

# 青藏铁路沿线生态环境敏感性评价 GIS 模型\*

董仁才<sup>1,2\*\*</sup> 孙晓泽<sup>1</sup> 李春明<sup>1</sup> 刘涛<sup>2</sup> 苟亚青<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院城市环境研究所, 城市环境与健康重点实验室, 福建厦门 361021; <sup>2</sup>中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

**摘要** GIS 强大的空间分析功能对生态环境敏感性评价过程中的空间要素叠置分析具有明显优势。本文通过对传统生态环境敏感性评价方法的系统分析和逻辑完善, 采用 ArcGIS 平台的 Model Builder 工具封装了可以进行多循环生态环境敏感性评价 GIS 模块; 并选取青藏铁路沿线部分路段, 测试了从环境问题分析、指标与权重确立、空间数据预处理到 GIS 模型运行的全过程。结果表明: 在多重生态与环境要素累加效应影响下, 青藏铁路生物通道的两侧高度敏感, 且多个敏感区连成一个线性敏感带, 铁路沿线生态环境敏感性区域的带状空间格局特征突出; 通过与大量地面调查的评估结果相比较, 验证了该 GIS 模型判断生态敏感区域的科学性和可靠性, 从而为线性工程的生态环境敏感性快速评价提供技术支撑。

**关键词** 生态环境敏感性; 生物通道; 缓冲区; 青藏高原

**中图分类号** S731.8 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)9-2093-06

**GIS model for eco-environmental sensitivity assessment of the areas along Qinghai-Tibetan railway.** DONG Ren-cai<sup>1,2\*\*</sup>, SUN Xiao-ze<sup>1</sup>, LI Chun-ming<sup>1</sup>, LIU Tao<sup>2</sup>, GOU Ya-qing<sup>2</sup> (<sup>1</sup>*Institute of Urban Environment, Key Lab of Urban Environmental and Health, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, Fujian, China*; <sup>2</sup>*State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(9): 2093-2098.

**Abstract:** GIS has a substantial advantage for the spatial overlay analysis in eco-environmental sensitivity assessment. In this paper, the traditional eco-environmental sensitivity assessment methodology was logically improved by adopting ArcGIS Model Builder to incorporate GIS modules capable of multi-cycle eco-environmental sensitivity assessment, and the assessment capacity of the improved methodology was tested in Qinghai-Tibetan railway area. By identifying environmental problems, determining indices and weights, and preprocessing spatial data, the GIS modules were easy and quick to run. The test results showed that the improved methodology could effectively illustrate the spatial pattern of the eco-environmental sensitivity areas along Qinghai-Tibetan railway. The highly eco-environmental sensitivity areas were mainly near the wildlife pathways on the both sides of the railway, and formed a linear distribution in a larger scale. The accuracy and reliability of our results were validated, and showed a strong compassion to the previous field researches in the region, implying that the improved methodology could supply a technical support for the quick eco-environmental sensitivity assessment of linear construction project.

**Key words:** eco-environmental sensitivity, wildlife pathway, buffer zone, Tibetan Plateau.

青藏高原由于其独特的地理位置和特殊的气候条件, 造就了中国分布面积最大的高寒生态系统和

极具保护价值的野生动植物资源。由于其海拔高、气候条件严酷等, 导致区域内生态脆弱、环境敏感, 在受到人类活动的干扰后极易造成严重的退化。而其特殊的社会和文化背景, 又使青藏高原的生态环境的保护受到中国政府和社会各界的高度重视。因此, 应用多种技术手段开展该区域生态环境敏感性

\* “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAC09B08)和中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室自主项目(SK-LURE2008-1-05)资助。

\*\* 通讯作者 E-mail: dongrencai@rcees.ac.cn

收稿日期: 2011-03-17 接受日期: 2011-05-19

评价具有重要意义。生态环境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,说明发生环境问题的难易程度和可能性大小。即,如果在同样的人类活动强度影响下或外力作用下,各生态系统出现区域环境问题(如沙漠化、盐渍化、水土流失和酸雨)的概率大小(欧阳志云和王效科,2000),敏感性高的地区在受到人类不合理的活动时候就容易出现环境问题。生态环境敏感性评价是生态环境科学研究与应用实践中的一项重要工作,通过生态环境敏感性评价可以确定环境中的敏感区域,从而为生态环境的规划和保护提供参考依据。

