

土壤稳定入渗速率空间插值不确定性研究^{*}

胡志瑞^{1,2}, 杨勤科^{1,2}, 刘建飞^{1,2}, 任宗萍^{1,2}, 王琦^{2,3}, 姚志宏^{2,3}

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 以黄土丘陵沟壑第三副区的藉河流域为研究区, 根据 65 个实测点数据, 采用普通克里格法、反距离权重法、样条函数法等插值方法, 分析了测点数量变化、栅格像元尺寸变化及插值方法的差异对土壤稳定入渗速率空间插值结果的影响, 剖析了空间插值中的不确定性。结果表明: (1) 参与插值站点越多, 所得插值结果不确定性越小; (2) 像元尺寸在 25~800 m 间变化对土壤稳定入渗速率的插值结果影响微弱; (3) 不同插值方法对插值结果的精度影响较大, 说明插值方法的差异对插值结果的不确定性有较大影响。

关键词: 空间插值; 稳定入渗速率; 不确定性; 藉河流域

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)03-0048-04

Study on the Spatial Interpolation Uncertainty of Soil Steady Water Infiltration Rates

HU Zhi-rui^{1,2}, YANG Qin-ke^{1,2}, LIU Jian-fei^{1,2}, REN Zong-ping^{1,2}, WANG Qi^{2,3}, YAO Zhi-hong^{2,3}

(1. College of Resource and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This study mainly discuss the spatial interpolation uncertainty of soil steady water infiltration rates in Ji river basin which located in the third vice-area of loess hilly and gully region. Based on the 65 actual measurement points data, the spatial interpolation methods of inverse distance weighted, ordinary kriging and spline are utilized to analyze the impact of sample numbers, cell size of interpolation grid and different interpolation methods on the results of spatial interpolation of steady water infiltration rates. The results are as follows: (1) The more samples in the interpolation, the lower uncertainty reflected by MAE; (2) The variations of cell size from 25 m, 50 m, 100 m, 200 m, 400 m, 800 m does not affect the accuracy remarkably; (3) Different interpolation methods affect the accuracy remarkably, and bring different levels of uncertainty.

Key words: spatial interpolation; steady water infiltration rates; uncertainty; Ji river basin

20 世纪 90 年代以来, 国内外学者对区域尺度土壤侵蚀研究给予了高度重视, 区域土壤侵蚀研究已成为土壤侵蚀学科的前沿研究领域^[1]。区域土壤侵蚀模型作为区域土壤侵蚀研究的重要组成部分, 是进行大区域土壤侵蚀调查、认识土壤侵蚀对环境的影响、理解多种尺度土壤侵蚀过程及其相关现代地表过程、分析评估全球变化与土壤侵蚀关系的基

础^[2-3]。土壤因子是影响土壤侵蚀的重要因子。土壤稳定入渗速率作为表征土壤性质的指标之一, 在土壤侵蚀领域对其进行了大量的研究^[4-7]。

土壤稳定入渗速率一般通过野外实测的方法, 在有限点上采集数据。为了反映区域入渗速率及其空间变异性, 必须进行空间化处理。袁建平曾针对小流域提出平均入渗速率点面转化公式^[8], 也有人

^{*} 收稿日期: 2009-01-17

基金项目: 黄委会天水水土保持实验站项目(黄土丘陵第三副区水土流失预测预报的区域模型研究)

作者简介: 胡志瑞(1983-), 男, 宁夏同心县人, 硕士研究生, 主要从事遥感与 GIS 应用、空间数据挖掘和不确定性研究。E-mail: zhiruihu@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 杨勤科(1962-), 男, 陕西陇县人, 研究员, 主要从事基于遥感和 GIS 的区域水土流失评价研究。E-mail: qkyang@ms.iswc.ac.cn

进行过入渗速率的空间插值, 但对于插值方法及其参数设置方面的研究较少。目前空间插值研究多集中在插值方法选取、空间变异性研究上, 针对插值中的不确定性研究不足, 这不利于对插值结果的可靠程度做出评价。

空间插值目前已有一系列方法^[9], 包括泰森多边形、反距离权重和地统计学等方法。诸多研究表明, 克里格等地统计方法往往较传统方法具有更高的插值精度^[10], 因而在土壤学研究中得到广泛应用^[11-12]。本文就土壤稳定入渗速率空间插值结果受采样密度、插值方法等因素的影响进行研究, 分析插值中的不确定性, 以期提高插值精度, 然后进一步分析其空间变异性和相关性, 进而为区域尺度水土流失评价提供更为精确的输入参数。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

