

黄土高原小流域土壤养分空间变异特征及预测

连 纲^{1,2}, 郭旭东², 傅伯杰³, 虎陈霞⁴

(1. 浙江大学土地管理系, 杭州 310029; 2. 国土资源部土地利用重点实验室, 北京 100035;

3. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 4. 中国计量学院经济与管理学院, 杭州 310018)

摘要:在黄土高原小流域尺度上, 地形和土地利用是影响土壤属性变异的重要因素。在横山县朱家沟小流域采集 111 个表层土样, 比较不同土地利用及景观位置土壤养分变异及分布特征, 分析土壤养分与地形因素的关系并利用相关环境信息进行空间预测。结果表明, 不同土地利用类型土壤养分存在显著性差异。有机质和全氮含量表现为坝地最高, 灌木地最低, 而全磷含量以梯田最高。在不同景观位置, 沟平地有机质和全氮含量显著高于其他景观位置, 而全磷差异不显著。土壤有机质与复合地形指数 *CTI*、汇流动力 *SPI*、沉积物运移指数 *STI* 显著负相关, 全氮与沉积物运移指数 *STI* 显著负相关, 而全磷只与坡度 β 显著负相关。多元线性逐步回归模型预测土壤有机质和全氮较好, 而全磷预测结果较差; 回归-克里格预测有效地减小了残差, 与实测值较为接近, 预测精度高于回归预测。

关键词:土壤养分; 空间变异; 环境因子; 空间预测; 小流域

文章编号: 1000-0933(2008)03-0946-09 中图分类号: S159 文献标识码: A

Spatial variability and prediction of soil nutrients in a small catchment of the Loess Plateau

LIAN Gang^{1,2}, GUO Xu-Dong², FU Bo-Jie³, HU Chen-Xia⁴

1 Department of Land Management, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China

2 Key Laboratory of Land Use, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China

3 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China

4 College of Economics and Management, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 0946 ~ 0954.

Abstract: The study on the spatial variability of soil properties is vital for sustainable land management. Both topography and land use are pivotal factors which affect the variability of soil properties on the catchment scale in the loess hilly area. This study analyzed the spatial variation of soil nutrients from different land use types and landscape positions, based on the data of 111 surface soil points (0 ~ 20cm) in the Zhujiagou catchment on the Loess Plateau. We measured soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) and used correlation analyses to determine relationships between soil nutrients and terrain attributes. Finally, terrain attributes and land use types were used to predict the spatial distribution of the soil properties by using multiple-linear regression analysis and regression-kriging. The results showed that concentrations of these soil nutrients were very low in the surface soil, and the coefficients of variation for soil properties were moderate. Soil nutrients were significantly different among different land use types. Higher values of SOM and TN were found in check-dam farmland and lower values from shrub land. Significant differences among landscape positions were

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40201004, 40321101)

收稿日期: 2007-05-23; 修订日期: 2008-01-20

作者简介: 连纲(1977 ~), 男, 陕西彬县人, 博士, 主要从事环境保护、景观生态学及土地质量研究。E-mail: lian.gang@163.com

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40201004, 40321101)

Received date: 2007-05-23; **Accepted date:** 2008-01-20

Biography: LIAN Gang, Ph. D. mainly engaged in environment protection, landscape ecology and land quality. E-mail: lian.gang@163.com

observed for SOM and TN, and concentrations of SOM and TN located in the flat valley position were higher than in other positions. There were negative correlations between SOM and compound topographic index (CTI), stream power index (SPI), and sediment transport index (STI). Similarly, TN has negative correlation with sediment transport index (STI), and a significant negative correlation was found between TP and slope (β). To some extent, correlations between these terrain attributes and soil properties reflect patterns of soil development caused by water flow through and over the landscape. From the regression models, we determined that variability of measured soil properties ranged from 13% to 51%. The regression model for TN had the highest R^2 value, followed by SOM and TP. The regression models were relatively precise for the SOM and TN, but variation was large with a high smoothing effect on the predicted values. For TP, the predicted result was very poor. To further explain the variations, we combined step-wise regression with residuals interpolated using kriging. Results showed that regression-kriging can improve the accuracy of prediction.

