

# 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

韩贵锋<sup>1</sup>, 赵珂<sup>1</sup>, 袁兴中<sup>2\*</sup>, 孙荣<sup>2</sup>

(1. 重庆大学建筑城规学院, 重庆 400045 2. 重庆大学资源及环境科学学院, 重庆 400044)

**摘 要:** 以典型的秦巴山地城市万源市为例, 根据山地生态系统特征, 选取土地覆盖类型、高程、地质灾害、生境类型、水土流失、坡度、景观破碎度和生物多样性等 8 个因子, 划分为极敏感、敏感、低敏感和不敏感 4 个等级, 利用 AHP 确定因子权重, 结合 GIS 空间分析技术, 得到综合的生态敏感性空间分布, 4 个敏感级的面积比分别为 8.44%、44.50%、38.31%、8.75%。根据各个因子对生态环境贡献的大小, 得到了限制性敏感因子在空间上的分布。生态敏感性分析为城市规划和城市发展用地选择提供了科学依据, 减小了城市发展对生态系统破坏的风险。

**关键词:** 山地; 生态敏感性; 空间分析; AHP; 万源市

**中图分类号:** X171.1

**文献标识码:** A

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<sup>[1]</sup>。在自然状态下, 各种生态过程维持着一种相对稳定的耦合关系, 保证着生态系统的相对稳定, 而当外界干扰超过一定限度时, 这种耦合关系将被打破, 某些生态过程会趁机膨胀, 导致严重的生态问题。事实上, 生态敏感性就是生态系统对因内在和外在因素综合作用引起环境变化的响应强弱程度<sup>[2,3]</sup>。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。目前对生态敏感性的研究多集中在某一生态问题或国家和省级尺度上进行<sup>[4-7]</sup>, 缺乏对多种生态环境问题的综合研究<sup>[8]</sup>, 对地级和县级甚至更小尺度的研究极为少见<sup>[9]</sup>。由于地域之间的自然生态本底和社会经济发展水平差异较大, 表现出的生态环境问题各有不同; 评价方法正处于探索与发展阶段, 指标体系选择

存在较大的随意性, 没有形成统一的标准。本文在县级尺度上, 以典型山地城市——四川省万源市为例, 在借鉴相关研究成果的基础上, 加入景观破碎度和生物多样性因子, 探索山地生态敏感性评价的指标体系, 分析区域综合性生态敏感性, 并判断限制性因子, 为城市规划用地选择, 主体功能区划提供依据。

## 1 数据与研究方法

### 1.1 研究地区

万源市介于 31°39'~32°20'N, 107°28'~108°31'E 之间, 地处四川省东北边境的川、陕、渝三省(市)结合部, 是大巴山中段腹心地带典型的山地城市, 属于中国南北气候的过渡区、嘉陵江和汉江的分水岭。全市幅员面积 4 065 km<sup>2</sup>, 2005 年总人口 56.9 万人, GDP 为 28.51 亿元, 全市以农业为主, 工

收稿日期 (Received date): 2007-11-30; 改回日期 (Accepted): 2008-04-28.

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金资助项目 (40301015), 重庆大学人才引进科研启动项目 (0903005104852), 万源市城市总体规划 (2007-2020) [Sponsored by the National Science Foundation of China (No. 40301015), Research Initiate Foundation of Chongqing University (0903005104852) and Master Planning of Wanyuan City (2007-2020)]

作者简介 (Biography): 韩贵锋 (1975-), 男, 陕西西乡人, 博士/博士后, 讲师, 主要从事植被生态遥感和 GIS 在城市规划中的应用研究, 已发表论文 10 余篇。[Han Guifeng (1975-), male, Ph.D., postdoctor lecturer mainly engaged in nutritional vegetation ecology remote sensing and GIS application in urbanization.] Tel 15922565276; E-mail newseaboy@163.com

\* 通讯作者 (Corresponding Author), E-mail xzyuan63@yahoo.com.cn

业和服务业主要集中在太平、官渡、青花和白沙四镇。随着人口的快速增长和社会经济高速发展,人为活动对生态环境影响的强度在增加,范围在扩大。天然林面积逐年下降,生物多样性保育功能变差;山区土壤侵蚀严重,加之陡坡耕种致使城周山地裸露斑块增多,青山白化现象突出,频繁诱发滑坡、泥石流和坍塌等山地地质灾害。

