河流、水体、红树林湿地等影响,距离越近阻力越大,生态需求用地阻力则相反.城市建设用地扩张主要分布于高栏港、高栏岛、斗门区与金湾区交界的农田地带、香洲区北部的唐家湾镇一带,而生态需求用地扩张主要分布在斗门区的竹篙岭、黄杨山自然保护区、锅盖栋、金湾区西江临近前山水道至入海口段、香洲区凤凰山自然

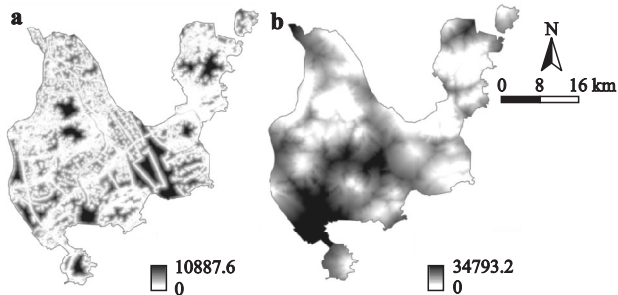


图 1 珠海市城市建设用地(a)和生态需求用地扩张(b)阻力  
Fig.1 Resistance of urban construction expansion (a) and ecological requirement land expansion (b) of Zhuhai City.



表 1 珠海市景观过程阻力值设定  
Table 1 Landscape process resistance assignment of Zhuhai City

生态需求 用地扩张 阻力值 Resistance value of ecological requirement land expansion	城市建设 用地扩张 阻力值 Resistance value of urban construction expansion	景观类型 Landscape type	土壤侵蚀敏感性 Soil erosion sensitivity					地质灾害敏感性 Sensitivity of geological disaster		生态功能 Ecological function	生态价值 Ecological value	
			坡度 Slope (°)	植被 覆盖度 Vegetation fraction (%)	土壤类型 Soil type	海岸距离 Distance to the coast (m)	降水 Precipita- tion (mm)	地貌 Landscape	断裂 带距离 Fault distance (m)		距最近 水域距离 Distance to adjacent water (m)	NDVI
1	5	林地、水域	>35	0~20	滨海沙土	<200	>2300	低山	0~200	自然保护区、 名胜区、 森林公园	0~50	0.8~1.0
2	4	滩涂、草地	25~35	20~40	~	200~500	2000~2300	高丘陵	200~400	红树林、 基本农田	50~100	0.6~0.8
3	3	耕地	15~25	40~60	红壤	500~1000	1700~2000	低丘陵	400~600	-	100~150	0.4~0.6
4	2	裸地	8~15	60~80	-	-	-	台地	600~800	-	150~200	0.2~0.4
5	1	建设用地	0~8	80~100	水稻土	>1000	-	平原	>800	其他区域	>200	0~0.2

保护区等地.将生态需求用地扩张的最小累积阻力与城市建设用地扩张的最小累积阻力相减得出 2 种阻力的差值(图 2).

**2.2.2 确定分区阈值** 根据最小累积阻力差值的正负关系划分为两大类,>0 的区域适宜城市建设用地;<0 的区域适宜生态系统发展.从图 3 可以看出,最小累积阻力差值为-6480(A 点)时发生突变;最小累积阻力差值为 0(B 点),突变最为明显,达到峰值;在最小累积阻力差值为 6480(C 点)时也有一个突变过程.按照 A、B、C 3 点划分分区阈值,评价结果划分为重点建设区、适宜建设区、限制建设区和禁止建设区 4 个等级.其中,重点建设区和适宜建设区属于适宜城市建设的用地,限制建设区和禁止建设区属于适宜生态的用地.根据基本农田保护条例,基本农田保护区依法划定后,任何单位和个人不得改变或者占用,因此单独将其分为一类.珠海市城市生态适宜性分区区间见表 2.

