

喀斯特山地石漠化的垂直变异

罗 林¹, 周应书^{2,*}, 何兴辉³, 谢永贵², 王 敏², 吴明艳²

(1. 贵州省毕节地区水土保持办公室, 毕节 551700; 2. 贵州省毕节地区林业科学研究所, 毕节 551700;
3. 贵州省林业调查规划院 贵阳 550003)

摘要:应用地统计学对地处滇黔桂连片喀斯特腹地, 海拔垂直梯度变化范围广的贵州省毕节地区石漠化指标垂直梯度的空间变异进行分析。基岩裸露率的半变异函数最佳理论模型为线性有基台模型, 植被覆盖率、砾石含量为球状模型。植被覆盖率的空同异质比为 22.32%, 具有强烈的垂直梯度空间相关性, 主要受到随海拔梯度变化的自然性控制因素作用; 基岩裸露率、砾石含量的空同异质比分别为 34.38%、25.97%, 均具有中等程度的垂直梯度空间相关性, 受随机因素作用较大。砾石含量、植被覆盖率的变程分别为 968.10m、859.48m, 受因素影响的海拔范围都较宽; 基岩裸露率的变程为 52.28m, 受因素影响的海拔范围很窄。基岩裸露率、植被覆盖率的 Moran's I 系数随海拔梯度变化的趋势相类似, 但砾石含量的差别较大。

关键词:喀斯特; 石漠化; 垂直梯度; 地统计学; 空间变异

文章编号: 1000-0933(2009)01-0332-05 中图分类号: P642.25, Q149, X171.1 文献标识码: A

Vertical variability of rock desertification in Karst mountainous areas

LUO Lin¹, ZHOU Ying-Shu^{2,*}, HE Xing-Hui³, XIE Yong-Gui², WANG Min², WU Ming-Yan²

1 The Water and Soil Conservation Office of Bijie Prefecture of Guizhou Province, Bijie 551700, China

2 Guizhou Province Bijie Region Forestry Science Research Institute, Bijie 551700, China

3 Guizhou Forestry Survey and Planning Institute, Guiyang 550003, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 0332 ~ 0336.

Abstract: The vertical gradient variation of rock desertification index was analyzed using geostatistics for Bijie region, Guizhou province, that exhibits wide altitudinal variation in the centre of Yunnan, Guizhou, Guangxi Karst area. Optimal semivariogram theoretical model of bedrock expose rate was fitted well with linear sill model, and vegetation cover and gravel content were fitted with spherical model. Vegetation cover rate (VCR), which mainly affected by natural control factors correlated with altitudinal variation, was highly related to vertical gradient. The rate of nugget to sill of VCR was 22.32%. Bedrock expose rate and gravel content were mainly affected by random factors, which had moderately relativity with vertical gradient and their rates of nugget to sill were 34.38% and 5.97%, respectively. The altitudinal ranges of gravel content and vegetation cover rate were 968.10 m and 859.48 m, respectively, indicating wide range of altitudinal effect. The altitudinal range of bedrock expose rate was 52.28m, indicating narrow range of altitudinal effect. Similarity was found between the trend of Moran's I of bedrock expose rate and trend of Moran's I of vegetation cover rate along altitudinal gradient. However, trend of gravel content showed greater different from the other two.

Key Words: Karst; rock desertification; vertical gradient; geostatistics; spatial variability

石漠化是在脆弱喀斯特自然环境下, 由于人为活动的干扰, 地表植被遭受破坏, 土壤严重侵蚀, 引起基岩裸露或砾石堆积, 土壤退化乃至消失的现象。石漠化的格局受地质地貌、降水等自然因素和人为因素直接或

基金项目: 国家科技攻关计划“西部开发科技行动”重大资助项目(2005BA901A05)

收稿日期: 2007-09-07; 修订日期: 2008-04-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bjdqlks@126.com

间接控制,这些因素都具有垂直分异的特征。分析石漠化的垂直分异特征,揭示其分布规律,为石漠化防治提供理论依据,对因地制宜地开展石漠化防治十分重要。虽然国内学者对喀斯特石漠化的分布格局和影响因素等,从不同角度都作了细致的分析^[1~5],但缺乏石漠化垂直空间变异方面的研究。为此,选择地处滇黔桂连片喀斯特腹地,滇东高原向黔中山低山丘陵过渡斜坡地带的贵州省毕节地区,利用地统计学空间自相关分析和半变异函数,分析石漠化垂直空间的变异特征、尺度和演变,以揭示经典统计方法难以发现的规律,更深刻、更全面地理解喀斯特山地石漠化的垂直空间分布。

