

# 煤矿区次生裸坡土壤抗冲性的空间变异特征

潘德成<sup>1</sup>, 孙卓越<sup>2</sup>, 吴祥云<sup>3</sup>, 蒋春光<sup>1</sup>, 张东为<sup>1</sup>, 李纯乾<sup>1</sup>

(1. 辽宁省水土保持研究所, 辽宁 朝阳 122000; 2. 阜新矿业集团公司,

辽宁 阜新 123000; 3. 辽宁工程技术大学 资源与环境工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘 要:**为定量描绘矿区次生裸坡土壤抗冲性特征,以山西潞安王庄煤矿矸石山为例,运用传统统计学与地统计学相结合的方法,对煤矸石山土壤抗冲性进行空间变异特征研究。结果表明:矸石山土壤具有明显的空间异质性特征。土壤抗冲指数的最适理论模型为指数模型。在 2, 2.5, 3, 4 m 共 4 个步长间隔范围内,拟合模型的精度随步长间距的增大而提高。土壤抗冲指数的块金系数  $C_0/(C_0+C)$  在 10.91%~13.68% 之间,具有强烈的空间自相关性,且空间变异主要受结构因素的影响。土壤抗冲指数的空间分布表现为条带状和斑块状的分布特点,且主要分布在 0.06~0.12 min/g 之间,占 83.02%。沿坡长方向,土壤抗冲指数呈现先减小后增大的趋势,且极显著服从于方程  $ANS=0.0001X^2-0.0048X+0.1166$ 。

**关键词:**煤矿区; 次生裸坡; 土壤抗冲性; 地统计学; 空间变异

**中图分类号:** X752; S157.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2013)03-0082-04

## Spatial Heterogeneity of Soil Anti-scouribility in Coal Mining Secondary Bare Slope

PAN De-cheng<sup>1</sup>, SUN Zhuo-yue<sup>2</sup>, WU Xiang-yun<sup>3</sup>, JIANG Chun-guang<sup>1</sup>, ZHANG Dong-wei<sup>1</sup>, LI Chun-qian<sup>1</sup>

(1. Liaoning Institute of Soil and Water Conservation, Chaoyang, Liaoning 122000, China;

2. Fuxin Mining Group Company, Fuxin, Liaoning 123000, China; 3. College of Resources

and Environment Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

**Abstract:** In order to quantitatively describe soil anti-scouribility in mining secondary bare slope, the spatial heterogeneity of soil anti-scouribility in Wangzhuang coal gangue pile of Lu An, Shanxi province, was studied by the methods of classic statistics and geostatistics. The results showed that soil of gangue pile has obvious spatial heterogeneity. Exponential model fitted best for soil anti-scouribility index(ANS). Among the long spacing of 2, 2.5, 3 m and 4 m, the longer the long spacing was, the more accurate the model simulation was. And ANS showed strong spatial autocorrelation because nugget coefficient  $C_0/(C_0+C)$  was in the range of 10.91%~13.68%. The variability of ANS was mainly controlled by structural factors. The spatial distribution of ANS was apparently strip and block, the most level was distributed between 0.06~0.12 min/g, accounting for 83.02%. From top to foot of slope, ANS first decreased and then increased. ANS obviously followed the equation of  $ANS=0.0001X^2-0.0048X+0.1166$ .

**Key words:** coal mining area; secondary bare slope; soil anti-scouribility; geostatistics; spatial variability

我国是世界上最大的煤炭生产国和消费国,在煤炭生产、洗选过程中,煤矸石成为必然的伴生废弃物,其排放量约为原煤产量的 20%,是我国目前年排放量和累计存量最大的工业废弃物<sup>[1]</sup>,历年堆存总量已超过 40 亿 t,占全国工业固体废弃物的 40%<sup>[2]</sup>,占地 1.33 万  $\text{hm}^2$  以上,且每年仍以约 1 亿 t 的速度递增,

