

地统计方法在土石山区土壤侵蚀空间变异性研究的应用

马 驰¹, 卢玉东²

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 长安大学环境科学与工程学院, 西安 710054)

摘要: 土壤侵蚀是一种复杂的空间随机分布现象, 其影响因素多, 对其做出合理有效的定量分析难度较大。近年来, GIS 技术及地统计学的迅猛发展为我们攻克土壤侵蚀空间变异这一难题提供了可能。以西南土石山区水土保持项目为依托, 尝试地统计方法在土壤侵蚀空间变异性研究的应用, 建立了地统计学方法在土壤侵蚀空间变异性研究中的应用的基本技术流程。以便其在小流域土壤侵蚀的定量评价、规划与治理以及动态监测等方面提供理论研究和实际应用。

关键词: 地统计学; 土石山区; 土壤侵蚀; 空间变异性

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)04-0072-03

Advance in Spatial Variability of Soil Erosion in Mountainous Area by Using Geostatistics

MA Chi¹, LU Yutong²

(1. College of Environment & Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. College of Environment Science & Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Soil erosion is one kind of complex spatial random distribution phenomenon with many influencing factors, it is difficult to make a reasonable effective quantitative analysis. In recent years, GIS and Geostatistics swift and violent development give us the possibility to solve the difficult problem of the spatial variability in soil erosion's research. Basing on the conservation of water and soil project in soil and rock mountainous area in the Southwest of China, the research of soil erosion's spatial variability is made applying the method of Geostatistics, and the basic program is set up in order to provide the fundamental research and the practical application for the soil erosion quantitative evaluation, plan and management as well as dynamic monitoring.

Key words: Geostatistics; mountainous area; soil erosion; spatial variability

西南土石山区地处水力侵蚀为主的二级类型区, 由于人多地少, 山高坡陡, 雨量充沛, 特别是暴雨多, 植被一旦遭到破坏, 很容易产生严重的水土流失。治理水土流失的首要任务就是要对土壤侵蚀进行科学评价, 搞清土壤侵蚀规律、强度、空间分布特征。

土壤侵蚀空间变异分析是从动态的角度去研究土壤侵蚀现象在空间和时间两个尺度上的变异性质, 从物理过程出发来揭示土壤侵蚀内在的时空变化机理, 从而为土壤侵蚀的科学评价和过程模型的建立提供理论支持。然而, 土壤侵蚀是一种复杂的空间随机分布现象, 其影响因素多, 对其做出合理有效的定量分析难度较大。近年来, GIS 技术及地统计学的迅猛发展为我们攻克土壤侵蚀空间变异这一难题提供了可能^[1,2]。本文以重庆璧山县为例, 对土壤侵蚀空间变异性研究方法做一分析。

1 地统计学方法基本原理

地质统计学方法通过引入区域性变量理论, 既考虑了研究对象性质的随机性, 又考虑了其结构性, 较好地处理了研究对象特性这个随机变量, 因而日益成为研究空间变异性现象的重要工具^[3]。

土壤侵蚀在空间上是连续变化的, 空间相近的点比空间

分散的点在理化性质等方面具有更大的相似性, 即它们在统计学意义上相互依赖。这也是地统计学应用的前提^[4]。区域化变量是研究那些分布于空间中并显示出一定结构性和随机性的自然现象。它有两个最基本的假设即平稳假设和本征假设, 它要求所有的随机误差都是二阶平稳的, 也就是随机误差的均值为零且任何两个随机误差之间的协方差依赖于它们之间的距离和方向而不是它们的确切位置。区域化变量用以描述分布于空间并显示出一定结构的现象, 在数学上, 区域化变量可写成函数形式 $Z(x)$, 其中 Z 表示所研究的变量, x 为空间位置^[5]。

在区域化理论中常用到二阶平稳性假设, 即:

a. 期望值为常数且独立于 x

$$E[Z(x)] = m(x) = m \quad (1)$$

b. 任两点 x 与 x' 之间的方差不依赖于 x 和 x' 本身, 而与矢量 $(x - x')$ 有关

$$E[Z(x) - m][Z(x') - m] = k(x - x') \quad (2)$$

然而二阶平稳假设所要求的条件仍然相当苛刻, 既要求方差存在且为常数, 又要求协方差存在且不依赖于 x , 于是对于较多离散性很大的物理现象, 既无先验方差又无协方差存在时, 可采用弱二阶平稳假设(内蕴假设) 即:

a. 与二阶平稳性相同

* 收稿日期: 2005-10-19

作者简介: 马 驰(1969-), 男, 陕西兴平人, 硕士, 主要从事 GIS 应用与环境地学研究。

$$E[Z(x)] = m \tag{3}$$

b. 增量 $[Z(x+h) - Z(x)]$ 的有限方差与 x 无关

$$Var[Z(x+h) - Z(x)] = 2\gamma(h) \tag{4}$$

式中: 函数 $\gamma(h)$ 习惯上称为半变异函数^[6]。

半变异函数的功能在于它既能描述土壤侵蚀参数的空间结构性变化, 又能描述其随机性变化。因此, 在土壤侵蚀参数的空间变异性分析中, 可以将变异函数视为其空间变化的结构函数, 该结构函数即是刻画土壤侵蚀参数空间变异规律的数学模型。因而, 利用半变异函数及其参数可以定量揭示土壤侵蚀参数的空间变异规律。

2 GIS 中地统计学方法

变异性分析的目的在于能够充分考虑其空间变异特性, 从而更加准确对研究对象进行预测分析。地统计学的克立格方法对土壤侵蚀空间变异性的研究就是体现在如何应用有限的空间分布数据进行变异性分析, 建立充分考虑变异性影响的插值模型, 实现插值预测的过程。

2.1 空间变异性分析的克立格法(Kriging)

在建立预测模型和方法进行空间插值时, 通常的方法有反距离加权法和样条插值法, 另一类插值方法包括地统计学中的克立格方法, 它们以考虑自相关关系(量测点间的统计关系)的统计模型为基础。因此这些方法不仅能拟合出曲面而且可以对预测结果的精度给予定量的描述。

克立格法类似于反距离加权, 通过给参与计算的样本点赋予权重来进行插值。其通用公式可表示为样本点的加权之和:

$$Z(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i)$$

式中: $Z(S_i)$ —— I 点的观测值; λ_i —— 每个样本点的权重, 该权重是未知的; S_0 所要预测的点; N —— 观测的总点数。

在反距离加权中, λ_i 仅与观测点到插值点的距离相关。在克立格插值中, λ_i 不仅与观测点到插值点的距离相关, 而且与观测点的空间分析模式有关。为将这种空间分布模式应用到权重中来, 克立格法中将这种空间自相关关系要加以量化分析。因此, 在普通克立格插值中, λ_i 依赖于观测点的拟合函数, 该函数同时考虑了观测点到插值点的距离及观测点的空间分布模式。

2.2 克立格法实现空间变异分析和插值的一般步骤

运用克立格方法进行土壤侵蚀空间变异分析插值, 有以下几步工作是必须的:

(1) 揭示空间依赖关系

第一步: 空间变异分析

拟合一个模型或进行空间建模称为结构分析或变异分析。在对采样点进行结构分析即空间建模时, 首先会得到一个经验变异函数图。由半变异函数得到:

半变异函数(距离 h) = $0.5 \times$ 平均值[(属性值 i - 属性值 j)²]

公式主要计算每两个点间属性值偏差的平方。依次对各点进行该计算。

实际应用中, 我们通常对这些点进行分组, 且每一组点(两个)都有惟一值, 且有很多类似的组。例如, 计算所有大于 40 m 小于 50 m 的点对的平均变异函数。经验变异函数的 x 轴是距离(步长), y 轴是平均变异函数值。

第二步: 拟合经验变异函数模型

在分析了空间变异性后, 就是拟合一个点的经验变异函数模型。克立格法最主要的应用就是预测未采样点的属性

值。点的经验变异函数提供了数据集的空间关联, 但它不能提供所有方向的距离的相关信息。为这个原因, 同时也为保证克立格插值总有一个正的克立格方差, 需要我们拟合出一个变异函数的理论模型(如一个连续函数或曲线)。克立格法提供了很多理论模型, 其中最为常用的有球状模型和指数模型。在具体分析中模型选择取决于源数据的空间关联以及对所研究对象的先验知识。根据土壤侵蚀空间变异性的特征, 我们可以选用球状模型。

(2) 进行插值预测。在完成揭示数据的空间依赖性后, 有了数据间的空间关联关系, 就可利用拟合好的模型进行预测。进行插值的操作与反距离加权一样, 克立格法也利用观测值构成权重来预测未知点的值。而克立格法相对来说比反距离加权更成熟些。反距离加权重权仅仅是基于距离进行了简单的计算, 而克立格权值来自于变异函数, 它考虑了数据间的空间关联。要创建一个研究对象的连续曲面或地图, 必须对每个点进行预测, 这时要以变异函数及未知点周围观测点的分布为基础。

