

# 桂西北石漠化空间分布及尺度差异

杨青青<sup>1,2,3</sup>, 王克林<sup>1,2,\*</sup>, 岳跃民<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125;  
2. 中国科学院环江喀斯特系统观测研究站, 环江 547100; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:**运用研究区 TM 影像, 结合 GIS&RS 技术等手段建立桂西北石漠化基础数据, 通过多元逐步回归、冗余分析 (RDA) 研究了不同尺度上桂西北石漠化与相关因子的关系, 探索石漠化的空间分布规律及尺度差异性。结果表明, 自然因素对石漠化分布的影响大于人为因素, 人为作用的影响随着石漠化等级的提高而增大。石漠化空间分布的控制因子存在尺度转移。在县级尺度上, 土壤类型起决定性作用, 石质土对石漠化的贡献率最大; 在乡镇尺度上, 地形与土地利用类型的影响更重要, 石漠化因子的重要性排序为山地比例 > 平均高程 > 裸岩地 > 石灰土 > 未利用地 > 石质土。两个尺度上, 极强度石漠化均表现为人为活动的结果。由于石漠化空间分布的控制因子存在尺度差异, 部署石漠化恢复治理任务时, 需遵从其空间分布的规律。

**关键词:**桂西北; 喀斯特; 石漠化; RDA; 多元回归分析

文章编号: 1000-0933(2009)07-3629-12 中图分类号: P208 文献标识码: A

## Spatial distribution of rocky desertification and its difference between scales in northwest Guangxi

YANG Qing-Qing<sup>1,2,3</sup>, WANG Ke-Lin<sup>1,2,\*</sup>, YUE Yue-Min<sup>1,2,3</sup>

1 Key Laboratory for Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

2 Huanjiang Observation and Research Station of Karst ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, China

3 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

*Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7): 3629 ~ 3640.

**Abstract:** On the basis of TM images and GIS, RS technology, basic database on rocky desertification in the northwest Guangxi was built. The relationship between rocky desertification and related factors at different scales was analyzed, and the spatial distribution pattern of rocky desertification and its difference between scales were explored by using multiple stepwise regression analysis and redundancy analysis (RDA). The results showed that the influence of natural factors on the distribution of rocky desertification was greater than that of the social factors, and the influence of human activity gradually increased with increasing grade of rocky desertification. Decisive factor changed with scale in determining the spatial distribution of rocky desertification. At the county scale soil types played a decisive role, for example, stony soil had most contribution on rocky desertification. At the town scale, both landform and land use pattern were the most important factors. The importance of impact factors in decreasing order was: montanic proportion > average elevation > bare rock land > limestone soil > unutilized land > rocky soil. Extremely strong rocky desertification was caused by human activity at both scales. Due to the scale difference of decisive factor in regulating the distribution of rocky desertification, it was necessary to abide by the distribution pattern when deploying the tasks on recovery and control of rocky desertification.

**基金项目:**中国科学院西部行动计划项目 (KZCX2-XB2-08); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 课题资助项目 (2006CB403208)

**收稿日期:** 2009-03-03; **修订日期:** 2009-04-15

**致谢:**中国科学院地理科学与资源研究所刘纪远和庄大方研究员以及中国科学院南京土壤研究所史学正、于东升和潘贤章等提供的土壤类型数据; 中国地质科学院岩溶地质研究所提供了地质数据, 在此一并致谢。

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kelin@isa.ac.cn

**Key Words:** northwest of Guangxi; karst; rocky desertification; RDA; multiple regression

尺度的存在根源于地球表层自然界的等级组织和复杂性,尺度本质上是自然界所固有的特征或规律,而为有机体所感知<sup>[1]</sup>。尺度问题是一切生态调查研究的基本问题<sup>[2]</sup>。不同的规模尺度上具有不同的特征,包括不同的影响因素、不同的演变机理与过程<sup>[3,4]</sup>。任何单一尺度都不能完全理解生态现象,对于单一尺度和组织水平的观测,最大程度上只能获得与那一尺度或水平相关的格局和过程的规律<sup>[5]</sup>,只有当测量尺度与所研究现象的本征尺度相符时,格局或过程才能被可靠的揭示<sup>[6,7]</sup>。因此处理尺度问题的能力对于分析和监测生态系统方法论框架是有益的。喀斯特地区地表起伏剧烈,景观异常破碎,在大尺度明显稳定的景观,可能隐藏了在小尺度很多的变化。

石漠化概念最早于 20 世纪 80 年代初提出<sup>[8]</sup>,随后被定义为表征植被、土壤覆盖的喀斯特地区转变为岩石裸露的喀斯特景观的过程,导致了喀斯特风化残积层土的迅速贫瘠化<sup>[9]</sup>。我国喀斯特地区是典型的生态脆弱区,其石漠化问题已成为该区最严峻的生态经济问题,构成该地区灾害和贫困之源<sup>[10]</sup>。典型石漠化地区的治理经验证明石漠化的治理需要有不同时空尺度下驱动机制理论的指导,特别是确定自然因素和人为作用对石漠化过程的正负面影响以及各自的贡献率<sup>[11]</sup>。故不同尺度下石漠化分布特征及其与环境因子的关系,对于了解喀斯特地区生态系统的过程具有重要意义,受到广泛关注<sup>[8~14]</sup>。现今对石漠化空间分布的研究多局限在单个因素<sup>[10,12~14]</sup>,且多数是对空间相关性的探讨,全面而系统地定量分析各种因素对石漠化的空间分布的影响的研究还较欠缺,对其尺度差异性的相关问题的研究更少。本文运用 GIS&RS 技术,采用多元逐步回归方法和数量生态学中的冗余分析方法(RDA)分别在县级和乡镇尺度研究石漠化的空间分布规律,旨在揭示石漠化的空间分布的决定因素及不同尺度之间的差异,为喀斯特地区石漠化治理提供参考。

## 1 研究区概况与方法

### 1.1 研究区概况

广西壮族自治区河池市东连柳州,南界南宁,西接百色,北邻贵州省布依族苗族自治州,地处 106°34'18"~109°09'38"E 和 23°41'36"~25°32'16"N。该区处于云贵高原向广西丘陵过渡的斜坡地带,地势由西北向东南倾斜,全境地形地貌基本上由四大山脉(东北部的九万大山,西北部的凤凰山、东风岭,西南部的都阳山),三大断裂(丹池断裂、都安至马山断裂、四堡断裂)和两大水系(红水河水系、龙江河水系)所组成。研究区属亚热带季风气候,年均温为 17~21℃,7 月份温度最高,约为 33℃。年均降水量 1090~1920mm,夏季降水量占全年降水量的 45%~60%。地表河流 206 条,地下河 159 条,深约 30~50m。主要河流有红水河、龙江河、环江河、刁江河、澄江河等,均由西北流向东南。

研究区土地总面积 3.34 万 km<sup>2</sup>,占广西壮族自治区陆地面积的 14.1%,辖金城江区、宜州市、罗城仫佬族自治县、环江毛南族自治县、南丹县、天峨县、凤山县、东兰县、巴马瑶族自治县、都安瑶族自治县、大化瑶族自治县 11 个县(市、区),金城江区为市府所在地。以碳酸盐为主的地质基础使得喀斯特地貌广泛发育。由于喀斯特生态系统具自我调节、自我修复的能力低,抗干扰能力弱、空间转移能力强等一系列脆弱性特征,故研究区内环境主要表现为:地表崎岖破碎、地势起伏大、非地带性土壤发育;成土速度慢、土层薄、肥力不足;喀斯特植被的旱生性、岩生性和喜钙性使植被生长困难,植被覆盖率低,生态系统抗干扰能力低;虽然降水丰富,但广泛发育的地表和地下的双层空间结构,使地表水漏失严重、地下溶洞交织,且夏季易涝,冬季易旱;此外,石山区人口压力大,人类在开垦森林矿产等自然资源的同时破坏了生态系统的平衡,造成严重的水土流失,也影响了经济的发展,从而陷入“PPE 怪圈”,即“贫困—人口过度增长—环境退化”之间的恶性循环,所属的 11 个县(市、区)有 9 个属于国家级贫困县。

