

典型岩溶流域土壤有机质空间变异 ——以云南小江流域为例

蒋勇军^{1 2} 袁道先^{1 2 3} 谢世友¹ 李林立^{1 2}

(1. 西南大学地理科学学院 重庆 400715 2. 西南大学岩溶环境与石漠化治理研究所 重庆 400715 ;
3. 中国地质科学院岩溶地质研究所、国土资源部岩溶动力学开放研究实验室 广西 桂林 54100)

摘要 :以云南小江流域为例 ,利用地统计学与 GIS 相结合研究岩溶区土壤有机质的空间变异。统计分析结果表明 ,研究区内土壤有机质含量的总体水平较高 ,平均为 29.0g/kg ,变异系数为 60.5% ,属强变异 ;半方差函数分析结果表明 ,流域土壤有机质含量的空间变异具有各向异性 ,长、短轴变程分别为 39.8 km 和 22.0 km ,同时由空间自相关部分引起的空间变异性的程度较大 , $C_0/(C_0 + C_1)$ 值为 53.4% ,流域土壤有机质含量具有中等的空间相关性 ;Kriging 插值分析结果表明流域土壤有机质含量由东部向西、西南部逐渐降低 ,其空间分布与流域地质、地貌及土地利用表现出明显的一致性。

关键词 岩溶流域 土壤有机质 空间变异 GIS

文章编号 :1000-0933 (2007)05-2040-08 中图分类号 :Q149 S153.6+21 S154.1 文献标识码 :A

Spatial variability of soil organic matter content in a typical karst watershed : case study of Xiaojiang watershed , Yunnan Province

JIANG Yong-Jun^{1 2} , YUAN Dao-Xian^{1 2 3} , XIE Shi-You¹ , Li Lin-Li^{1 2}

1 College of Geographical Sciences , Southwest University , Chongqing 400715 , China

2 Research Institute of Karst Environment and Rock Desert Control , Southwest University , Chongqing 400715 , China

3 Institute of Karst Geology , CAGS , Karst Dynamics Laboratory , M L R Guilin 541004 , China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (5) 2040 ~ 2047.

Abstract :The Xiaojiang watershed of Yunnan Province , Southwest China , covers an area of about 1034 km² , which extends 24°12'—24°45'N and 103°32'—104°00'E. The watershed is mainly underlain by Triassic system with carbonate rocks of 617 km² or about 60% . Understanding the spatial variation and distribution pattern of SOM content is needed for sustainable development in the karst region. The spatial variation of SOM content in Xiaojiang watershed was determined using geostatistics and GIS to provide information for understanding rock desertification mechanisms and preventing soil degradation.

Based on different stratum , landform , and land-use type , 177 soil samples (0—20 cm) were collected from the watershed. The SOM content was analyzed using the Walkley Black wet combustion method. The geostatistical characteristics , spatial trend and azimuth of anisotropic axle of SOM content were analyzed using the Geostatistical Analyst , ArcGIS 9.2. And a contour map of SOM content for the watershed using Kriging interpolation was obtained. The results are

基金项目 :西南大学博士基金资助项目 (SWNUB2005035) ;西南大学自然地理学重点学科开放基金资助项目 (250-411109)

收稿日期 2006-04-06 ;修订日期 2006-11-20

作者简介 :蒋勇军 (1968 ~) ,男 ,湖南益阳人 ,博士 ,副教授 ,主要从事资源环境与 GIS 应用研究. E-mail :jiangyj@swu.edu.cn

Foundation item :The project was financially supported by doctorate foundation of Southwest University China (No. SWNUB2005035) , the open foundation of physical geography of Southwest University China (No. 250-411109).

Received date 2006-04-06 ;**Accepted date** 2006-11-20

Biography :JIANG Yong-Jun , Ph. D. , Associate professor , mainly engaged in application of GIS to resources and environment. E-mail :jiangyj@swu.edu.cn

as follows :

(1) The distribution of SOM content was highly variable in Xiaojiang watershed. Statistical analysis showed differences in SOM content among different stratum ,landform and land-use type. The coefficient of variation (CV) of SOM content was greatest in carbonate (CV =63.1 %) and smallest in Quaternary soil (CV =40.1 %) among stratum ;and greatest in karst groovy (CV =61.6 %) and vale (CV =61.6 %) and smallest in hill soil (CV =32.3 %) among land form ; and greatest in unused land (CV =60.6 %) and smallest in dry land soil (CV =52.9 %) among land-use types. For all soil samples (n = 177) , the mean , minimum , maximum , standard deviation and coefficient of variation of SOM content were 29.00g/kg ,1.90g/k g ,93.64g/kg ,17.50 and 60.5% , respectively.