以甘肃省藉河流域为研究区。藉河流域属黄土丘陵沟壑第三副区^[13], 是渭河的一级支流。流域平均海拔 1 685.28 m, 位于 34.35° - 34.66° N、105.13° - 105.86° E, 流域面积为 1 265.13 km²。该区地形支离破碎、沟壑纵横。由于黄土地层广布、植被覆盖不良等因素造成土壤侵蚀十分严重, 因而被列入黄河流域重点治理工程区。

1.2 数据来源及数据预处理

本研究所用的土壤稳定入渗速率数据是参照蒋定生先生的双环法^[14], 在野外实测所得, 单位为 mm/min。在藉河流域共布设 65 个测点(图 1)。在测每个点时用 GPS 测出经纬度坐标和高程。先把各实测点和预测点的经纬度信息整理成文本文件, 在 Arc/Info 中用 generate 及其 subcommand 命令, 生成空间定位点图层并构建拓扑关系。然后添加属性信息。由于 GPS 所测点位为 WGS84 坐标系, 为了方便以后数据处理, 需将生成的图层进行投影转换, 以便于后期数据处理。

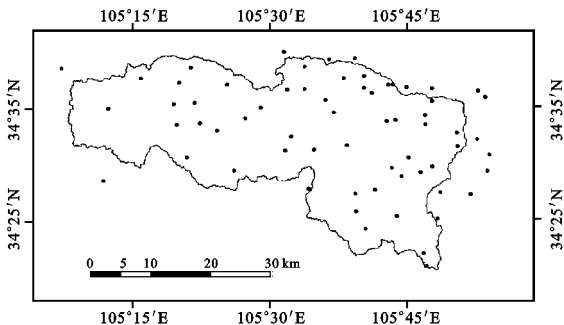


图 1 藉河流域土壤稳定入渗速率实测点位布设图

1.3 分析方法

1.3.1 插值方法 为了保证插值结果的可比性, 像元尺寸变化分析、站点数量变化分析都采用反距离权重法(Inverse Distance Weighting, IDW), 权重指数固定取值为 2, 搜索范围设为临近的 15 个站点。插值方法的比较分析则采用了 IDW 法、普通克里格法(Ordinary Kriging, OK)、样条函数法(Spline)。这些插值运算过程都是在 ArcGIS 中完成的^[15-16]。

1.3.2 插值检验 从样区 65 个站点中随机抽出 20%(13 个)的点作为误差检验站点, 剩余的 52 个站点参与插值计算。插值结果生成后, 可在 GIS 软件中得到 13 个检验站点的预测值, 并将其与实际观测值进行对比统计分析, 考察不同情况下插值结果的平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)、平均相对误差(Mean Relative Error, MRE)和平方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)的变化。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_{\alpha i} - Z_{\hat{\alpha} i}| \quad (1)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Z_{\alpha i} - Z_{\hat{\alpha} i}}{Z_{\alpha i}} \right| \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{\alpha i} - Z_{\hat{\alpha} i})^2}{n}} \quad (3)$$

式中: $Z_{\alpha i}$ ——第 i 个点的实测值; $Z_{\hat{\alpha} i}$ ——估计值; n ——用于检验的点的数目。

1.3.3 分析设定 站点数量变化以藉河流域剩余 52 个实测站点的数据为基础, 将这 52 个站点依次减少 10 个点, 即 42, 32, 22 个站点进行稳定入渗速率的空间插值, 考察 13 个检测站点的平均绝对误差、平均相对误差和平方根误差的变化。像元尺寸变化以剩余 52 个实测站点的数据进行稳定入渗速率插值, 栅格大小分别设定为 25 m, 50 m, 100 m, 200 m, 400 m, 800 m, 比较像元尺寸变化后 13 个检测站点的误差变化。插值方法的比较分析中, 采用 IDW 法、普通克里格法、样条函数法进行插值, 考察方法的改变导致检测站点插值结果的变化。