Key Words: soil nutrients; spatial variation; environment indicators; spatial prediction

土壤属性是土壤质量的重要决定因素,并强烈影响土地利用和生态过程。土壤性质的空间变异性是指在一定的景观内,在同一时间、不同地点的土壤性质存在明显的差异性和多样性^[1]。科学的土壤资源利用和管理是建立在对区域土壤属性空间变异性正确理解基础之上,分析预测土壤属性空间变异及其动态是可持续土地利用的重要组成部分之一^[2]。土壤养分是土地生产力的基础,是植物生长的必要条件,也是衡量土壤质量好坏的重要指标。在黄土高原地区,土壤肥力是提高作物产量的限制因子^[3],研究土壤养分空间变异,特别是对其量化过程的研究,对指导植被恢复及区域生态评价、治理等具有重要意义。

黄土高原地形破碎,加之各种人类活动干扰,土壤属性空间分布受土地利用和地形显著影响^[4]。以往传统的土壤分级制图法及样点数据空间内插等方法,比较适用于较均一的环境,但对于高度异质的景观,传统的方法较难得出理想的空間预测结果^[5]。对于小流域尺度土壤属性空间变异,许多学者已做了大量相关研究工作,奠定了良好的研究基础^[5-8],但仍存在一定的应用局限,诸如实测数据工作量过大,在地形复杂地区土壤属性可能存在不平稳性,直接应用地统计存在一定争议,以及多源数据的无缝衔接等问题。利用土地利用、景观位置和地形等其它相关环境特征信息研究土壤属性空间变异及分布特征对于生态过程预测,理解生态系统运行机制和评估未来土地利用变化对土壤属性的影响至关重要^[9-11]。本文结合 3S 技术,利用数字地形分析技术,提取相关地形因子,分析不同土地利用、景观位置及地形因子等对土壤养分的影响,并利用相关环境因子进行空间预测,以期理解小流域土壤养分空间变异特征提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于陕西省北部横山县朱家沟流域(37°56'~37°59'N,109°21'~109°24'E),面积 11.3km²。区域气候为半干旱大陆性季风气候,年平均温度 8.6℃,年平均降水量 400mm 左右,降水多集中在 7~9 月份,年际变率大。研究区地形破碎,沟壑纵横,区内土壤以黄绵土为主,土质疏松,抗蚀性差,水土流失严重。流域内自然植被破坏殆尽,垦殖指数较高,土地利用以坡耕地、梯田、坝地、草地、林地和灌木林地为主,是一个典型的雨养旱作农业区。主要作物品种有:谷子(*Panicum miliaceum*)、玉米(*Zea mays* L.)、高粱(*Sorghum* spp.)、绿豆(*Phaseolus vulgaris*)、土豆(*Solanum tuberosum*)等。

2 研究方法

2.1 采样与分析

利用 1:10000 地形图生成的高精度 DEM(栅格为 5m×5m)及 QuickBird 影像(全色和多光谱)人工目视解译结合野外调查生成的土地利用图,在 GIS 平台下进行叠加分析,综合考虑采样尺度及样点代表性,根据土地利用、地形等特征,有针对性的预设 140 个样点,并记录各样点坐标,输入 GPS 作为野外采样参照点。精确定位是进行外业取样、数字地形分析及保证数据质量的前提,本研究选用了高精度 GPS (SF-2040G, NavCom),其水平精度为 0.15m。于 2005 年 8 月进行外业采样,依据 GPS 定位尽量与预设样点相一致,并记录实际样点

坐标及详细的样地特征信息。每个样地取 0 ~ 20cm 的表层土壤,设置 3 次重复,所有采样在 3d 内完成。由于受野外实际条件限制,最终外业采样共 111 个土样,样点分布见图 1。将土样风干、过筛后测定有机质、全氮和全磷。分析方法如下,有机质:重铬酸钾容量法;全氮:开氏定量法;全磷:硫酸-高氯酸消煮-ICP 测定^[12]。

2.2 地形属性的获取

利用高精度 DEM(栅格为 5m × 5m),结合样点信息,通过数字地形分析技术,在空间分析模块下获取和计算相关地形属性:

基本属性——高程(h),坡度(β),坡向(α),平面曲率(K_h),剖面曲率(K_p);

复合属性——复合地形指数 CTI (compound topographic index),汇流动力指数 SPI (Stream power index),沉积物运移指数 STI (sediment transport index)。

复合地形指数 CTI (亦称为地形湿度指数),汇流动力指数 SPI (亦称为径流强度指数)和沉积物运移指数 STI 是表征特定景观中水分和沉积物运移的有用的综合地形变量,量化了某一点在景观中的位置,是预测土壤属性非常有用的变量^[13~15]。计算公式为:

$$CTI = \ln\left(\frac{Ac}{\tan\beta}\right)$$

$$SPI = \ln(Ac \times \tan\beta \times 100)$$

$$STI = \left(\frac{Ac}{22.13}\right)^{0.6} \left(\frac{\sin\beta}{0.0896}\right)^{1.3}$$