目前,基于生态环境敏感性的研究已经涉及了很多方面,有对某一区域进行综合评价的(刘康等,2003;潘竟虎和董晓峰,2006;贺秋华等,2007);也有对某一个生态环境特征或对象进行专题评价的(肖荣波等,2005;李君铁等,2007;李东梅等,2008),如石漠化敏感性评价、盐渍化敏感性评价、酸雨敏感性评价、土地生态敏感性评价等;还有基于生态环境敏感性评价来进行生态功能区划和可持续管理研究的(俞洁等,2006;于谦龙,2007;杨月圆等,2008)。在各种各样的敏感性评价过程中几乎都需要GIS的空间分析功能,而对于其具体软件操作步骤都介绍的不够详细,没有一个统一的评价流程或方法,更未形成系统的程序化流程与GIS模型。

遥感、地理信息系统等空间技术和相关数学模型的结合已经成为生态环境分析强有力的工具,例如,由ESRI公司和美国德克萨斯州奥斯汀大学水资源研究中心(CRWR)联合开发的Arc Hydro Tools工具,以及美国农业部(USDA)开发的SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型等。综合利用这些技术不仅能够为资源环境提供一个多层次的综合分析平台,同时也能将获取的信息集成到理论生态系统进行比较分析(张艳红和张树文,2002)。本文通过总结前人对生态环境敏感性评价的研究现状,构建了适用于GIS平台的生态环境敏感性评价数学模型,规范了利用ArcGIS平台地理数据库(Geodatabase)数据格式开展生态环境敏感性评价的程序化流程,并采用Model Builder工具进行了封装,生成了可以进行生态环境敏感性评价的模块,并对青藏铁路沿线不冻泉车站至二道沟车站进行了测试和分析。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

青藏铁路格拉段,北起青海省格尔木市,经纳赤台、五道梁、沱沱河、雁石坪、翻越唐古拉山,再经西藏自治区安多、那曲、当雄、羊八井、进入拉萨市,全长1142 km,其中格尔木(含)至南山口(含)为既有线改建32 km,南山口至拉萨段新建线路1110 km,共有车站(所)45座,其中改建车站2座,新建设车站(所)43座,大中小桥梁676座,跨度总长159.7 km,其中特大桥69座,跨度总长82.1 km,工程概算总投资约330.9亿元,实际环保投资15.4亿元,占总投资的4.6%。其中,不冻泉车站至二道沟车站沿线两侧50 km范围是藏羚羊进行迁徙的主要区段,所以沿线生态环境质量的好坏对藏羚羊的迁徙起着重要作用,通过敏感性评价可以知道该区域内的生态环境问题的状况,确定重点保护和监测区域。

### 1.2 生态环境敏感性模型构建

**1.2.1 敏感性指数与评价基础** 生态环境敏感性可以借助于生态环境敏感性指数(Eco-environmental Sensitivity Index, ESI)来衡量(俞洁等,2006; Li *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2008),它是一个介于0~1的数,计算公式1如下:

$$ESI_k = C + \sum_{i=1}^n F_{ij} W_i \\ = C + F_{1j} W_1 + F_{2j} W_2 + F_{3j} W_3 + \dots + F_{nj} W_n \quad (1)$$

$$C = \lim_{n \rightarrow \infty} (ESI_k - \sum_{i=1}^n F_{ij} W_i) = 0 \\ k = 1, 2, \dots, s; i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \\ F_{ij} = \frac{f_{ij} - \min(f_{ij})}{\max(f_{ij}) - \min(f_{ij})} \quad (2)$$

式中: $ESI_k$ 为k空间单元生态环境敏感性指数, $F_{ij}$ 为敏感性要素标准化后的取值,计算式(2), $W_i$ 为敏感性要素的权重, $C$ 为常数项, $f_{ij}$ 为敏感性要素的实际取值, $\max(f_{ij})$ , $\min(f_{ij})$ 分别为该敏感性要素的最大值和最小值, $k$ 为空间单元个数, $i$ 为敏感性要素个数, $j$ 为各敏感要素不同项。

生态环境敏感性评价是将敏感性要素按照式(1)进行累加的一个过程,并最终确定各种敏感性级别的范围和面积大小。这需要进行充分的生态环境问题识别,选出各种敏感要素并制作出各种敏感性要素的专题图层;利用GIS的空间分析功能计算