(2) The spatial variation of SOM content in the watershed was anisotropic ,which showed that the SOM semivariogram depended on both the distance and the direction of soil sampling. The spatial correlation distances (ranges) were large (39.8 km on the long axle and 22.0 km on the short axle). The nugget variance (0.28) indicated a large disconnection of the semivariogram value from the origin ,and the sill (0.52) showed a large semivariogram value for distance beyond the ranges ;and the integrative comparison of the prediction errors from the trend effects indicated that the 1 order trend effect was preferable.

(3) There is a different in the spatial distribution of SOM content in watershed. The Kriging spatial interpolation showed that SOM decreased gradually from the east to the west and southwest in the watershed. The lowest level band of SOM content was in the southwest of the watershed , but the high level band of SOM content was in the east of the watershed. The spatial distribution of SOM content was related to variation in stratum ,land form and land-use type in the watershed.

Key Words :typical karst watershed ; soil organic matter ; spatial variability ; GIS

土壤是不均一的时空连续体 ,具有高度的空间变异性。20 世纪 70 年代后期地统计学的理论和方法开始应用于土壤调查、制图和土壤空间变异性研究^[1~6] ,到 80 年代土壤空间变异性已成为土壤科学研究的重要内容 ,并由定性描述转向定量研究 ,同时还引进了 Kriging、Cokriging、Punctual Kriging 等内插技术 ,并用于土壤制图 20 世纪 90 年代以来 ,基于 GIS 技术 ,使得土壤空间变异性研究变得更加广泛和深入^[7~10]。

土壤有机质 (SOM)是土壤的重要组成成分 ,是表征土壤质量的重要因子。国内外已有一些用地统计方法研究土壤有机质空间变异的报道 :Mishra 等在农田尺度上研究了红壤地区土壤有机质和 pH 值的空间变异^[11] ;Kuzel 等研究了一公顷区域内镉浓度、pH 值和土壤有机质的空间变异^[12] ;王学锋、杨玉玲、张淑娟、王军等也在农田尺度上探讨了土壤有机质的空间变异性^[13~16] ,高峻等在研究农田土壤颗粒组成及其剖面分层的空间变异时考虑了各向异性和趋势效应 ,更全面、更精确地研究了土壤性质的空间变异问题^[17] ,郭旭东^[18] 和王军^[19]、张世熔^[20]、黄元仿^[21]、舒建英^[22]等在区域尺度上分别研究了黄土高原、黄淮海冲积平原、干旱荒漠区、南方红壤区土壤有机质的时空变异特征。而从区域尺度上利用地统计与 GIS 相结合的方法研究岩溶区土壤有机质空间变异在国内外还鲜见报道。

因此 ,本文拟以云南小江流域为例 ,采用地统计学方法 ,并且考虑各向异性及趋势效应 ,深入探讨岩溶区土壤有机质的空间格局以及土地石漠化的形成机制 ,为岩溶区域可持续发展提供参考。

1 研究区概况

小江流域位于云南省东南部泸西县 ,东经 103°32' ~ 104°00' ,北纬 24°12' ~ 24°45' ,面积 1034km² ,小江河为珠江支流南盘江左岸一级支流 ,气候为旱、雨两季分明的亚热带高原季风气候 ,多年平均气温 15.2℃ ,多年平均降水量 966.8mm ,流域出露地层以中生界三叠系的地层为主 (图 1) ,其中碳酸盐岩面积 616.5 km² ,占流域面积的 59.62% ,为一典型岩溶流域 ,地貌以岩溶峰丛洼地为主 (图 2) ;土壤以红壤为主 ,面积 730km² ;土地利用以耕地和林地为主 (图 3)。2004 年流域总人口 22.7 万人 ,其中农业人口 20 万人 ,占总人口的 87.9% ;