1 研究区概况

贵州省毕节地区地处滇黔桂连片喀斯特腹地,滇东高原向黔中山低山丘陵过渡的斜坡地带,地处东经 105°36′~106°43′,北纬 26°21′~27°46′之间,从东向西分布有低山、低中山、中山、高中山和高原等 5 种地貌,海拔 457~2900m,土地面积 26853km²,其中山地、丘陵占总土地面积的 93%。气候属亚热带季风气候,多年平均降雨量 850~1444mm,平均径流系数为 0.47,形成的喀斯特发育区总土地面积为 19693 km²,占全区总土地面积的 73.3%^[6],水土流失面积 16830km²。因经济文化落后,贫困面大,水土流失严重,生态环境恶化。是国务院批准成立的“开发扶贫、生态建设”试验区。

2 研究方法

2.1 数据采集

石漠化的特征是基岩裸露率高、植被覆盖率低和土壤中砾石含量大。根据这 3 个特征,在毕节地区喀斯特石漠化山地,从东部低海拔低山到西部高海拔的高原,按海拔 50m 左右的间距,选择同一海拔高程上基岩裸露和砾石特征有代表性的地段,设置 20 m×20 m 的正方形调查样地。在样地中用测绳按纵横两个垂直方向,以 1m 的间距布设网格点,调查每个网格点的基岩裸露和植物覆盖状况,每个样地调查 400 个网格点,统计基岩裸露和植物覆盖点数,计算样地的基岩裸露率和植被覆盖率。在样地中心点和中心点到四边的中间各选择 5 个有土壤的采样点,用土壤剖面环刀取样,取样深度 50cm,调查计算环刀中砾石含量。共调查样地 41 个,分布海拔在 540~2610m 之间。

2.2 空间变异分析

地统计学是在经典统计学基础上发展起来的空分分析方法,能够有效地揭示属性量在空间上的分布、变异和相关特征。对垂直空间梯度的变异分析主要进行变异函数分析和空间自相关分析,计算用 SPSS12.0 和 GS+7.0 统计软件完成^[7~10]。

2.2.1 变异函数分析

半变异函数是地统计学的基本工具,为区域变量 $z(x_i)$ 和 $z(x_i + h_i)$ 增量平方的数学期望,即区域化变量的方差。其通式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [zx_i - z(x_i + h)]^2$$

式中, $\gamma(h)$ 为变异函数; h 为步长,为分类样点的海拔空间间隔高度,并小于最大间隔高度; $N(h)$ 为间隔距离为 h 时的样点对数; $z(x_i)$ 和 $z(x_i + h)$ 分别为变量 z 在垂直空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 的取值。

为使半变异函数真实地描述变量的变化规律,用球形模型、指数模型、高斯模型和线性有基台模型等多种理论模型分别进行拟合,按决定系数(R^2)和 F 检验值选出最优拟合模型,通过块金值(C_0)、基台值($C_0 + C$)、变程(a)、块金值与基台值之比 $[C_0/(C_0 + C)]$ 等模型参数定量地分析基岩裸露率、植被覆盖率、砾石含量等石漠化指标的空间变化规律。

2.2.2 空间自相关分析

空间自相关是变量观测值因观测点在空间上邻近而形成的相关性,与空间格局存在着对应关系,只要变量在空间上表现出一定的规律性,则存在空间自相关。空间自相关可分为全局空间自相关和局部空间自相关,本文用 Moran's I 系数进行全局空间自相关分析,计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{(\sum_{i=a}^n \sum_{j=a}^n w_{ij}) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})}$$

式中, x_i 和 x_j 分别是变量 x 在相邻空间点 i 和 j 上的取值; w_{ij} 是相邻权重; n 是空间单元数; I 系数取值在 $(-1, 1)$ 之间; $I=0$ 表示空间不相关, 正值为正相关, 负值为负相关。