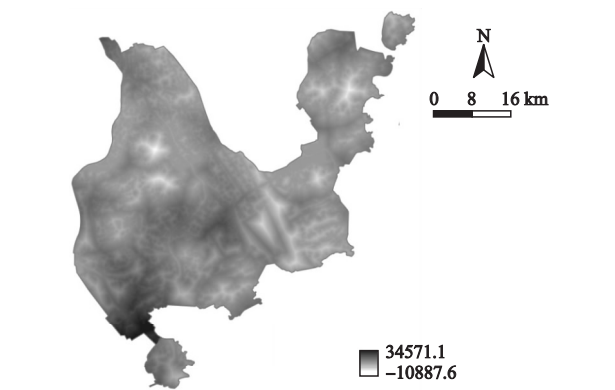


图 2 珠海市最小累积阻力差值  
Fig.2 Difference of minimum accumulated resistances of Zhuhai City.

**2.2.3 生态适宜性分区结果** 根据表 2 中的分区区间,对最小累积阻力差值表面进行重分类,得到珠海市生态适宜性分区结果(图 4).生态需求用地占总

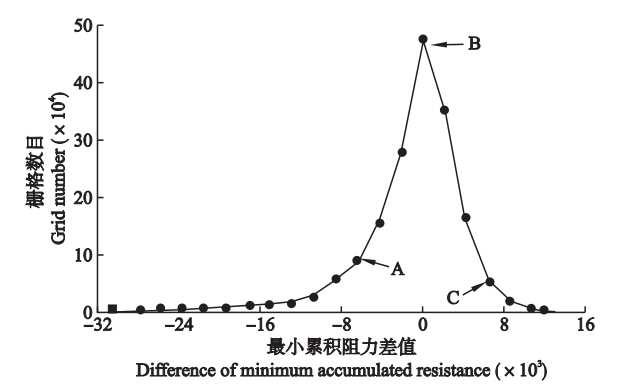


图 3 珠海市最小累积阻力差值与栅格数目的关系  
Fig.3 Relationships of grid numbers and difference of minimum accumulated resistance of Zhuhai City.

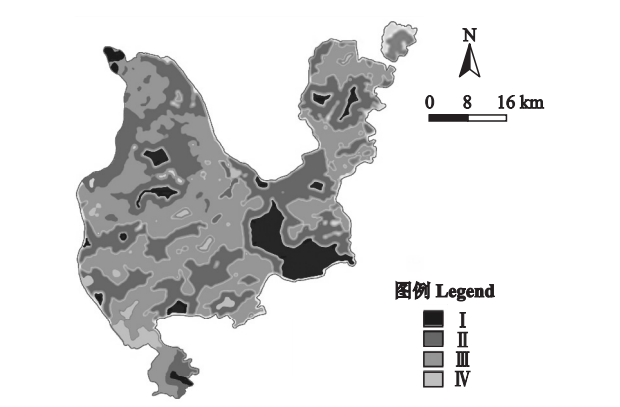


图 4 珠海市生态适宜性分区  
Fig.4 Ecological suitability zone of Zhuhai City.  
I: 禁止建设区 Constructive expansion prohibited zone; II: 限制建设区 Constructive expansion restricted zone; III: 重点建设区 Key construction zone; IV: 优先开发区 Priority development zone. 下同 The same below.

表 2 珠海市生态适宜性分区阈值区间  
Table 2 Threshold range for ecological sustainability zones of Zhuhai City

生态适宜性分区 Ecological suitability classification		像素值区间 Pixel value range	面积 Area (km <sup>2</sup> )	百分比 Percentage
生态用地 Ecological land	禁止建设区 Construction expansion prohibited zone	-30445 ~ -6480	159.75	10.1
城市建设用地 Construction land	限制建设区 Construction expansion restricted zone	-6480 ~ 0	519.91	32.9
	适宜建设区 Construction suitable zone	0 ~ 6480	572.89	36.3
基本农田 Basic cropland	重点建设区 Key construction zone	6480 ~ 12815	36.97	2.3
		-	289.84	18.4

面积的 43.0%,适宜城市建设的用地占全市总面积的 38.6%,多分散在地势平坦的平原和台地区域,基本农田占总面积的 18.4%.在开发过程中,一定要从科学的角度来规划,不能忽视生态环境的保护.