式中, Ac 垂直于水流方向的特定汇流面积(m^2),可通过 ArcGIS 水文分析模型计算; β 坡度(rad),为了避免分母为 0,对于那些坡度为 0 的栅格赋以极小值 0.0001。

2.3 预测结果的检验

从 111 个样点数据随机抽取 20 个样点作为验证数据集验证其余 91 个样点数据产生的预测模型。通过比较验证数据点位置 j 上土壤属性的实际观测值 z_j 和预测值 $\hat{z}_j$ 评价预测精度,以验证数据集的平均预测误差 (MPE) 和均方根预测误差 ($RMSPE$) 来评价预测准确性^[16], MPE 和 $RMSPE$ 的计算方法如下:

$$MPE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (z_j - \hat{z}_j)$$

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (z_j - \hat{z}_j)^2}$$

式中, n 为验证数据集中采样点的个数。

3 结果与讨论

3.1 描述性统计分析

小流域土壤养分统计分析见表 1,由于受水土流失及特殊的自然地理条件的影响,表层土壤各项养分指标都很低。从变异系数来看,小流域土壤养分空间变异不是很大,有机质、全氮和全磷均属中等变异。经单样本 $K-S$ 检验,三者均符合正态分布。

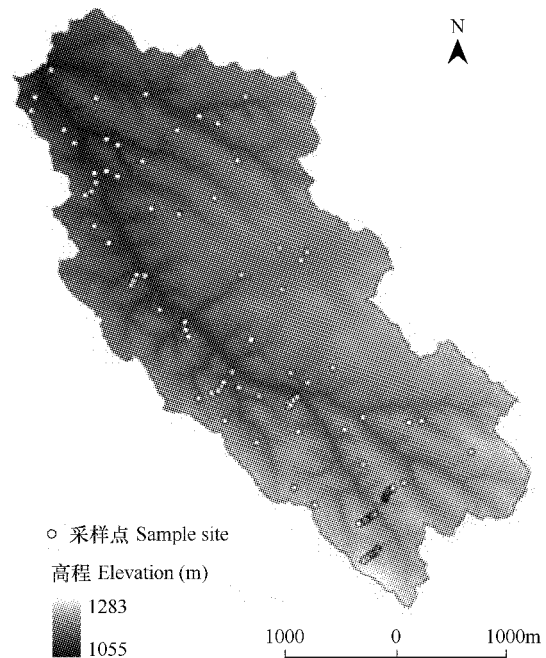


图 1 小流域样点分布

Fig. 1 Distribution pattern of sampling sites

3.2 不同土地利用及景观位置土壤养分变化

3.2.1 不同土地利用类型土壤养分变化

土地利用是环境属性的综合反映,由不同土地利用构成的异质景观影响土壤养分的分布和迁移。土地利用及其管理措施是影响元素分布的重要因素,它的变化可引起许多自然和生态过程的变化^[4,17]。不同土地利用及不同的管理措施等导致土壤性质的变化以及土地生产力的改变^[18],研究土地利用与土壤养分的关系,不同土地利用类型土壤养分变化,可以为合理土地利用提供理论依据。

表 1 土壤养分基本统计学特征

Table 1 Descriptive statistics for soil nutrients

项目 Item	平均值 Mean	中数 Median	最小值 Min	最大值 Max	极差 Range	标准差 SD	变异系数 Cv(%)	K-S
有机质 SOM(g/kg)	4.48	4.63	1.30	9.24	7.94	1.70	38.2	0.66
全氮 TN(g/kg)	0.36	0.36	0.11	0.87	0.76	0.13	37.3	0.49
全磷 TP(g/kg)	0.85	0.78	0.37	1.50	1.13	0.26	30.2	0.31

表 2 不同土地利用类型土壤养分变化

Table 2 Change of soil nutrients in different land use types

土地利用类型 Land use	样本量 Sample size	有机质 SOM (g/kg)	全氮 TN (g/kg)	全磷 TP (g/kg)
坡耕地 Slope farmland	49	4.17bc	0.33c	0.76b
梯田 Terrace	7	4.97abc	0.35bc	1.30a
坝地 Check-dam farmland	4	7.53a	0.81a	0.88ab
林地 Woodland	14	3.77b	0.31c	0.87b
灌木地 Shrubland	7	1.55d	0.13d	0.61b
草地 Grassland	30	4.88c	0.39b	0.87b
F 值		5.23 ***	12.12 ***	3.37 **