### 1.2 研究方法

多尺度分析方法有多尺度统计分析和多层次统计方法<sup>[15]</sup>,前者由 Veldkamp A. 等人<sup>[16]</sup>提出,De Koning 等人<sup>[17]</sup>作了改进,并在喀斯特地区人地关系<sup>[18]</sup>、土地利用与自然社会因子关系<sup>[19]</sup>等相关研究中得到了

很好的应用。冗余分析(RDA, redundancy analysis)是一种直接梯度分析方法,能从统计学的角度来评价一个或一组变量与另一组多变量数据之间的关系<sup>[20,21]</sup>。它是基于排序技术进行的线性分析方法,其优势在于能够独立保持各个环境变量对石漠化变化的贡献率,能有效地对多个解释变量进行统计检验,并确定对响应变量变化且具有最大解释能力的最小变量组<sup>[22]</sup>,其二维排序图直观的展现了石漠化与环境及环境因子之间的关系。

本文通过 RS 与 GIS 技术分别获取以县为单位和以乡镇为单位的石漠化数据、自然背景数据和社会经济数据,采用多元逐步回归方法在两个尺度分析石漠化与影响因素之间的关系,进一步用 RDA 方法在乡镇尺度分析石漠化的空间分布。两个尺度由于数据获取难易不同,指标稍有不同。

### 1.3 数据来源与预处理

(1)基础数据来源 本研究采用的数据包括研究区 1:25 万 DEM 数据、土地利用图、行政界限图和 1:50 万地质岩性图,以及 1:100 万土壤类型图<sup>[23]</sup>。所有图件统一为 Albers 投影,中央经线 105°E,标准纬线 1 是 25°N,标准纬线 2 是 47°N。另外还有遥感影像 LANDSAT-TM 和 2005 年社会经济统计年鉴。土地利用数据由国家科学数据共享工程——地球系统科学数据共享网提供的 2000 年土地利用现状数据结合遥感图像的目视解释生成<sup>[24]</sup>。土壤数据由中国科学院资源环境科学数据中心提供。

(2)遥感影像预处理 2004 年 12 月下旬的 LANDSAT-TM 数据共 6 景,通过 ERDAS IMAGE8.5 软件进行几何纠正。然后把纠正好的影像进行拼接、波段合成,并根据行政边界切割出研究区图像。

(3)石漠化数据 以遥感数据为基础,提取研究区石漠化数据。首先,借助地质岩性图提取喀斯特区域,对喀斯特区域遥感影像进行目视解译。石漠化等级划分采用植被加土被和岩石裸露率两个指标。植被加土被依据熊康宁等<sup>[25]</sup>的划分标准,裸岩率分级结合李阳兵等<sup>[12]</sup>的标准。因 TM4、3、2 波段组合对植被、石灰岩、土壤 3 种地物的区分较好,在 Arcview3.2 中对 TM 图像采取 432 假彩色合成,完成人工制图后,再辅以土地利用现状图和土壤类型图修正结果,最后用 Arcgis8.3 建立拓扑关系。经验证该方法精度可达 93.6%<sup>[26]</sup>。研究区石漠化总面积为  $2.69 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,占河池市总面积的 8.02%,石漠化发生率为 11.95%(石漠化分布见图 1)。潜在、轻度、中度、强度、极强度石漠化的面积分别为 537.46,914.68,737.86,359.62,144.83  $\text{km}^2$ ,各占总面积的 19.95%,33.95%,27.38%,13.35%,5.38%。

(4)基础数据预处理 研究区的土壤数据共包括铁铝土、人为土、半水成土、初育土 4 个土纲,9 个土类,16 个亚类。以土类为单位,把发生石漠化的 9 种土壤亚类(表 1)分成 4 类:石灰土,石质土,粗骨土和其他。研究区的地质数据中地层岩组按照碳酸盐岩的含量分成 2 类:纯质碳酸盐岩和不纯碳酸盐岩。其中纯质碳酸盐岩的碳酸盐岩含量大于 90%,包括石灰岩,白云岩,石灰岩与白云岩混合(石灰岩夹白云岩、白云岩夹石灰岩),不纯碳酸盐岩的碳酸盐岩含量低于 90%,包括石灰岩夹层、不纯石灰岩、白云岩夹层、碳酸盐岩和碳酸盐岩夹层。土地利用数据将研究区划分为 6 个一级地类、15 个二级地类,一级地类为耕地,林地,草地,水域,城乡工矿居民用地和未利用地。本研究统计的一级地类有未利用地和草地,二级地类有旱地、有林地、农村居民点、

表 1 研究区不同土壤的石漠化

Table 1 Rock desertification of different soil in study area

| 土壤 Soil            | 亚类 Subtypes                          | 石漠化面积 Rocky desertification area ( $\text{km}^2$ ) | 石漠化发生率 Occurrence of rocky desertification (%) |
|--------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 石灰土 Limestone soil | 棕色石灰土 Brown limestone soil           | 1817.52                                            | 13.76                                          |
|                    | 黑色石灰土 Black limestone soil           | 58.9                                               | 25.76                                          |
| 石质土 Rocky soil     | 石质土 Rocky soil                       | 396.67                                             | 17.17                                          |
| 粗骨土 Skeletal soil  | 硅质岩粗骨土 Siliceous rocky skeletal soil | 219.76                                             | 10.85                                          |
|                    | 酸性粗骨土 Acid skeletal soil             | 5.58                                               | 55.37                                          |
| 其他 Other           | 赤红壤 Lateritic red soil               | 25.93                                              | 7.55                                           |
|                    | 红壤 Red soil                          | 104.03                                             | 4.51                                           |
|                    | 黄红壤 Yellow-red soil                  | 61.37                                              | 4.98                                           |
|                    | 黄壤 Yellow soil                       | 4.51                                               | 10.57                                          |

裸土、裸岩地。土地利用组成指标均由 Arcgis8.3 完成矢量图层叠加后统计得到。研究区 500m 以下主要为河谷、平原和丘陵。500m 以上大多为山地,500 ~ 800m 为低山,800 ~ 1000m 为中山,1000m 以上为高山。因此以 500m 作为山地界限,统计 >500m 面积比例为山地比例。以 DEM 为基础,在 Arcgis8.3 中用 zonal statistic 获得地形指标。社会经济数据由 2005 年统计年鉴得到。