2003 年流域国内生产总值 3.34 亿元 ,其中农牧业生产总值 2.27 亿元 ,占流域国民生产总值的 67.96% ;农产品以水稻、玉米、烤烟为主。

2 数据来源与研究方法

2.1 土壤样品采集与化学分析

采样时间是 2003 年 7~10 月 ,根据地质背景、地貌及土地利用情况共设置了 177 个取样点 (图 4)。采集 0~20cm 表层土样 ,每个养点取 3 份土壤样品并混合 ,带回室内分析。土壤有机质含量用重铬酸钾容量法测定 [23]。

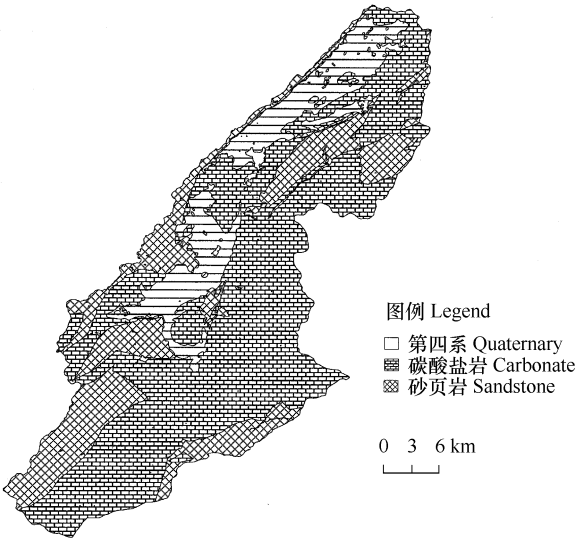


图1 小江流域地质图

Fig.1 The geological map of Xiaojiang watershed

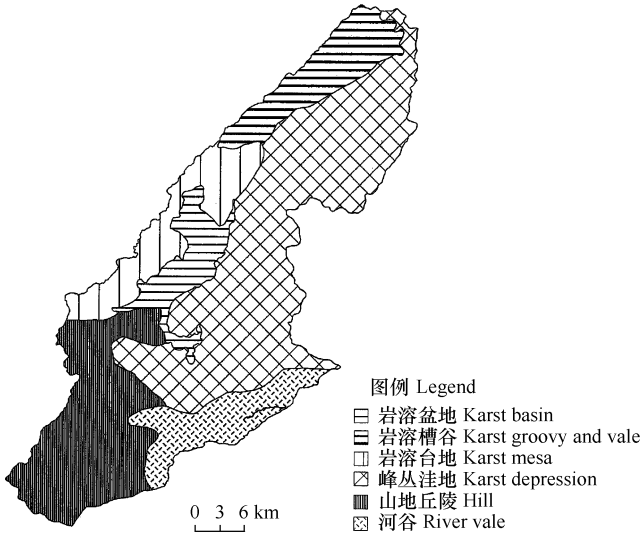


图2 小江流域地貌图

Fig.2 The landform map of Xiaojiang watershed

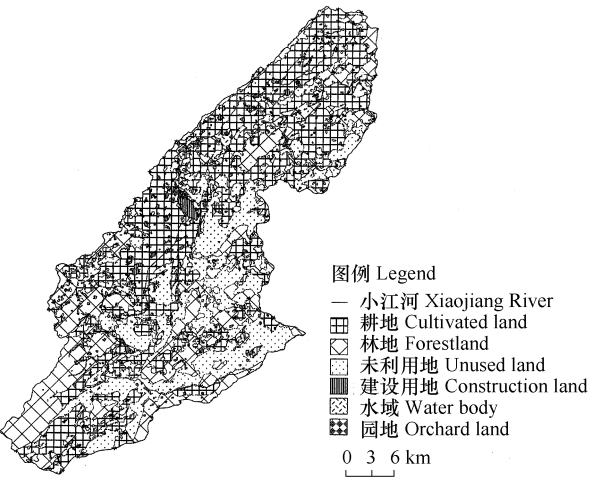


图3 小江流域土地利用图

Fig.3 The land use map of Xiaojiang watershed

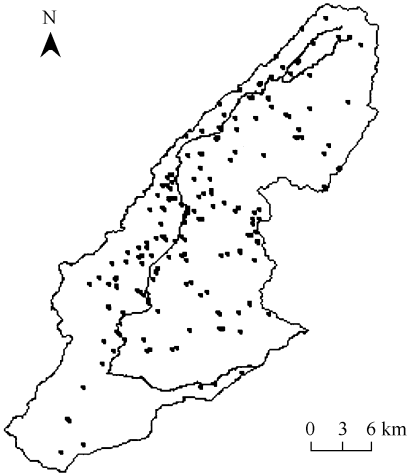


图4 土壤采样点分布图

Fig.4 Distribution map of soil sample points

2.2 地统计学基本理论

Fisher 传统统计学理论将研究的变量假设为纯随机变量 ,但许多土壤性质在空间上并不完全独立 ,而在一定范围内存在着空间相关性 [4 6 24 25]。地统计学方法以变异函数 (半方差函数)和 Kriging 插值为基本工具 ,可以对既具有随机性又具有结构性的各种变量在空间上的分布进行研究。

变异函数能够描述区域化变量的随机性和区域性,定义为区域化变量在抽样间隔下样本方差的数学期望^[26-27],但变异函数只有在最大间隔的1/2内才有意义^[6-28]。当区域化变量随空间位置的变化而变化,并在研究区域里满足内蕴假设和平稳性假设时,其变异函数(半方差函数)为:

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

式中 $r(h)$ 为变异函数 h 为步长 $N(h)$ 为间隔为 h 的样点对数 $Z(x)$ 是区域变化量在位置 x 的值 $Z(x+h)$ 是区域变化量在位置 $x+h$ 处的值。

Kriging 插值是利用已知点的数据去估计未知点 (X_0) 的数值,其实质是一个实行局部估计的加权平均值:

$$Z(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i)$$

式中 $Z(X_0)$ 是在未经观测的点 X_0 上的内插估计值 $Z(X_i)$ 是在点 X_0 附近的若干观测点上获得的实测值 λ_i 是考虑了半方差图中表示空间的权重。