### 1.2 数据来源与处理

太平、青花、官渡和白沙地区 Quick 影像 (2006-08-27), 万源市 TM 影像 (2006-04-10), 轨道号 p127r38 1:5万地形图; 万源市地质灾害防治图; 万源市土壤侵蚀分布图。使用 ERDAS 8.7对影像进行辐射校正, 大气校正和去云处理, 并利用地形图进行几何精纠正, 误差小于 1个像元。数字化 1:5万地形图, 生成 DEM, 提取坡度。将地质灾害图和土壤侵蚀图扫描, 利用 ArcGIS 9.0的 Georeferencing 模块进行几何校正, 并数字化。根据典型土地覆盖类型的样方调查, 计算香农-维纳生物多样性指数, 再参照生态环境质量评价方法及分级标准, 推算整个万源市生物多样性。将矢量化数据栅格化, 并将所有栅格数据重采样, 像元尺寸统一为 10m。

### 1.3 研究方法

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结合来评价, 本文使用 AHP方法。由于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<sup>[10]</sup>。为减小指标之

间的相关性, 并考虑数据的可获得性, AHP只包括目标层和指标层。目标层为综合生态敏感性。根据万源市具备的山地地形地貌及河流沟谷特征, 并依据主导因素、代表性和综合性原则, 选取 8个生态环境因子作为 AHP指标层要素, 土地覆盖因子, 高程因子, 地质灾害因子, 生境类型因子, 水土流失因子, 坡度因子, 景观破碎度, 生物多样性因子。其中, 景观破碎度是将万源市地表覆盖分为旱地、水田、林地、灌木林地、草地、农村聚落、水体、道路、城市建设用地、城市绿地、未利用地等 11类景观类型, 然后在 Fragstat3.3中计算得到, 移动窗口为 13×13像元。

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, 将单因子分为极敏感、敏感、低敏感和不敏感四个等级 (表 1), 然后利用专家打分法 (德尔斐法) (7分制) 构造判断矩阵, 获得 8个因子的权重, 在 ArcGIS 9.0的 Spatial Analysis 模块中计算综合生态敏感度。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因子生态敏感性

单因子的敏感性的空间分布 (图 1, 表 2) 显示, 有林地和灌木林地是整个生态系统的构成主体, 具有较大的生态服务价值, 发挥重要的生态功能, 是极敏感的用地类型; 河流、水库、河漫滩以及草地属于

表 1 万源市生态敏感性评价因子及其分级  
Table 1 Assessment factors and grades of ecological sensitivity in Wanyuan city

评价因子	生态敏感性分级			
	极敏感	敏感	低敏感	不敏感
土地覆盖类型	有林地、 灌木林地	河流、水库、河 漫滩、草地	公共绿地、裸地、特殊 用地、旱地、水田	各种建设用地
高程	> 800 m	750 ~ 800 m	700 ~ 750 m	< 700 m
地质灾害	重点治理区	次重点治理区	一般治理区	一般治理区
生境类型	自然保护区、森林公园、 地质公园、风景名胜區	冲沟、山脊、拟建设的 绿地休闲空间	其他一般区域	城市建成区
水土流失	剧烈、极强度、强度	中度	轻度	微度
坡度	> 35°	25° ~ 35°	15° ~ 25°	0° ~ 15°
景观破碎度	> 0.45	0.3 ~ 0.45	0.15 ~ 0.3	0 ~ 0.15
生物多样性	> 2	1.0 ~ 2	0.5 ~ 1.0	0 ~ 0.5

敏感的用地类型。山地景观极其丰富,山峦叠嶂,错落有致,植被的垂直地带性分布异常明显。800 m 以上的极敏感地区占 70.78%;700 m 以下地区均为沟谷地带,城市建设和农村居民点相对集中,仅占 15.91%。地质结构复杂,地形陡峻,沟谷常见呈“V”型发育,属中山、低山切割地貌,地质灾害容易发生。市内地质灾害有滑坡、泥石流、崩塌、地面塌陷及地面裂缝,其中以滑坡和崩塌为主。截止 2004 年底,全市列入地质灾害预案点 274 处,其中滑坡 235 处、崩塌 14 处、泥石流 7 处、地面塌陷 9 处、地面裂缝 9 处,分布在全市 53 个乡镇,主要发生在大沙、青花、沙滩、河口、草坝、临河、大竹镇、白果等乡镇。