1)禁止建设区.该区面积 159.75 km<sup>2</sup>,占珠海市总面积的 10.1%,主要分布在斗门区六乡镇的竹蒿岭、斗门镇的黄杨山自然保护区、乾务镇的锅盖栋、金湾区的文楼山公园、拦浪山、香洲区横琴岛的三叠泉风景区、南屏镇的白面将军山、烧猪石山、中心城区的观音山、凤凰山、唐家湾的南山、白鹤顶、淇澳岛的红树林湿地自然保护区以及西江临近前山水道至入海口段.该区地形复杂,植被覆盖度高,土壤侵蚀敏感性较高,水体覆盖区域系统稳定性差,生态价值高,容易受到外来干扰的影响,是珠海市生态敏感性最高的区域.它提供了包括水土保持、洪涝调蓄、生物多样性保护等生态系统服务,维护珠海市的生态安全,是生态城市可持续发展的基础,也是珠海市城镇建设用地扩展的刚性界限.

2)限制建设区.该区面积 519.91 km<sup>2</sup>,占珠海市总面积的 32.9%,主要分布在禁止开发区外缘地带、金湾区的宝镜湾、红旗镇的水产养殖区以及饮用水源保护区等地.该区系统稳定性差,对外来干扰的抵抗力较弱,生态敏感性较高,是中心城区生态保护的缓冲区域,是城镇建设与底线生态基础设施的隔离带,应以生态恢复、生态保护为主,这对于维护中心城区生态格局的整体性具有重要意义.由于该区植被覆盖度高于建设用地,以及邻近水体的特性,它是城市中最适宜塑造风景的地区,部分地区可以合理引导,适量开展生态旅游活动,但要严格控制发展规模,以保护生态环境.

3)适宜建设区.该区面积 572.89 km<sup>2</sup>,占珠海市总面积的 36.3%,处于重点建设区与限制建设区之间.该区地貌多为平原或台地,外界的建设活动对它影响小,系统稳定性较强,是城镇建设的缓冲区域.一些地段处于地质灾害敏感区,土壤侵蚀敏感度较

重点建设区高,可以作为城市扩展用地.要合理引导该区域的开发利用,建设新区的同时也要注意生态文明建设,生态补偿与生态破坏相符合,城市内部绿地建设要形成点、线、面等不同形态并与城市林业生态圈融为一体.

4)重点建设区.该区面积 36.97 km<sup>2</sup>,占珠海市总面积的 2.3%,位于斗门区北部莲州镇、南部井岸镇、金湾区西南部高栏港、中部红旗镇以及香洲区唐家湾镇的部分地区.该区地貌多为平原或台地,地质灾害敏感性低,土壤侵蚀敏感性低,生态系统服务功能低,对生态环境的负面影响较小,从生态环境保护的角度出发,最适宜作为建设用地.

5)基本农田.该区面积 289.84 km<sup>2</sup>,占珠海市总面积的 18.4%,位于斗门区北部的莲州镇、斗门镇、白蕉镇、南部的乾务镇、东部的白蕉镇以及金湾区西部的平沙镇、中部的红旗镇和东部鹤洲镇的农田集中区.为保障一定时期内珠海市人口和社会经济发展对农产品的需求,必须对基本农田进行严格保护,在城市发展建设中避免“摊大饼式”的空间蔓延.

分区对于快速城市化地区的土地资源保护非常重要.珠海的建设用地扩展一般以行政区为单位,传统的用地保护很难在空间上体现差异性.本文采用最小累积阻力模型进行分区,充分考虑了城市扩张与生态保护两方面影响因素,由生态功能较差的台地向适宜建设区扩张,相应保护力度由弱至强,体现了城市格局的分区域分层次保护理念.