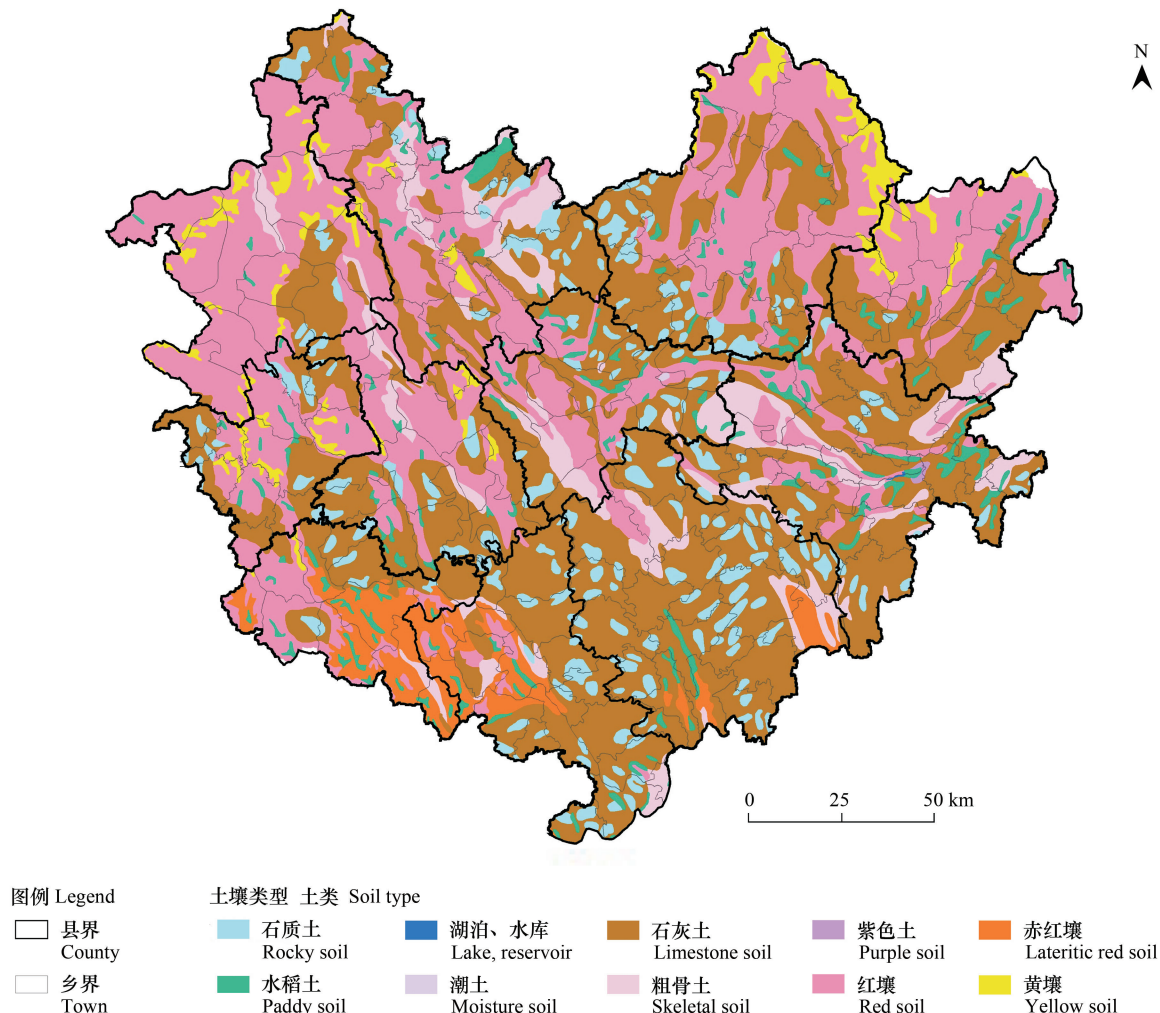


图 1 研究区土壤分布

Fig. 1 The soil types of study area

## 2 结果与分析

### 2.1 县级尺度石漠化的空间分布分析

#### 2.1.1 县级尺度空间数据

石漠化从植被退化、土壤退化、地表状况恶化到岩石裸露是一个渐变的过程<sup>[27]</sup>。从潜在到极强度石漠化,植被生境愈来愈向旱生、岩生方向转化,群落结构趋于简单,多样性和植被盖度降低。因为不同强度等级石漠化其土地退化程度<sup>[28]</sup>,恢复难度和时间不同<sup>[29]</sup>,故对潜在-极强度分别设置 1 ~ 5 权重来综合石漠化面积与强度信息。以研究区 11 个县作为样本,因变量为  $Y_1 \sim Y_5$  潜在-极强度的石漠化面积,  $Y_6$  石漠化总面积、 $Y_7$  加权石漠化面积,共 7 个。自变量共 43 个,其中自然背景变量 17 个,土地利用组成类 7 个,社会经济变量 19 个。

A 自然背景变量 I 地形类 5 个:  $D_1$  平均高程(m)、 $D_2$  平均坡度(°)、 $D_3$  平均起伏度(m)、 $D_4$  山地比例(%)、 $D_5$  大于 25°比例(%); II 环境类 5 个,  $H_1$  河网密度(km/km<sup>2</sup>)、 $H_2$  河网长度(km)、 $H_3$  气温(°)、 $H_4$  降

雨量(mm)、H5 森林覆盖率(%) ;Ⅲ地质类 3 个:G1 喀斯特比例(%)、G2 纯质碳酸盐岩面积(km<sup>2</sup>)、G3 不纯碳酸盐岩面积(km<sup>2</sup>) ;Ⅳ土壤类 4 个:S1 石灰土面积(km<sup>2</sup>)、S2 石质土面积(km<sup>2</sup>)、S3 粗骨土面积(km<sup>2</sup>)、S4 其他土壤面积(km<sup>2</sup>) ;

B 土地利用变量 L1 旱地面积(km<sup>2</sup>)、L2 有林地面积(km<sup>2</sup>)、L3 草地面积(km<sup>2</sup>)、L4 农村居民点面积(km<sup>2</sup>)、L5 裸土面积(km<sup>2</sup>)、L6 裸岩地面积(km<sup>2</sup>)、L7 未利用地面积(km<sup>2</sup>)。

C 社会经济变量 X1 人均 GDP(元)、X2 单位面积 GDP(元/km<sup>2</sup>)、X3 农业人均 GDP(元)、X4 有效灌溉面积(×10<sup>3</sup>hm<sup>2</sup>)、X5 农业产值(万元)、X6 乡内劳力(人)、X7 粮食播种面积(hm<sup>2</sup>)、X8 每公顷产量(kg)、X9 粮食总产量(t)、X10 人均耕地(公顷)、X11 农民人均纯收入(元)、X12 农业人口(万人)、X13 人口密度(人/km<sup>2</sup>)、X14 总人口(万人)、X15 第一产业 GDP(万元)、X16 旱地面积(hm<sup>2</sup>)、X17 工业总产值(万元)、X18 人均工业总产值(元)、X19 单位面积工业总产值(元/km<sup>2</sup>)。

2.1.2 县级尺度空间分布特征分析

对所有自变量归一化处理,消除量纲的差别后,再进行主成分分析,得出各主成分的特征向量及累积贡献率。前 4 个主成分的信息量分别占总信息量的 40.23%、22.66%、10.11% 和 8.68%。第一主成分总人口、粮食总产量以及其他社会经济信息的负荷值较大;第二主成分农业人均 GDP 等农业信息的负荷值较大;第三主成分人均工业总产值的负荷值较大;第四主成分人均耕地的负荷值较大。4 个主成分累计信息量达总信息量的 82%,说明前 4 个主成分能反映石漠化相关因子的主要信息,但并不能完全反映石漠化与因子的关系。采用多元逐步回归分析确定对石漠化空间分布贡献显著的因子(以 0.05 的显著性水平为选择标准),并建立石漠化空间分布的多元回归方程(表 2)。可见,所选变量对石漠化分布的解释水平较高,尤其强度石漠化与极强度石漠化 94.3% 能被所选因子解释。石质土的面积对潜在-强度石漠化的贡献率最大。不纯碳酸盐岩面积对极强度石漠化的贡献率最大。

