

# 基于 SRP 概念模型的沂蒙山区生态环境脆弱性评价\*

刘正佳<sup>1,2,4</sup> 于兴修<sup>1\*\*</sup> 李 蕾<sup>3,4</sup> 黄 玫<sup>4</sup>

(<sup>1</sup>临沂大学化学与资源环境学院山东省水土保持与环境保育重点实验室, 山东临沂 276005; <sup>2</sup>山东师范大学人口资源与环境学院, 济南 250014; <sup>3</sup>北京林业大学林学院, 北京 100083; <sup>4</sup>中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘 要** 基于生态敏感性-生态恢复力-生态压力度(SRP)概念模型,选取景观多样性指数、土壤侵蚀、高程等13个评价指标,在GIS环境下,结合空间主成分分析法和层次分析法,对沂蒙山区生态环境脆弱性进行评价,并根据生态环境脆弱性指数(EVI)值,将研究区生态环境脆弱度分为5级:微度脆弱(<1.8)、轻度脆弱(1.8~2.8)、中度脆弱(2.8~3.5)、重度脆弱(3.5~4.0)和极度脆弱(>4.0)。结果表明:沂蒙山区生态环境脆弱性以中度脆弱性为主,其中,微度、轻度、中度、重度和极度脆弱区面积分别占研究区总面积的6.1%、33.8%、43.3%、15.9%和0.9%,重度和极度脆弱区主要集中在地形较复杂的山地丘陵区或人类活动强度较大的丘陵和平原过渡交错带。

**关键词** 生态环境 脆弱性 地理信息系统 生态敏感性-生态恢复力-生态压力度(SRP)概念模型 沂蒙山区

**文章编号** 1001-9332(2011)08-2084-07 **中图分类号** X171.1 **文献标识码** A

**Vulnerability assessment of eco-environment in Yimeng mountainous area of Shandong Province based on SRP conceptual model.** LIU Zheng-jia<sup>1,2,4</sup>, YU Xing-xiu<sup>1</sup>, LI Lei<sup>3,4</sup>, HUANG Mei<sup>4</sup> (<sup>1</sup>Shandong Province Key Laboratory of Soil & Water Conservation and Environment Protection, College of Chemistry & Resources Environment, Linyi University, Linyi 276005, Shandong, China; <sup>2</sup>College of Population, Resource and Environment, Shandong Normal University, Ji'nan 250014, China; <sup>3</sup>College of Forestry Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; <sup>4</sup>Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(8): 2084-2090.

**Abstract:** Based on the ecological sensitivity-resilience-pressure (SRP) conceptual model, and selecting 13 indices including landscape diversity index, soil erosion, and elevation, etc., the vulnerability of the eco-environment in Yimeng mountainous area of Shandong Province was assessed under the support of GIS and by using principal component analysis and hierarchy analytical method. According to the eco-environmental vulnerability index (EVI) values, the eco-environment vulnerability of study area was classified into 5 levels, i. e., slight (<1.8), light (1.8-2.8), moderate (2.8-3.5), heavy (3.5-4.0), and extreme vulnerability (>4.0). In the study area, moderately vulnerable area occupied 43.3% of the total, while the slightly, lightly, heavily, and extremely vulnerable areas occupied 6.1%, 33.8%, 15.9%, and 0.9%, respectively. The heavily and extremely vulnerable areas mainly located in the topographically complicated hilly area or the hill-plain ecotone with frequent human activities.

**Key words:** eco-environment; vulnerability; GIS; ecological sensitivity-resilience-pressure (SRP) conceptual model; Yimeng mountainous area.

\*教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-08-0877)、山东省科技攻关项目(2009GG10006015)、水利部准委科技项目(SBJ2010003)和临沂市重大科技创新项目(201011019)资助。