2.3 数据处理

数据分析处理均在 Arcgis 9.2 软件中完成。

3 结果与讨论

3.1 统计特征

在 Arcgis 中利用地统计分析模块对样品进行统计分析,得到不同地质、地貌及土地利用下有机质含量的统计特征(表1)。

表1 土壤有机质的描述性统计							
Table 1 Descriptive statistical results of the soil organic matter							
项目 Item		样点数 Sample No.	最小值 (g/kg) Min	最大值 (g/kg) Max	平均值 (g/kg) Mean	标准差 S D	变异系数 (%) C V
地层 Stratum	第四系 Quaternary	47	8.98	59.3	28.86	11.57	40.1
	碳酸盐岩 carbonate	87	1.9	93.64	32.8	20.96	63.1
	砂页岩 Sandstone	43	3.5	77.82	21.6	13.5	62.5
地貌类型 Land form	岩溶盆地 Karst basin	50	8.98	62.72	28.17	13.9	49.3
	岩溶槽谷 Karst groovy and vale	27	8.85	93.64	30.82	18.97	61.6
	峰丛洼地 Karst depression	58	2.00	81.56	36.53	20.27	55.5
	岩溶台地 Karst mesa	11	4.90	40.60	26.14	11.69	44.7
	河谷 River vale	19	1.90	30.60	14.29	7.94	55.5
	山地丘陵 Hill	12	10.54	27.90	18.33	5.93	32.3
土地利用 Land-use	水田 Paddy field	21	2.14	59.30	27.70	15.70	56.7
	旱地 Dry land	108	3.50	81.56	27.02	14.30	52.9
	林地 Forestland	37	8.85	93.64	42.80	23.66	55.3
	未利用地 Unused land	11	1.90	17.68	9.19	5.56	60.6
合计 Total		177	1.90	93.64	29.00	17.50	60.5

结果表明:(1)不同地层中以碳酸盐岩母质发育的土壤有机质含量最高,变异系数也最大,第四系母质发育的土壤有机质居中,变异系数最小,而砂页岩母质发育的土壤有机质最低,变异系数居中。碳酸盐岩母质区与第四系母质和砂页岩母质相比,由于碳酸盐岩地层富钙的环境有利于腐殖质的积累^[29-32],故碳酸盐岩母质区土壤的有机质含量高,同时由于地形和人类活动影响的差异,导致其变异系数最大,第四系母质区由于富钙的环境和长期的施肥等人类影响,有机质含量也比较高,同时地势平坦和人类影响的均衡性使其变异系数较

小,而砂页岩母质区由于长期的侵蚀作用,有机质含量较低,地形和人类活动的差异性导致其变异系数较大;