万源市境内自然保护区、森林公园、地质公园、风景名胜、河源头区、长江上游生态防护林保护区、水源涵养区以及其他实施抢救性保护的地区,对维系整个区域生态系统健康和平衡有至关重要的作用<sup>[11]</sup>,将其划为极敏感区,占总面积的 20.46%;冲沟、山脊、25℃以上退耕地和拟建设的绿地休闲空间等需要保护性开发的地区确定为敏感区,占 33.7%。其他区域对应分别划归为低敏感区和 not 敏感区。由于山地面积大,海拔高、坡度大,雨量充沛,降水强度大,暴雨和地表水冲刷剥蚀、侵蚀作用强,加之陡坡耕种,工程开挖对山体的切割,水土流失十分明显,是生态建设面临的主要问题。

在景观水平上,生态系统对外界干扰响应的灵敏程度与景观类型和景观破碎程度密切相关,破碎度越大,说明生境处在退化阶段,对外界的人为影响

表现出更高的灵敏度。例如,在城市区域,自然生态系统的结构和功能几乎丧失殆尽,城市生态系统对人为排放污染物的敏感程度较高,故而环境问题愈演愈烈。根据景观类型分类,计算出景观破碎度空间分布(见图 1),在河谷人口密集地区景观破碎度较大,而在高海拔且人为干扰较小的地区,破碎度较小。景观破碎度对应的极敏感、敏感、低敏感和 not 敏感区所占面积比例分别为 0.25%,0.35%,78.51%,20.89%。

由于秦巴山区是我国天然的物种基因库和重要的生态功能区,万源市处于其腹心地带,是中国南北气候的分界线,南北气候交汇过渡,水热条件好,生物资源丰富,享有“万宝之源”的美誉。2005 年,全市森林覆盖率达 50.5%,植被垂直地带性分布明显,生物多样性丰富。生物多样性极敏感、敏感、低敏感和 not 敏感区所占的面积比例分别为 35.39%,41.53%,17.86%,5.22%,保护生物多样性的任务十分艰巨。