表 2 县级尺度各因子对石漠化影响的多元逐步回归分析

Table 2 Results of multiple stepwise regression of the effect of factors on rock desertification at the town scale

| 因变量<br>Dependent | 入选因子<br>Selected factors | 方程 Equation                                           | 显著性<br>Sig. | 调整决定系数<br>Adjusted R <sup>2</sup> |
|------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------|-------------|-----------------------------------|
| Y1               | S2 H3                    | Y1 = 0.946S2 - 0.478H3                                | 0.002       | 0.735                             |
| Y2               | S2 H3                    | Y2 = 1.007S2 - 0.337H3                                | 0.000       | 0.845                             |
| Y3               | S2                       | Y2 = 0.886S2                                          | 0.000       | 0.761                             |
| Y4               | S2 S3                    | Y2 = 0.748S2 + 0.422S3                                | 0.000       | 0.943                             |
| Y5               | G3 L3 X5                 | Y5 = 0.720G3 + 0.598L7 - 0.409X5                      | 0.000       | 0.943                             |
| Y6               | S2 X6                    | Y6 = 0.878S2 + 0.323X6                                | 0.000       | 0.860                             |
| Y7               | S2 X18 X2 X6 S3          | Y7 = 0.726S2 + 0.272X6 + 0.506X18 - 0.484X2 + 0.250S3 | 0.000       | 0.991                             |

石质土指土壤极稀薄的地表。但石质土并不等同于石漠化,部分石质土地区地表植被覆盖良好,甚至形成森林生态系统。如木论国家自然保护区的石质土区,其地上岩石出露率达 90%,但仍生长着茂密森林。对石质土与所有的变量进行相关分析,结果表明,S2(石质土)与 12 个因子有显著的相关性(表 3)。其中与石灰土、裸岩地、未利用地、纯碳酸盐岩、降雨量、农业人口存在极显著正相关,与河网密度存在极显著负相关。据图层叠加统计分析,石质土主要分布在典型连片的喀斯特峰丛洼地地貌,且镶嵌于石灰土中(图 2),85.64% 分布在连续性碳酸盐岩地区。其中,40.16% 分布在石灰岩地层,24.61% 分布在石灰岩夹白云岩,18.09% 分布在白云岩夹石灰岩,2.78% 分布在白云岩地层。主要原因为石灰岩岩层比白云石岩层更易于溶解,更易被水溶蚀,形成地下空间<sup>[14]</sup>,导致地表土壤结构和河流分布的差异。故石质土分布区基本无土壤或者土层极薄,其分布与石漠化分布趋势一致(图 3),是脆弱喀斯特生态系统恶劣环境的极端表现。研究区石质土面积大的县经济落后,人口众多,人民生活主要依靠种植业,最典型的都安县农业人口达 93%,以致形成“环境恶劣—贫困—人口过度增长—环境退化”,陷入“PPE 怪圈”。石质土与 4 个社会经济因子的相关证实了以上

推论。

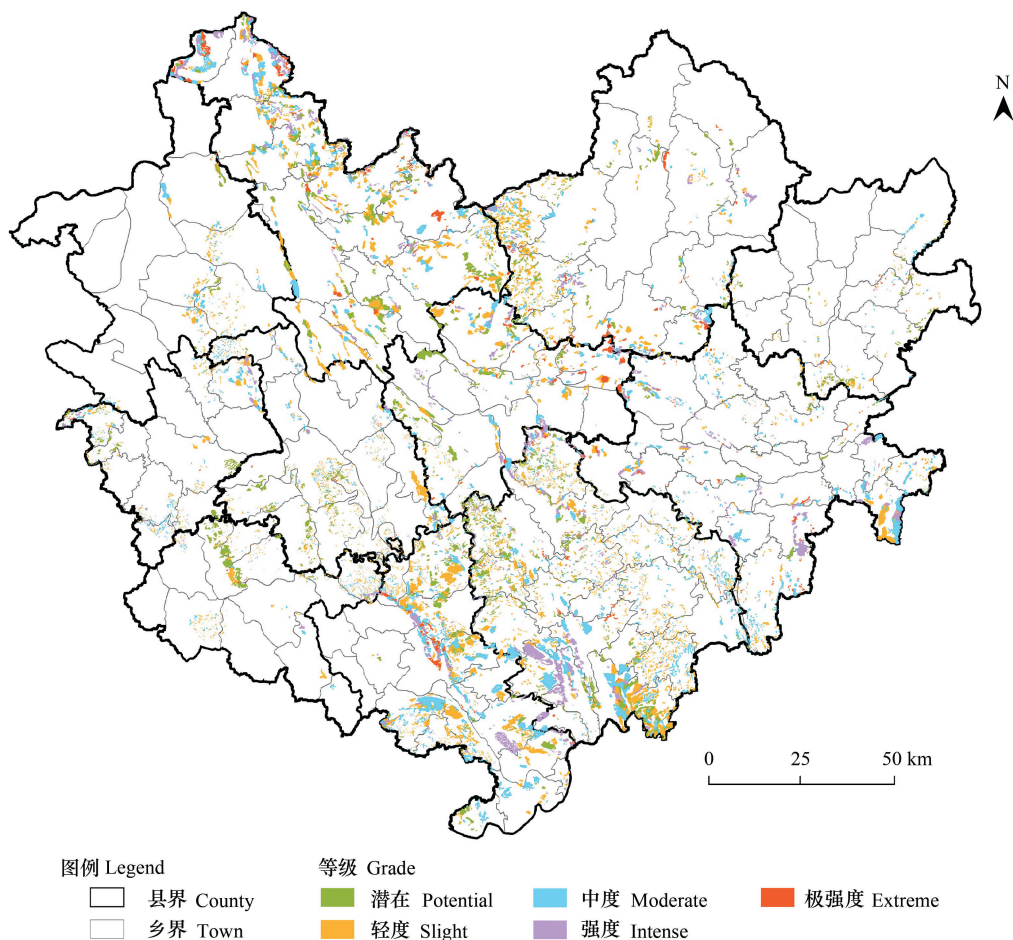


图2 研究区石漠化分布

Fig. 2 Distribution of rock desertification in study area

表3 石质土与其它因子相关性

Table 3 Correlation of stony soil and other factors

| S2  | 自然变量 Natural factors         |       |       |        |                        |       |
|-----|------------------------------|-------|-------|--------|------------------------|-------|
|     | G1                           | G2    | G3    | H1     | H4                     | S1    |
| R   | 0.688                        | 0.779 | 0.616 | -0.858 | 0.754                  | 0.884 |
| Sig | 0.019                        | 0.005 | 0.044 | 0.001  | 0.007                  | 0.000 |
| S2  | 社会经济变量 Socioeconomic factors |       |       |        | 土地利用变量 Landuse factors |       |
|     | X7                           | X12   | X14   | X16    | L7                     | L6    |
| R   | 0.668                        | 0.74  | 0.712 | 0.706  | 0.848                  | 0.843 |
| Sig | 0.025                        | 0.009 | 0.014 | 0.015  | 0.001                  | 0.001 |