### 3 中心城区生态适宜性评价

#### 3.1 评价模型

3.1.1 过程源的确定 “源”是向外扩张的起始点,生态需求用地的扩张源一般为需要保护的對象,主要是较大的生态保护区域,它的生态功能较强、生物多样性较为丰富.对于中心城区来说,指的是饮用水源涵养地、自然保护区、森林公园、风景名胜区.具体包括香洲区的凤凰山自然保护区、石溪山风景区、珠

海渔女、白莲洞、石景山、板障山森林公园、圆明新园、共乐园、河水饮用水源一级保护区、水库饮用水源一级保护区等.生态需求“源”的总面积为 21.85 km<sup>2</sup>,占中心城区总面积 31.1%.城市建设用地的扩张源为现有的城市建设用地,面积为 27.06 km<sup>2</sup>,占中心城区总面积 38.6%.

**3.1.2 阻力面的确定** 中心城区生态适宜性评价阻力面的设置与全市的设置类似,从景观类型、生态价值、地质灾害敏感性、土壤侵蚀敏感性、生态功能 5 个方面建立阻力评价体系.主要区别在于景观类型,这是由于遥感影像分类体系不同,中心城区的分类更详细.

3.2 模拟分析结果

**3.2.1 计算阻力差值** 借助 ArcGIS 软件分别计算出城市建设用地扩张和生态需求用地扩张 2 个过程的最小累积阻力(图 5).城市建设用地扩张的阻力主要受板障山森林公园、景山公园、石溪山风景区、将军山公园的影响,距离越近阻力越大,生态需求用地的阻力则与之相反.城市建设用地扩张主要位于北部和中部山体之间,以及南部靠近海岸、澳门一带,而生态需求用地扩张围绕中部的板障山森林公

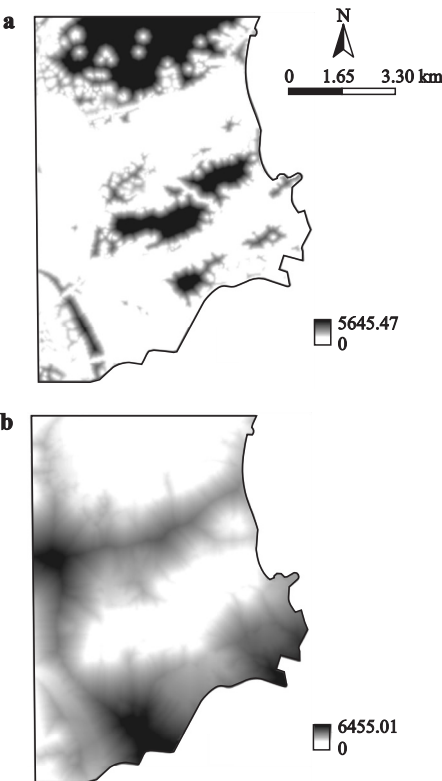


图 5 珠海中心城区城镇建设用地(a)和生态需求用地扩张(b)阻力

Fig.5 Resistance of urban construction expansion (a) and ecological requirement land expansion (b) of Zhuhai downtown.

园、景山公园以及北部的石溪山风景区.将生态需求用地扩张的最小累积阻力与城市建设用地扩张的最小累积阻力相减得出两种阻力的差值(图 6).

**3.2.2 确定分区阈值** 珠海城市中心的土地可以按照之前所述,根据最小累积阻力差值的正负关系划分为两大类,>0的区域适宜城市建设用地;<0的区域适宜生态系统发展.从图 7 可以看出,在最小累积阻力差值为-1562(A 点)时发生突变;在最小累积阻力差值为 2343(C 点)时也有一个突变过程.按照 A、B、C 3 点划分分区阈值,并划分为重点建设区、适宜建设区、限制建设区和禁止建设区 4 个等级.其中,重点建设区和适宜建设区属于适宜城市建设的用地,限制建设区和禁止建设区属于适宜生态的用地.珠海市城市生态适宜性分区区间见表 3.

