

河源市生态敏感性评价

褚艳玲¹, 陈义², 杨道运², 吴锋², 黄威文³ (1. 北京大学深圳研究院, 广东深圳 518040; 2. 深圳市深港产学研环保工程技术股份有限公司深港环境科学研究院, 广东深圳 518040; 3. 深圳市城市规划设计研究院有限公司, 广东深圳 518040)

摘要 根据河源市生态本底特色, 将研究区划分为极敏感区、高敏感区、中敏感区、轻敏感区、不敏感区 5 个等级, 从建设用地的适宜性、水安全与雨洪安全、生物多样性安全三大方面选取了 8 个具有代表性的因子, 采取层次分析法(AHP)、多因子加权叠加算法、取最大值法, 结合 GIS 空间分析技术, 对生态敏感性进行综合评价。结果表明, 5 个敏感等级面积比重分别为 25.98%、33.84%、12.78%、19.76%、7.63%。并在生态敏感性分析的基础上, 提出了生态功能区划建议, 为城市规划、生态控制线划定等提供科学依据。

关键词 生态敏感性; 生态功能区划; 河源市

中图分类号 S181.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)11-0067-05

Evaluation of Ecological Sensitivity in Heyuan City

CHU Yan-ling¹, CHEN Yi², YANG Dao-yun² et al (1. Shenzhen Research Institute of Peking University, Shenzhen, Guangdong 518040; 2. IER Environmental Engineering Technology Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518040)

Abstract According to ecological background characteristics of the Heyuan City was divided into 5 grades, including extremely sensitive zone, high sensitive zone, middle sensitive zone, sensitive zone, non-sensitive zone. Considering of three aspects from the construction land suitability, water and rain safety, biological diversity, 8 representative factors were selected. Using analytic hierarchy process (AHP), multi factor weighted superposition algorithm, maximum value method, and GIS spatial analysis technology, the ecological sensitivity evaluation map was obtained. The proportions of the 5 sensitive zone were 25.98%, 33.84%, 12.78%, 19.76%, 7.63%, respectively. On the basis of ecological sensitivity analysis, the suggestions of ecological function region were put forward, which can provide scientific basis for urban planning and ecological control line.

Key words Ecological sensitivity; Ecological function region; Heyuan City

生态敏感性是指生态系统对人类活动干扰和自然环境变化的反映程度, 说明发生区域生态环境问题的难易程度和概率大小^[1]。生态敏感性评价分析实质上是对现状自然环境背景下潜在的生态环境问题进行明确辨识, 并将其落实到具体的空间区域。敏感性高的区域生态系统容易受损, 应该是生态环境保护和恢复建设的重点, 也是人为活动受限或者禁止地区。将生态敏感性评价分析应用于不同尺度、不同地域的资源环境研究已经成为生态学和地理学的研究热点, 而将生态敏感性评价分析应用于生态功能区划、生态控制线划定也正成为一种趋势。目前, 欧阳志云等^[1-4]从宏观尺度对全国、省域及流域的生态敏感性空间差异及等级区划进行了研究; 陶星名等^[5-9]从中观尺度对地市级别的地域生态敏感性进行了评价; 尹海伟等^[10-15]对地市以下尺度的区域性生态敏感性进行了分析。这些研究多集中于某一生态问题上, 缺乏对多种生态问题的综合研究; 评价方法多为多因子加权叠加算法^[16-17]或取最大值法^[9], 缺乏对 2 种方法的融合。笔者采用多因子加权叠加算法和取最大值法相结合的方法, 从城市建设用地适宜性、水安全与雨洪安全、生物多样性安全 3 个维度选取多个因子, 开展河源市生态敏感性评价分析, 以期对河源市生态控制线规划、生态功能区划、城市总体规划等编制中生态用地保护、土地的合理利用分析提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 河源市位于广东省东北部, 地处东江中上游、韩江上游和北江上游, 地理坐标为 114°14' ~ 115°36' E, 23°10' ~ 24°27' N, 总面积为 1.56 万 km², 地形以山地、丘陵为主, 大部分海拔较低, 坡度在 30°以下, 宜植面