每个空间单元的敏感性分值。最后进行各个敏感性级别的划分。具体的评价流程图如图 1。

**1.2.2 指标选取与权重确立** 本研究开展了大量文献分析和实地调查,调查对象包括来自青海、西藏地方环境保护、林业、旅游、铁路等管理部门,以及从事该地区科学研究的学者与游客等,获得了 200 余份有效问卷。同时结合《青藏铁路格拉段竣工验收环境影响评价》和《青藏高原环境保护总体规划》项目的研究积累。从影响青藏铁路沿线生态系统的土壤侵蚀、沙漠化、盐渍化、石漠化、酸雨、生物多样性丧失、地质灾害、水环境污染和人口密度等诸多要素中,选取具有代表性的敏感要素。同时,又考虑了数据的可获得性,最终确立了生物通道受阻、自然保护区干扰、河流湖泊水质污染、植被破坏、土壤侵蚀 5 个要素。由于不同的敏感要素对生态系统整体敏感性的贡献不同,需要对不同的敏感要素赋予不同的权重,即式(1)  $W_i$  确定。结合多次问卷调查和层次分析法,本文根据青藏铁路修建、运行与管理过程中的人类活动与其两侧生态环境敏感性要素特性确立了不同指标的敏感性系数。其中,系数越高敏感性越高,反之系数越低敏感性越低(表 1)。

**1.2.3 数据预处理** 数据预处理是将具有空间特性的生态与环境敏感要素生成空间图层的一个重要过程。由于评价尺度较大,使得有些生态环境敏感要素成点状或线状分布,本研究根据这些影响因素的影响机理,结合敏感性要素的空间影响特点,以点或线为中心生成适宜范围的缓冲区,使其全部转化成面状要素(表 1),然后利用 GIS 的空间分析功能进行分析。评价图层采用 ESRI 公司的面向对象的地理数据库数据格式,使其地理空间特征的表达较

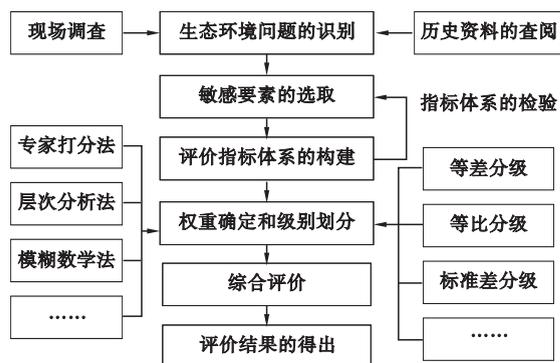


图 1 生态环境敏感性评价流程图

Fig.1 The operation flow of eco-environmental sensitivity assessment

表 1 生态环境敏感性要素特点及其系数值

Table 1 Description and coefficient of each eco-environmental sensitivity factor

敏感性要素及其说明	空间对象分级	系数	
生物通道:根据动物活动频率,将生物通道所在区域进行划分	首要生物通道区	1.00	
	次要生物通道区	0.66	
	非生物通道区	0.33	
自然保护区:以青藏铁路修建时调整的自然保护区边界为准则划分	核心区	1.00	
	缓冲区	0.66	
	非自然保护区	0.33	
河流湖泊:根据青藏铁路跨越、辐射和可能影响的水域范围	水体	1.00	
	近湖(河)区	0.66	
	非河流湖泊区	0.33	
生态系统:根据文献及专家对青藏铁路沿线的生态系统抗干扰程度、恢复力判断为依据进行划分	河谷灌丛生态系统	1.00	
	沼泽湿地生态系统	1.00	
	高寒草甸生态系统	0.80	
	高寒垫状植被生态系统	0.80	
	高寒草原生态系统	0.60	
	高寒流石坡稀疏植被生态系统	0.40	
	典型荒漠生态系统	0.20	
	冰川与积雪	0.20	
	土壤侵蚀:依据全国土壤侵蚀普查数据,对其水力侵蚀、风力侵蚀和冻融侵蚀区进行细分	剧烈水力侵蚀	1.00
		极强度水力侵蚀	0.83
		强度水力侵蚀	0.67
		中度水力侵蚀	0.50
		轻度水力侵蚀	0.33
		微度水力侵蚀	0.17
		剧烈风力侵蚀	1.00
极强度风力侵蚀		0.83	
强度风力侵蚀		0.67	
中度风力侵蚀	0.50		
轻度风力侵蚀	0.33		
微度风力侵蚀	0.17		
强度冻融侵蚀	1.00		
中度冻融侵蚀	0.75		
轻度冻融侵蚀	0.50		
微度冻融侵蚀	0.25		