**3.2.3 生态适宜性分区结果** 根据表 4 中的分区区间,对最小累积阻力差值进行重分类,得到珠海城市中心生态适宜性分区结果(图 8).适宜建设的用地占中心城区总面积 62.8%,适宜生态的用地占总面积的 37.2%.1)中心城区禁止建设区面积为 8.09 km<sup>2</sup>,

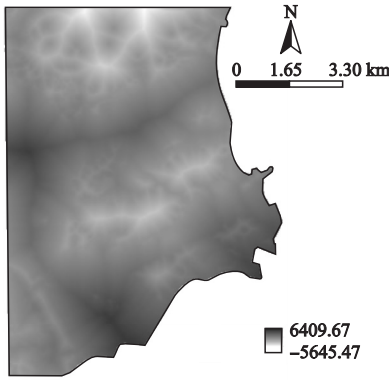


图 6 最小累积阻力差值

Fig.6 Difference of minimum accumulated resistance.

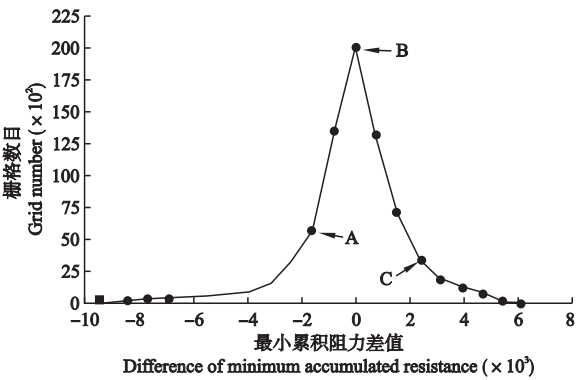


图 7 珠海中心城区最小累积阻力差值与栅格数目的关系

Fig.7 Relationships of grid numbers and difference of minimum accumulated resistance of Zhuhai downtown.



表 3 珠海中心城区生态适宜性分区阈值区间  
Table 3 Threshold range for ecological sustainability zones of Zhuhai downtown

生态适宜性分区 Ecological suitability classification		像素值区间 Pixel value range	面积 Area (km <sup>2</sup> )	百分比 Percentage
生态用地 Ecological land	禁止建设区 Construction expansion prohibited zone	-9439 ~ -1526	8.09	11.6
	限制建设区 Construction expansion restricted zone	-1526 ~ 0	17.93	25.6
城市建设用地 Construction land	适宜建设区 Construction suitable zone	0 ~ 2343	36.73	52.4
	重点建设区 Key construction zone	2343 ~ 6180	7.28	10.4

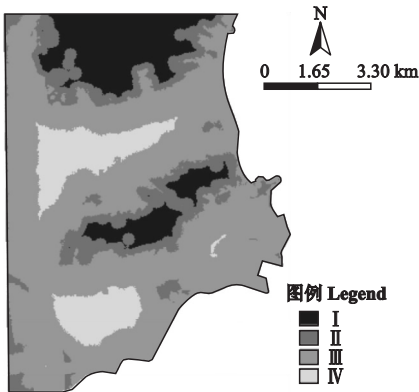


图 8 珠海市中心城区生态适宜性分区  
Fig.8 Ecological suitability zoning of Zhuhai downtown.