2 结果与分析

2.1 站点数量对插值结果的影响

以 52, 42, 32, 22 个站点数据, 采用反距离权重法对藉河流域稳定入渗速率进行空间插值, 得到各自的土壤稳定入渗速率表面, 其累积频率曲线如图 2 所示。结果表明参与插值站点数量越多, 所得曲线越平滑, 整体精度越高。参与插值站点较少时, 值会出现突变。同时得到 13 个检验站点的插值结果, 然后与实测值相比较, 如表 1 所示。

表 1 不同插值站点数量插值结果误差统计

编码	站 点	实测值	AE(52)	AE(42)	AE(32)	AE(22)
1	马 兰	6.45	3.75	3.79	2.75	3.81
2	曹家埂	4.54	1.01	0.99	0.71	0.15
3	徐家山	2.72	0.21	0.15	1.05	1.00
4	郑家磨	6.75	4.10	4.06	3.97	3.77
5	刘家湾	1.81	4.58	4.56	6.19	8.15
6	西 华	1.81	0.11	0.07	0.26	1.72
7	吉家河	1.51	1.24	2.62	0.46	1.56
8	大湾里	3.43	0.17	0.50	0.80	0.78
9	严家河	1.41	0.05	0.10	0.01	2.02
10	唐家湾	3.93	1.83	1.61	1.42	1.18
11	何家庄	4.23	2.50	2.38	3.27	2.02
12	龟凤山	6.65	2.53	2.31	2.73	2.45
13	何家窑	3.02	0.06	0.01	0.38	1.07
MAE			1.704	1.779	1.846	2.283
MRE			0.496	0.560	0.564	0.861
RMSE			2.329	2.375	2.550	3.023

注: AE 为绝对误差(Absolute Error, AE)。

表 1 列出了 4 种情况下 13 个检验点插值结果的误差统计。结果显示, 随着插值站点数量的减少, 13 个检验站点的平均绝对误差、平均相对误差和平方根误差均呈递增趋势, 分别由 1.704 增至 2.283、由 0.496 增至 0.861、由 2.329 增至 3.023。这说明: 插值站点数量不同, 插值结果的精度不同; 插值站点的数目越多, 插值精度越高, 越接近实测值, 13 个检验站点的平均绝对误差越小。

2.2 像元尺寸对插值结果的影响

利用 52 个站点数据, 采用反距离权重法按 25 m, 50 m, 100 m, 200 m, 400 m, 800 m 像元大小分别进行空间插值, 得到 6 种像元大小的土壤稳定入渗速率累积频率曲线, 如图 3 所示。结果表明:

像元在 25~ 800 m 间变化对插值结果影响微弱, 所有累积频率曲线都连续、光滑, 且曲线形状变化趋势一致, 几乎重合。同时统计出 13 个检验站点的误差结果(表 2)。根据检验站点的误差统计结果, 像元大小由 25~ 800 m 变化的过程中, 13 个检验点的 MAE、MRE 和 RMSE 都有一定的变化, 但变化幅度并不大。检查每一个检验站点 AE 变化情况, 发现变化较小。该结果表明, 像元大小对插值结果的不确定性有影响, 但影响有限, 栅格大小的改变不会引起插值结果明显的变化。

2.3 插值方法对插值结果的影响

插值方法的比较中分别采用普通克里格法、反距离权重法、样条函数法等插值方法对藉河流域的

土壤稳定入渗速率进行空间插值。其中: 克里格的半方差函数采用高斯模型, 站点搜索范围为临近的 15 个站点; 反距离权重法的距离权重指数为 2, 站点搜索范围为临近的 15 个站点; 样条函数法所用的样条为规则样条, 指数为 0.1, 站点搜索范围也为临近的 15 个站点。运用以上插值方法得到 3 种土壤稳定入渗速率表面的累积频率曲线, 如图 4 所示。结果表明, OK 法插值结果分布更集中, 更为接近正态分布, IDW 法和 Spline 法所得结果都整体偏大, 其中以 Spline 法插值效果最差。同时得到用 13 个站点对各插值方法结果检验误差, 如表 3 所示。