\*\*通讯作者. E-mail: yuxingxiu@lyu.edu.cn

2011-01-04 收稿, 2011-05-23 接受。

生态环境脆弱性是生态系统在特定时空尺度下对于外界干扰所具有的敏感反应和自恢复能力,是自然属性和人类经济行为共同作用的结果<sup>[1-2]</sup>.对区域生态环境脆弱性进行评价,不仅对保护区域生态环境具有重要意义,而且对区域资源合理利用及区域可持续发展等也有重要的理论和现实意义<sup>[3]</sup>.我国在脆弱生态环境研究方面的起步较晚,始于 20 世纪 80 年代,但发展较快.1996 年提出的“可持续发展纲要”、2000 年提出的“西部大开发战略”、2006 年国家“十一五”规划纲要中提出的“国土主体功能区划”等都对脆弱生态环境的研究工作起到了很大的推动作用.经过近 30 年的努力,国内学者在脆弱性评价方面逐步形成了以模糊判定分析方法<sup>[4]</sup>、景观生态学方法<sup>[5-6]</sup>、人工神经网络法<sup>[7]</sup>、主成分分析法<sup>[8]</sup>、综合评价法<sup>[9]</sup>和层次分析法<sup>[10-11]</sup>等为核心知识的一系列评价方法,并取得了诸多重要的研究成果.由于研究区以及反映脆弱性角度的差异,使脆弱性评价方法以及指标体系构建尚无统一范式,因此,在脆弱性定量评价模型及参数筛选方法方面还需进一步研究.

生态敏感性-生态恢复力-生态压力度(SRP)概念模型是基于生态系统稳定性的内涵而构建<sup>[12]</sup>.其模型结构较全面地体现了生态脆弱性的综合方面,已在环渤海地区<sup>[13]</sup>、川西滇北农林牧交错带<sup>[14]</sup>等地区的脆弱性评价研究中有所应用.然而,在以往的研究中,存在因子筛选方法单一、权重确定方法的主观性等问题,在一定程度上限制了该模型的应用发展.

沂蒙山区是北方土石山区的典型代表,具有土壤表层疏松、夹杂石砾、土层浅薄、土壤涵蓄水能力低、人口密度大的特点.生态退化成为制约该地区可持续发展的重要因素<sup>[15]</sup>.虽然有学者<sup>[16-17]</sup>对该区域生态环境脆弱性研究有所涉及,但所采用的分析指标局限于反映土壤侵蚀作用下的生态质量退化,在描述复杂的生态环境脆弱特征方面不够深刻.因此,本研究以 SRP 概念模型为依据筛选评价指标,通过空间主成分分析法和层次分析方法确定各参评因子权重,评价了沂蒙山区的生态环境脆弱性,并揭示其空间格局特征,以期为沂蒙山区生态环境研究与保护提供科学依据.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

沂蒙山区(34°23'14"—36°18'38" N, 116°40'41"—119°11'36" E)位于山东省中南部(图1).研究区面

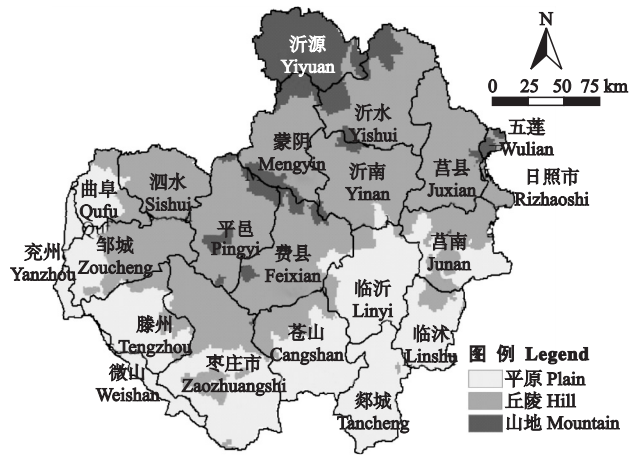


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Sketch map of location of the study area.

积 28804.5 km<sup>2</sup>,海拔 20~1156 m,丘陵山地面积占 70%左右,土壤以棕壤和褐土为主.该区属暖温带大陆性气候,四季分明,气候温暖.

### 1.2 数据来源及预处理

分辨率为 90 m 的 2007 年数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据来自国际科学数据服务平台提供的 SRTM 数据产品,分辨率为 1 km 的 2000 年植被分类数据和 2009 年土壤类型数据来自于中国科学院地理科学与资源研究所数据中心.

景观多样性指数通过植被分类数据得到<sup>[18-19]</sup>,计算公式如下:

$$H = - \sum_{i=1}^m P_i \ln P_i \quad (1)$$

式中: $H$ 为多样性指数; $P_i$ 为景观类型 $i$ 的面积百分比; $m$ 为景观类型的数目.

植被覆盖度以 1998—2004 年各旬归一化植被指数(NDVI)求平均计算得到<sup>[20]</sup>,公式如下:

$$f = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (2)$$

式中: $f$ 为多年旬平均植被覆盖度; $NDVI$ 为多年旬平均归一化植被指数; $NDVI_{\max}$ 、 $NDVI_{\min}$ 分别为多年旬平均 $NDVI$ 的最大值和最小值.