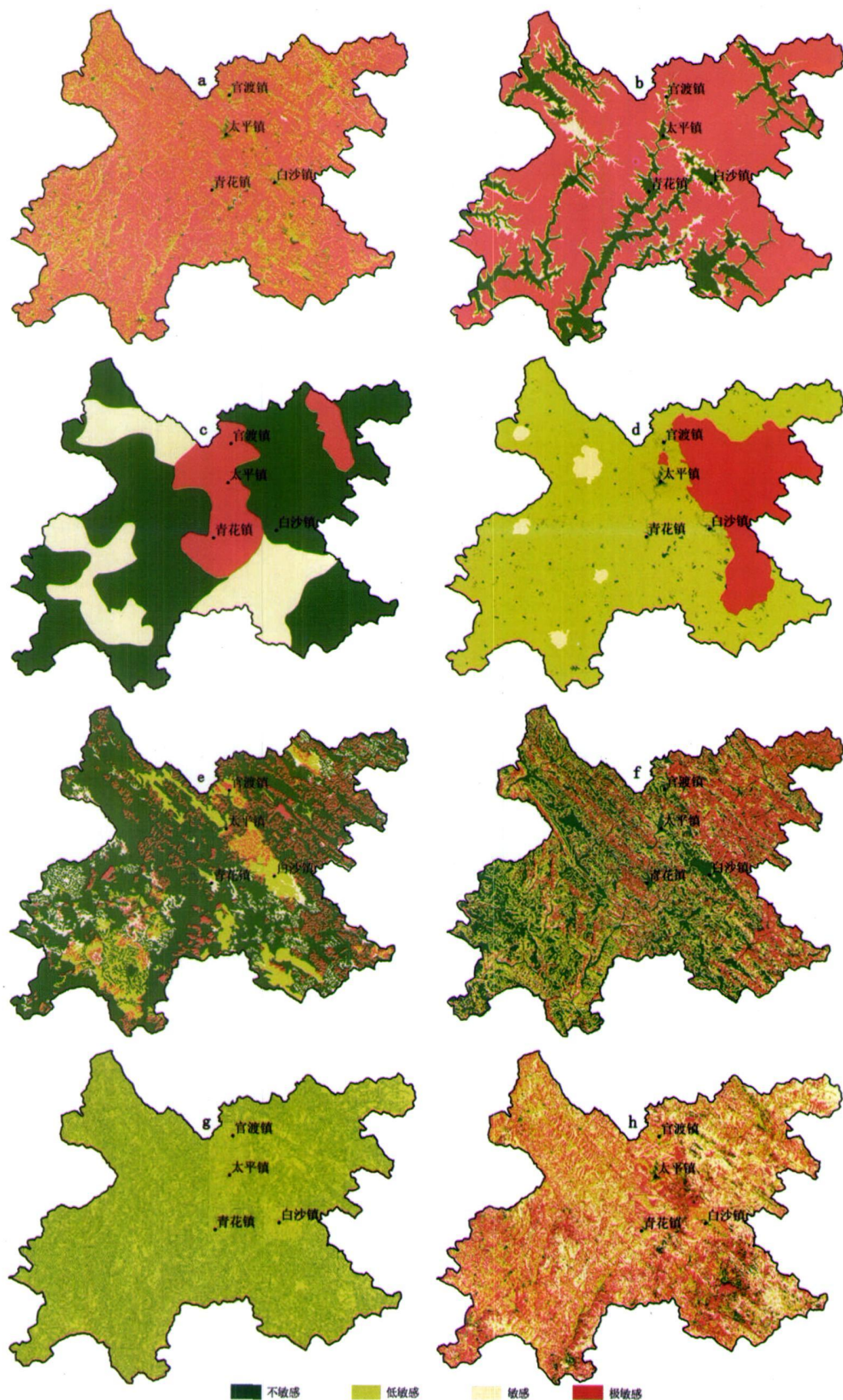
2.2 综合生态敏感性评价

2.2.1 生态敏感因子的权重确定

选择 30 位生态学、环境学、土地科学、地质学、地理学、城市规划学领域的专家和地方专家,两两比较单因子对生态环境的重要性,按照 7 分制进行打分。相对很重要时赋值 7,相反赋值 1/7;相对重要时赋值 5,相反赋值 1/5;相对比较重要时赋值 3,相反赋值 1/3;同等重要时赋值 1。统计多个专家的打分方案,取众数分值,得到 8×8 判断矩阵。该矩阵的最大特征根为 8.94。将最大特征根和  $n=8$  代入

表 2 各因子的敏感性分级面积  
Table 2 The area of each ecological sensitivity grade of each assessment factor

因子	极敏感		敏感		低敏感		不敏感	
	面积 ( km <sup>2</sup> )	面积比 ( % )	面积 ( km <sup>2</sup> )	面积比 ( % )	面积 ( km <sup>2</sup> )	面积比 ( % )	面积 ( km <sup>2</sup> )	面积比 ( % )
土地覆盖类型	2 943.06	72.40	250.00	6.15	828.85	20.39	43.09	1.06
高程	2 877.21	70.78	382.11	9.40	158.94	3.91	646.74	15.91
地质灾害	556.91	13.70	923.97	22.73	1 348.36	33.17	1 235.76	30.40
生境类型	831.29	20.45	1 369.91	33.70	1 829.66	45.01	34.15	0.84
水土流失	587.80	14.46	334.14	8.22	515.04	12.67	2 628.02	64.65
坡度	969.50	23.85	847.55	20.85	590.24	14.52	1 657.71	40.78
景观破碎度	10.02	0.25	14.31	0.35	3 191.31	78.51	849.37	20.89
生物多样性	1 032.10	25.39	1 688.19	41.53	726.01	17.86	618.69	15.22



a 土地覆盖 land cover, b 高程 elevation, c 地质灾害 geology disasters, d 生境类型 habitat, e 水土流失 soil and water loss, f 坡度 slope, g 景观破碎度 landscape fragmental index, h 生物多样性 biodiversity

图 1 单因子敏感性空间分布

Fig. 1. The spatial distribution of sensitivity of single factor.