积占 90% 以上。辖区内水资源丰富, 素有“粤东宝库”之称, 拥有华南第一大水库——新丰江水库, 东江自北向南斜穿而过, 流经河源段长 254 km, 占东江全长的 45.5%, 是东江下游地区的饮用水源地; 境内满目青翠, 绿水长流, 空气清静, 环境优美, 被誉为东江河畔的“绿色明珠”。

1.2 基础资料及研究方法 基础资料包括河源市域范围内的自然、地质、社会经济现状的文字和图件资料; 1:10 000 地形图; 2016 年度河源市 Landsat 8 (15 m × 15 m) 遥感影像; 30 m × 30 m 栅格的市域范围高程图以及经矢量化的行政边界、河流、水库等 GIS 工程文件。研究方法包括遥感解译、层次分析法(AHP)、多因子加权叠加算法、最大值方法、基于 GIS 地理信息技术的空间分析法。

1.3 生态敏感因子选择 影响生态敏感性的因子随研究区域和研究尺度而不同。欧阳志云等^[1]在对我国生态环境敏感性划分研究中选用了气候、地形、土壤、地表覆盖度等因子; 张伟等^[18]在山地城市生态敏感性研究中, 根据山地城市生态空间特征, 选取了坡度、高程、植被覆盖度、地质灾害、河流水库缓冲区 5 个因子。由于生态敏感性通常是生态系统受到多因子共同作用而呈现出的抗干扰能力, 往往需要定性和定量方法相结合来评价; 同时生态环境系统具有综合性和复杂性特点, 生态敏感性指标选取不宜过细, 否则难免交叉重叠^[19]。为减小指标之间的相关性, 并考虑指标的可获得性, 结合河源市山地地形地貌及河流特征, 根据区域特殊性、综合性、代表性原则, 从建设用地适宜性、水安全与雨洪安全、生物多样性安全 3 个方面选取高程、坡度、土地利用覆盖类型、主要河流缓冲区、饮用水源保护区、易涝区、植被覆盖指数、物种栖息地适宜性 8 个具有代表性的因子作为 AHP 二级指标层要素。

作者简介 褚艳玲(1981—), 女, 内蒙古呼和浩特人, 中级工程师, 硕士, 从事生态环境及环境管理研究。

收稿日期 2017-02-28

1.4 评价指标体系构建 依据国家有关生态功能区划工作生态敏感性指标体系分级标准,参照国家制定和颁布的有关环境标准、行业标准与设计标准,同时参考有关省区生态环境质量指标分级、评分标准,将单因子分为 5 个等级,其中 9 为极敏感、7 为高度敏感、5 为中度敏感、3 为轻度敏感和 1 为不敏感。各因子具体划分标准如下:

1.4.1 高程。河源市地形起伏多变,地势属于罗浮山脉,境内峰峦重叠,海拔千米以上的山峰有近 100 座,黄牛石顶海拔 1 430 m,为全市最高峰。因此在分级体系中高程以 100、150、300、500 m 作为分级界点。

1.4.2 坡度。河源市山地占 53%,丘陵占 36%,谷地和平原占 11%。山地、丘陵大部分海拔较低,坡度在 30°以下,结合《水土保持综合治理规划通则(GB/T 15772—2008)》中的分级标准,以 5°、10°、15°、20°作为分级界点。

1.4.3 土地覆盖类型。根据河源市国土资源二调数据,结合河源市实际用地特征,将有林地、其他林地、灌木林地、沼泽、风景名胜及特殊用地划分为极敏感区,河流水面、坑塘水面、水田、水浇地、内陆滩涂、其他草地、水利建设用地为高度敏感区,果园、旱地、茶园为中度敏感区,裸土地、采矿用地为轻度敏感区,其他建设用地为不敏感区。