3 结果与分析

3.1 描述性统计分析

表现石漠化特征的基岩裸露率、植被覆盖率和砾石含量等 3 项指标的描述性统计结果见表 1。除基岩裸露率的平均值大于中位数外, 其余两项指标的平均值均小于中位数, 但都相差不大。变异系数最低的是植被覆盖率, 最高的是基岩裸露率。对 3 个指标的样本数据作 K-S 检验, 符合正态分布 ($p < 0.05$), 对原始数据不需进行转换就可进行地统计学分析。

表 1 石漠化指标描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistics characters of rocky desertification index

石漠化指标 Rocky desertification index	最小值 Min (%)	最大值 Max (%)	平均值 Mean (%)	中位数 Mediam (%)	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	K-S 值 K-Svalue
基岩裸露率 Bedrock expose rate	1.25	86.75	31.94	23.25	26.76	0.84	0.498	-1.065	0.168
植被覆盖率 Vegetation cover	17.00	93.50	74.38	84.50	23.29	0.31	-1.240	0.382	0.250
砾石含量 Gravel content	11.43	50.83	26.10	25.54	10.79	0.41	0.351	-0.761	0.147

3.2 半变异函数分析

用变异函数计算出基岩裸露率、植被覆盖率和砾石含量等 3 项指标的实验变异函数值, 用理论模型进行拟合, 得出基岩裸露率的最优理论模型为线性有基台模型, 植被覆盖率、砾石含量的最优理论模型为球状模型, 理论模型与实验函数的决定系数 (R^2) 分别为 0.945、0.836 和 0.763, R^2 检验值均达到显著水平, 拟合效果能很好地反映石漠化垂直梯度的空间变异特征, 拟合结果和相关参数见表 2。

表 2 石漠化指标的变异函数模型及其参数

Table 2 Optimal semivariogram theoretical model and corresponding parameters of rocky desertification index

石漠化指标 Rocky desertification index	理论类型 Theoretical model	块金值 Nugget	基台值 Sill	空间异质比 Nugget/sill (%)	变程 Range (m)	R^2	F 检验 F test
基岩裸露率 Bedrock expose rate	线性有基台模型 Linear with sill model	342.44	995.94	34.38	52.28	0.945	103.22
植被覆盖率 Vegetation cover	球状模型 Spherical model	407.24	1824.18	22.32	859.48	0.836	18.71
砾石含量 Gravel content	球状模型 Spherical model	95.19	366.48	25.97	968.10	0.763	11.81

空间变异主要由空间自相关和随机变异组成, 表 2 中块金值 (C_0) 表示由实验误差和小于最小取样尺度引起的随机变异; 基台值 ($C_0 + C$) 表示包括结构性变异和随机性变异的系统内总变异, 反映了各项石漠化指标随海拔梯度异质化程度; $[C_0 / (C_0 + C)]$ 表示随机部分空间变异占总空间变异性程度, 反映了随机误差引起石漠化指标的空间变异, 其值越低, 空间自相关引起的空间变异越强; 反之, 随机误差引起的空间变异起主要作用。从表 2 可知石漠化三个指标的块金效应均为正值, 说明存在着由采样误差、短距离变异、随机和固有变异引起的各种正基底效应, 是由随海拔梯度变化的地质地貌、土壤、气候等因素引起的变异, 植被覆盖率的变

异程度最大,其次是基岩裸露率和砾石含量。

根据 Cambardella 等提出的区域化变量空间相关程度分组标准^[11],基岩裸露率、砾石含量的 $C_0/(C_0 + C)$ 值在 25% ~ 75% 之间,均具有中等程度的空间相关性;植被覆盖率的 $C_0/(C_0 + C)$ 值小于 25%,具有强烈的空间相关性。表明植被覆盖率、基岩裸露率、砾石含量除了受到随海拔梯度变化的地质地貌、土壤、气候、植物群落等因素引起的变异结构性因素的作用外,随机因素主要是外在人为影响如垦殖、干扰和破坏植被等活动也起了一定的作用。其中植被覆盖率受海拔梯度结构性因素的控制性最大,受随机因素作用小;而基岩裸露率和砾石含量受随机因素影响相对较大,海拔梯度的空间相关性相对较弱。在随机因素的强烈作用下,三个指标可逐渐向均一化方向发展。