气候是喀斯特形成、演化的背景,是重要的喀斯特生态系统的驱动力。潜在、轻度石漠化除与石质土有关外,还与气温有很大关联。当气温大于  $15^{\circ}\text{C}$  时,喀斯特地区岩溶作用随着气温升高而增强<sup>[9,30]</sup>。研究区所有县的温度在  $17.7 \sim 21.7^{\circ}\text{C}$ ,溶蚀强烈。又因降雨集中于 4~8 月份,雨强大,故侵蚀也较强,气温和降雨的综合作用导致喀斯特地区土壤流失与漏失严重,从而促进石漠化形成。对潜在石漠化和轻度石漠化面积取对数,气温减去  $15^{\circ}\text{C}$ ,使它们三者相同的数据范围,考察其关系。由图 4 可见,除南丹县与天峨县外,潜在、轻度石漠化与气温呈现正相关,相关系数分别为 0.82 和 0.76。南丹与天峨县例外,南丹县工矿业发达,其石漠化与矿业开采有很大关系。天峨县的喀斯特比例为 23%,远远小于其他县。Xiong 等也取得类似结果<sup>[31]</sup>。

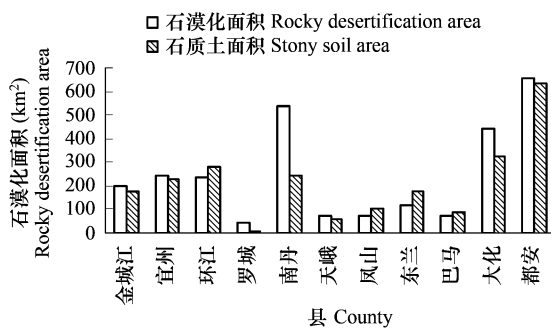


图3 石质土与石漠化的相关性

Fig. 3 Correlation of rocky soil and rocky desertification

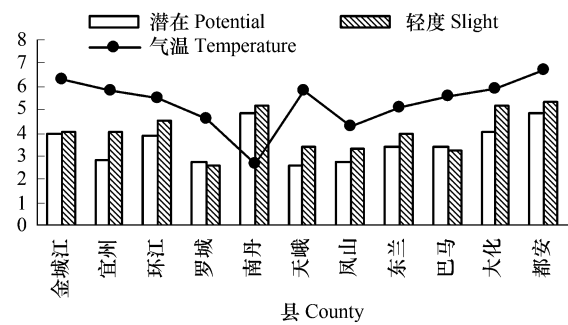


图4 潜在、轻度石漠化与气温相关性

Fig. 4 Correlation of potential, slight rocky desertification and temperature

强度石漠化还与粗骨土的比例有关。从地质数据的岩层组成可知,许多岩组含有硅质岩夹层或团块,如罗城组,孤峰组,栖霞组,黄金组等。这些地层的碳酸盐岩溶蚀后,剩下硅质岩风化物形成硅质岩粗骨土。故研究区粗骨土以硅质岩粗骨土为主,占喀斯特总面积的 8.98%,酸性粗骨土仅占 0.04%。粗骨土为初育土,土体浅薄,土壤结构性差。表土层厚度 10~20cm,土壤剖面构型多为 A—C 或 A—AC—C 构型。表土层以下为风化或半风化的母质层,一般 20~50cm,厚度变幅较大,夹有大量岩屑体。表土层及母质层中石砾含量超过 35%。因此,酸性粗骨土与硅质岩粗骨土的石漠化发生率都较高(表 1),强度石漠化所占比例大。

极强度石漠化与不纯碳酸盐岩地层和草地的分布有显著的正相关,与农业产值负相关。不纯碳酸盐岩地层中有更多酸不溶物,地表相对于纯碳酸盐岩会有更厚的土层,利于人类的生产生活,喀斯特地区城镇大多在此类地区。城镇的工矿业发达,导致其周围工厂、采石场较多。据野外调查,城镇周围工矿业(采石厂、矿厂等)易形成强度以上石漠化,岩石裸露率多在 90% 以上。也正是由于这些地区主要发展工矿业,农业的投入受影响,因而农业产值较低。

### 2.1.3 县级尺度石漠化影响因素排序

石质土石漠化虽然只占全部石漠化面积的 14.72%,但石质土地区是纯质碳酸盐岩地区水分溶蚀下渗、土壤漏失,以致形成水土分离格局的典型,是地表土壤、岩性和水文的综合反映。县级尺度石漠化的分布是以上三个自然因素综合作用,同时叠加社会经济因素如县人均工业总产值和单位面积 GDP 的影响。考虑主导因素石质土的分布,研究区受石漠化威胁最大的依次是都安县、大化县、环江县。同时考虑石漠化的强度等级后,影响石漠化的因子排序为:石质土>人均工业总产值>单位面积 GDP>乡内劳力>粗骨土比例。

## 2.2 乡镇尺度石漠化的空间分布分析

### 2.2.1 乡镇尺度空间数据

研究区共有 157 个乡镇发生石漠化(7 个无石漠化发生)。因变量为 5 个等级石漠化面积  $Y_1 \sim Y_5$ ,石漠化总面积  $Y_6$ ,以及加权石漠化面积  $Y_7$  共 7 个。自变量共 24 个,包括自然因子 14 个,土地利用组成因子 7 个,社会经济因子 3 个。

A 自然因子 I 地形类 5 个:  $D_1$  平均高程(m)、 $D_2$  平均坡度( $^\circ$ )、 $D_3$  平均起伏度(m)、 $D_4$  山地比例(% )、 $D_5$  大于  $25^\circ$  坡度比例(% ) ; II 环境类 2 个,  $H_1$  河网密度( $\text{km}/\text{km}^2$ )、 $H_2$  河网长度(km) ; III 地质类 3 个:  $G_1$  喀斯特比例(% )、 $G_2$  纯质碳酸盐岩面积( $\text{km}^2$ )、 $G_3$  不纯碳酸盐岩面积( $\text{km}^2$ ) ; IV 土壤类 4 个:  $S_1$  石灰土面积( $\text{km}^2$ )、 $S_2$  石质土面积( $\text{km}^2$ )、 $S_3$  粗骨土面积( $\text{km}^2$ )、 $S_4$  其他土壤面积( $\text{km}^2$ ) ;

B 土地利用因子  $L_1$  旱地面积( $\text{km}^2$ )、 $L_2$  有林地面积( $\text{km}^2$ )、 $L_3$  草地面积( $\text{km}^2$ )、 $L_4$  农村居民点面积( $\text{km}^2$ )、 $L_5$  裸土面积( $\text{km}^2$ )、 $L_6$  裸岩地面积( $\text{km}^2$ )、 $L_7$  未利用地面积( $\text{km}^2$ )。

C 社会经济因子  $X_1$  乡镇总人口(人)、 $X_2$  乡镇人口密度(人/ $\text{km}^2$ )、 $X_3$  人均 GDP(元)。

### 2.2.2 乡镇尺度回归模型分析

以  $Y_1 \sim Y_7$  为因变量,对所有自变量进行多元逐步回归分析。由表 4 可见,从潜在石漠化到极强度石漠

化,随着等级的提高,决定因子逐渐变少,模型的解释能力有降低的趋势。另外,贡献率最大的因子也随着等级的改变而改变,潜在石漠化贡献率最大的是石灰土,轻度、中度与强度石漠化贡献率最大的是未利用地与裸岩地,是人们对喀斯特地区土地的不合理利用导致其退化为裸岩地和未利用地。极强度石漠化依然主要为不纯碳酸盐岩,且与海拔正相关,与山地(>500m)比例负相关,说明人们在500m以下的地段开发活动较多,导致地表退化为低结构草地。石漠化总面积与加权面积的因子排序稍有不同,但未利用地的贡献率均为最大。