1.4.4 主要河流缓冲区。河源市水资源丰富,有“深港水塔”之美誉,东江是河源市最大的河流,全市 87.5%的地域属于该流域。新丰江是东江水系最大支流,位于右岸,干流长 163 km。笔者结合河源市主要河流水系分布特征,分别将东江、新丰江等河道缓冲区域以 100、200、300、500 m 作为分界点。

1.4.5 饮用水源保护区。根据《河源市环境保护规划(2007—2020)》,将目前已划定和规划的一级水源保护区、二级水源保护区等纳入极敏感区。其缓冲区域分别以 100、200、300、400 m 作为分界点。

1.4.6 易涝区。河源市东西两侧为山体,东江两岸地势平坦,导致因地形形成的洼地数量多、分布广,当暴雨天气持续时间长时,容易因洼地溢流形成地表径流,从而汇流至东江流域,导致沿途洪涝灾害的发生;特别是东江沿岸建成区为洪涝灾害重灾区。该研究基于 DEM 数据,通过 GIS 平台径流模拟模型,模拟河源市汇流集雨区,即低洼地。并根据低洼地大小及形成地表径流的难易程度,将≥2 000 m²的洼地面积纳入极敏感区域。

1.4.7 植物覆盖指数。采用 NDVI 指数来揭示河源市植被生长状况的空间差异。NDVI 指数是表征绿色植被的相对丰度和活性的辐射量值,可简单地通过不同遥感光谱波段间的线性和非线性组合计算获得。该研究根据河源市植被特征,以 NDVI 指数分别为 10%、20%、30%、35%作为分界点。

1.4.8 物种栖息地适宜性。选取国家二级保护物种白鹭作为指示种。白鹭分布于我国南方、台湾及海南岛,河源市新丰江水库、东江沿岸、水稻田、溪流等地附近均有发现。通过距水源距离、海拔高度、距建成区距离 3 个指标,开展白鹭栖息地适宜性评价。根据河源市白鹭记录分布,结合该物种习性,将水源距离分别以 500、1 000 m 作为分界点,划分为 3 个

等级;海拔高度以 100 m 为分界点,划分为 2 个等级;距建成区距离分别以 1 000、2 000、4 000 m 为分界点,划分为 4 个等级。

1.5 指标因子权重确定 该研究根据各因子对影响生态敏感性的相对重要程度进行权重赋值,对生态敏感性影响较大的因子赋予较大的权重。为确保评价因子权重的科学性和准确性,运用层次分析法(AHP)对各层指标的相对重要性进行两两比较和判断,并保持判断矩阵的一致性,最后得出各个指标的权重值,具体步骤如下:

1.5.1 构造判断矩阵。判断矩阵表示针对上一层次中的某元素而言,判定该层次中各有关元素相对重要性的状况。AHP 法在对指标的相对重要性进行评判时,引入了九分位的比例标度,对元素进行两两比较(表 1)。

表 1 两两比较元素的 9 分制标度方法
Table 1 9 point scale method of two comparison elements

序号 No.	a_i 与 a_j 比较 Comparison between a_i and a_j	A_{ij} 的 Saaty 标度 Saaty scale of A_{ij}	意义 Significance
1	a_i 与 a_j 相比同等重要	1	$a_i = a_j$
2	a_i 与 a_j 相比稍微重要	3	$a_i = 3a_j$
3	a_i 与 a_j 相比相当重要	5	$a_i = 5a_j$
4	a_i 与 a_j 相比强烈重要	7	$a_i = 7a_j$
5	a_i 与 a_j 相比极端重要	9	$a_i = 9a_j$
6	a_i 与 a_j 的重要性在上述描述之间	2,4,6,8	—
7	a_i 与 a_j 的不重要性比较在上述描述之间	相应上述数的倒数	—

1.5.2 因子权重计算。按照标度方法,两两元素相互比较;为确保评价因子权重的科学性和准确性,运用层次分析法对各层指标的相对重要性进行两两比较、判断,最后得出各个指标的权重值及同一层各因素相对于上一层某因素相对重要性的权重。