LSD 多重比较 ($p < 0.05$), 相同字母表无显著性差异; *, **, *** 分别表示显著性水平在 0.05, 0.01 和 0.001

Values in each row with the same letter are not significantly ($p < 0.05$, LSD) different among land use; *, **, *** Significant at the 0.05, 0.01 and 0.001 level, respectively

从表 2 可见,在 6 种土地利用类型中,有机质、全氮和全磷均存在极显著差异($p < 0.01$)。多重比较表明,除梯田外,坝地有机质含量显著高于其他土地利用类型;而灌木地的有机质含量显著低于其他土地利用类型;草地有机质含量显著高于林地和灌木地。坝地由于特定的地理位置,具有较好的水热条件,作物长势良好,植被覆盖度大,凋落物及最终收获后的田间残留物相对较多,腐殖化作用明显,所以表层土壤有机质含量比较高;此外,坝地地处沟谷地带,接纳了来自高处的物质运移,富集了因水土流失而来自坡面的养分。而灌木地集中分布在流域东北部坡顶位置,受侵蚀影响较大;此外,受沙化影响,灌木地砂粒含量较高,土壤砂性比较强,土壤保肥性能比较差。不同土地利用土壤全氮含量变化趋势基本与有机质相同,土壤有机质含有各种营养元素,对土壤水、气、热等各种肥力因素起着重要的调节作用,有机质影响了养分的保持与供给^[19]。值得注意的是,当地草地有机质和全氮含量显著高于林地和灌木地。分析主要由以下几方面原因,其一是草地长势良好,比较茂密,具有良好的水土涵养功能,减少了侵蚀的影响;再者,与管理措施相关,草地一般受人类干扰较少,定期收割植株的地上部分,保留的根茬不仅可以减少水土流失的影响,还可以一定程度的补充有机物质;此外,全氮含量较高还与物种有关,草地主要以紫花苜蓿和沙打旺为主,而这两种都是豆科植物,具有较强的固氮能力。

不同土地利用类型土壤全磷含量分析表明,除坝地外,梯田全磷含量显著高于其他土地利用类型,而其他土地利用类型之间,全磷含量不存在显著性差异。小流域全磷含量整体水平不高,因而不同土地利用类型之间差异不大;此外,与磷的流失机理有关,土壤中磷的损失主要随径流流失,而梯田具有较好的水土保持能力;

再者,梯田具有相对较好的耕作条件,农户也愿意将相对有限的肥料施用到梯田。

3.2.2 不同景观位置土壤养分变化

景观位置影响径流、土壤侵蚀和土壤水分,进而造成土壤组成的差异^[13,19]。在景观不同位置,因为土地利用和地形的影响,诸如土壤发生、形成、迁移、沉积、风化、分解等物理化学过程都存在很大的差异,造成土壤理化性质空间分异。根据 Brubaker 划分坡面景观位置的方法^[19],结合野外调查的实际情况,划分为坡顶(包括梁、崩顶等)、坡上、坡中、坡下及沟平地(包括坝地)5 种类型来比较其差异。

从不同景观位置土壤养分变化来看(表 3),有机质和全氮存在显著差异,且二者变化规律基本一致,而全磷差异不显著。从养分整体变化趋势来看,在坡上和沟平地位置,养分含量要偏高,其中沟平地有机质和全氮含量显著高于其他景观位置。沟平地养分含量较高是因为其他坡位的元素淋溶后在此汇集,而当地水土流失较为严重。坡上部侵蚀泥沙一般搬运到坡下部,以及水蚀对土壤养分具有富集化作用,因而坡下部土壤养分含量相对较高。相关研究也表明土壤养分含量从坡顶到坡脚逐渐增加^[20,21]。

表 3 不同景观位置土壤养分变化
Table 3 Change of soil nutrients in different landscape positions

景观位置 Landscape position	样本量 Sample size	有机质 SOM (g/kg)	全氮 TN (g/kg)	全磷 TP (g/kg)
坡顶 Crest	23	4.59ab	0.36ab	0.75
坡上 Upper slope	20	4.57ab	0.37ab	0.90
坡中 Middle slope	24	4.72ab	0.38ab	0.81
坡下 Lower slope	32	3.82b	0.31b	0.85
沟平地 Flat	12	5.64a	0.49a	0.88
F 值		1.31 *	1.82 *	2.86