表 4 乡镇尺度下各因子对石漠化影响的多元逐步回归分析

Table 4 Results of multiple stepwise regression of effect of factors on rock desertification at the country scale

| 因变量<br>Dependent | 入选因子<br>Selected factors | 因子的标准系数<br>Standard coefficient of factors       | 调整决定系数显著性<br>Adjusted R <sup>2</sup> Sig. | 样本数<br>Sample <sup>①</sup> |
|------------------|--------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------|
| Y1               | S1 D4 L6 S4 S3 G1 H4 L1  | 0.450;0.371;0.350;0.273;0.269;0.193;0.242;-0.199 | 0.572 0.000                               | 129                        |
| Y2               | L7 S1 D4 S2 L3 S4        | 0.495;0.367;0.309;0.214;0.184;0.183              | 0.621 0.000                               | 149                        |
| Y3               | L7 L3 S2 G2 D1           | 0.633;0.267;0.263;0.193;0.166                    | 0.520 0.000                               | 147                        |
| Y4               | L6 L3 S1                 | 0.398;0.290;0.206;                               | 0.196 0.000                               | 121                        |
| Y5               | G3 D1 D4                 | 0.332;1.350;-1.058                               | 0.304 0.000                               | 107                        |
| Y6               | L7 S1 L3 D1 S4 S2 X2     | 0.557;0.368;0.305;0.292;0.246;0.260;0.138        | 0.715 0.000                               | 123                        |
| Y7               | L7 L3 S1 S2 D1 S4 X2     | 0.557;0.365;0.310;0.273;0.238;0.216;0.126        | 0.645 0.000                               | 123                        |

①有的乡镇无个别等级石漠化发生,不在统计范围内 Some towns which have no individual grade rocky desertification are not in statistical scope

2.2.3 乡镇尺度石漠化影响因素的 RDA 分析

回归模型虽能较为正确地反映出石漠化的空间分布规律,但影响因子之间存在复杂相关和相互影响,需进一步去除相互影响成分。另外,为排除乡镇面积与喀斯特比例的差异,用石漠化发生率来表示该乡镇发生石漠化的严重程度。石漠化发生率(Y8),即石漠化面积与相应的乡镇喀斯特面积的比值。添加石漠化发生率到石漠化的物种变量,以Y1~Y8为石漠化物种变量,所有24个因子为环境变量,采用冗余分析(RDA)来揭示两组变量之间的关系。选择有五个等级石漠化的乡镇共77个作为样本,对两组变量进行RDA分析。结果通过Monte Carlo test检验, $p=0.002$ ,第一个轴解释了石漠化变量的68.5%,石漠化与环境关系的96.2%,四个轴共解释了石漠化物种变量的71.2%,石漠化与环境关系的99.9%。石漠化与环境第一轴、第二轴的相关性分别为0.85、0.83。石漠化变量的四个轴与环境轴之间最大的相关为0.18,环境轴间完全垂直。以上这些都说明RDA分析能够很好的解决问题。

潜在、轻度石漠化、石漠化总面积分布在第四象限,中度、强度、极强度石漠化、石漠化发生率与加权石漠化面积在第一象限。排序图上箭头的夹角表示相关性,长短表示贡献率的大小。总人口与不纯碳酸盐岩的夹角最小,再次验证了以上推论,人口在不纯碳酸盐岩区聚集。极强度石漠化位于二者之间,主要受二者的影响。石漠化变量与环境变量箭头越近,受其影响越大,二者关系越紧密。如潜在石漠化与石质土的箭头最近,说明潜在石漠化与石质土在空间分布上有很强的相关性。轻度石漠化与纯质碳酸盐岩、石质土最相关。中度石漠化与裸岩地、未利用地的箭头最近。强度石漠化与总人口箭头最近。极强度石漠化与不纯碳酸盐岩的关系最密切。石漠化总面积与山地比例的关系最大。加权石漠化面积与裸岩地、未利用地、平均高程关系最大,石漠化发生率与总人口的关系最大。

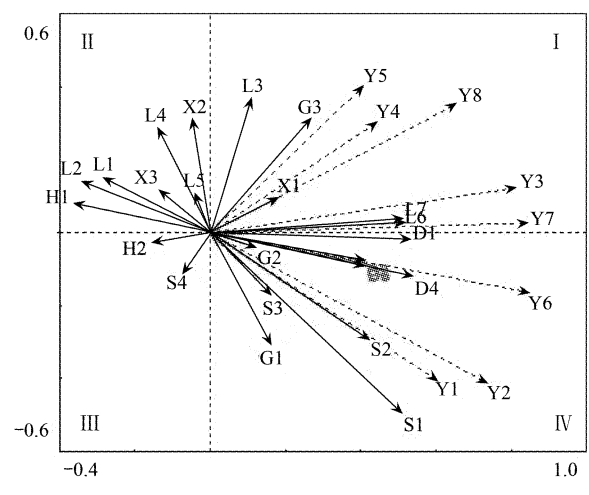


图 5 石漠化与环境因子的 RDA 二维排序图  
Fig. 5 Ordination diagram of the first two axes of RDA of rock desertification and environmental factors

以向右为正方向,石漠化变量全部分布在第一轴的正方向。第一轴的正方向以裸岩地、未利用地和平均高程的贡献率最大。这说明石漠化主要分布在平均高程较高,裸岩地和未利用地比例大的地区。第一轴的负方向代表河网密(长)度大,有林地比例大的地区。以向上为正方向,第二轴的正方向代表人口密度高,草地比例大的地区。负方向表示喀斯特比例大的地区。右图还清晰展现了 24 个变量之间的关系:平均坡度、平均起伏度、大于 25°坡度比例、山地比例这四个地形因子之间的相关性极高,但山地比例的箭头最长,对石漠化解释的贡献率最大。裸岩地和未利用地的箭头夹角很小,说明它们相关性极高。另外还有农村居民点与裸土、人口密度相关,以及河网密度与有林地、耕地相关。总之,所选的 24 个环境因子以裸岩

地、未利用地、石灰土、石质土、平均高程、山地比例、草地比例、河网密度、人口密度这 9 个环境因子为中心,向右的因子对石漠化有推动作用,向左为负关系。应用 RDA 分析这 9 个因子的贡献率,前 6 个因子均达到了 0.002 的显著性,最重要的 4 个因子为山地比例、平均高程、裸岩地和石灰土(表 5)。

#### 2.2.4 乡镇尺度石漠化影响因子排序

据回归分析,石漠化总面积和石漠化加权面积的主要影响因子为未利用地、草地面积、石灰土、石质土、其他土壤、平均高程、乡镇人口密度;冗余分析进一步表明这些因子的重要性排序为山地比例 > 平均高程 > 裸岩地 > 石灰土 > 未利用地 > 石质土。考虑主导因素中地形因素,典型的乡镇为凤山县的更沙乡、南丹县的小场镇、巴定乡,考虑土地利用的裸岩地因素,典型乡镇为都安县的龙湾乡、地苏乡和大化县的镇西乡。