在对各因子进行权重计算前,先进行一致性检验:CI = $\frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$;一致性比例:CR = CI/RI,其中 RI 为平均随机一致性指标(表 2)。根据计算,所有判断矩阵的 CR≤0.1,满足一致性检验。具体各因子权重分析结果见表 3。

2 结果与分析

2.1 建设用地适应性评价 基于地形及土地覆盖类型资料,采用多因子加权叠加算法,识别具有较高建设风险或建设成本极高的地区,禁止相关建设活动,保障建设安全与效率。具体评价方法如下:

表 2 平均随机一致性指标 RI 值
Table 2 RI value of average random consistency index

阶数 Order number(n)	RI	阶数 Order number(n)	RI
1	0	6	1.26
2	0	7	1.36
3	0.52	8	1.41
4	0.89	9	1.46
5	1.12		

表3 河源市生态敏感性综合评价指标体系标准赋值及权重

Table 3 Standard assignment and weight of ecological sensitivity evaluation index system in Heyuan City

1 级指标 1 grade index	2 级指标 2 level index	等级分类 Grade classification	评价价值 Evaluation value	权重 Weight
建设用地适宜性 Suitability of construction land	高程	<100 m	1	0.43
		≥100 ~ 150 m	3	
		≥150 ~ 300 m	5	
		≥300 ~ 500 m	7	
		≥500 m	9	
	坡度	<5 °	1	0.43
		≥5 ~ 10 °	3	
		≥10 ~ 15 °	5	
		≥15 ~ 20 °	7	
		≥20 °	9	
	土地覆盖类型	其他建设用地	1	0.14
		裸土地、采矿用地	3	
		果园、旱地、茶园	5	
		河流水面、坑塘水面、水田、水浇地、内陆滩涂、其他草地、水利建设用地	7	
		有林地、其他林地、灌木林地、沼泽、风景名胜及特殊用地	9	
水安全与雨洪安全 Safety of water and flood	主要河流缓冲区	≥500 m	1	0.10
		≥300 ~ 500 m	3	
		≥200 ~ 300 m	5	
		≥100 ~ 200 m	7	
		<100 m	9	
	饮用水源保护区	≥400 m	1	0.26
		≥300 ~ 400 m	3	
		≥200 ~ 300 m	5	
		≥100 ~ 200 m	7	
		<100 m	9	
生物多样性安全 Biodiversity security	易涝区 NDVI 指数	≥2 000 m ²	9	0.64
		≤10%	1	0.50
		10% ~ ≤20%	3	
		20% ~ ≤30%	5	
		30% ~ ≤35%	7	
		>35%	9	
白鹭栖息地适宜性 Habitat suitability of <i>Egratta</i>	距水源地距离	≥0 ~ 500 m	9	0.65
		500 ~ 1 000 m	7	
		>1 000 m	1	
	海拔高度	0 ~ ≤100 m	9	0.28
		>100 m	3	
	距建成区距离	>4 000 m	9	0.07
		2 000 ~ ≤4 000 m	5	
		1 000 ~ ≤2 000 m	3	
		0 ~ ≤1 000 m	1	

$$S_i = \sum_{i=1}^n B_i \cdot W_i \tag{1}$$

式中, W_i 表示生态因子 i 在区域建设用地适宜性评价中的权重; B_i 表示第 i 个生态因子敏感度评价价值; S_i 表示区域建设用地适宜性综合评价价值。

根据 GIS 空间叠加分析, 得到建设用地适宜性极敏感区面积为 3 304.76 km², 占区域总面积的 21.18%; 高敏感区面积为 3 739.41 km², 占 23.97%; 中敏感区面积为 2 340.50 km², 占 15.00%; 轻敏感区面积为 4 106.06 km², 占 26.32%; 不敏感区面积为 2 111.99 km², 占 13.54% (图 1)。其中, 极高敏感和高敏感主要分布于西北部连平县、和平县西北部、紫金县北部、龙川县南部等山地地带; 中敏感和轻敏感主要分布于和平县西南部、龙川县东部、紫金县东部等丘陵地带; 不敏感区域主要分布于江东新区—东源县南部—龙川县西南部谷地地带、中部东源县与连平县交界段平原地带、源城区平原地带, 呈现聚集带状和片状分布的特点。