LSD 多重比较 ($p < 0.05$), 相同字母表无显著性差异; *, **, *** 分别表示显著性水平在 0.05, 0.01 和 0.001

Values in each column with the same letter are not significantly ($p < 0.05$, LSD) different among landscape position. *, **, *** Significant at the 0.05, 0.01 and 0.001 level, respectively

不同景观位置间其养分差异并不是很大,可能由于不同景观位置养分间,组内的差异太大,所以组间差异不显著。此外,可能与土地利用有关,土地利用对土壤养分的控制作用模糊了景观位置的作用;再者,由于剧烈的土壤侵蚀,致使其地形极其破碎,不同的微地形分布可能抵消了景观位置对养分的影响。

3.3 土壤养分与地形指数的关系及环境变量空间预测

地形因子与土壤中水分的运输及物质的运移有着紧密的联系^[22],从而会影响土壤中养分的分布情况。地形属性可以刻画反映汇流的特征,因此也可反映土壤属性特征^[13]。从地形分析入手,提取相关地形指数,引入地形复合指数,尝试将格局与过程联系起来,研究定量化地形特征与土壤性质之间的关系。利用所提取的地形指数,与土壤养分进行相关分析。由于坡向是一环形变量,进行了相应的变换^[6,23]。分析结果见表 4,土壤有机质与复合地形指数 CTI、汇流动力指数 SPI 和沉积物运移指数 STI 显著负相关,而这三者是表征特定景观中水分和沉积物运移的综合地形变量,越大表明汇流、侵蚀的潜在影响越为强烈。全氮只与沉积物运移指数 STI 显著负相关,进一步说明了养分受水土流失的影响。而全磷只与坡度 β 显

表 4 土壤养分与地形指数的相关矩阵

Table 4 Correlation matrix of soil nutrients and terrain indices

地形因子 Terrain indices	有机质 SOM	全氮 TN	全磷 TP
H	0.030	-0.096	0.089
β	-0.097	-0.020	-0.166 *
$\cos\alpha$	0.069	0.196	-0.099
$\sin\alpha$	0.041	0.111	0.056
K_v	-0.123	-0.087	0.120
K_h	0.124	0.114	-0.117
CTI	-0.232 *	-0.216	0.063
SPI	-0.311 **	-0.209	0.152
STI	-0.292 **	-0.227 *	0.048

* 表示显著性水平为 0.05; ** 表示显著性水平为 0.01

* Correlation is significant at the 0.05 level; ** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

著负相关,与其他地形因子关系不显著。坡度影响入渗和径流等,坡度越大,导致其入渗率下降,地表和亚表层径流越大^[10],各种因素综合作用影响了土壤属性的重新分布、变化,尤其是土壤全磷,因为磷的流失主要是受径流的影响。地形指数与土壤养分的相关分析从一定程度上反映了土壤的形成、发展与地表和亚表层水分、沉积物运移相关。整体而言,地形指数与土壤属性的相关性较低,远低于预期值。这可能与土地利用有关,表层土壤养分受土地管理活动影响较大。相关研究表明^[24],在较新形成的冲积单元上,地形与土壤属性的关系远比其它景观单元上密切。

以土壤养分为因变量,地形指数为自变量,综合考虑土地利用的影响,将其作为虚拟自变量进行多元线性逐步回归分析,采用最小二次方的方法进行拟合,分析结果如下(各回归方程自变量顺序均按进入模型的顺序排列):

$$\text{SOM} = 7.08 - 2.16SL + 3.87CDL - 0.37SPI + 0.75GL \quad R^2 = 0.35 \quad (p < 0.001)$$

$$\text{TN} = 0.51 + 0.51CDL - 0.17SL - 0.02SPI + 0.06GL \quad R^2 = 0.51 \quad (p < 0.001)$$

$$\text{TP} = 0.83 + 0.47TFL \quad R^2 = 0.13 \quad (p < 0.001)$$

式中,SOM 表示土壤有机质,最终进入模型的变量为灌木地 *SL*、坝地 *CDL*、汇流动力指数 *SPI* 和草地 *GL*, $R^2 = 0.35$ ($p < 0.001$);TN 表示全氮,经多元线性逐步回归最终进入模型的自变量为坝地 *CDL*、灌木地 *SL*、汇流动力指数 *SPI* 和草地 *GL*, $R^2 = 0.51$ ($p < 0.001$);TP 表示全磷,最终进入模型的自变量只有梯田 *TFL*, $R^2 = 0.13$ ($p < 0.001$)。从各变量进入顺序及对变异解释的贡献来看,土地利用是影响土壤养分变异的主导因子。对于土壤有机质,土地利用和地形因子分别解释了 24.9% 和 9.7% 的变异;对于全氮,土地利用解释了 45.6% 的变异,地形因子解释了 5.6% 的变异。