#### 2.3 石漠化的空间分布的尺度差异性

研究结果表明运用线性逐步回归研究石漠化的影响因素,随着尺度缩小,模型的解释能力变差。针对一个特定的区域而言,空间格局表现为大尺度上的线性变化与小尺度上的非线性变化特点<sup>[32]</sup>。县级尺度回归分析的结果中随着石漠化的等级提高,贡献最大的因子从土壤变为岩性与土地利用因子,人为作用的影响初现;乡镇尺度 RDA 排序图按逆时针从第四象限到第一象限,解释变量为从潜在-轻度-石漠化总面积-加权面积直到极强度石漠化排列,环境因子为从土壤-地形-土地利用-人口排列,影响因子逐步由自然因子转变为人为因子。这说明两个尺度人为影响都随石漠化等级升高而发挥更大作用。在较大的县级尺度上,石漠化主要受石质土和人均工业总产值的影响;而在较小的乡镇尺度上,石漠化主要受山地比例和裸岩地的影响。这些说明研究区自然因素对石漠化分布的影响大于人为因素的影响,石漠化的空间分布存在尺度转移。产生这种尺度转移的原因是地质岩性、土壤类型和气温的变异范围相对较大,小范围内相对均一。当研究单元缩小时,对石漠化空间变异解释贡献最大的因子就变成小范围内变异较大的因子,如地形与土地利用方式。Walsh S J 等<sup>[5]</sup>提出在评价人为空间中的土地利用变化与由社会调查和空间数字方法定义的一系列驱动力之间的联系时,社会和生物物理系统中的尺度依赖性是一个重要的考虑因素。对县级以上尺度的研究认为地质构造运动塑造的地貌景观、古环境演化、季风气候和社会经济压力为石漠化的主要驱动力<sup>[29,33]</sup>,强调地质背景对喀斯特生态系统的限制<sup>[30]</sup>,岩性与石漠化的空间分布的相关性<sup>[10,14]</sup>;县级以下尺度的石漠化空间分布的研究表明土地利用<sup>[12]</sup>、地形(坡度、坡向等)<sup>[34]</sup>、人口<sup>[35]</sup>对其影响显著。

### 3 结论

(1)对单一因子的研究往往导致片面强调其对石漠化分布的作用<sup>[10,12~14,36,37]</sup>,通过综合分析与石漠化相关的各类因素,发现自然因素对石漠化分布的影响大于人为因素,且随着石漠化等级的提高,人为作用的影响

表 5 环境因子的重要性和显著性

Table 5 Importance and significance of environmental factors

| 因子<br>Factors | 重要性<br>Importance | 显著性<br>Sig. | 排序<br>Order |
|---------------|-------------------|-------------|-------------|
| D4            | 0.204             | 0.002       | 1           |
| D1            | 0.2               | 0.002       | 2           |
| L6            | 0.184             | 0.002       | 3           |
| S1            | 0.183             | 0.002       | 4           |
| L7            | 0.182             | 0.002       | 5           |
| S2            | 0.124             | 0.002       | 6           |
| H1            | 0.093             | 0.008       | 7           |
| G3            | 0.051             | 0.042       | 8           |
| G1            | 0.02              | 0.216       | 9           |
| L3            | 0.011             | 0.392       | 10          |
| X2            | 0.004             | 0.612       | 11          |

增大。

(2) 无论是石漠化整体还是分等级,在尺度较大的县级水平上,空间分布的控制因子少,相关系数大。影响石漠化的因子排序为:石质土 > 人均工业总产值 > 单位面积 GDP > 乡内劳力 > 粗骨土比例。

(3) 在尺度较小的乡镇水平上,石漠化空间分布的控制因子变多,相关系数变小。石漠化因子的重要性排序为山地比例 > 平均高程 > 裸岩地 > 石灰土 > 未利用地 > 石质土。

(4) 现在国家根据宏观监测的结果(以县为单位)部署西南喀斯特地区石漠化治理。实际上由于尺度依赖性的存在,宏观研究会掩盖一些规律。本研究表明石漠化空间分布的控制因子存在尺度转移。县级尺度上,土壤类型起决定性作用;乡镇尺度上,地形与土地利用类型的影响更重要。因此在重点县的治理过程中,还需要具体分析县域内导致石漠化的主导因素,并据此来选取典型样区。综合的多尺度研究有助于选取各个尺度层次的主导因素与典型样区,在实际的工作中发挥积极意义。已有的对石漠化驱动力的研究通常构建石漠化动力指数<sup>[38,39]</sup>,从本研究石漠化总面积和加权总面积来看,权重不同会导致结果的差异。

## References:

- [1] Lü Y H, Fu B J. Ecological scale and scaling. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2096—2105.
- [2] WIENS JA. Spatial scaling in ecology. *Functional Ecology*, 1989, 3: 385—397.
- [3] Holling C S. Cross-scale morphology, geometry and dynamics of ecosystems. *Ecological Monographs*, 1992, 62(4): 447—502.
- [4] Zheng M G, Cai Q G, Chen H. Effect of vegetation on runoff-sediment relationship at different spatial scale levels in Gullied-hilly area of the Loess Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9): 3572—3581.
- [5] Walsh S J, Crawford T W, Welsh W F, *et al.* A multiscale analysis of LULC and NDVI variation in Nang Rong district, Northeast Thailand. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2001, 85: 47—64.
- [6] Wu J G. Effects of changing scale on landscape pattern analysis: scaling relations. *Landscape Ecology*, 2004, 19: 125—138.
- [7] Zhang N. Scale issues in ecology: concepts of scale and scale analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(7): 2340—2355.
- [8] Williams P W. Environmental change and human impact on karst terrains: An introduction. *Catena*, 1993, (Suppl. 25): 1—19.
- [9] Yuan D X. *The Karst study of China*. Beijing: Geology Press, 1993.
- [10] Li R L, Wang S J, Zhou D Q, *et al.* The correlation between rock desertification and lithology in karst area of Guizhou. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(2): 314—320.
- [11] Wang S J, Li Y B, Li R L. Karst rocky desertification: formation background, evolution and comprehensive taming. *Quaternary Sciences*, 2003, 2(6): 657—666.
- [12] Li Y B, Bai X Y, Zhou G F, *et al.* The relationship of land use with karst rocky desertification in a typical karst area, China. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(6): 624—632.
- [13] Li Y B, Shao J A, Yang H, *et al.* The relations between land use and karst rocky desertification in a typical karst area, China. *Environmental Geology*, 2009, 57(3): 621—627.
- [14] Shan Y T. Karst rocky desertification and analysis on the geological factors in southwest China. *Carsologica Sinica*, 2006, 25(2): 163—167.
- [15] Qiu B W. Multi-scale characterization of land-use patterns of Luoyuan County in northeast Fujian Province. *Progress in Geography*, 2008, 27(1): 82—89.
- [16] Veldkamp A, Fresco L O. Reconstructing land use drivers and their spatial scale dependence for Costa Rica. *Agricultural Systems*, 1997, 55: 19—43.
- [17] De Koning G H J, Veldkamp A, Fresco L O. Land use in Ecuador: a statistical analysis at different aggregation levels. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1998, 70: 231—247.
- [18] Li X D. Study on the natural environmental factors affecting population distribution in the Guizhou Karst Plateau: Multivariate regression analysis and zonality. *Arid Zone Research*, 2007, 24(2): 280—286.
- [19] Verburg P H, Chen, Y Q. Multi-scale characterization of land-use patterns in China. *Ecosystems*, 2000, 3: 369—385.
- [20] ter Braak C J F, Smilauer P. *CANOCO Reference Manual and User'S Guide to Canoco for Windows (version 4.5)*. New York: Centre for Biometry Wageningen, 2002, 113—180.
- [21] Borcard D, Legendre P, Drapeau P. Partialling O U. *The spatial component of ecological variation*. *Ecology*, 1992, 73: 1045—1055.
- [22] Dong X H, Yang X D, Liu E F, *et al.* Application of redundancy analysis in predigesting sedimentary proxies for paleolimnological research: A