变程(a)是变异函数达到基台值所对应的距离,表明属性因子空间自相关范围的大小,它与观测尺度以及在取样尺度上影响石漠化各项指标的相互作用过程有关。在变程之内,空间自相关存在,反之则不存在。因此,变程提供了研究某种属性相似范围的一种测度,变程大小可以表示空间异质性尺度。表 2 中砾石含量的变程最大,植被覆盖率与之相近,基岩裸露率的变程最小。说明影响砾石含量、植被覆盖率和基岩裸露率的因素在不同的尺度上起作用,同时也表明随机因素对砾石含量、植被覆盖率的影响范围比基岩裸露率广。

3.3 空间自相关分析

用 Moran's I 系数定量描述研究变量在垂直空间上的依赖关系。从图 1 石漠化 3 项指标的相隔高度变化的 Moran's I 系数可知,基岩裸露率、植被覆盖率分别在相隔高度小于 750m(海拔高度 1290 m),370m(海拔高度 910 m),大于 1880 m(海拔高度 2420 m)处表现出随海拔梯度的正相关;砾石含量相隔高度 370 m(海拔高度 910m)以下和 1130 ~ 1700 m(海拔高度 1670 ~ 2240 m)之间表现出较强的正相关,主要受海拔梯度变化的变异结构性因素的作用。在其它海拔梯度范围表现为较强的负相关,主要是随机因素包括外在人为因素的作用。

总体而言,基岩裸露率、植被覆盖率的 Moran's I 系数随海拔梯度变化的趋势比较类似。并且结合各海拔梯度的人口分布来看,正相关海拔梯度范围的人口密度较小,在海拔高度 1290m 以下的平均人口密度为 233 人/ km^2 、2420m 以上的平均人口密度为 181 人/ km^2 ;负相关的海拔梯度范围人口分布较为集中,密度较大,平均人口密度为 336 人/ km^2 。说明人为因素对基岩裸露率、植被覆盖率有着相似的作用。砾石含量的 Moran's I 系数随海拔梯度变化趋势的作用因素较为复杂,与基岩裸露率、植被覆盖率的差别较大。

4 结论与讨论

石漠化垂直梯度的空间异质性是喀斯特山地生态系统的重要特征,地统计学为研究这种空间异质性提供了一个有效的工具,可以定量描述空间自相关作用对海拔梯度变量总变异的贡献,并揭示这种自相关格局的空间尺度,为分析空间格局与生态过程的关系,揭示其分布规律奠定了基础。

通过对毕节地区喀斯特山地石漠化指标垂直梯度的空间变异分析,基岩裸露率的半变异函数最优理论模型为线性有基台模型,即变异随垂直空间尺度增加呈直线增大,到基台值后出现平稳;植被覆盖率、砾石含量为球状模型,即变异随垂直空间尺度增加呈曲线增大,到基台值后出现平稳。植被覆盖率的空间异质比为 22.32%,具有强烈的垂直梯度空间相关性,主要受到随海拔梯度变化的自然性控制因素地质地貌、土壤、气候的作用;基岩裸露率、砾石含量的空间异质比分别为 34.38%、25.97%,均具有中等程度的垂直梯度空间相关性,受人为因素如垦殖、干扰等随机因素的作用较大。砾石含量、植被覆盖率和基岩裸露率的变程分别为 968.10、859.48 m 和 52.28m,植被覆盖率、砾石含量变异受因素影响的海拔范围都较宽,而基岩裸露率变异受因素影响的海拔范围很窄。从 Moran's I 系数的全局空间自相关分析结果看,基岩裸露率、植被覆盖率的空