每年新增占地约 400  $\text{hm}^2$ <sup>[3]</sup>。煤矸石堆积过高,坡度过大,常因水土流失而造成坍塌、滑坡和泥石流等灾害<sup>[4]</sup>,且其所含有害物质如 Hg, Cd, Cr, Cu, As, Mn, Zn, Al 等随水土流失进入周边土壤、水体,导致水土资源的严重污染和破坏<sup>[5]</sup>。已往对矿区次生裸坡的土壤侵蚀研究多为定性描述和动态分析,在细节性的

收稿日期: 2012-11-13

修回日期: 2012-12-19

资助项目: 国家科技部科技支撑“采煤废弃地水土保持与生态修复关键技术应用研究”(2006BAD03A0203)

作者简介: 潘德成(1968—),男,河北沧州人,博士,研究员,主要从事矿山环境工程、水土保持研究。E-mail: pdc6165@126.com

通信作者: 吴祥云(1962—),男,博士,教授,主要从事矿区废弃地生态修复理论与技术研究。E-mail: wuxyun2003@yahoo.com.cn

局部变化特征方面的研究明显不足<sup>[6]</sup>。传统统计学与地统计学相结合的方法是当前揭示土壤属性变量在空间分布、变异的最有效的方法之一,可对土壤空间性质进行定量描述和研究<sup>[7-8]</sup>。近几年,国内外学者采用这种方法已在作物田间、丘陵、城市土壤等区域土壤理化特性(尤其是土壤养分、水分)空间变异等方面进行了大量研究,并取得了许多重要的成果<sup>[8-13]</sup>,但应用该方法对矿区这一特殊危害环境的土壤侵蚀进行研究还少有报道,而对矿区煤矸石山土壤抗冲性的空间变异研究至今还未见报道<sup>[14-16]</sup>。为此,本文以山西潞安王庄煤矿矸石山为例,应用传统统计学与地统计学相结合的方法,研究以矿区煤矸石山为主的次生裸坡土壤抗冲性的空间分布特征,揭示该类型区土壤抗冲性的空间变异规律。以期为王庄煤矿的水土流失防控提供科学依据,也为全国同类型矿区水土保持与生态重建提供借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

山西潞安王庄煤矿位于山西省东南部的长治市,地理坐标介于东经 113°02′19″—113°09′51″,北纬 35°52′45″—35°57′00″,属典型的中温带半湿润大陆性季风气候。年均气温为 9.5℃,极端最高气温为 37.8℃,极端最低气温为 -25.3℃。无霜期为 148 d。年降水量 500~650 mm,多集中在夏季(6—9 月份),占全年降雨量的 57%。年蒸发量 1 490 mm。山西潞安王庄煤矿矸石山已经过 20 多年的堆积和风化,矸石山南北长 360 m,东西宽 150 m,占地面积约 5.5 hm<sup>2</sup>,高差 60 m,坡度达 21°~38°。矸石风化后形成次生铝土矿物如高岭石、伊利石、蒙脱石等。由于矸石山坡度较大,水蚀较为严重,坡面一般为细沟、浅沟侵蚀,如果有集中强降水,就会产生严重沟蚀,甚至发生塌方、滑坡。由于矸石山是一种极端裸地,坡面表土常常流失,导致植被稀少,仅在风化较好的区域长有几株灌木状的野生榆树、柳树和一些白草、艾蒿、黄花蒿、米苋蒿、野菊花等植物<sup>[17]</sup>。

### 1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集 试验于 2010 年 4 月 15 日—5 月 31 日进行。首先在矸石山选择一个起伏变化较小的坡面,坡面长 54 m,宽 6 m,平均坡度为 38°。在坡面采用棋盘法打成若干个方格,每个方格见方 2 m,由于距坡脚 18 m 处区域内大粒径石块分布较多,无法采样,故本次共采集表层原状土样 53 个进行土壤抗冲性测试。