(2)不同地貌区中土壤有机质含量大小的顺序为:岩溶峰丛洼地>岩溶台地>山地、丘陵>盆地平坝、岩溶槽谷>河谷区,变异系数大小顺序为:岩溶峰丛洼地>岩溶槽谷>盆地平坝>岩溶台地>河谷谷>山地、丘陵,岩溶峰丛洼地、岩溶台地地貌区由于碳酸盐岩地质背景的影响,土壤富钙环境利于有机质的积累,同时海拔较高,温湿的气候条件也有利于有机质的积累,因此,土壤有机质含量较高,但由于地形和人类活动的差异影响,土壤有机质的变异系数较大,山地、丘陵地貌区由于海拔较高,温湿的气候条件有利于有机质的积累,同时地表主要为森林覆盖,大量的枯枝落叶进入土壤,因此,土壤有机质含量较高,尽管地形差异较大,但人类活动影响比较均一,因此土壤有机质的变异系数较小,盆地平坝、岩溶槽谷地貌区尽管土壤中钙、镁富集,但海拔较低,气候比较干、热,有机质的分解比较快,不利于有机质的积累,同时主要为耕地分布区,一方面有机物输入减少,另一方面农作物的生长和频繁的翻耕措施导致土壤有机质的分解加快,因此土壤有机质含量较低,而土壤有机质的变异系数较大主要由于耕地管理水平和耕作制度等方面的差异引起,河谷、峡谷地貌区由于坡度较大,水土流失强烈,导致土壤有机质含量低,地形起伏大以及土地利用方式的差异导致其土壤有机质变异系数大;

(3)土地利用类型中有机质含量大小顺序为:林地>水田>旱地>未利用地,变异系数大小顺序为未利用地>水田>林地>旱地,林地由于森林的覆盖,大量的枯枝落叶进入土壤,因此,土壤有机质含量较高,其变异系数较小,水田由于农民的投入较大,土壤有机质含量也较高,变异系数较大,旱地由于投入水平低,有机质含量较低而变异系数小,而未利用地由于主要为石漠化土地,土壤有机质含量低,但其变异系数较大。

3.2 数据检验与趋势分析

利用 Arcgis 软件的地统计分析模块对数据进行检验,直方图和正态 QQPlot 分布图的检验结果表明,经对数转换后土壤有机质数据接近正态分布。因此,将原始数据经过对数转换后可以 进行插值分析。

由于受成土因素的影响,流域土壤性质的空间分布常呈明显的趋势特征和异向性分布。图 5 是流域土壤有机质含量的趋势图,从图中看到流域土壤有机质含量呈一定程度的一阶趋势。

3.3 变异函数分析

根据分隔距离 h 和计算出的半方差 $\gamma(h)$,采用指数模型进行拟合,且考虑各向异性和一阶趋势效应,得到流域土壤有机质含量半方差函数模型,其参数见表 2。

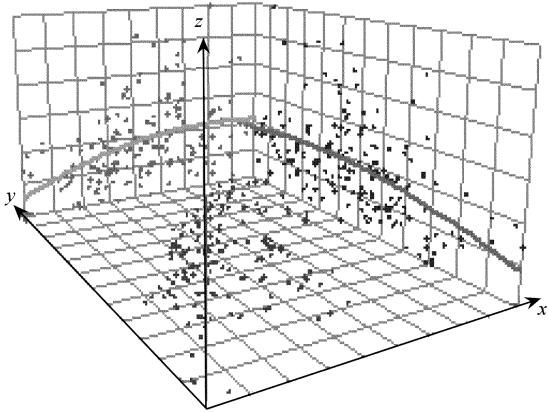


图 5 土壤有机质含量趋势图
Fig. 5 Trend analysis of SOM contents

表 2 半方差函数模型类型及其参数
Table 2 The semi-variogram model of SOM contents its parameters

模型 Model	趋势阶数 Trend effect	变程 Range (km)		块金 C_0 Nugget	基台 $C_0 + C_1$ Sill	Nugget/ Sill (%)
		长轴 Long axle	短轴 Short axle			
指数 Exponential	1-order	39.8	22.0	0.28	0.52	53.4