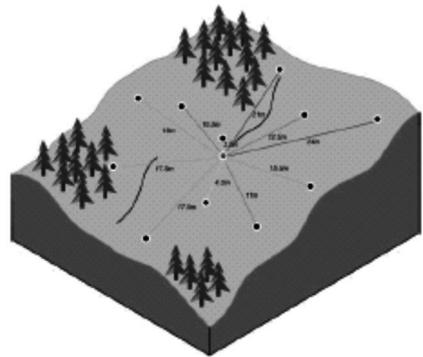


图 1 样点对示意图

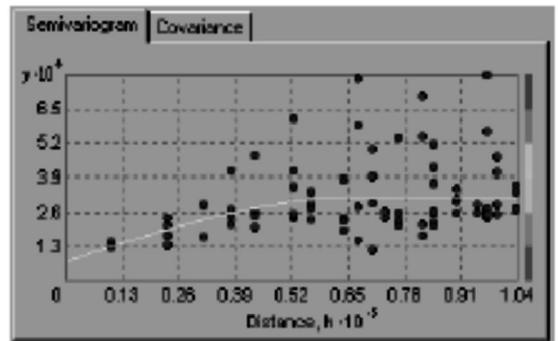


图 2 半变异模型图

2.3 地统计模块的空间变异分析

地统计模块提供了功能强大的空间数据探索工具项目, 这些项目能让用户从一个不同的视图来研究数据的特征。每个视图在单独的窗口中显示出来, 并且与 ARCMAP 视图及其他空间探索窗口相互联系和作用^[7]。这些工具分别是^[8]:

Histogram (直方图): 主要用来描述数据中单变量(一个变量)的特征。它可以显示感兴趣数据集的频率分布特征并计算一些概括性的统计指标, 如位置指标的均值、中数, 分布指标的方差、标准差, 形状指标的偏斜系数、峰度等。

Voronoi Map(Voronoi 地图): 该图通过特定的方法生成样点周围的相邻多边形, 从而给出相邻点的定义, 这样就可以在此基础上根据相应指标实现不同的研究目的, 具体研究内容与指标分配是: 局部平滑: 均值、模式、中值; 局部变异: 标准(偏)差、熵; 局部离群值: 聚类; 局部影响: 简化。

Normal QQplot(正态 QQplot 分布图): 它是用两种分

布的分位数做出的图形。

Trend Analysis (趋势分析): 它可以帮助你识别出输入数据集的全局趋势。趋势分析工具可以生成数据的三维透视图。样点的位置可以在 X、Y 平面上来表示, 对于每个样点的值, 则通过垂直方向上的 Z 轴来表示。趋势分析工具的独特之处在于它将数据值投影到 XZ 平面和 YZ 平面来做散点图。它可以被看作是三维数据的侧视图, 然后用多项式来拟合投影平面上的散点图。它的另外一个特点是你可以旋转数据从而起到隔离数据的方向趋势的作用。它还有许多其他的特点, 如能让你旋转和改变整个图像的透视图, 改变点、线的大小和颜色, 删除平面和点, 选择拟合散点图的多项式的次数等。

这些分析工具主要包括以下几类:

- 检验数据的分布特征: 用直方图和 QQplot 图探索土壤侵蚀空间数据的频率分析;
- 寻找全局或局部离群值;
- 全局趋势分析: 趋势分析工具;
- 检测空间自相关及方向变异: 半变异/ 协方差云;
- 多数数据集的协变: 正交协方差函数。

3 研究区结果分析

在实际工作中, 有时对研究区域通常只能按特定取样方法, 获取空间分布的有限实测数据, 由这些有限的实测数据去推断整个研究区域未知点上的值。GIS 及地统计方法的引入为我们最终解决土壤侵蚀空间分布趋势预测分析与推断提供了有效的手段^[1]。下面以重庆市璧山县为例, 就土壤侵蚀变异性的 USLE 方程计算结果与地统计学方法预测值进行对比分析。

表 1 地统计 Kriging 预测流失分级数据

流失等级	面积/ m ²	面积百分比/ %
11	5966486. 227	0. 57
12	32441259. 12	3. 12
13	348230224. 5	33. 5
14	583217989. 7	56. 1
15	66670048. 53	6. 41
16	3188567. 538	0. 31

将由 USLE 方程计算结果与地统计学(GeoStatistical) 方法插值得到的土壤侵蚀分级分布数据统计, 得到如表 2 结果。

从结果看, 由 USLE 方程计算所得土壤侵蚀主要集中于参考文献:

[1] 蔡崇法, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19- 24.