高程、坡度、坡向基于 DEM 数据提取;土壤数据由土壤类型数据提取;气象数据(包括年均降水量、年均气温和年均相对湿度)通过气象站多年(1981—2006 年)数据求平均,再利用 Kriging 法插值得出;1981—2006 年植被净初级生产力(NPP)通过生态过程机理模型(CEVSA 模型)<sup>[21-22]</sup>计算得到;研究区 2000 年土壤侵蚀数据利用 RUSLE 模型<sup>[23]</sup>计算得到;人口密度和 GDP 密度数据源于

2000年全国1 km 栅格的人口密度和GDP密度数据。所有数据均栅格化为1 km。

### 1.3 研究方法

**1.3.1 评价指标的选择** SRP模型是基于生态环境脆弱性定义的模型,该模型包括3个因子:生态敏感性、生态恢复力和生态压力度。生态敏感性因子包含地形因子、地表因子、气象因子和土壤侵蚀强度,其中,地形因子又包含高程、坡度和坡向;地表因子包括景观多样性指数、植被覆盖度、土壤类型;气象因子包括年均降水量、年均气温、年均相对湿度;土壤侵蚀强度由土壤侵蚀各因子经RUSLE模型计算后转化而来。生态恢复力指生态系统受到扰动时的自身恢复能力,与其内部结构的稳定性有关,研究中用NPP表征。生态压力度指生态系统受到外界干扰及其产生的生理效应,一般为人口活动压力和经济活动压力,分别用人口密度和GDP密度表示<sup>[13]</sup>。

为减少评价指标之间的相关性,避免指标重复而影响评价的精确性,本研究使用主成分分析法对初选的评价指标进行筛选。首先用ArcGIS栅格计算器对初选指标进行标准化处理,再使用GRID模块下的Makestack命令和Princomp函数完成空间主成分分析(表1)。在主成分分析法中,一般选取累积贡献率大于85%的几个主成分作为计算指标。本研究选取前5个主成分作为指标对研究区生态脆弱性进行分析。

主成分的计算公式如下:

$$F_i = \alpha_{1i}X_1 + \alpha_{2i}X_2 + \dots + \alpha_{13i}X_{13} \quad (3)$$

表1 各主成分的特征值、贡献率和累积贡献率  
Table 1 Eigenvalues, contribution rates and accumulated contribution rates of principal components

| 主成分<br>Principal component | 特征值<br>Eigenvalue<br>( $\times 10^{-2}$ ) | 贡献率<br>Contribution rate<br>(%) | 累积贡献率<br>Accumulated contribution rate<br>(%) |
|----------------------------|---|---------------------------------|---|
| 1                          | 8.27                                      | 31.6                            | 31.6  |
| 2                          | 5.06                                      | 19.3                            | 50.9  |
| 3                          | 3.82                                      | 14.6                            | 65.5  |
| 4                          | 3.57                                      | 13.6                            | 79.2  |
| 5                          | 1.69                                      | 6.5                             | 85.6  |
| 6                          | 1.02                                      | 3.9                             | 89.5  |
| 7                          | 0.78                                      | 3.0                             | 92.5  |
| 8                          | 0.68                                      | 2.6                             | 95.1  |
| 9                          | 0.55                                      | 2.1                             | 97.2  |
| 10                         | 0.45                                      | 1.7                             | 98.9  |
| 11                         | 0.16                                      | 0.6                             | 99.5  |
| 12                         | 0.07                                      | 0.3                             | 99.8  |
| 13                         | 0.06                                      | 0.2                             | 100   |

式中: $F_i$ 为第*i*主成分; $\alpha_{1i}, \dots, \alpha_{13i}$ 分别为第*i*主成分各因子对应的特征向量(表2); $X_1$ 为年均温度; $X_2$ 为土壤类型; $X_3$ 为坡度; $X_4$ 为年均降水量; $X_5$ 为人口密度; $X_6$ 为NPP; $X_7$ 为景观多样性指数; $X_8$ 为年均相对湿度; $X_9$ 为GDP密度; $X_{10}$ 为土壤侵蚀强度; $X_{11}$ 为高程; $X_{12}$ 为坡向; $X_{13}$ 为植被覆盖度。