一致性检验公式  $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$ , 得到  $CI = 0.13$ 。8 阶方阵在理论上的平均随机一致性指标  $RI = 1.41$ 。判断矩阵的随机一致性比  $CR = CI / RI$ 。即  $CR = 0.13 / 1.41 = 0.092 < 0.10$ , 故认为判断矩阵具有令人满意的一致性。进而求出最大特征根对应的特征向量, 并经过归一化处理, 得到单因子的重要性权重  $W = [0.037\ 8\ 0.291\ 8\ 0.062\ 8\ 0.213\ 4\ 0.068\ 7\ 0.127\ 8\ 0.075\ 0\ 0.122\ 6]$ 。

2.2.2 综合生态敏感性区划

用百分制对四个敏感等级打分(极敏感, 100 分; 敏感, 75 分; 低敏感, 50 分; 不敏感, 25 分), 然后按照各自的权重在 ArcGIS 中叠加处理, 得到的综合敏感性分区。叠加产生的综合敏感区的得分值为 28.75~115.01, 为了便于比较和图形显示, 将综合敏感性值线性拉伸到 0~100, 然后再进行重新分级, 分级标准如表 3。综合敏感性空间分布如图 2。极敏感区面积相对较小, 仅占总面积的 8.44%, 主要集中分布在花萼山自然保护区、巴台山国家地质公园、大竹河、龙潭河、烟霞山等风景名胜區, 以及高海拔、高坡度和地质灾害易发区。不敏感区面积同样较小, 仅占总面积的 8.73%, 分散分布在沟谷地带和坡度较缓的平台地区, 是目前城市建设和居民点集中分布地区。敏感区和低敏感区占万源市绝大部分面积, 共占 82.81%, 主要为低山和中山地带的林地和农业用地。

表 3 综合生态敏感性评价分级表

Table 3 Summary grade of ecological sensitivity in Wanyuan city

敏感性等级	极敏感	敏感	低敏感	不敏感
分级值 S	$100 \geq S > 75$	$75 \geq S > 50$	$50 \geq S > 25$	$25 \geq S > 0$
面积比例 (%)	8.44	44.65	38.18	8.73

2.3 限制性敏感因子识别

在空间上, 单因子对综合生态敏感性的贡献不同。每一个像元上, 对综合生态敏感性贡献最大的因子被确定为限制性敏感因子, 从而直接为土地利用、资源开发和社会经济活动提供参照。将每个像元上的单因子乘以相应的权重, 并求其最大值所对应的敏感因子则为限制性敏感因子, 空间分布如图 3。万源市是典型的山地城市, 高程在土地利用类型、生物多样性、景观多样性、水土流失及地质灾害等方面起重要作用, 因此以高程为限制性生态敏感

因子的地区, 占总面的 84.02%, 广泛分布于除沟谷以外的丘陵和山区。生境类型作为限制性生态敏感因子, 占总面积 9.32%, 主要分布在花萼山国家级自然保护区和巴台山国家地质公园以及其他风景名胜區, 这些特殊的生境类型应该受到严格保护。生物多样性作为限制性因子, 占总面积的 5.10%, 主要分布在城乡交错地带, 受到人为干扰和影响较大。坡度和景观破碎度分别作为限制性因子的面积较小, 比例分别为 1.53% 和 0.03%, 主要分布在低海拔地区和居民点较集中的河谷地带。

3 结语

3.1 结论

以典型的山地城市万源市为例, 选取 8 个有代表性的生态环境因子, 在 GIS 空间分析技术的支持下, 依据 AHP 方法构建生态敏感性评价指标体系, 计算出万源市极敏感、敏感、低敏感、不敏感区占总面积的比例分别为 8.44%、44.50%、38.31%、8.75%。极敏感区主要分布在自然保护区、风景名胜區, 以及高海拔、高坡度和地质灾害易发区, 为重点保护区域, 禁止开发活动; 不敏感区主要分布在沟谷地带和坡度较缓的平台地区, 是城乡居民点集中区域, 也是将来城市发展的主要拓展区域。敏感区和低敏感区面积较大, 主要为林地和农业用地, 对开发活动要适当限制和优化。作为典型的山地城市, 高程是最突出的生态环境因子, 对生态环境的贡献最大, 作为限制性敏感因子, 在空间上广泛分布, 面积比例高达 84.02%。将生态敏感性分析和建设用地适宜性分析结合, 能有效指导城市规划, 从而减小城市发展对生态破坏的风险。