之以往的 Coverage 和 Shape 数据模型更接近我们对现实事物对象的认识和表达,能够完成对数据的统一管理。

**1.2.4 GIS 模型实现** 为多次、分段评价青藏铁路沿线生态环境敏感性,本研究基于 GIS 构建了生态环境敏感性评价模块,其结构体系见图 2。其核心是利用 ArcGIS 9.3 的 Analysis Tools 中的 Union 工具,在叠加生成新图层的同时,反复循环输入被叠加

图层的的信息,以达到了综合的目的。为得到最终图层中每一图块的敏感性分值,在综合图层的属性表中添加一个字段,用来采用式(1)计算每一图块的敏感性分值,并利用 Field Calculator 来完成。整个过程采用 ArcGIS 9.3 中 Model Builder 工具进行封装,图3为该模块的运行界面。

在该模块中输入参数表达式的时候,按照  $W_1 \times [F_1] + W_2 \times [F_2] + W_3 \times [F_3] + \dots + W_n \times [F_n]$  的格式进行输入,式中  $W_n$  为各个敏感性要素的权重,  $F_n$  为相应敏感性系数字段的名称。所有的敏感要素的权重共同构成一个权重向量  $V$ , 即  $V = (W_1, W_2, W_3, \dots, W_n)$ , 通过输入不同的权重向量可以得到不同的评价结果。

### 1.3 评价结果分级与验证

生态环境敏感性评价结果分级是进行综合评价的一项重要工作,一般要根据数据的特点和事物的客观属性采用不同的分级方法,如等差分级适合于均匀分布的数据,等比分级适合于具有抛物线分布的数据,标准差分级适合于成正态分布的数据等(钱乐祥,1994)。生态环境敏感性根据其对应的生

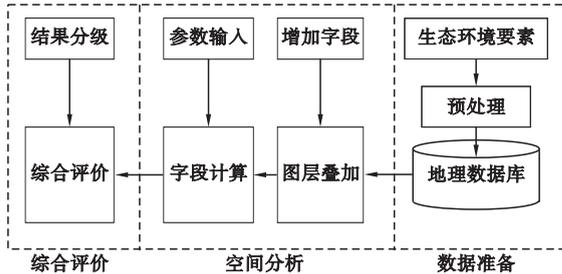


图2 生态环境敏感性评价模块结构体系

Fig. 2 Structure of eco-environmental sensitivity assessment module



图3 生态环境敏感性评价模块运行界面

Fig. 3 Program interface of eco-environmental sensitivity assessment module in GIS

表2 生态环境敏感等级特征描述

Table 2 Descriptions of each ecological sensitive level

敏感性等级	生态系统状态	评分区间
极敏感	首要生物通道处,接近自然保护区核心区,跨越河流和湖泊,属高寒草甸生态系统,强度冻融侵蚀,需要重点保护和严禁开发	68.7~91.5
高度敏感	次要生物通道两侧,接近自然保护区核心区,跨越河流或湖泊,多为高寒草甸或垫状生态系统,强度水力、风力或冻融侵蚀区,需重点保护并限制人类活动	59.0~68.7
中度敏感	次要生物通道区,接近自然保护区的缓冲区,与湖(河)地区相邻,多属高寒草原生态系统,中度水力、风力和冻融侵蚀区,需要重点保护与监测	52.6~59.0
轻度敏感	次要生物通道区,接近自然保护区缓冲区,非河流湖泊区,高寒流石坡稀疏植被生态系统,轻度中度水力、风力和冻融侵蚀区,需要加强环境保护管理	44.8~52.6
不敏感	远离生物通道区和河湖水体,非自然保护区,多为典型荒漠生态系统,轻度或微度水蚀或风蚀,保护现状并禁止人类活动过度干扰	25.6~44.8