由表2可以看出,第1主成分中,景观多样性指数、年均温度的贡献较大,可以看作景观多样性指数、年均温度共同反映生态环境脆弱性的综合指标;第2主成分中,土壤类型的贡献较大,远超过了其他指标,可以单独看成是土壤因素的影响;第3主成分中,土壤侵蚀强度的贡献较大,其次是坡向,可将其看成是反映土壤侵蚀强度和坡向的综合指标;第4主成分中,高程贡献较大,将高程作为该主成分的评价指标;第5主成分中,植被覆盖和GDP密度的贡献远超过其他指标,可将其作为反映植被覆盖和GDP的综合指标。

**1.3.2 指标量化分级** 在ArcGIS中,利用Reclassify函数,采用Natural Breaks(Jenks)法把主成分分析后的综合指标再各分为5级。第1主成分中,景观多样性指数和年均温度是主要因素,所以按数值由大到小分为1~5级;第2主成分中,根据土壤可蚀性大小顺序(华北地区典型土壤类型K值<sup>[24]</sup>:石质土为0.23、沙土为0.29、棕壤为0.31、褐土为0.32、潮土为0.34),土壤类型数值由大到小分为1~5级;第3

表2 各主成分对应的特征向量

Table 2 Eigenvectors of the principal components

| 特征向量<br>Eigenvector | 主成分 Principal component |       |       |       |       |
|---------------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                     | 1                       | 2     | 3     | 4     | 5     |
| $\alpha_1$          | 0.46                    | -0.03 | -0.10 | 0.47  | 0.03  |
| $\alpha_2$          | -0.05                   | 0.98  | -0.03 | 0.02  | -0.01 |
| $\alpha_3$          | 0.04                    | -0.13 | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| $\alpha_4$          | 0.08                    | -0.06 | -0.03 | 0.10  | -0.01 |
| $\alpha_5$          | 0.14                    | 0.02  | -0.25 | -0.46 | 0.11  |
| $\alpha_6$          | -0.36                   | 0.01  | 0.07  | 0.31  | -0.08 |
| $\alpha_7$          | -0.59                   | -0.10 | 0.04  | -0.22 | -0.13 |
| $\alpha_8$          | 0.14                    | -0.01 | -0.31 | 0.15  | -0.02 |
| $\alpha_9$          | 0.38                    | 0.03  | 0.44  | -0.05 | -0.50 |
| $\alpha_{10}$       | 0.09                    | 0.02  | 0.64  | 0.05  | 0.38  |
| $\alpha_{11}$       | -0.27                   | -0.02 | -0.11 | 0.61  | 0.05  |
| $\alpha_{12}$       | 0.16                    | 0.00  | -0.46 | -0.05 | -0.10 |
| $\alpha_{13}$       | 0.08                    | 0.00  | -0.04 | -0.07 | 0.75  |

$\alpha_1 \sim \alpha_{13}$ : 年均温度、土壤类型、坡度、年均降水量、人口密度、NPP、景观多样性指数、年均相对湿度、GDP密度、土壤侵蚀强度、高程、坡向、植被覆盖度的特征向量 Eigenvector of annual average temperature, soil type, slope, annual average precipitation, population density, NPP, landscape diversity index, annual average relative humidity; GDP density, soil erosion intensity, elevation, slope aspect, vegetation coverage.

表 3 综合指标等级

Table 3 Level of aggregative indicator

| 等级<br>Level | 主成分 Principal component |              |               |              |              |
|-------------|-------------------------|--------------|---------------|--------------|--------------|
|             | 1                       | 2            | 3             | 4            | 5            |
| 1           | 0.24 ~ 0.69             | 0.62 ~ 0.95  | -0.60 ~ -0.28 | -0.20 ~ 0.12 | 0.37 ~ 0.74  |
| 2           | 0.00 ~ 0.24             | 0.42 ~ 0.62  | -0.28 ~ -0.15 | 0.12 ~ 0.22  | 0.25 ~ 0.37  |
| 3           | -0.14 ~ 0.00            | 0.31 ~ 0.42  | -0.15 ~ -0.01 | 0.22 ~ 0.32  | 0.14 ~ 0.25  |
| 4           | -0.31 ~ -0.14           | 0.06 ~ 0.31  | -0.01 ~ 0.13  | 0.32 ~ 0.46  | 0.01 ~ 0.14  |
| 5           | -0.66 ~ -0.31           | -0.17 ~ 0.06 | 0.13 ~ 0.84   | 0.46 ~ 0.84  | -0.52 ~ 0.01 |