3.2 讨论

目前, 生态敏感性评价的理论和方法并不成熟, 在国家、省、县等尺度上, 亟待建立相对统一的生态敏感性评价指标体系, 形成生态敏感性评价技术导则, 客观指导在不同自然本底、不同发展水平下、不同尺度下的生态敏感性评价, 从而形成由国家到地方(分辨率由粗到细)的生态敏感性分区标准, 不但使得地区间具有较好的可比性, 更重要的是对不同层次的主体功能区划分、生态功能区划分、城市总体规划提供科学合理的依据。



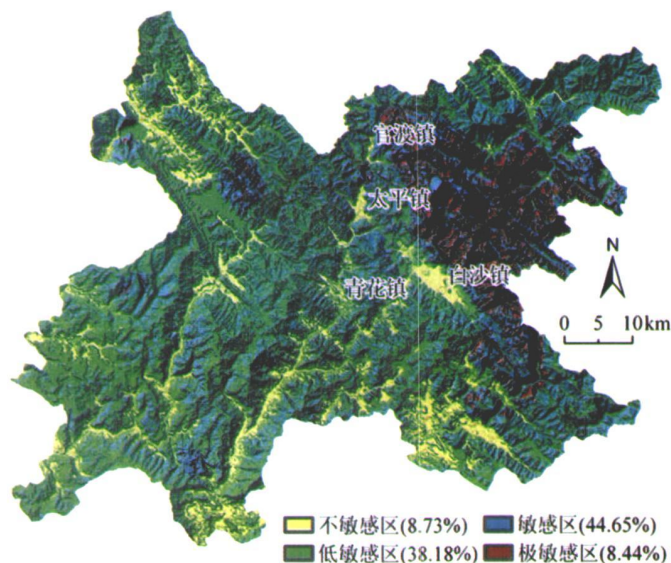


图2 单因子敏感性空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of ecological sensitivity in Wanyuan city

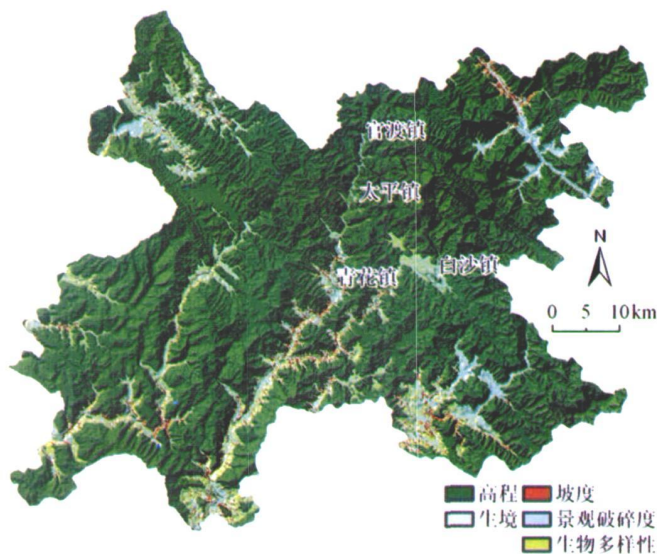


图3 限制性的生态敏感因子空间分布

Fig. 3 The spatial distribution of restrictive ecological sensitivity factor

## 参考文献 (References)

- [1] Ouyang Zhiyun, Wang Xiaoke, Miao Hong. China's eco-environmental sensitivity and its spatial heterogeneity [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(1): 9~12 [欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国生态敏感性及其区域差异规律研究 [J]. 生态学报, 2000, 20(1): 9~12]
- [2] Nilsson C N, Grelsson G. The fragility of ecosystems: a review [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1995, 32: 677~692
- [3] Rossi P, Pecci A, Amadio V, et al. Coupling indicators of ecological value and ecological sensitivity with indicators of demographic pressure in the demarcation of new areas to be protected: the case of the Olmetto Pavese and the Ligurian-Emilian Apennine area (Italy) [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2008, 85: 12~26
- [4] Rodrigues E, Vila L. Ecological sensitivity atlas of Argentine continental shelf [J]. *International Hydrographic Review*, 1992, 69: 47~53
- [5] Yang Zhifeng, Xu Qiao, He Mengchang, et al. Analysis of city eco-sensitivity [J]. *China Environmental Science*, 2002, 22(4): 360~364 [杨志峰, 徐俏, 何孟常, 等. 城市生态敏感性分析 [J]. 中国环境科学, 2002, 22(4): 360~364]
- [6] Wang Xiaoke, Ouyang Zhiyun, Xiao Han, et al. Distribution and division of sensitivity to water-caused soil loss in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(1): 14~19 [王效科, 欧阳志云, 肖寒, 等. 中国水土流失敏感性分布规律及其区划研究 [J]. 生态学报, 2001, 21(1): 14~19]