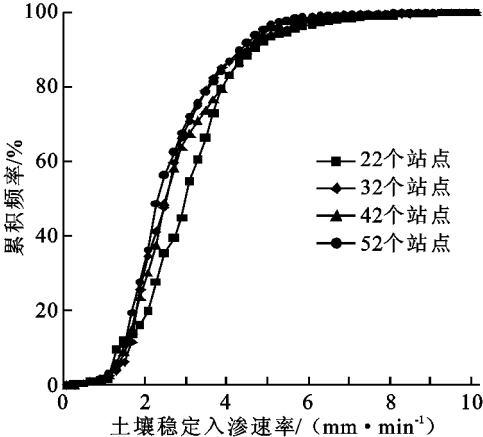


图 2 不同数量站点插值结果累积频率曲线

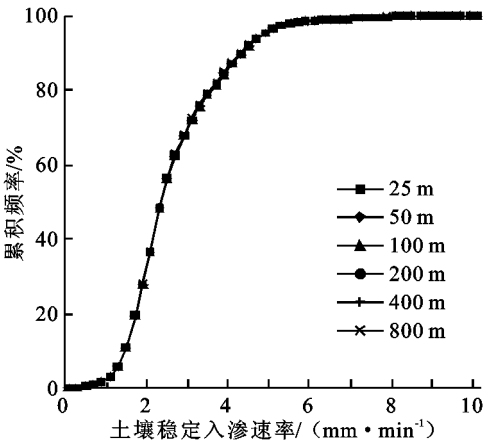


图 3 不同像元大小插值结果累积频率曲线

从表 3 可以看出, 各种插值方法的插值结果精度不同, 普通克里格方法精度相对较高。这说明不同插值方法的插值结果具有不同程度的不确定性。但从每个检验站点的 AE 可以看出, 并非每个点普通克里格的插值精度都高于其他方法, 如点 3, 13; 同时, 也不是每个点样条函数法的插值精度都最低, 如点 4。

3 结论与讨论

自然地理要素空间插值的不确定性长期以来一直存在, 在已有研究中对气象方面关注较多^[17]。与

降雨、气温等要素的空间插值相比,土壤稳定入渗速率空间插值的不确定性存在类似情况,即插值站点数量、插值方法、像元尺寸等,但时间变化对其影响较小。就土壤稳定入渗速率本身特性而言,需要有针对性的分析,以期明确研究方向,尽量减少这些不确定性。

表 2 不同栅格尺寸插值结果误差统计							
编码	实测值	不同栅格尺寸/m					
		25	50	100	200	400	800
1	6.45	3.76	3.75	3.75	3.76	3.71	3.81
2	4.54	1.03	1.04	1.01	0.89	0.99	0.71
3	2.72	0.22	0.22	0.21	0.21	0.25	0.13
4	6.75	4.11	4.10	4.10	4.10	4.12	4.11
5	1.81	4.57	4.57	4.58	4.50	4.46	4.05
6	1.81	0.11	0.11	0.11	0.10	0.09	0.01
7	1.51	1.23	1.23	1.24	1.25	1.05	1.11
8	3.43	0.16	0.17	0.17	0.19	0.15	0.21
9	1.41	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	0.06
10	3.93	1.83	1.83	1.83	1.83	1.81	1.83
11	4.23	2.50	2.50	2.50	2.50	2.47	2.77
12	6.65	2.53	2.53	2.53	2.52	2.56	2.52
13	3.02	0.06	0.05	0.06	0.07	0.09	0.14
MAE		1.704	1.706	1.704	1.691	1.675	1.652
MRE		0.495	0.496	0.496	0.491	0.479	0.464
RMSE		2.330	2.329	2.329	2.315	2.299	2.272

表 3 不同插值方法插值结果误差统计				
编码	实测值	AE(OK)	AE(IDW)	AE(SPLINE)
1	6.45	2.57	3.75	3.94
2	4.54	0.04	1.01	1.22
3	2.72	0.80	0.21	0.46
4	6.75	3.90	4.10	3.19
5	1.81	3.67	4.58	6.74
6	1.81	0.16	0.11	1.80
7	1.51	1.84	1.24	1.42
8	3.43	0.01	0.17	1.99
9	1.41	0.55	0.05	1.83
10	3.93	2.03	1.83	3.49
11	4.23	1.55	2.50	3.41
12	6.65	2.05	2.53	4.81
13	3.02	0.74	0.06	0.21
MAE		1.533	1.704	2.655
MRE		0.496	0.496	0.888
RMSE		1.980	2.329	3.191