表 2 中 μ 表示变程(长轴、短轴变程分别表示半方差在该轴方向上达到基台值的样本间距)。 C_0 表示纯块金方差, $C_0 + C_1$ 表示基台值。 $C_0/(C_0 + C_1)$ 可表示空间变异性程度(随机部分引起的空间变异性占系统总变异的比例),如果该比值较高,说明由随机部分引起的空间变异性程度较大;相反,则由空间自相关部分引起的空间变异性程度较大,如果该比值接近 1,则说明该变量在整个尺度上具有恒定的变异。从结构性因素看, $C_0/(C_0 + C_1)$ 的比值可表示系统变量的空间相关性程度,比值小于 25%,说明变量具有强烈的空间相

关性 ,比值在 25% ~75% ,变量具有中等的空间相关性 ;大于 75% ,变量空间相关性很弱^[31]。

流域土壤有机质含量空间变异具有各向异性特征 ,长、短轴变程分别为 39.8 km 和 22.0 km (表 2)。 $C_0/(C_0 + C_1)$ 值表明 ,由空间自相关部分引起的空间变异性程度较大 ,流域土壤有机质含量具有中等的空间相关性。

3.4 Kriging 插值分析

根据取样点实测数据 ,在半方差结构分析和指数模型套合的基础上 ,采用普通 Kriging 插值方法 ,考虑各向异性 ,选取一阶趋势参数 ,得到流域土壤有机质含量的空间分布图 (图 6)。

整体来看 ,流域土壤有机质含量从东部向西和西南方向逐渐降低。将土壤有机质含量分布图与地质、地貌和土地利用图叠加后 ,发现土壤有机质含量的空间变异与地质、地貌以及土地利用的关系密切。东部地区地层为碳酸盐岩 ,海拔较高 ,气候湿润 ,同时土地利用主要为林地 ,因此 ,土壤有机质含量高 ;中部地区地层为第四系 ,海拔最低 ,土地利用主要为旱地和水田 ,土壤有机质含量中等 ;而西部、西南地区地层主要是砂页岩 ,土地利用主要为旱地 ,特别是西南河谷地区主要是未利用地分布 ,因而土壤有机质含量低。

Kriging 插值精度在 Arcgis 软件地统计分析模块中的交叉验证面板可以查看得到 ,交叉验证面板中提供的预测图表、预测误差统计值以及每个样点的实际值与预测值的对照可以查看预测精度 ,其中预测误差统计项的预测误差的均值、预测误差的均方根、平均预测标准差、平均标准差和标准均方根预测误差五项指标综合反映了预测表面的精度。土壤有机质预测模型的交叉验证结果表明 ,预测误差的均值、预测误差的均方根、平均预测标准差、平均标准差都比较小 ,标准均方根预测误差在 0.73 ~0.9996 之间 ,说明预测的精度比较高。因此 ,流域土壤有机质的 Kriging 插值结果是比较可靠的。

4 结语

(1) 统计分析结果表明 ,流域土壤有机质含量总体水平较高 ,平均为 29.0 g/kg ,变异系数为 60.5% ,属强变异 ,这反映了岩溶区土壤有机质含量较高但分布高度不均的特点。

(2) 地统计学与 GIS 相结合是研究土壤性质变异的有力工具。变异函数分析得到土壤有机质的理论模型和相应参数 ,这些参数反映了土壤有机质的变异特征。流域土壤有机质含量空间变异具有各向异性特征 ,由空间自相关部分引起的空间变异性程度较大 ,土壤有机质含量具有中等的空间相关性。

(3) 流域土壤有机质含量由东部向西、西南部逐渐降低 ,土壤有机质含量的空间分布与流域地质、地貌以及土地利用的分布表现出很好的一致性。

References :

[1] Hillel D. Research in soil physics a review. Soil Sci ,1991 , (5) 30 —34.
[2] Warrick A WAnd D R N ielsen. Spatial variability of soil physics. Application of soil physics. New York : Hillel Academic Press ,1980 ,319 —344.
[3] Russo D. A geo-statistical approach to solute transport in heterogeneous fields add its applications to salinity management. Water Resource Res , 1984 ,20 (9) :1260 —1270.