态系统的具体状态,一般划分为:极敏感、高度敏感、中度敏感、轻度敏感和不敏感5个级别。为保证组内之间的差异最小,组间的差异最大,本研究采用 ArcGIS 的“Natural Break”方法计算评分区间,进行分级(表2)。这样可以使数据分级能够更好地反映出事物的客观现象。同时,为验证本模型计算的生态环境敏感性评价结果和测试模型对权重的灵敏性。通过聘请多名长期研究青藏铁路沿线生态环境问题的专家进行实地调查,对其进行了现场评估,并将评估结果绘制成图,将其与模型模拟结果进行比较,以分析二者之间的差异性。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物通道周边敏感性级别提高

通过上述方法获得了青藏铁路不冻泉至二道沟段生态环境敏感性评价图(图4)。从图4看出,铁路沿线生态环境敏感性呈现出较强空间不均匀分布特征。首先是,铁路沿线的生物通道两侧敏感性级别多为中度敏感区,在河流、湖泊周边,由于多种敏感要素的叠加,形成了多个高度敏感区,且多个生物通道敏感区连成一个线性敏感区。统计表明,大约有36.6%的中度、高度敏感区分布在铁路沿线。虽然在道路选线时,选择了生态系统相对稳定、地势平缓、土壤侵蚀较轻的地区,但由于线性地物明显的切

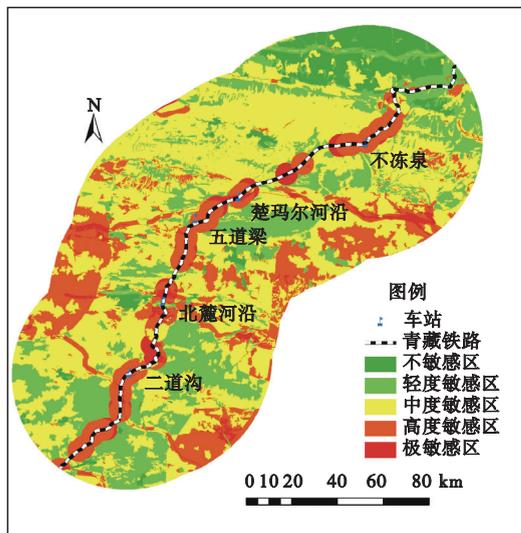


图4 青藏铁路不冻泉至二道沟生态环境敏感性评价结果  
Fig.4 The results of eco-environmental sensitivity assessment from Budongquan to Erdaogou along Qinghai-Tibetan railway

割作用,增强了生态敏感区的线性空间格局。

## 2.2 模型模拟与地面调查结果相近

为了验证评价模型的合理性,通过对大量地面调查评估数据成图基础上(图5),将其与模拟结果进行了对比(表3)。从以上分析结果可以发现,模型模拟结果与地面调查的评估结果对不同敏感级别的基本判断较为相似,对该区域的敏感性分级秩序均为轻度敏感>中度敏感>高度敏感>不敏感>极敏感,二者的面积比例也极为相似,相关系数达到0.879。

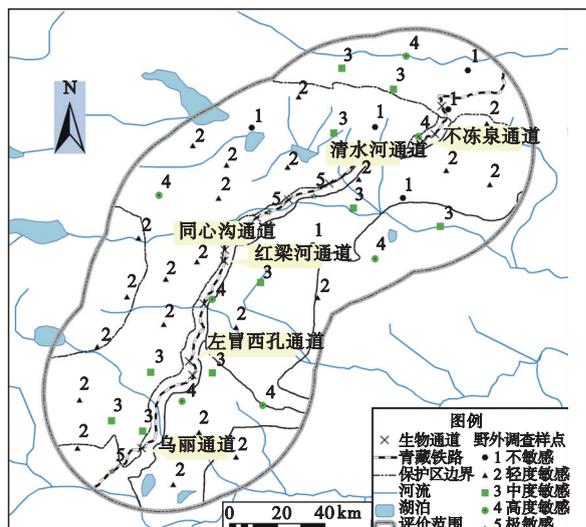


图5 青藏铁路不冻泉至二道沟地面调查样点分布与专家评价结果

Fig.5 The sample site and expert assessment from Budongquan to Erdaogou along Qinghai-Tibetan railway