- [ 7 ] He Q iuhuan, Zhang Dan, Chen Chaomeng *et al.* Eco-environmental sensitivity evaluation of central Guizhou province based on GIS technique[ J]. *Chinese Journal Ecology*, 2007, 26( 3): 413~ 417 [贺秋华, 张丹, 陈朝猛, 等. GIS支持下的黔中地区生态环境敏感性评估[ J]. 生态学杂志, 2007, 26( 3): 413~ 417]
- [ 8 ] Zhang Zhihua, Xu Jianhua, Han Guifeng. Ecological sensitive area division indicator system[ J]. *Ecologic Science*, 2007, 26( 1): 79~ 83[张治华, 徐建华, 韩贵锋. 生态敏感区划分指标体系研究[ J]. 生态科学, 2007, 26( 1): 79~ 83]
- [ 9 ] Liu Kang, Ouyang Zhiyun, Wang Xiaoke, *et al.* Eco-environmental sensitivity and its spatial distribution in Gansu Province[ J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23( 12): 2711~ 2718[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]
- [ 10 ] Xu Jianhua. Mathematical Methods in Contemporary Geography (Second edition) [ M ]. Beijing: High Education Press, 2002: 224[徐建华. 现代地理学中的数学方法(第二版)[ M ]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 224]
- [ 11 ] Yuan Xingzhong, Liu Hong, Lu Jianjian. Assessment of ecosystem health-concept framework and indicator selection[ J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12( 4): 627~ 629[袁兴中, 刘红, 陆健健. 生态系统健康评价: 概念构架与指标选择[ J]. 应用生态学报, 2001, 12( 4): 627~ 629]

## Evaluation of Ecological Sensitivity in Mountain Area Based on Spatial Analysis

——A Case Study of Wanyuan City in Sichuan Province

HAN Guifeng<sup>1</sup>, ZHAO Ke<sup>1</sup>, YUAN Xingzhong<sup>2</sup>, SUN Rong<sup>2</sup>

( 1. College of Architecture and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. College of Resource and Environment, Chongqing University, Chongqing 400044, China )

**Abstract** Taking a typical mountain city (Wanyuan city) in Qinba Mountain area for example, eight sensitive factors for eco-environment are selected based on literatures and characteristic of mountain landscape such as land cover, elevation, geology disaster, habitat type, water and soil loss, slope, landscape fragmental index and biodiversity. Firstly, sensitive factors are classified into four grades: extreme sensitivity, sensitivity, low sensitivity and no sensitivity. Then combined Analytic Hierarchy Process (AHP) and spatial analysis in Geographical Information System (GIS), overall ecological sensitivity is firstly calculated and displayed on space. The area percentages of extreme sensitivity, sensitivity, low sensitivity and no sensitivity are 8.44%, 44.50%, 38.31% and 8.75% respectively. Area with extreme sensitivity mainly distributes in nature protected area, scenic spots and other area with higher elevation, higher slope and high risk of geology disaster, where any exploitive activity should be forbidden. Area with no sensitivity, however, scatters in valley and platform as expanded area of the city in future. Other area with sensitivity and low sensitivity hold total area more than eighty percent of Wanyuan city, in which anthropic activity should be reasonably limited and optimized. Furthermore, Restrictive ecological sensitivity factor in every pixel is determined based on contribution of sensitivity factor to eco-environment. Ecological sensitivity analysis can present a scientific evidence for urban planning and land use and can reduce the risk of ecosystem damage.

**Key words** mountain; ecological sensitivity; spatial analysis; AHP; Wanyuan city