占中心城区总面积的 11.6%，一般为坡度>25°、植被景观优良和临近水体的区域，主要分布在中心城区的北部石溪风景区、大镜山水库、中部板障山森林公园以及南部将军山公园的核心位置。该区地形复杂，植被覆盖度高，生态价值高，土壤侵蚀敏感性较高，系统稳定性差，是中心城区中生态敏感性最高的区域。它提供了包括水土保持、洪涝调蓄、生物多样性保护等生态系统服务，维护中心城区的生态安全，是生态城市可持续发展的基础。2) 中心城区限制建设区面积为 17.93 km<sup>2</sup>，占中心城区总面积的 25.6%，一般坡度>15°，主要分布在东部海滨公园、石花山公园、西南部前山水道、炮台山公园以及禁止建设区的外缘地带，该区系统稳定性差，具有一定的生态敏感性，容易受到外来人为干扰，是中心城区生态保护的缓冲区域，是城镇建设与底线生态基础设施的隔离带，对于维护中心城区生态格局的整体性具有重要意义。3) 中心城区适宜建设区面积为 36.73 km<sup>2</sup>，占中心城区总面积的 52.4%，为城市居民点分布区。它的分布范围较广，包含中心城区各街道的若干区域。该区地貌多为平原或台地，但一些地段处于地质灾害敏感区，土壤侵蚀敏感度较重点建设区高。4) 中心城区重点建设区面积为 7.28 km<sup>2</sup>，占中心城区总面积的 10.4%，主要为城市居民点分布区，包括西部前山街道、中部梅华街道、吉大街道以及南部拱北街

道的部分区域。该区地貌多为平原或台地，地质灾害敏感性低，生态系统服务功能价值低，土壤侵蚀敏感性也低，对生态环境的负面影响较小，从生态环境保护的角度来看最适宜作为建设用地。

4 结 论

通过基于最小阻力模型的生态适宜性评价，对城市扩展用地进行合理分区，可以避免因决策失误而产生对生态环境的破坏。城市扩张的禁止建设区就是为了保护研究区地质条件敏感的区域以及水体，以保证城市拓展的安全性、维持区域生态环境的稳定性。珠海适宜城市建设用地呈现东高西低的状态，重点建设区大部分集中在高栏港国家经济技术开发区附近，这与国家当前政策相一致。适宜建设区东西部连通性差，受到禁止建设区、限制建设区以及基本农田区的阻隔。在做总体规划时，应权衡之间利弊，加强东西部的连通性，并加强东部建设，改善东西部发展极不平衡的现状。城区内自然保护区的地位对于城市的可持续发展、生态城市的建设尤为重要。经过该体系评价得出的分区结果与珠海市中心城区发展现状基本一致，同时适宜生态的用地、适宜建设的用地均与《珠海市城市总体规划》(2006—2020 年)<sup>[22]</sup>中自然与文化遗产保护区一致，控制要点相符合。在理论上也验证《珠海市城市总体规划》(2006—2020 年)<sup>[22]</sup>中心城区部分发展用地、制定保护区的科学性。

基于最小累积阻力模型，结合遥感和 GIS 空间分析，可以将城市土地演变过程中的阻力量化，从而模拟城市土地适宜性的水平动态，但运用该模型很难体现以建设用地作为源，以及侵占生态用地对生态功能产生胁迫效应的城镇建设空间运动过程，而阻力系数的赋值参考了国内外的相关研究成果，随着技术的进步，今后的研究中应采取更为精确的赋值方式。