本研究所用的数据用双环法测得,这些数据可能存在人为误差和设备误差。据相关研究表明,双

环法所测土壤稳定入渗速率会偏大^[4]。由于现有插值方法很多,为了说明不同方法对结果精度的影响,在插值中只应用了IDW法、普通克里格等应用最为广泛的常规方法,而没有采用协同克里格等方法。为了反映插值结果的不确定性水平与趋势,选择了20%的点作为误差检验站点。权重、搜索范围和普通克里格插值中所选模型的不同都会造成插值结果的变化,为了使结果有可比性,用了同一权重和搜索范围。

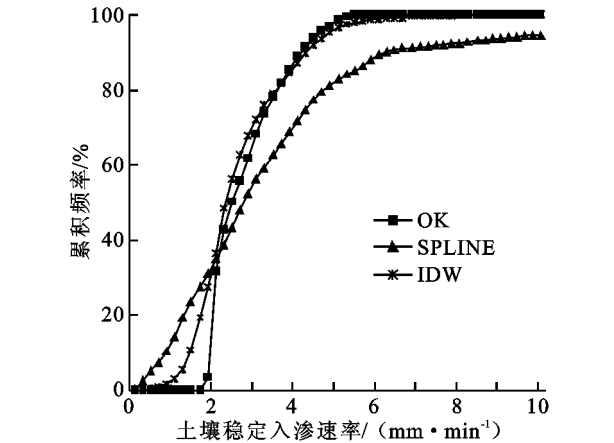


图 4 不同插值方法插值结果累积频率曲线

通过本研究可得到如下结论: (1) 像元尺寸在 25~ 800 m 间变化对土壤稳定入渗速率的影响微弱; (2) 插值站点数量不同, 会对插值结果有较大影响。整体而言, 参与插值站点越多, 所得插值结果精度越高, 但局部结果的不确定性是否减少, 与站点的空间分布有关; (3) 不同插值方法对插值结果的精度影响较大, 就本文而言, 普通克里格法所得结果精度较高。说明插值方法的差异对插值结果的不确定性有较大影响。

土壤稳定入渗速率空间插值的不确定性主要由参与插值站点数量的多少和插值方法的选取造成的。因而减少这种不确定性, 提高插值结果的精度主要需从这两个方面考虑。站点密度的增加是提高插值精度的关键, 但由于野外实测过程中各种条件的限制, 所得站点数量总会有限。因此在站点数量一定的情况下, 可以在插值过程中引入其他相关地理要素数据, 如 DEM 数据、土壤类型图、土地利用图等。引入第三方变量的前提是该变量与土壤稳定入渗速率必须有很高的相关性, 已有研究表明流域土壤稳定入渗速率呈现明显的坡面垂直分带特性^[5, 18]。因而可以考虑将坡度、坡向、坡位、海拔等相关变量引入插值中, 这些相关变量的选取并且整合到现有插值模型中将是以后研究的重点。

田景观入侵过程,阔叶林斑块的格局指标在表现景观破碎过程中在几组尺度上表现规律一致,分别为在 50 m、500 m、750 m 和 100 m、150 m 和 75 m、125 m、200 m 这三组尺度。

参考文献:

[1] Turner M G, O'Neill R V, Gardner R H, et al. Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern[J]. *Landscape Ecology*, 1989, 3(3/4): 153-162.

[2] Wickham J D, Ritters K H. Sensitivity of landscape metrics to pixel size[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16(18): 3585-3595.

[3] Wu J G, Shen W J, Sun W Z, et al. Empirical patterns of the effects of changing scale on landscape metrics[J]. *Landscape Ecology*, 2002, 17(8): 761-782.

[4] Jerry A G, Edward A M, Kevin P P. Landscape structure analysis of Kansas at three scales[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2000, 52(1): 45-61.

[5] Cumming S, Vernier P. Statistical models of landscape pattern metrics, with applications to regional scale dynamic forest simulations[J]. *Landscape Ecology*, 2002, 17(5): 433-444.

[6] Quinlan R, Paterson A M, Hall R I, et al. A landscape approach to examining spatial patterns of limnological variables and long-term environmental change in a southern Canadian lake district[J]. *Freshwater*

Biology, 2003, 48(9): 1676-1697.