1.2.2 土壤抗冲性试验方法 用土壤抗冲指数来衡

量土壤抗冲性能的大小,即用冲失 1 g 土所需时间来表示抗冲指数(ANS)。

$$ANS = T / WLDS$$

式中:ANS——单位流量土壤抗冲指数(min/g);  
T——冲刷历时(min);WLDS——冲失干土重(g)。  
土壤抗冲性试验采用改进的原状土冲刷水槽法,冲刷坡度为 25°,恒压水箱调整的供水流量设计水平为 3 L/min,具体试验方法见参考文献[16,18]。

1.2.3 地统计学方法 地统计学通过变异函数确定变量因子的空间变异程度及空间变异尺度,半变异函数和 Kriging 空间插值是地统计学的两大基本内容<sup>[7]</sup>。已有研究表明,地统计学方法中的变差图和 Kriging 插值法适合于土壤特性空间预测,因而本文采用这两种方法进行分析<sup>[11]</sup>。

(1) 半变异函数。半变异函数是描述土壤性质空间变异结构的一个函数,能够同时描述区域化变量的随机性和结构性。它的一些重要参数如块金值、基台值和变程等,可用来表示在一定尺度上的空间变异和相关程度。半方差函数模型有球状模型、指数模型、高斯模型与有基台值的线性模型等。有关其变异函数的理论和模型,许多的论著和研究中都有介绍<sup>[7-13]</sup>,此处只做简单介绍。在所有间隔距离上的任意两点间土壤特性的空间变异特征可用半变异函数描述为:

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

式中: $\gamma(h)$ ——变异函数; $h$ ——样点间间隔距离,称为步长; $n$ ——间隔距离为  $h$  的点对总数; $Z(x_i)$ ,  $Z(x_i + h)$ ——区域化变量  $Z(x)$  在空间位置  $x_i$  和  $(x_i + h)$  的实测值。本研究中半变异函数的拟合主要采用指数模型(exponential model),其公式为:

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C_0 + C[1 - \exp(-h/a)] & h > 0 \\ \gamma(h) &= 0 & h = 0 \end{aligned}$$

式中: $C_0$ ——块金值(nugget),是由实验误差、施肥、管理水平等随机因素引起的变异; $C$ ——结构方差,是由气候、岩性、地形地貌等非人为的区域因素(空间自相关部分)引起的变异; $(C_0 + C)$ 为基台值(still),表示系统内总的变异; $C_0 / (C_0 + C)$ ——随机部分引起的变异占总变异的比例,分 0~25%,25%~75%,>75%共 3 个级别,分别表示空间自相关程度为高、中等和微弱; $a$ 为变程(range),表示采样数据在空间上存在相关性的尺度,间距小于变程的样点之间存在空间相关性,而间距大于变程的样点则是相对独立的<sup>[8]</sup>。

(2) Kriging 插值。Kriging 法是在变异函数  $\gamma$

(h)的基础上,用若干点的实测  $Z(x_i)$  推求未知点的  $Z^*(x_0)$  的一种方法:

$$Z^*(x_0)=\sum_{i=1}^n\lambda_iZ(x_i)$$

式中: $Z^*(x_0)$ ——未知点  $x_0$  处的线形、无偏、最优估计值; $n$  为实测值个数; $\lambda_i$ ——计算  $Z^*(x_0)$  时实测值  $Z(x_i)$  的权重。一旦确定了土壤某一性质的变异函数,就可以确定土壤性质的空间变异分布特性。

1.2.4 数据处理 采用 SPSS 统计分析软件对数据进行统计学分析,并根据拟合的变异函数理论模型,借助 Sufer 8.0 软件,利用普通 Kriging 插值法对坡面土壤抗冲指数进行无偏最优内插,并在 ArcGIS 9.2 软件中对不同等级的土壤抗冲指数所占的面积进行统计。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤抗冲指数的半方差函数分析

数据的正态分布性是使用地统计学方法进行土壤性质空间分析的前提<sup>[7]</sup>。已有研究表明,土壤抗冲指数的空间变异符合正态分布,可以满足地统计学分析的假设条件,利用地统计学方法进行分析<sup>[16]</sup>。在各向同性条件下计算土壤抗冲指数的变异函数,通过