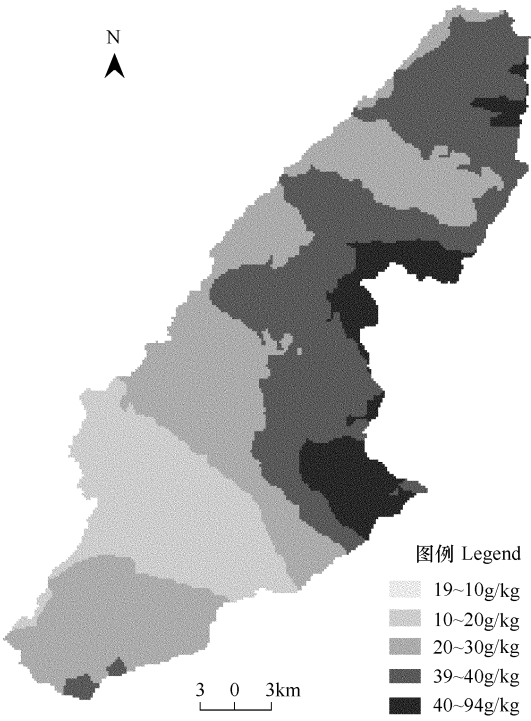


图 6 土壤有机质含量分级图
Fig.6 The group of soil organic matter contents

[4] Burgess T M , Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties I : the semivariogram and punctual kriging. J Soil Scie , 1980 , 31 : 315 — 331.

[5] Burrough P A. Multiscale sources of spatial variability in soil variation. J Soil Sci , 1983 , 34 : 577 — 579.

[6] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. Advance Soil Sci , 1985 , 3 : 1 — 70.

[7] Gupta R K , Mostaghimis , McClellan P W. Spatial variability and sampling strategies for NO₃-N , P , and K determinations for site specific farming. Trans of the ASAE , 1997 , 40 (2) : 337 — 343.

[8] Nanlsen D R. Opportunities for examming on farm soil variability. Site-specific Management for Agricultural Systems. ASA-CSSA-SSSA , Madison. WI. , 1995 , 95 — 132.

[9] Webster R. Advance in soil science. New York : Springer Verlag , Inc , 1985. 32 — 70.

[10] Tabor J A. Spatial variability of Nitrate in irrigated cotton. soil mitrate ancorrelated variables. Soil Sci. Soc , Am J , 1985 , (49) : 390 — 394.

[11] Mishra T K , Banerjee S K. Spatial variability of soil pH and organic matter under Shorea robusta in lateritic region. Indian Journal of Forestry , 1995 , 18 (2) : 144 — 152.

[12] Kuzel S , Nyd V , Kolar L , et al. Spatial variability of cadmium , pH , organicmatter in soil and its dependence on sampling scales. Water Air and Soil Pollution , 1994 , 78 (1-2) : 51 — 59.

[13] Wang X F , Zhang H. The spatial variability of soil organic matter. Soil , 1995 , (2) : 85 — 89.

[14] Yang Y L , T ian C Y , Sheng J D , et al. Spatial variability of soil organic matter , total nitrogen , phosphorus and potassium in cotton field. Agricultural Research in the Arid Areas , 2002 , 20 (3) : 26 — 30.

[15] Zhang S J , He Y , Fang H. Spatial variability of soil properties in the field based on GPS and GIS. Transactions of the CSA E , 2003 , 19 (2) : 39 — 44.

[16] Wang J , Fu B J , Q iu Y , et al. Spatial Heterogeneity of Soil Nutrients in a Small Catchment of the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica , 2002 , 22 (8) : 1173 — 1178.

[17] Gao J , Huang Y F , Li B G , et al. Spatial variability analysis of soil particle compositions and soil profile horizon in field. Plant Nutrition and Fertilizer Science , 2003 , 9 (2) : 151 — 157.

[18] Guo X D , Fu B J , Chen L D , et al. The Spatio-temporal Variability of Soil Nutrients in Zunhua Plain of Hebei Province. Acta Geographica Sinica , 2000 , 55 (5) : 555 — 566.

[19] Wang J , Fu B J , Qiu Y , et al. Spatial distribution patterns of soil nutrients in a small catchment of the Loess Plateau , Geographical Research , 2003 , 22 (3) : 373 — 379.

[20] Zhang S R , Huang Y F , Li B G , et al. The Temporal and Spatial Variability of Soil Organic Matter Contents in the Alluvial Region of Huang Huai Hai Plain , China. Acta Ecologica Sinica , 2002 , 22 (12) : 2041 — 2047.