- case study of Taibai Lake. *Geographical Research*, 2007, 26(3): 477—484.
- [23] Shi X Z, Yu D S, Pan X Z, *et al.* A Framework for the 1:1 000 000 Soil Database of China. In proceedings of the 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Thailand, 2002, 8: 14—20.
- [24] Kong X L, Wang K L, Chen H S, *et al.* Canonical Correspondence Analysis of Land-use Change and Socio-economic Development in Hechi Prefecture, Guangxi Province. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(1): 131—140.
- [25] Xiong K N. The study of karst rocky desertification using the GIS&RS technology. Beijing: Geology Press, 2002.
- [26] Wang J H, Li S, Li H X, *et al.* Classifying indices and remote sensing image characters of rocky desertification lands: A case of karst region in northern Guangdong Province. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(5): 765—770.
- [27] Li S, Wei X H, Huang J G, *et al.* Cause and processes of rocky desertification lands in karst areas of south China. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(6): 918—926.
- [28] Liu F, Wang S J, Liu Y S, *et al.* Changes of soil quality in the process of karst rocky desertification and evaluation of impact on ecological environment. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 639—644.
- [29] Cao J H, Yuan D X, Zhang C, *et al.* Karst ecosystem constrained by geological conditions in southwest China. *Earth and Environment*, 2004, 32(1): 1—8.
- [30] Cao J H, Yuan D X, *et al.* Karst ecosystem of southwest China constrained by geological setting. Beijing: Geology Press, 2005.
- [31] Xiong Y J, Qiu G Y, Mo D K, *et al.* Rocky desertification and its causes in karst areas: a case study in Yongshun County, Hunan Province, China. *Environmental Geology*, 2009, 57(7): 1481—1488.
- [32] Hu B Q, Li L, Jiang S F. Spatial pattern analysis on karst rocky desertification of Guangxi based on landscape spatial method. *Earth and Environment*, 2005, 33(1B10): 581—587.
- [33] Zhang D F, Wang S J, Zhou D Q. Eco-Geo-Environment of rocky desertification and its driving mechanism — a typical example in karst mountainous areas of Guizhou Province. *Rural Eco-Environment*, 2002, 18(1): 6—10.
- [34] Zhou M W, Wang S J, Li Y B. Spatial factor analysis of karst rocky desertification landscape patterns in Wangjiazhai catchment, Guizhou. *Geographical Research*, 2007, 26(5): 897—905.
- [35] Bai X Y, Xiong K N, Li Y B. Quantitative research of the space dependence of different grades rocky desertification and the factor of population in karst mountain area. *Journal of Mountain Research*, 2004, 24(2): 242—248.
- [36] Hu B Q, Huang Q Y, Liao C M, *et al.* Spatial correlation analysis of karst rocky desertification and soil type based on RS&GIS — a case study at Du'an Yao autonomous county of Guangxi Province. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2004, 10(5): 67—70.
- [37] Zhou Z F. Analysis of relation of rock desertification to landform and gradient in karst region — A case study of Qingzhen City of Guizhou Province. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2006, 26(5): 1—3.
- [38] Lan A J, Xiong K N, An Y L. Analysis on driving factors of karst rock desertification——With a special reference to Guizhou Province. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(6): 19—23.
- [39] Hu B Q, Liao C M, Yan Z Q, *et al.* Diving mechanism diagnosis of karst rocky desertification in Du'an Yao autonomous county of Guangxi based on RS and GIS. *Journal of Mountain Research*, 2004, 22(5): 583—590.

#### 参考文献:

- [1] 吕一河, 傅伯杰. 生态学中的尺度及尺度转换方法. *生态学报*, 2001, 21(12): 2096—2105.
- [4] 郑明国, 蔡强国, 陈浩. 黄土丘陵沟壑区植被对不同空间尺度水沙关系的影响. *生态学报*, 2007, 27(9): 3572—3581.
- [7] 张娜. 生态学中的尺度问题: 内涵与分析方法. *生态学报*, 2006, 26(7): 2340—2355.
- [9] 袁道先. 中国岩溶学. 北京: 地质出版社, 1993.
- [10] 李瑞玲, 王世杰, 周德全. 贵州岩溶地区岩性与土地石漠化的相关分析. *地理学报*, 2003, 58(2): 314—320.
- [11] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理. *第四纪研究*, 2003, 23(6): 657—666.
- [12] 李阳兵, 白晓永, 周国富, 等. 中国典型石漠化地区土地利用与石漠化的关系. *地理学报*, 2006, 61(6): 624—632.
- [14] 单洋天. 我国西南岩溶石漠化及其地质影响因素分析. *中国岩溶*, 2006, 25(2): 163—167.
- [15] 邱炳文. 闽东北沿海罗源县土地利用空间分布格局的多尺度分析. *地理科学进展*, 2008, 27(1): 82—89.
- [18] 李旭东. 贵州喀斯特高原人口分布的自然环境因素 II. 多元回归分析与地带性研究. *干旱区研究*, 2007, 24(2): 280—286.
- [22] 董旭辉, 羊向东, 刘恩峰, 等. 冗余分析(RDA)在简化湖泊沉积指标体系中的应用——以太白湖为例. *地理研究*, 2007, 26(3): 477—484.
- [24] 孔祥丽, 王克林, 陈洪松, 等. 广西河池地区土地利用变化与社会经济发展水平关系的典范对应分析. *自然资源学报*, 2007, 22(1): 131—140.
- [25] 熊康宁. 喀斯特石漠化的遥感-GIS典型研究. 北京: 地质出版社, 2002.

- [26] 王金华,李森,李辉霞,等. 石漠化土地分级指征及其遥感影像特征分析——以粤北岩溶山区为例. 中国沙漠, 2007,27(5):765~770.
- [27] 李森,魏兴琥,黄金国,等. 中国南方岩溶区土地石漠化的成因与过程. 中国沙漠, 2007,27(6):918~926.
- [28] 刘方,王世杰,刘元生,等. 喀斯特石漠化过程土壤质量变化及生态环境影响评价. 生态学报,2005,25(3):639~644.
- [29] 曹建华,袁道先,章程,等. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统. 地球与环境, 2004,32(1):1~8.
- [30] 曹建华,袁道先,等. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统. 北京:地质出版社,2005.
- [32] 胡宝清,李玲,蒋树芳. 基于景观空间方法的广西喀斯特石漠化空间格局分析. 地球与环境,2005,33(1B10):581~587.
- [33] 张殿发,王世杰,周德全. 土地石漠化的生态地质环境背景及其驱动机制——以贵州省喀斯特山区为例. 农村生态环境, 2002,18(1):6~10.
- [34] 周梦维,王世杰,李阳兵. 喀斯特石漠化小流域景观的空间因子分析——以贵州清镇王家寨小流域为例. 地理研究, 2007, 26(5):897~905.
- [35] 白晓永,李阳兵,熊康宁. 喀斯特山区不同强度石漠化与人口因素空间差异性的定量研究. 山地学报, 2004,24(2):242~248.
- [36] 胡宝清,黄秋燕,廖赤眉,等. 基于 RS 与 GIS 的喀斯特石漠化与土壤类型的空间相关性分析. 水土保持通报, 2004,10(5):67~70.
- [37] 周忠发. 喀斯特地区石漠化与地形坡度的关系分析——以贵州省清镇市为例. 水土保持通报, 2006, 26(5):1~3.
- [38] 蓝安军,熊康宁,安裕伦. 喀斯特石漠化的驱动因子分析——以贵州省为例. 水土保持通报, 2001,21(6):19~23.
- [39] 胡宝清,廖赤眉,严志强,等. 基于 RS 和 GIS 的喀斯特石漠化驱动机制分析——以广西都安瑶族自治县为例. 山地学报, 2004,22(5):583~590.