2.2 水安全与雨洪安全评价 基于河流缓冲区、饮用水源

水源涵养分析及内涝点分析, 构建市域水安全与雨洪格局。经多因子加权叠加计算和 GIS 空间叠加分析, 得到水安全与雨洪安全极敏感区面积为 1 042.81 km², 占区域总面积的 6.68%; 高敏感区面积为 172.79 km², 占 1.11%; 中敏感区面积为 269.11 km², 占 1.72%; 轻敏感面积为 256.51 km², 占 1.64%; 不敏感区面积为 13 861.50 km², 占 88.88% (图 2)。其中极敏感和高敏感区主要分布于新丰江饮用水源保护区、东江沿岸、东江及新丰江沿岸低洼地等; 中敏感和轻敏感区主要分布于饮用水源保护和主要河流沿岸周边; 不敏感区域分布于除主要饮用水源、河流缓冲区以外区域。

2.3 生物多样性安全评价 基于植物覆盖指数和物种栖息地适应性评价, 构建生物多样性保护格局。经多因子加权叠加计算和 GIS 空间叠加分析, 得到生物多样性安全极敏感区面积为 670.52 km², 占区域总面积的 4.30%; 高敏感区面积为 2 610.08 km²; 占 16.73%; 中敏感区面积为 1 685.28 km², 占 10.80%; 轻敏感区面积为 10 362.45 km², 占 66.41%; 不