主成分中,以土壤侵蚀为主,其数值由大到小分为 5~1 级;第 4 主成分中,以高程为主,其数值由大到小分为 5~1 级;第 5 主成分中,以 GDP 和植被覆盖为主,其数值由大到小分为 1~5 级(表 3)。

**1.3.3 指标权重的确定** 本研究采用层次分析法(AHP)确定综合评价指标的权重<sup>[25]</sup>。首先,根据前 5 个主成分的贡献率,确定各主成分之间的重要性。依据层次分析法的重要性标度方法及表 1 中的累积贡献率,对各主成分的评比给出数量标度,并得到 5 个主成分的两两对应关系。然后,在 Excel 软件中通过 AHP 计算出主成分 1~5 的权重分别为 0.48、0.21、0.12、0.12、0.07。最后进行一致性检验,检验结果为随机一致性比率(CR)=0.01<0.1,具有满意的一致性,表明各指标权重的计算结果合理。

**1.3.4 脆弱性评价** 根据各评价指标及其权重,参照 Wang 等<sup>[26]</sup>提出的脆弱生态环境定量评价方法,建立沂蒙山区生态环境脆弱性评价的数学模型,计算研究区每个像元的脆弱性指数,计算公式如下:

$$EVI = \sum_{i=1}^n w_i f_i \quad (4)$$

式中:  $EVI$  为生态环境脆弱性指数;  $w_i$  为评价指标的权重;  $f_i$  为评价指标的等级。

## 2 结果与分析

### 2.1 沂蒙山区生态环境脆弱性分级

沂蒙山区生态环境脆弱性指数(EVI)值在 1.0~4.6,平均值为(2.97±0.65)(图 2)。其中,1.8、2.8、3.5 和 4.0 是频率分布较多的 4 个 EVI 值<sup>[26]</sup>,依据这 4 个 EVI 值将研究区生态脆弱性分为 5 级:微度脆弱(<1.8)、轻度脆弱(1.8~2.8)、中度脆弱(2.8~3.5)、重度脆弱(3.5~4.0)和极度脆弱(>4.0)。各分级具有以下特征,微度脆弱:生态系统稳定、多以平原为主、植被状况较好;轻度脆弱:生态系统相对稳定、低矮丘陵面积较大、植被状况较好;中度脆弱:多为丘陵平原或山地丘陵交错带、人口密度较大、生态系统相对不稳定且抗干扰性较差;重度

脆弱:主要分布在山区或人口密度较大的平原地区、生态系统不稳定、抗干扰性差、土壤侵蚀较严重;极度脆弱:生态系统不稳定、抗干扰性差、土壤侵蚀严重、工业污染影响严重。

### 2.2 沂蒙山区生态环境脆弱性的空间分布

沂蒙山区生态环境脆弱性以中度脆弱为主,总体的脆弱性较高(表 4)。该区 93.9% 的地区具有不同程度的脆弱性,中度和中度以上脆弱区的面积比例为 60.1%,轻度、中度和重度脆弱区面积比例较大,分别为 33.8%、43.3% 和 15.9%。

生态环境微度、轻度脆弱区主要分布在沂蒙山区西部;中东部地区以中度脆弱性为主,重度和极度脆弱区主要分布在研究区北部、中部和东南部;在蒙阴县南部、费县南部和莒南县南部等区域,生态环境极度脆弱区面积较大(图 3)。

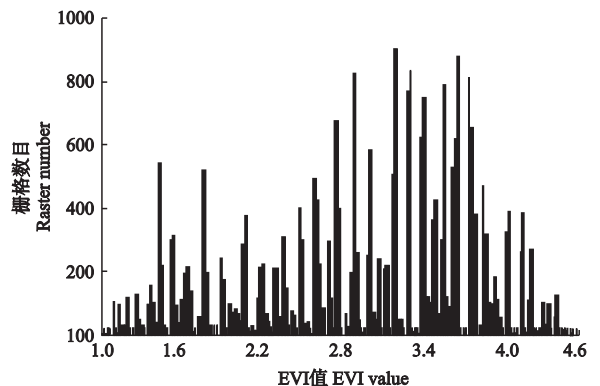


图 2 沂蒙山区生态环境脆弱性指数(EVI)值的分布  
Fig. 2 Distribution of EVI values in Yimeng Mountains Area.