[21] Huang Y F , Zhou Z Y , Yuan X Y , et al. Spatial variability of soil orgaic matter content in an arid desert area. Acta Ecologica Sinica , 2004 , 24 (12) : 2776 — 2781.

[22] Shu J Y , Zhang S R , Sun B , et al. Dynamic analysis of soil organic matter conten ts in soil and water conservation region of Xingguo County , Jiangxi Province. Acta Ecologica Sinica , 2005 , 25 (6) : 1240 — 1246.

[23] Nanjing Institute of Soil Science , Chinese Academy of Sciences. Soil physical and chemical analysis. Shanghai : Shanghai Science and Technology Press , 1983. 132 — 136.

[24] Fisher E Thornton B , Hudson G , Edwards A C. The variability in total and extractable soil phosphorus under a grazed pasture. Plant and Soil. , 1998 , 203 : 249 — 255.

[25] Burgess T M , Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties II . Block Kriging. J. Soil Sci. , 1980 , (31) : 333 — 341.

[26] Matheron G. Principles of geostatistics. Economic Geology , 1963 , 58 : 1246 — 1266.

[27] Wang Z Q. Geostatistics and its applications in ecology. Beijing : Science Press , 1999. 35 — 96.

[28] Rossi Richard E , Mulla D J , Journel A G , et al. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. Ecological Monographs , 1992 , 62 : 277 — 314.

[29] Yan D X , Liu Z H , Lin Y S , et al. Karstdynamic systems of China. Beijing : Geology Press , 2002. 196 — 200.

[30] Yan D X , Liu Z H , Jiang Z C , et al. The carbon cycle and karst geological environment. Beijing : Science Press , 2003 , 178 — 225.

[31] Jiang Z C. Carbon cycle and ecological effects in epi-karst systems in southern China. Quaternary Sciences , 2000 , 4 : 316 — 324.

[32] Cao J H , Yuan D X , Pan G X. Some soil features in karst ecosystem. Advance in Earth Science , 2003 , 1 : 37 — 44.

[33] Cambardella C A , Moorman T B , Novak J M , et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. Soil Sci. Soc. Am. J. , 1994 , 58 : 1501 — 1511.

参考文献：

[13] 王学锋,张衡. 土壤有机质的空间变异性. 土壤,1995,(2):85~89.

[14] 杨玉玲,田长彦,盛建东,等. 灌淤土壤有机质、全量氮磷钾空间变异性初探. 干旱区农业研究,2002,20(3):26~30.

[15] 张淑娟,何勇,方慧. 基于 GPS 和 GIS 的田间土壤特性空间变异性的研究. 农业工程学报,2003,19(2):39~44.

[16] 王军,傅伯杰,邱扬,等. 黄土高原小流域土壤养分的空间异质性. 生态学报,2002,22(8):1173~1178.

[17] 高峻,黄元仿,李保国. 农田土壤颗粒组成及其剖面分层的空间变异分析. 植物营养与肥料学报,2003,9(2):151~157.

[18] 郭旭东,傅伯杰,陈利顶,等. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征. 地理学报,2000,55(5):555~566.

[19] 王军,傅伯杰,邱扬,等. 黄土高原小流域土壤养分的空间分布格局. 地理研究,2003,22(3):373~379.

[20] 张世熔,黄元仿,李保国,等. 黄淮海冲积平原区土壤有机质时空变异特征. 生态学报,2002,22(12):2041~2047.

[21] 黄元仿,周志宇,苑小勇,等. 干旱荒漠区土壤有机质空间变异特征. 生态学报,2004,24(12):2776~2781.

[22] 舒建英,张世熔,孙波. 江西兴国水土流失治理区土壤有机质动态变化. 生态学报,2005,25(6):1240~1246.

[23] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤物理化学分析. 上海:上海科学技术出版社,1983. 132~136.

[27] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京:科学出版社,1999. 35~96.

[29] 袁道先,刘再华,林玉石,等. 中国岩溶动力系统. 北京:地质出版社,2002. 196~200.

[30] 袁道先,刘再华,蒋忠诚,等. 碳循环与岩溶地质环境. 北京:科学出版社,2003. 178~225.

[31] 蒋忠诚. 中国南方表层岩溶系统的碳循环及其生态效应. 第四纪研究,2000,4:316~324.

[32] 曹建华,袁道先,潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤. 地球科学进展,2003,1:37~44.