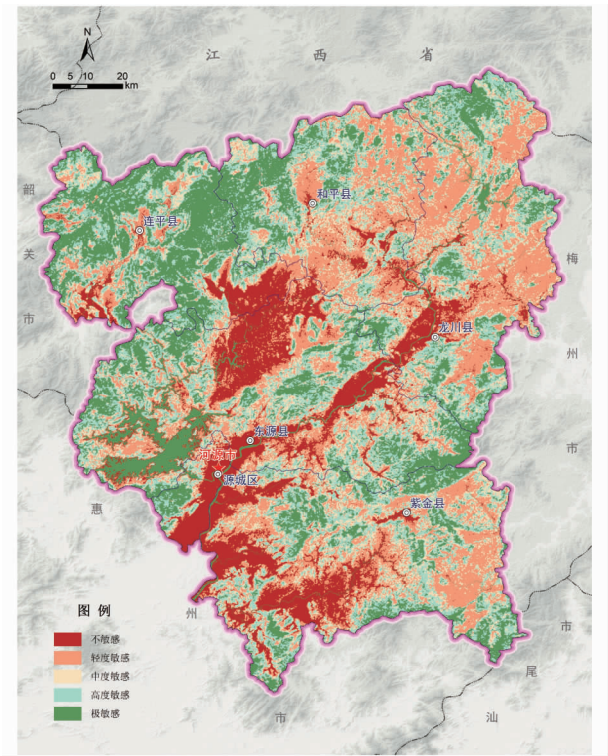


图1 河源市建设用地适宜性评价

Fig.1 Suitability evaluation of construction land in Heyuan City

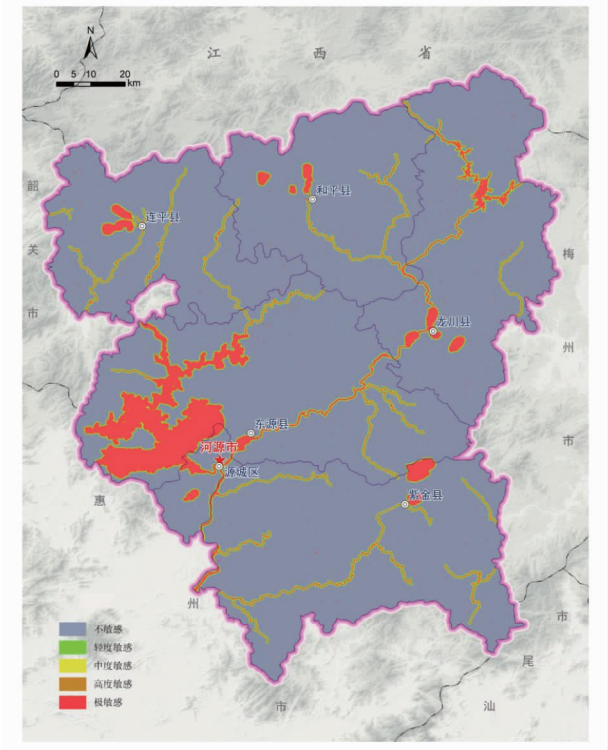


图2 河源市水安全与雨洪安全评价

Fig.2 Safety evaluation of water security and rainfall flood in Heyuan City

敏感区面积为 274.39 km², 占 1.76% (图 3)。其中, 极敏感和高敏感区域主要位于新丰江饮用水源保护、主要河流沿岸、中部山体等地带; 中敏感和轻敏感区全市各区、县均有分布; 不敏感区主要分布于中心城区、各县、乡镇等建成区

地带。

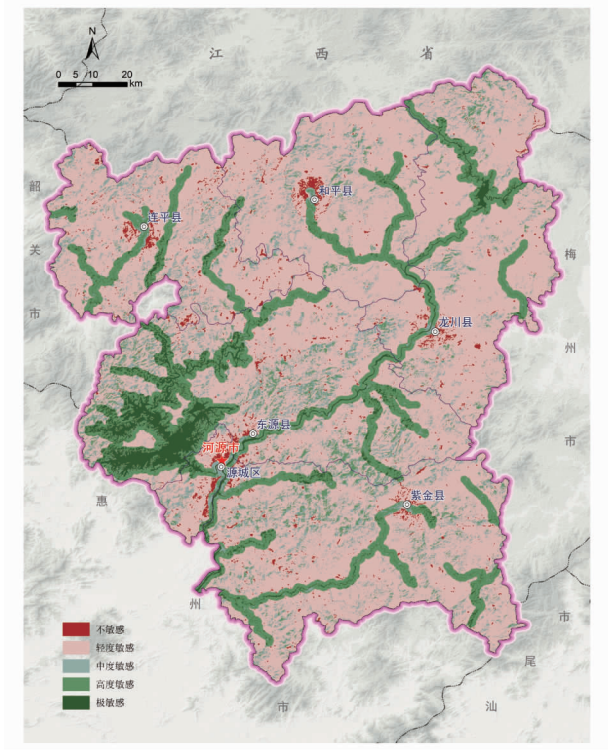


图3 河源市生物多样性安全综合评价

Fig.3 Comprehensive evaluation of biodiversity security in Heyuan City

2.4 生态敏感性综合评价 由于研究区各因子的生态敏感性存在一定程度的差异, 多个因子在进行一次加权求和之后再加权求和会在一定程度上导致单因子评价结果之间抵消或放大, 加之栅格叠加操作复杂、运算效率低, 从而影响区域综合生态敏感性的评价结果, 综合评价采用因子加权叠加的方法进行评价不太适合。因此, 该研究选用影响某地因子的最大值方法, 计算公式如下:

$$D_s = \text{Max}d_{si} \quad (2)$$

式中, D_s 为生态敏感性综合评价指数; d_{si} 为第 i 个因子敏感性指数。

将建设用地适宜性、水安全与雨洪安全和生物多样性 3 个一级影响因素的生态敏感性空间分布经 GIS 空间叠加再取最大值, 识别具有较高生态保护价值的生态要素, 得到河源市生态敏感性综合评价空间分布情况 (图 4)。经数据统计分析, 极敏感区面积为 4 053.48 km², 占区域总面积的 25.98%; 高敏感区面积为 5 279.99 km², 占 33.84%; 中敏感区面积为 1 994.59 km², 占 12.78%; 轻敏感区面积为 3 083.61 km², 占 19.76%; 不敏感区面积为 1 191.05 km², 占 7.63%。其中, 极敏感和高敏区主要分布于新港大叶山、新丰江水源林、新丰江饮用水源、桂山大陂、黄牛石、黄石坳、枫树坝、野猪嶂、白溪、鸡公嶂、仙女滩、乌禽嶂等自然保护区及东江、新丰江等主要河流沿岸; 中敏感和轻敏感主要分布于和平县、龙川县、紫金县等丘陵地带; 不敏感区主要分布于东源县与连平县交界、东江及新丰江沿岸、紫金县秋香江沿岸等平原带。

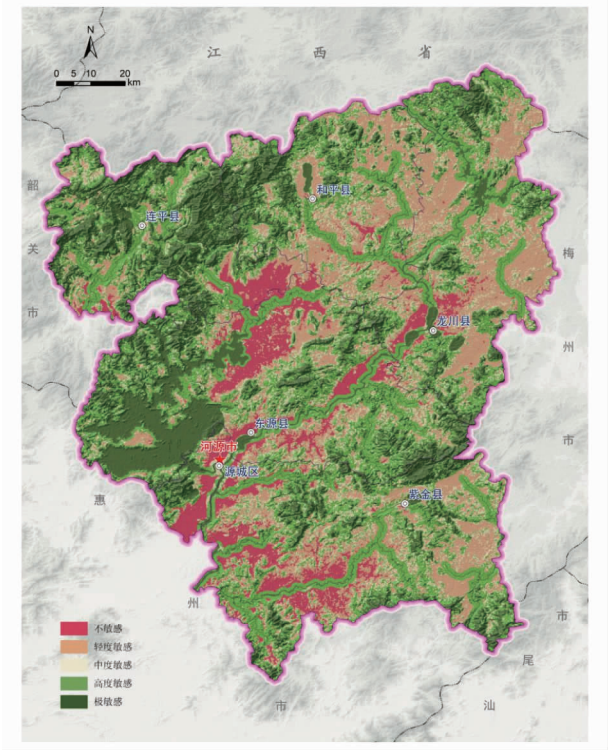


图4 河源市生态敏感性综合评价

Fig. 4 Ecological sensitivity evaluation of Heyuan City

3 讨论与结论

根据《河源市土地利用规划》(2006—2020 年)、《河源市城市总体规划》(2008—2020 年)等,河源市禁止开发区面积为 3 419.94~8 415.00 km²;截至 2020 年,建设用地控制规模在 958~970 km²(表 4、5)。因此,通过河源市生态敏感性综合评价分析,结合河源市相关规划,考虑未来城市发展弹性,建议将极敏感区域和高敏感区域纳入禁止开发区,面积为 9 333.47 km²,占市域面积为 59.82%;中敏感和轻敏感区域纳入限制开发区,面积为 5 078.20 km²,占 32.55%;不敏感区域纳入优先开发区,面积 1 191.05 km²,占 7.63%。禁止开发区属于脆弱的生态功能区,系统稳定性极差,易受人为破坏且很难恢复,该类区域应重点保护;限制开发区为较为脆弱的生态功能区,对外界干扰活动具有一定的抵抗能力,较易遭受人为干扰,该类区域可以作为发展过渡区,可在科学指

表 4 《河源市城市总体规划》(2006—2020 年)空间管控类型及面积
Table 4 Types and area of space management of “Heyuan urban master plan” (2006–2020)

类型 Types	面积 Area km ²	建设用地 目标控制 Construction land control km ²	常住人口 目标控制 Resident population control//万人
允许建设区 Permitted construction area	479.07	970.00	119.47
有条件建设区 Condi- tional construction area	34.94		
限制建设区 Restricted construction area	11 708.03		
禁止建设区 Prohibited construction area	3 419.94		

表 5 《河源市土地利用规划》(2008—2020 年)空间管控类型及面积
Table 5 Types and area of “Heyuan land use planning” (2008–2020)