表 4 沂蒙山区各生态环境脆弱等级的面积及比例  
Table 4 Area and proportion of each eco-environmental vulnerability level in Yimeng Mountains Area

| 脆弱性等级<br>Evaluation level | EVI 值<br>EVI value | 面积<br>Area<br>( $\times 10^3$ km <sup>2</sup> ) | 占总面积比例<br>Percentage of total area |
|---------------------------|--------------------|---|------------------------------------|
| 微度 Slight                 | <1.8               | 1.76  | 6.1                                |
| 轻度 Light                  | 1.8 ~ 2.8          | 9.73  | 33.8                               |
| 中度 Moderate               | 2.8 ~ 3.5          | 12.47   | 43.3                               |
| 重度 Heavy                  | 3.5 ~ 4.0          | 4.59  | 15.9                               |
| 极度 Extreme                | >4.0               | 0.25  | 0.9                                |



平原地区的生态环境脆弱性以轻度和中度为主,微度和重度次之;丘陵地区以中度脆弱性为主,轻度和重度脆弱性次之;在山地地区,重度脆弱性区域占山区总面积的比例较大,其次为轻度和中度脆弱性区域(图4)。极度脆弱性地区主要集中在丘陵与山地或平原与丘陵过渡带,原因可能在于此地带内人口密度较高,人类活动强度相对剧烈,导致了生态系统的退化。

### 2.3 沂蒙山区生态环境脆弱性成因分析

沂蒙山区西部、沂南县东北部和莒县西部等地的生态环境脆弱性以微度和轻度脆弱为主(图3),是研究区生态环境较好的地区,这些地区地势相对平坦,平均海拔在100 m以下,植被状况较好,生态系统稳定。这些地区生态环境较好,其原因可能与多年来实施的水土保持工程、生态修复项目和河道治理工程等措施有密切关系。

蒙阴县南部、费县南部、枣庄市东北部、苍山县

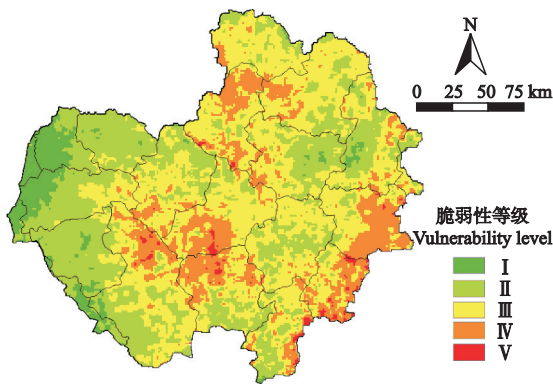


图3 沂蒙山区生态环境脆弱度的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the eco-environmental vulnerability in Yimeng Mountains Area.

I: 微度 Slight; II: 轻度 Light; III: 中度 Moderate; IV: 重度 Heavy; V: 极度 Extreme. 下同 The same below.

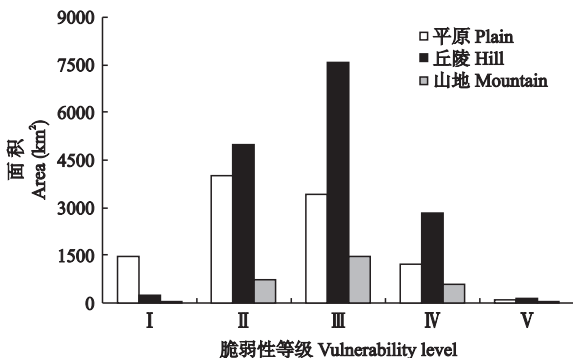


图4 研究区不同地貌类型的生态环境脆弱性面积分布

Fig. 4 Distribution of eco-environmental vulnerability area in different physiognomy types of the study area.

北部、莒南县南部、临沭县中东部、郯城县中东部等地是研究区生态环境极度脆弱的区域(图3)。蒙阴县南部、费县南部、枣庄市东北部、苍山县北部和莒南县南部位于沂蒙山区中北部,该地区地形复杂、土层贫瘠、植被覆盖度低、经济水平落后、石漠化严重、土壤侵蚀严重,是导致该地区生态环境极度脆弱的主要原因。

沂蒙山区南部虽然地形平坦,但人类活动强度较大,人口增长迅速。临沭、郯城两地的人口分别由1999年的61.28和96.45万增加到2005年的64和98.1万,近年来仍保持持续增加的趋势,加速了城镇化的进程。此外,这些地区自然生态系统类型较单一,多以农田为主,沂河、沭河两岸小型企业的工业废水及生活污水的排放等对生态系统的干扰和破坏较大。1999年,临沂市年工业废水的排放总量为 $10909.31 \times 10^4$  t,2002年则达到了 $15223.37 \times 10^4$  t。本文主成分分析结果表明,土壤侵蚀、植被覆盖和GDP等这些与人为活动较密切的指标<sup>[27]</sup>对生态脆弱性格局具有强烈影响。因此,人类活动影响强度的增加、经济的快速发展以及薄弱的生态环境保护意识是造成研究区部分区域生态环境极度脆弱的重要原因之一。