表 1 土壤抗冲指数理论变异函数拟合模型及参数

步长/m	理论模型	块金值 $C_0$	基台值 $(C_0+C)$	$[C_0/(C_0+C)]/\%$	变程/m	决定系数 $R^2$	残差 RSS	F 检验
2	指数模型	0.00016	0.00117	13.68	4.51	0.891	2.992E-08	40.15**

注:\*\*表示  $p<0.01$  水平下显著,\*表示  $p<0.05$  水平下显著。

2.1.2 不同步长间距下的理论变异函数拟合模型及参数 固定间距研究土壤空间变异性无法全面、深刻地揭示处于连续空间土壤特性的变异规律,为此,用各向同性下不同步长尺度的理论模型及其主要参数表现其空间变异性十分必要<sup>[7]</sup>。考虑到样点间距,分别采用了 2,2.5,3,4m 4 个步长间距,其土壤抗冲指数的理论变异函数结果见表 2。研究结果反映出在不同步长间距下所拟合的理论模型参数存在一定差异,决定系数  $R^2$  从 0.891 增大到 0.935,而残差 RSS 从 2.992E-08 减小到 9.926E-09,即拟合的精度有所提高,可见,步长尺度的选取与土壤抗冲指数的空间

采用球状模型、指数模型、高斯模型与有基台值的线性模型进行拟合,发现指数模型最适合作为土壤抗冲指数的拟合模型,F 值为 40.15~49.98,均达到极显著水平(表 1—2),说明土壤抗冲指数存在明显的空间异质性特征<sup>[19]</sup>。该拟合模型的选择与黄龙<sup>[16]</sup>的研究选取的模型有所不同,这可能与本研究区域为煤矸石山的特殊性质有关。

2.1.1 相同步长间距下的理论变异函数拟合模型及参数 由表 1 可知,在步长间隔为 2 m 的情况下,研究区域内的土壤抗冲指数的块金系数  $C_0/(C_0+C)$  值为 13.68%,小于 25%,表现为强烈的空间自相关性。空间自相关程度越高,说明随机因素对土壤抗冲指数的空间分布的贡献率越小,其空间分布主要是受气候、岩性、地形地貌、水文条件等结构性因素的影响<sup>[8]</sup>,受人为活动等随机因素的影响较小。变程的变化反映出引起土壤特性变异的主要过程。指数模型的相关距离为变程的 3 倍,由表 1 可以看出,抗冲指数的相关距离为 13.53 m(4.51 m×3),其相关距离较大,意味着在坡面内分布的均一性较强,在相关距离以内,土壤样本的变异不显著;在相关距离以外,土壤样本具有独立性和可迁性特点。

变异性大小有密切关系。四种步长尺度的相关距离分别为 13.53,13.77,13.17 m 和 11.01 m,可见前 3 个步长尺度的相关距离相近,且均比 4 m 步长尺度的空间相关距离大,表现在块金系数  $C_0/(C_0+C)$  方面,前 3 个步长尺度的块金系数也较相近,且均大于 4 m 步长的块金系数(10.91%)。由于四种步长尺度的块金系数  $C_0/(C_0+C)$  均在 10.91%~13.68%,且均小于 25%,表现为强烈的空间自相关性,说明四种步长尺度的空间分布仍主要是受气候、岩性、地形地貌、水文条件等结构性因素的影响,相比之下,只是 4 m 步长尺度受结构性因素的影响更大一些。

表 2 不同步长间距下土壤抗冲指数拟合模型及参数

步长/m	理论模型	块金值 $C_0$	结构尺度 $C$	$[C_0/(C_0+C)]/\%$	变程/m	决定系数 $R^2$	残差 RSS	F 检验
2	指数模型	0.00016	0.00101	13.68	4.51	0.891	2.992E-08	40.15**
2.5	指数模型	0.00016	0.00102	13.56	4.59	0.912	2.953E-08	45.08**
3	指数模型	0.00016	0.00101	13.68	4.39	0.925	1.795E-08	48.19**
4	指数模型	0.00012	0.00098	10.91	3.67	0.935	9.926E-09	49.98**