[7] 李正国,王仰麟,张小飞,等. 陕北黄土高原景观破碎化的时空动态研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(11): 2066-2070.

[8] 李正国,王仰麟,张小飞. 陕北黄土高原景观破碎化及其土壤裸露效应[J]. *生态学报*, 2005, 25(3): 421-427.

[9] 肖荣波,周志翔,王鹏程,等. 武钢工业区绿地景观格局分析及综合评价[J]. *生态学报*, 2004, 24(9): 1924-1930.

[10] 布仁仓,李秀珍,胡远满,等. 尺度分析对景观格局指标的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(12): 2181-2186.

[11] Herzog F, Lausch A, Muller E, et al. Landscape metrics for assessment of landscape destruction and rehabilitation[J]. *Environmental Management*, 2001, 27(1): 91-107.

[12] Kie J G, Bowyer R T, Nicholson M C, et al. Landscape heterogeneity at differing scales: effects on spatial distribution of Mule Deer[J]. *Ecology*, 2002, 83(2): 530-544.

[13] 赵明华,杨树佳,牟文龙. 山东半岛县域土地利用景观格局分析:以招远市为例[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(3): 155-157.

[14] McGarigal K, Marks B J. FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure[M]. Portland: Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-351, 1995.

[15] 李秀珍,布仁仓,常禹,等. 景观格局指标对不同景观格局的反应[J]. *应用生态学报*, 2004, 24(1): 123-134.

(上接第 51 页)

参考文献:

[1] 杨勤科,李锐,曹明明. 区域土壤侵蚀定量研究的国内外进展[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(9): 31-38.

[2] 姚志宏,杨勤科,吴喆,等. 区域尺度降雨径流估算方法研究 I: 算法设计[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(5): 306-308.

[3] 姚志宏,杨勤科,吴喆,等. 区域尺度侵蚀产沙估算方法研究[J]. *中国水土保持科学*, 2007, 5(4): 13-17.

[4] 蒋定生,黄国俊. 黄土高原土壤入渗速率的研究[J]. *土壤学报*, 1986, 23(4): 299-305.

[5] 袁建平,张素丽. 黄土丘陵区小流域土壤稳定入渗速率空间变异[J]. *土壤学报*, 2001, 38(4): 579-583.

[6] 张爱国,张平仓,杨勤科. 区域水土流失土壤因子研究[M]. 北京:地质出版社, 2003.

[7] 雷俊山. 基于 GIS 的区域土壤抗侵蚀性因子研究[D]. 陕西杨陵: 中国科学院水利部水土保持研究所, 2004.

[8] 袁建平,蒋定生. 黄土丘陵沟壑区小流域降雨入渗产流点面转化[J]. *地理科学*, 2001, 21(3): 262-266.

[9] 朱会义,刘述林,贾绍凤. 自然地理要素空间插值的几个问题[J]. *地理研究*, 2004, 23(4): 425-432.

[10] 李艳,史舟,徐建明,等. 地统计学在土壤科学中的应用及展望[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(1): 178-182.

[11] 连纲,郭旭东,傅伯杰,等. 黄土高原县域土壤养分空间变异特征及预测:以陕西省横山县为例[J]. *土壤学报*, 2008, 45(4): 577-584.

[12] Goovaerts P. Geostatistical modelling of uncertainty in soil science[J]. *Geoderma*, 2001, 103(1/2): 3-26.

[13] 黄秉维. 编制黄河中游流域土壤侵蚀分区图的经验和教训[J]. *科学通报*, 1955(12): 15-21.

[14] 蒋定生,黄国俊,谢永生. 黄土高原土壤入渗能力野外测试[J]. *水土保持通报*, 1984, 4(4): 7-9.

[15] Johnston K, Sakala M, Wrightsell J. Using ArcGIS geostatistical analyst[M]. CA: Environmental Systems Research Institute Redlands, 1999.

[16] 吴秀芹,张洪岩,李瑞政,等. ArcGIS 9 地理信息系统应用与实践(下册)[M]. 北京:清华大学出版社, 2007.

[17] 朱会义,贾绍凤. 降雨信息空间插值的不确定性分析[J]. *地理科学进展*, 2004, 23(2): 34-42.

[18] 王月玲,蒋齐,蔡进军,等. 半干旱黄土丘陵区土壤水分入渗速率的空间变异性[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(4): 52-55.