平邑县、费县、蒙阴县、沂南县、沂水县、沂源县等地的地形较复杂,土壤侵蚀严重,加之不合理的土地利用方式,使其生态环境差异显著,故生态环境脆弱性存在明显的空间异质性。

### 3 结 论

以SRP概念模型为依据,选择指标评价区域生态环境脆弱性,由于较全面地考虑了生态环境脆弱性的内涵,且结合了主成分分析和层次分析两种数学方法的优点,使研究结果更合理。然而,该方法在指标权重的确定方面还存在一些主观因素,今后应进一步改善。

生态退化已成为制约沂蒙山区可持续发展的重要原因之一<sup>[16,27]</sup>。缺乏持续的支持力度是生态建设和保护的最大难题,需要加大这方面的投入,还需积极引导农户调整不合理的生产方式。另外,还应加强以下几方面的工作:尽快制定水土流失与环境保育的规划,积极开展小流域综合治理工作,落实生态环境重度和极度脆弱区的退耕还林还草工作;积极调整产业结构,引进高新技术,大力发展循环经济,依靠科技兴农;积极引进和发展生态恢复技术,加快生态环境恢复的步伐;依靠GIS和RS技术,建立生态

监测和管理系统,及时掌握区域生态环境动态变化特征及未来变化趋势,以便更好地为沂蒙山区生态可持续发展服务。

生态环境脆弱性格局主要受景观多样性指数、温度、土壤类型、土壤侵蚀和高程等因素影响,今后应进一步揭示上述因素对脆弱性空间分布的作用机理。

致谢 感谢华中农业大学马骞博士对本文提出宝贵意见。

#### 参考文献

- [1] Huang B-R (黄宝荣), Ouyang Z-Y (欧阳志云), Zhang H-Z (张慧智), *et al.* Assessment of eco-environmental vulnerability of Hainan Island, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20** (3): 639-646 (in Chinese)
- [2] Zhang X-N (张笑楠), Wang K-L (王克林), Zhang W (张伟), *et al.* The quantitative assessment of eco-environment vulnerability in Karst regions of Northwest Guangxi. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29** (2): 749-757 (in Chinese)
- [3] Bi X-L (毕晓丽), Ge J-P (葛剑平). Vegetation water conservation effect in the Jinghe River basin: An analysis based on topography and soil type. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2009, **28**(1): 95-101 (in Chinese)
- [4] Ran S-H (冉圣宏), Jin J-J (金建君), Xue J-Y (薛纪渝). Assessment of vulnerable ecological regions: Theory and methodology. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2002, **17**(1): 117-122 (in Chinese)
- [5] Lu D-A (卢冬爱), Tan S-C (谈树成), Xia J-S (夏既胜). Analysis on the ecological vulnerability of Dali City based on its landscape pattern and sensitivity to soil and water loss. *Yunnan Geographic Environment Research* (云南地理环境研究), 2009, **21**(2): 92-96 (in Chinese)
- [6] Liu Y-F (刘艳芬), Zhang J (张杰), Ma Y (马毅), *et al.* Changes of wetland landscape pattern in eastern Yellow River delta nature reserve from 1995 to 1999. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(11): 2904-2911 (in Chinese)
- [7] Li S-C (李双成), Wu S-H (吴绍洪), Dai E-F (戴尔阜). Assessing the fragility of ecosystem using artificial neural network model. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(3): 621-626 (in Chinese)
- [8] Wang SY, Liu JS, Yang CJ. Eco-environmental vulnerability evaluation in the Yellow River basin, China. *Pedosphere*, 2008, **18**: 171-182
- [9] Fan Z-W (樊哲文), Liu M-S (刘木生), Shen W-Q (沈文清), *et al.* GIS-based assessment on eco-vulnerability of Jiangxi Province. *Journal of Geo-Information Science* (地球信息科学学报), 2009, **11**(2): 202-208 (in Chinese)
- [10] Li L, Shi ZH, Yin W, *et al.* A fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to eco-environmental vulnerability assessment for the Danjiangkou Reservoir area, China. *Ecological Modelling*, 2009, **220**: 3439-3447
- [11] Huang PH, Tsai JS, Lin WT. Using multiple-criteria decision-making techniques for eco-environmental vulnerability assessment: A case study on the Chi-Jia-Wan Stream watershed, Taiwan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **168**: 141-158
- [12] Liu X-W (柳新伟), Zhou H-C (周厚诚), Li P (李萍), *et al.* A conceptual analysis of ecosystem stability. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24**(11): 2635-2640 (in Chinese)
- [13] Lu Y-L (卢亚灵), Yan L (颜磊), Xu X-G (许学工). Ecological vulnerability assessment and spatial auto-correlation analysis over the Bohai Rim Region. *Resources Science* (资源科学), 2010, **32**(2): 303-308 (in Chinese)
- [14] Qiao Q (乔青), Gao J-X (高吉喜), Wang W (王维), *et al.* Method and application of ecological fragility assessment. *Research of Environmental Sciences* (环境科学研究), 2008, **21**(5): 117-123 (in Chinese)
- [15] Liu Q-J (刘前进), Yu X-X (于兴修). Vertical landscape pattern on soil erosion intensity in the rocky area of northern China: A case study in the Yimeng Mountainous Area, Shandong. *Geographical Research* (地理研究), 2010, **29**(8): 1471-1483 (in Chinese)
- [16] Wang Y-P (王延平), Liu X (刘霞), Yao X-Y (姚孝友), *et al.* AHP analysis of soil and water conservation ecological fragility assessment in Yimeng Mountain Area of Huaihe River valley. *Science of Soil and Water Conservation* (中国水土保持科学), 2010, **8**(3): 20-27 (in Chinese)
- [17] Sun X-M (孙秀美), Sun X-H (孙希华), Feng J-H (冯俊华). Sensitivity appraisal for soil erosion in the Yimeng Mountainous Area. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2007, **27**(3): 84-92 (in Chinese)
- [18] Fu B-J (傅伯杰). Landscape diversity analysis and mapping. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1995, **15**(1): 345-350 (in Chinese)
- [19] Song Y-Q (宋豫秦), Cao M-L (曹明兰). Landscape ecological security assessment of Beijing City based on RS and GIS. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用