注:\*\*表示  $p<0.01$  水平下显著,\*表示  $p<0.05$  水平下显著。

### 2.2 矸石山坡面土壤抗冲性空间分布特征

通过 Kriging 法的制图表达,能将土壤抗冲性的

空间相关性或空间异质性在二维平面上表现出来,使土壤抗冲指数的定量结果得到更深刻、全面和直观的

显现<sup>[16]</sup>。结合矸石山坡面采样点的分布情况,将坡面分为上部、中部和下部,其中,坡面上部为从坡顶到距坡顶 12 m 处,坡面中部为距坡顶 12 m 处到距坡顶 24 m 处,坡面下部为距坡顶 24 m 处到距坡顶 36 m 处。利用半方差函数模型对土壤抗冲指数进行空间插值,获得研究区域内土壤抗冲指数预测空间分布图(图 1)。

从图 1 中可以看出,土壤抗冲指数存在明显的空间异质性变化,呈现出明显的条带状和斑块状分布特征。土壤抗冲指数不同等级占坡面总面积的比例分别为:<0.06 min/g 的占 7.55%,0.06~0.08 min/g 的占 30.19%,0.08~0.1 min/g 的占 30.19%,0.1~0.12 min/g 的占 22.64%,>0.12 min/g 的占 9.43%,且土壤抗冲指数大部分在 0.06~0.12 min/g 之间,占坡面总面积的 83.02%。

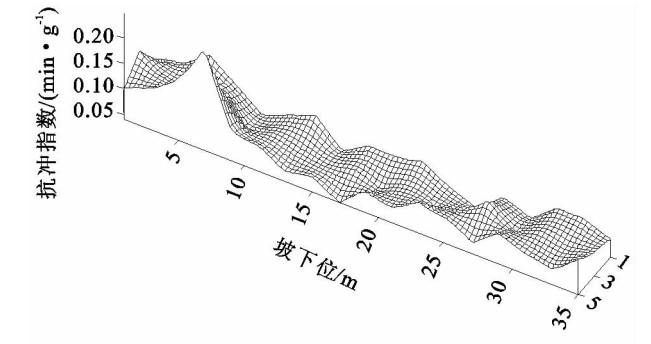


图 1 坡面土壤抗冲指数空间分布

由图 2 可以看出,土壤抗冲指数与坡位密切相关,由坡顶向下,土壤抗冲指数呈现下凹曲线式分布,在坡面上部和下部的土壤抗冲指数较高,在坡面中部形成较小值的“洼地”效应,整体表现出先减小后增大的趋势,并显著服从于方程  $ANS = 0.0001X^2 - 0.0048X + 0.1166$ ,复相关系数  $R^2 = 0.8214$ 。此动态变化模拟方程与黄龙<sup>[16]</sup>、李海燕<sup>[20]</sup>等的研究结论一致,分析其原因可能是矸石山坡面经长期的降水冲刷,上坡位的风化土壤颗粒被冲到中下部,使上坡位多为较耐冲刷的大矸石颗粒而使其抗冲指数较高,而下坡位可能是因为该区域的土层较厚,植被生长相对较好,植被根系对土壤的缠绕固定作用,以及植被对土壤的改善作用<sup>[6]</sup>,导致下坡位抗冲指数较高。研究表明,矸石山的上坡位因矸石粒径较大,而抗冲性较高,且土层较薄,不利于植被的直接恢复,应以改善地形地貌的工程治理措施为主;矸石山的中坡位是水土流失的多发地和重灾区,是综合实施工程措施与植被措施进行治理的重点;矸石山的下坡位虽然风化土层相对较好,但仍面临着严重的水土流失,因此应结合