表3 模型模拟及其与地面调查评估结果比较

Table 3 Comparison of GIS model results versus filed assessment results

敏感级别	模型模拟结果		地面评估结果	
	面积 (km)	比例 (%)	面积 (km)	比例 (%)
不敏感	2021.12	7.97	2157.47	8.51
轻度敏感	13320.68	52.55	10000.07	39.45
中度敏感	6252.41	24.66	9747.01	38.45
高度敏感	3305.76	13.04	2876.61	11.35
极敏感	450.51	1.78	569.32	2.25

但地面调查的评估结果中,轻度敏感区域占据了39.45%,与其中度敏感区域38.45%极为接近,这可能与地面调查时对大面积同类型斑块的判断比较近似有关。

## 3 结语

结合 ArcGIS 的 Model Builder 工具将生态环境敏感性评价这一流程进行了封装,简化了敏感性评价的过程,并且技术流程清晰明了,结构简单,既容易构建又容易修改,而且可快速得到结果,节省了时间,提高了效率。在对青藏铁路沿线部分路段,实施从生态环境问题分析、指标与权重确立、空间数据预处理到 GIS 模型运行的全过程测试后,不但能有效刻画铁路沿线生态环境敏感性区域的空间格局特征,也能与地面调查的评估结果相吻合,验证了 GIS 模型判断生态敏感区域的科学性和可靠性,为线性工程的生态环境敏感性快速评价提供技术支撑。

生态环境敏感性分析只是 GIS 在生态环境中的一个运用,生态环境中的很多信息都与空间有关,如何分析这些空间信息,如何将生态环境中的规律和理论更好的利用地理信息系统表达和分析,需要生态学者和地理信息开发人员更好的配合。但在实际应用中发现参数输入的时候还是显得不够灵活,为了克服这一点,可以根据需要结合 ArcEngine 开发专门的敏感性评价模块,使得参数的输入更加灵活,方便广大生态学工作者使用。

## 参考文献

- 贺秋华, 张丹, 陈朝猛, 等. 2007. GIS 支持下的黔中地区生态环境敏感性评估. 生态学杂志, 26(3): 413-417.
- 李东梅, 吴晓青, 于德永, 等. 2008. 云南省生态环境敏感性评价. 生态学报, 28(11): 5270-5278.
- 李君轶, 吴晋峰, 薛亮, 等. 2007. 基于 GIS 的陕西省土

- 地生态环境敏感性评价研究. 干旱地区农业研究, **25**(4): 19-23.
- 刘康, 欧阳志云, 王效科, 等. 2003. 甘肃省生态环境敏感性评价及其空间分布. 生态学报, **23**(12): 2711-2718.
- 欧阳志云, 王效科. 2000. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究. 生态学报, **20**(1): 9-12.
- 潘竞虎, 董晓峰. 2006. 基于GIS的黑河流域生态环境敏感性评价与分区. 自然资源学报, **21**(2): 267-273.
- 钱乐祥. 1994. 制图资料数量指标的分级方法. 地图, (1): 42-46.
- 肖荣波, 欧阳志云, 王效科, 等. 2005. 中国西南地区石漠化敏感性评价及其空间分析. 生态学杂志, **24**(5): 551-554.
- 俞洁, 邵卫伟, 于海燕, 等. 2006. 浙江省生态功能区划研究. 环境污染与防治, **28**(8): 620-623.
- 杨月圆, 王金亮, 杨丙丰. 2008. 云南省土地生态敏感性评价. 生态学报, **28**(5): 2253-2260.
- 于谦龙. 2007. 乌鲁木齐市生态环境敏感性评价与土地可持续利用研究. 安徽农业科学, **35**(21): 6544-6546.
- 张艳红, 张树文. 2002. 嫩江中下游湿地生态环境敏感性分析及可持续管理对策. 水土保持学报, **16**(4): 82-85.
- Li AN, Wang AS, Liang SL, *et al.* 2006. Eco-environmental vulnerability evaluation in mountainous region using remote sensing and GIS: A case study in the upper reaches of Minjiang River, China. *Ecological Modelling*, **192**: 175-187.
- Wang SY, Liu JS, Yang CJ. 2008. Eco-environmental vulnerability evaluation in the Yellow River Basin, China. *Pedosphere*, **18**: 171-182.
- 
- 作者简介** 董仁才,男,1971年3月,博士,副研究员。主要研究GIS与复合生态系统。E-mail: dongrencai@rcees.ac.cn
- 责任编辑** 李凤芹
-