- 生态学报), 2010, **21**(11): 2889–2895 (in Chinese)
- [20] Li D-K (李登科), Fan J-Z (范建忠), Wang J (王娟). Change characteristics and their causes of fractional vegetation coverage (FVC) in Shaanxi Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(11): 2896–2903 (in Chinese)
- [21] Tao B (陶波), Li K-R (李克让), Shao X-M (邵雪梅), *et al.* Temporal and spatial pattern of net primary production of terrestrial ecosystems in China. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2003, **58**(3): 372–380 (in Chinese)
- [22] Cao M, Prince SD, Small J, *et al.* Remotely sensed interannual variations and trends in terrestrial net primary productivity 1981–2000. *Ecosystems*, 2004, **7**: 233–242
- [23] Li X-S (李晓松), Ji C-C (姬翠翠), Zeng Y (曾源), *et al.* Dynamics of water and soil loss based on remote sensing and GIS: A case study in Chicheng County of Hebei Province. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2009, **28**(9): 1723–1729 (in Chinese)
- [24] Men M-X (门明新), Zhao T-K (赵同科), Peng Z-P (彭正萍), *et al.* Study on the soil erodibility based on the soil partial-size distribution in Hebei Province. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2004, **37**(11): 1647–1653 (in Chinese)
- [25] Zhou R (周锐), Li Y-H (李月辉), Hu Y-M (胡远满), *et al.* Protection regionalization of Houshi Forest Park based on landscape sensitivity. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(3): 665–672 (in Chinese)
- [26] Wang XD, Zhong XH, Liu SZ, *et al.* Regional assessment of environmental vulnerability in the Tibetan Plateau: Development and application of a new method. *Journal of Arid Environments*, 2008, **72**: 1929–1939
- [27] Ma Q (马骞), Yu X-X (于兴修), Liu Q-J (刘前进), *et al.* Research on dynamic change of soil erosion distribution and its controlling factors in Yimeng Mountainous Area of China. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2010, **43**(22): 4652–4662 (in Chinese)

---

作者简介 刘正佳, 男, 1986年生, 硕士研究生. 主要从事遥感和GIS在生态环境中的应用研究. E-mail: lzj7sdjn@126.com

责任编辑 杨弘

---