[2] 陈一兵, Trouwborst, K O. 土壤侵蚀建模中 ANSWERS 及地理信息系统 ARC/INFO 的应用研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(2): 1- 13.

[3] 符素华, 刘宝元. 土壤侵蚀量预报模型研究进展[J]. 地球科学进展, 2002, 17(1): 78- 84.

[4] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 等. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究- 以河北省遵化市为例[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 557- 563.

[5] 郭仁中. 空间分析[M]. 武汉: 武汉测绘大学出版社, 2000.

[6] 侯景儒, 黄竟先, 等. 地质统计学的理论与方法[M]. 北京: 地质出版社, 1990.

[7] 倪九派, 傅涛, 等. 应用 ARC/ INFO 预测芋子沟小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(4): 29- 32.

[8] 汤国安, 陈正江, 赵牡丹, 等. ArcView 地理信息系统空间分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2002, 136- 137.

[9] Ankeny. An investigation of spatial variation in soil erosion, soil properties, and crop production within an agricultural field in Devon, United Kingdom[J]. Journal of Soil and Water Conservation , 2002; 57(1): 55- 65.

[10] Burrough, P A. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment[M]. New York: Oxford University Press, 1986. 50.

[11] 李毅, 陈建军. 土壤空间变异研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2000, 4(4): 331- 337.

中度以下侵蚀类型分析, 从微度至极强度等呈总体下降分布趋势, 而由 Kriging 插值预测结果则呈正态的钟形分布, 其主要分布集中于中度、强度侵蚀类型, 其两端的微度和剧烈侵蚀分布都较少。经与 USLE 方程计算结果和实际调查对比分析, 其预测结果除微度和强度侵蚀外与实际较为稳合。

表 2 USLE 计算值与 Kriging 预测结果对比分析表

侵蚀级别	2003 年面积/ m ²	百分比/ %	预测面积/ m ²	百分比/ %	比例变化/ %
微度侵蚀	5024497. 4	48. 309	5966486. 227	0. 57	- 47. 74
轻度侵蚀	1028747. 5	9. 898	32441259. 12	3. 12	- 6. 778
中度侵蚀	2140723. 2	20. 583	348230224. 5	33. 5	12. 917
强度侵蚀	922311. 57	8. 895	583217989. 7	56. 1	47. 205
极强度侵蚀	275293. 02	2. 6471	66670048. 53	6. 41	3. 7634
剧烈侵蚀	89630. 28	0. 859	3188567. 538	0. 31	- 0. 549
总计	9481202. 9	91. 190	10397145. 76	100	8. 8096

4 结 论

地统计学是以区域化变量理论为基础, 以变异函数为主要工具, 研究那些在空间分布上既有随机性又有结构性, 或具有空间相关性和依赖性的自然现象的科学。土壤侵蚀作为一种复杂的地学变量区别于数学上随机变量的显著特征在于其在空间分布上的相关性, 它们既具随机性, 又有规律性, 与土壤和地质等空间变异性研究领域类似。由此可得一下认识:

- (1) 经典统计方法在分析研究对象时采用 FISHER 统计来分析, 它们视样本变量之间是完全独立的, 与研究对象间变异的样本取样方法不甚相符, 该方法在研究土壤侵蚀一类具有典型空间随机性和结构性的双重特性的变量时的局限性充分表现了出来。
- (2) 用传统的数理统计方法对其进行研究, 由于其不完全满足随机条件而可能产生偏差, 为此而产生了空间统计学(即地统计学), 对空间分布变量及其分布结构进行定量研究。
- (3) 地统计学方法通过引入区域性变量理论, 既考虑了研究对象性质的随机性, 又考虑了其结构性, 较好地处理了研究对象特性这个随机变量, 因而日益成为研究空间变异性现象的重要工具。
- (4) 将地统计学方法引入土壤侵蚀空间变异性研究中, 将对传统统计方法存在的不足加以改进, 促进土壤侵蚀空间变异性的认识、分析与评价, 从而为提高水土保持治理规划的科学性提供依据。