## 参考文献

- [1] Li X-W (李晓文), Fang C-L (方创琳), Huang J-C (黄金川), *et al.* The urban land use transformations and associated effects on eco-environment in Northwest China arid region: A case study in Hexi region, Gansu Province. *Quaternary Sciences* (第四纪研究), 2003, **23**(3): 280–290 (in Chinese)
- [2] Thomlinson JR, Rivera LY. Suburban growth in Luquillo, Puerto Rico: Some consequences of development on natural and semi-natural systems. *Landscape and Urban Planning*, 2000, **49**: 15–23
- [3] Carlsong TN, Arthur S. The impact of land use land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: A satellite perspective. *Global and Planetary Change*, 2000, **25**: 49–65
- [4] Wang YQ, Zhang XS. A dynamic modelling approach to simulating socioeconomic effects on landscape changes. *Ecological Modelling*, 2001, **140**: 141–162
- [5] Yan XL, Song HX, Chen QB, *et al.* Landscape planning approaches to sustainable development. *Advanced Materials Research*, 2012, **524**: 2813–2818
- [6] Bohnet I, Smith DM. Planning future landscapes in the Wet Tropics of Australia: A social-ecological framework. *Landscape and Urban Planning*, 2007, **80**: 137–152
- [7] Freudenberger L, Hobson PR, Rupic S, *et al.* Spatial road disturbance index (SPROADI) for conservation planning: A novel landscape index, demonstrated for the State of Brandenburg, Germany. *Landscape Ecology*, 2013, **28**: 1353–1369
- [8] Chen TS, Lin HJ. Application of a landscape development intensity index for assessing wetlands in Taiwan. *Wetlands*, 2011, **31**: 745–756
- [9] Cuddington K, Fortin MJ, Gerber LR, *et al.* Process-based models are required to manage ecological systems in a changing world. *Ecosphere*, 2013, **4**: art20
- [10] Gustafson EJ. When relationships estimated in the past cannot be used to predict the future: Using mechanistic models to predict landscape ecological dynamics in a changing world. *Landscape Ecology*, 2013, **28**: 1429–1437
- [11] Knaapen JP, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 1992, **23**: 1–16
- [12] Yu K-J (俞孔坚), Ye Z (叶正), Li D-H (李迪华), *et al.* Connectivity of landscape ecological process and patterns: A case study at Zhoushan City, Guangdong Province. *City Planning Review* (城市规划), 1998, **22**(4): 14–17 (in Chinese)
- [13] Yu K-J (俞孔坚). Landscape ecological security patterns in biological conservation. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1999, **19**(1): 8–15 (in Chinese)
- [14] Chu G-L (初桂兰), Zhang Y-H (张永华), Liu S-X (刘述锡), *et al.* The protection and exploitation partition of nonresidential islands on the minimum cumulative resistance model. *Marine Environmental Science* (海洋环境科学), 2013, **32**(5): 752–755 (in Chinese)
- [15] Li J (李晶), Meng J-J (蒙古军), Mao X-Y (毛熙彦). MCR based model for developing land use ecological security pattern in farming-pastoral zone: A case study of Jungar Banner, Ordos. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (北京大学学报: 自然科学版), 2013, **49**(4): 707–715 (in Chinese)
- [16] Zhong S-Y (钟式玉), Wu J (吴箐), Li Y (李宇), *et al.* Reconstruction of urban land space based on minimum cumulative resistance model: A case study of Xintang Town, Guangzhou City. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(11): 3173–3179 (in Chinese)
- [17] Zong Y-G (宗跃光), Wang R (王蓉), Wang C-G (汪成刚), *et al.* Ecological suitability assessment on land use based on potential-constrain approach: The case of urbanized areas in Dalian City, China. *Geographical Research* (地理研究), 2007, **26**(6): 1117–1126 (in Chinese)
- [18] Water Conservancy Industry Standard of the People's Republic of China (中华人民共和国水利部). Standards for Classification and Gradation of Soil Erosion (SL 190–2007). Beijing: China Standards Press, 2008 (in Chinese)
- [19] Mao Z-L (毛子龙), Yang X-M (杨小毛), Lai M-D (赖梅东). Evaluation on ecological adaptability of land for construction in Longquanshan, Chengdu. *Sichuan Environment* (四川环境), 2012, **30**(6): 63–68 (in Chinese)
- [20] Shi P-J (史培军), Gong P (宫鹏). Discussion of the Research Method and Practice on Land Use/Land Cover Change. Beijing: Science Press, 2000 (in Chinese)
- [21] Ju J. A primary integration matrices approach to sustainability orientated land use planning in China. Stuttgart, Germany: Institute of Regional Development Planning, 1998
- [22] Zhuhai Municipal People's Government (珠海市人民政府). Zhuhai City Master Plan (2006–2020). Zhuhai: Zhuhai Municipal People's Government, 2007 (in Chinese)

作者简介 李健飞,男,1989年生,博士研究生.主要从事景观生态学研究. E-mail: 973319246@qq.com

责任编辑 杨弘