工程治理措施,尽快实现以植被恢复为主的生态重建。

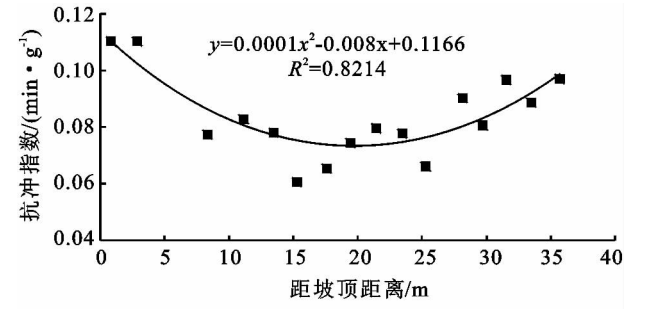


图 2 土壤抗冲指数沿坡面变化

### 3 结论

- (1) 运用地统计学方法对建模数据进行多种模型、多次模拟试验,并采用块金系数等指标对所获半方差模型进行评价,选取具有较高拟合精度的指数模型作为煤矸石山土壤抗冲指数的拟合模型。
- (2) 煤矸石山土壤抗冲性存在明显的空间异质性特点,在四种不同尺度范围的土壤抗冲指数的块金系数  $C_0/(C_0+C)$  均小于 25%,表现出强烈的空间自相关性,其空间分布主要是受气候、岩性、地形地貌、水文条件等结构性因素的影响。因此改善煤矸石山地形地貌等结构性因素,对加强矿区次生裸坡水土流失治理具有重要作用。
- (3) 土壤抗冲指数的空间分布呈现条带状和斑块状分布特征,且大部分位于 0.06~0.12 min/g 之间,占 83.02%。由坡顶向下,土壤抗冲指数呈现下凹式曲线分布,在坡面的中部形成较小值的“洼地”效应,并显著服从于方程  $ANS = 0.0001X^2 - 0.0048X + 0.1166$ 。由于矿区次生裸坡土壤抗冲性的空间分布差异性主要受降水、土壤特性、地形地貌等多种自然结构因素的影响,因此下一步应加强对矿区次生裸坡土壤特性的空间变异特征研究,以及地形地貌、水文调控等的工程治理措施研究。

#### 参考文献:

[1] 张凤辰. 煤矸石及其综合利用[J]. 节能与环保, 2005(1): 54-56.

[2] 陆勇敢, 邱国惠, 和世超. 固体废弃物煤矸石的环境管理[J]. 能源环境保护, 2004, 18(6): 63-64.

[3] 陈峰, 胡振琪, 柏玉. 矸石山周围土壤重金属污染的生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊): 575-578.

[4] 杨主泉, 胡振琪, 王金叶, 等. 煤矸石山复垦的恢复生态学研究[J]. 中国水土保持, 2007(6): 35-36.

增大,重庆都市区复杂地形迫使城市建设用地逐步向较高高程和较大坡度地区扩张;在城市发展过程中,建设用地将会首先占用耕地,因此,合理规划开发城市建设用地具有深远意义。同时,耕地在坡度大于 25°区域内仍有分布,推进退耕还林还草工程有待延续和加强。

参考文献:

[1] 冯朝阳,于勇,高吉喜,等. 地形因子对京西门头沟区土地利用/覆盖变化的影响[J]. 山地学报,2007,25(3):274-279.

[2] 罗广元,唐志红,文倩. 不同地形条件下的土地利用格局与变化分析:以湖南醴陵市为例[J]. 湖南农业科学,2009(9):62-65.

[3] 封志明,张丹,杨艳昭. 中国分县地形起伏度及其与人口分布和经济发展的相关性[J]. 吉林大学社会科学学报,2011,51(1):146-160.

[4] 吕国,宋唯一,郑爱珍. 甘肃西部地区土地与气候资源现状及农业可持续发展战略[J]. 水土保持研究,2010,17(1):265-269.

[5] 周启刚,周万村. 基于 RS 和 GIS 三江并流区土地利用/覆被现状格局研究[J]. 水土保持研究,2006,13(6):156-162.