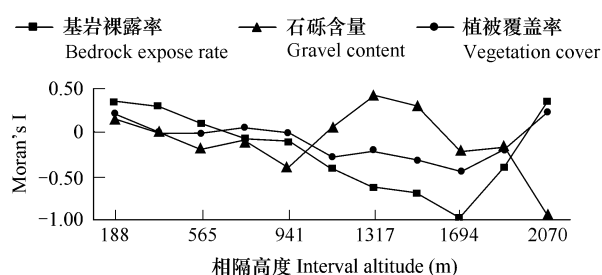


图 1 石漠化指标的 Moran's I

Fig. 1 Moran's I of rocky desertification index

间自相关随海拔梯度变化的趋势比较类似,而砾石含量与基岩裸露率、植被覆盖率有较大差别。

根据以上分析,在喀斯特山地石漠化综合防治上,要遵循石漠化指标垂直梯度的这种结构性因素和随机因素作用规律,根据地质地貌、气候、土壤的变化和人口社会经济条件,因地制宜地划分具体的防治类型。对正相关海拔梯度范围内的指标,要根据随海拔梯度变化的自然性控制因素作用规律,按地质地貌、气候、土壤的变化,以生态自然恢复和林灌草植物群落的营建为主,坡耕地梯化工程为辅,制定相应的防治技术措施。对负相关的海拔梯度范围的指标,要根据受随机因素影响较大,海拔梯度的空间相关性较弱的规律,除了科学地制定生态自然修复、林灌草植物群落营建的防治技术措施外,还要与减轻土地的人口负荷相结合,除大力实施既保护水土资源,又能提高粮食产量的坡耕地梯化工程外,还要制定劳动力转移、产业调整结构、农村循环经济发展等方面的措施,才能使石漠化防治取得较好的效益。

References:

- [1] Li Y B, Bai X Y, Qiu X C, *et al.* The correlation analysis of desertification of Karst rock and land use patterns. *Resources Science*, 2006, 28(2) : 67 — 73.
- [2] Rong L, Wang S J, Du X L, *et al.* Microclimatic effects along environmental gradient in karst rocky desertified area: A case study of a small catchment in Huajiang Gorge of Guizhou province. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(9) : 1038 — 1043.
- [3] Xiao R B, Ouyang Z Y, Wang X K, *et al.* Sensitivity of rocky desertification and its spatial distribution in southwestern China. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(5) : 551 — 554.
- [4] Jiang S F, Hu B Q, Huang Q Y, *et al.* spatial correlation analysis between karst rocky desertification and lithology in Du'an Yao autonomous county of Guangxi. *Geotectonica et Metallogenia*, 2004, 28(2) : 214 — 219.
- [5] 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.
- [6] Write Group of “Comprehensive Agricultural Regional Planning of Bijie Prefecture”. *Comprehensive Agricultural Regional Planning of Bijie Prefecture*. Guiyang: Guizhou People's Press, 1989. 5 — 91.
- [7] Li H B, Wang Z Q, Wang Q C. Theory and methodology of spatial quantification. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(6) : 651 — 657.
- [8] Wang Z Q. *Geostatistics and its application in ecology*. Beijing: Science Press, 1999. 5 — 91.
- [9] Goovaerts P. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. *Biol. Fertil. Soils*, 1998, 27: 315 — 334.
- [10] Rossi R E, Mulla D J, *et al.* Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological dependence. *Ecological Monographs*, 1992, 62(2) : 277 — 314.
- [11] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science of America Journal*, 1994, 58: 1501 — 1511.

参考文献:

- [1] 李阳兵, 白晓永, 邱兴春, 等. 喀斯特石漠化与土地利用相关性研究. *资源科学*, 2006, 28(2) : 67 ~ 73
- [2] 容丽, 王世杰, 杜雪莲, 等. 喀斯特低热河谷石漠化区环境梯度的小气候效应——以贵州花江峡谷区小流域为例. *生态学杂志*, 2006, 25(9) : 1038 ~ 1043
- [3] 肖荣波, 欧阳志云, 王效科, 等. 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*, 2005, 24(5) : 551 ~ 554
- [4] 蒋树芳, 胡宝清, 黄秋燕, 等. 广西都安喀斯特石漠化的分布特征及其与岩性的空间相关性. *大地构造与成矿学*, 2004, 28(2) : 214 ~ 219
- [5] 李瑞玲, 王世杰, 周德全, 等. 贵州省岩溶地区坡度与土地石漠化空间相关分析. *地理学报*, 2003, 58(2) : 314 ~ 320.
- [6] 《毕节地区综合农业区划》编写组. *毕节地区综合农业区划*. 贵阳: 贵州人民出版社, 1989. 5 ~ 91.
- [7] 李哈滨, 王政权, 王庆成, 等. 空间异质性的理论与模型. *应用生态学报*, 1998, 9(6) : 651 ~ 657.
- [8] 王政权. *地统计学在生态学中的应用*. 北京: 科学出版社, 1999. 5 ~ 91.