类型 Types	面积 Area km ²	建设用地 目标控制 Construction land control km ²	常住人口 目标控制 Resident population control//万人
优先发展区 Priority de- velopment area	153.00	958.00	128.00
潜力增长区 Potential growth area	122.00		
限制开发区 Restricted development zone	6 952.00		
禁止开发区 Prohibited zone	8 415.00		

导下进行适度的开发利用;优先开发区系统稳定性较好,外部的干扰对生态环境的影响不大,可进行强度较大的开发利用。

该研究在层次分析法(AHP)、GIS 空间叠加法的基础上,采用多因子加权叠加算法和取最大值法相结合的方法,选取体现河源市生态本底特色的 3 个一级指标共 8 个单因子对该地区生态敏感性进行评价分析,操作方法简单高效,避免了栅格叠加操作复杂、运算效率低等缺点,评价结果符合相关规划控制目标,可作为河源市生态控制线划定、生态功能区划、生态安全格局构建、环境保护规划等依据。

参考文献

[1] 欧阳志云,王效科,苗鸿. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究[J]. 生态学报,2000,20(1):9–12.

[2] 刘康,欧阳志云,王效科,等. 甘肃省生态环境敏感性评价及其空间分布[J]. 生态学报,2003,23(12):2711–2718.

[3] 林涓涓,潘文斌. 基于 GIS 的流域生态敏感性评价及其区划方法研究[J]. 安全与环境工程,2005,12(2):23–26.

[4] 余济云,周丹华,刘照程,等. 基于 GIS 的万泉河流域生态敏感性分析[J]. 中国农学通报,2002,28(10):69–73.

[5] 陶星名,张建英,王宇峰,等. 杭州市生态敏感性及其空间分布[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2006,32(1):27–30.

[6] 颜磊,许学云,谢正磊,等. 北京市域生态敏感性综合评价[J]. 生态学报,2009,29(6):3117–3125.

[7] 张伟,齐童,韩斌,等. 基于 GIS 的营口市生态旅游资源敏感性评价[J]. 首都师范大学学报(自然科学版),2010,31(1):74–79.

[8] 曹建军,刘永娟. GIS 支持下上海城市生态敏感性分析[J]. 应用生态学报,2010,21(7):1805–1812.

[9] 单勇兵,李志江,马晓冬. 基于 GIS 的徐州生态敏感性分析[J]. 水土保持研究,2011,8(4):244–247.

[10] 尹海伟,徐建刚,陈昌勇,等. 基于 GIS 的吴江东部地区生态敏感性分析[J]. 地理科学,2006,26(1):64–69.

[11] 汪军英,达良俊,由文辉. 城镇生态敏感区的划分及建设途径:以上海市航头镇为例[J]. 城市问题,2007(1):52–55.

[12] 徐广才,康慕谊,赵从举,等. 阜康市生态敏感性评价研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2007,43(1):88–92.

[13] 范建红,金利霞,金丹华. 经济发达地区土地利用变化对生态环境的影响:以佛山市南海区为例[J]. 热带地理,2008,28(1):58–62.

[14] 朱光明,王士君,贾建生,等. 基于生态敏感性评价的城市土地利用模式研究:以长春净月经济开发区为例[J]. 人文地理,2011(5):71–75.

[15] 廖兵,魏康霞,喻杰,等. 基于 GIS 与 RS 的工业园区生态敏感性分析:以南昌经济技术开发区为例[J]. 江西科学,2012,30(1):58–60.

[16] 赵晓慧,严力蛟. 生态敏感性的灰色关联投影评价模型及其应用[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2006,32(3):341–345.

[17] 韩贵锋,赵珂,袁兴中,等. 基于空间分析的山地生态敏感性评价:以四川省万源市为例[J]. 山地学报,2008,26(5):531–537.

[18] 张伟,王家桌,任希岩,等. 基于 GIS 的山地城市生态敏感性分析研究[J]. 水土保持研究,2013,20(3):44–47.

[19] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社,2002.