(上接第 85 页)

[5] 江洪青. 煤矸石对环境的危害及其综合治理与利用[J]. 煤炭加工与综合利用,2003(3):43-46.

[6] 吕春娟,白中科,陈卫国,等. 黄土区大型排土场植被根系的抗蚀抗冲性研究[J]. 水土保持学报,2006,20(2):35-38.

[7] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京:科学出版社,1999.

[8] 腊贵晓,顾怀胜,刘国顺,等. 喀斯特地区烟田土壤养分的空间变异特征[J]. 水土保持研究,2012,19(3):48-54.

[9] Tsegaye T, Hill R L. Intensive tillage effects on spatial variability of soil physical properties [J]. Soil Science, 1998,163(2):143-154.

[10] Juan G C, Gerd D, Tsitsi Y, et al. Intergration of mid-infrared spectroscopy and geostatistics in the assessment of soil spatial variability at landscape level[J]. Geoderma,2010,158(3):398-411.

[11] 谭万能,李志安,邹碧,等. 地统计学方法在土壤学中的应用[J]. 热带地理,2005,25(4):307-311.

[12] 陈伏生,曾德慧. 科尔沁沙地退化草场土壤养分的空间结构分析[J]. 草业学报,2004,1(1):39-44.

[6] 梁发超,刘黎明. 基于地形梯度的土地利用类型分布特征分析:以湖南省浏阳市为例[J]. 资源科学,2010,32(11):2138-2144.

[7] 张凡,赵卫权,张凤太,等. 基于地形起伏度的贵州省土地利用/土地覆盖空间结构分析[J]. 资源开发与市场,2010,26(8):737-739.

[8] 赵卫权,苏维词,袁俊. 基于地形起伏度的贵州省景观空间格局分异特征[J]. 水土保持研究,2010,17(2):110-115.

[9] 邸利,孙鹏举,李毅,等. 西部地区土地资源利用状况与土壤侵蚀关系研究[J]. 水土保持研究,2004,11(1):45-48.

[10] 刘纪远. 国家资源环境遥感宏观调查与动态监测研究[J]. 遥感学报,1997,1(3):225-230.

[11] TD/T1014-2007. 第二次全国土地调查技术规程[S]. 中华人民共和国国土资源部,2007.

[12] 黄海洋,杨庆媛,王成. 基于 DEM 的土地利用类型与地形因子关系研究:以重庆市酉阳县麻旺镇为例[J]. 西南大学学报:自然科学版,2009,31(4):159-164.

[13] 陈楠,杨武年,李娟. 巴中市丘陵山区土地利用在地形梯度上的分布特征[J]. 水土保持通报,2012,32(1):185-188.

[13] 孟宝,杨龙,张勃. 土壤特性的空间变异性与绿洲生态稳定性研究:以张掖绿洲为例[J]. 水土保持研究,2009,16(2):117-121.

[14] 胡振琪. 露天煤矿复垦土壤物理特性的空间变异性[J]. 中国矿业大学学报,1992,21(4):31-37.

[15] 王辉,韩宝平,卞正富. 充填复垦区土壤水分空间变异性研究[J]. 河南农业科学,2007(7):67-70.

[16] 黄龙. 海州露天矿排土场边坡土壤抗冲性空间变异性特征[J]. 亚热带水土保持,2011,23(1):1-5.

[17] 胡振琪,张光灿,魏忠义. 煤矸石山的植物种群生长及其对土壤理化特性的影响[J]. 中国矿业大学学报,2003,32(5):495-410.

[18] 胡建忠,周心澄,李文忠,等. 退耕地青海云杉人工林土壤抗冲性试验研究[J]. 水土保持学报,2004,18(6):6-10.

[19] 杨奇勇,蒋忠诚,马祖陆,等. 基于地统计学和遥感的岩溶区石漠化空间变异特征[J]. 农业工程学报,2012,28(4):243-247.

[20] 李海燕. 阜新孙家湾矸石山水土流失和沟蚀演变研究[D]. 辽宁阜新:辽宁工程技术大学,2009.