对于回归分析, R^2 虽然不是很高,但本研究认为可以接受。如果使用高分辨率、大比例尺的数字地形模型和更为详尽的环境变量,可能会解释更多的残差。然而,由于土壤属性本身的高度变异性和黄土高原特殊的自然地理环境条件,预期很好的回归结果可能不太现实。应用验证数据集数据对所测土壤属性预测偏差及预测准确性进行检验(图 2,表 5),回归预测对于有机质和全氮较为理想,但对于全磷,预测结果很差,预测数值只在两个值之间变动。然而就预测相对较好的有机质和全氮来说,预测准确性和预测精度也不是很好,预测模型平滑效应较强,预测数据有一个趋中趋势,预测效果不甚理想,须对残差再进行预测以降低预测残差,提高预测精度。

为了进一步提高预测精度,对所测各土壤属性的回归残差分别进行了克里格插值,最终的回归-克里格预

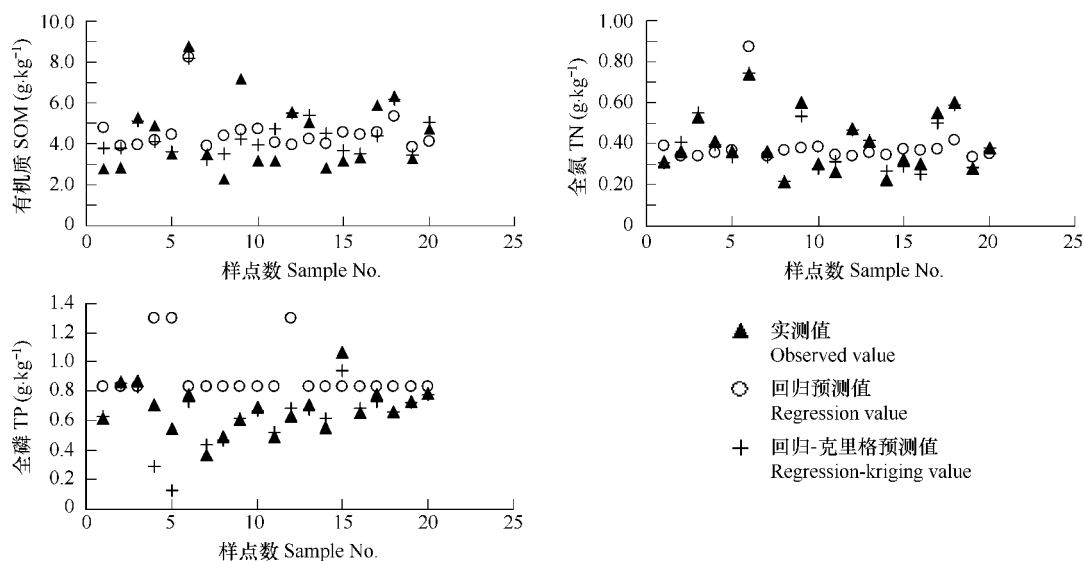


图2 实测值与预测值比较

Fig. 2 Comparison of observed and predicted value of soil nutrients

测结果如图 3 所示。对于有机质,预测值变化范围在 1.25 ~ 12.94g/kg 之间,与多元线性回归方法所得到的预测结果相比(1.51 ~ 11.58g/kg),极差更宽。从有机质空间分布图也可以直观看出,回归-克里格预测更好的反映了局部分布特征及其与土地利用的关系,沿沟谷地带分布的坝地、平地,以及草地其有机质含量明显较高;对于全氮,回归-克里格预测值在 0.04 ~ 1.45g/kg 之间,极差变大,沟谷地带含量明显高于其他地区;对于全磷,回归预测结果不甚理想,预测只有两个数值(0.83g/kg 和 1.30g/kg),基本上未能体现其空间变异。而回归-克里格预测,其预测值在 0.13 ~ 1.76g/kg 之间,反映了与土地利用的关系,也反映了其空间变异。

应用验证数据集数据对回归-克里格预测的土壤属性的预测偏差及预测准确性进行检验(表 5),结果表明:与多元线性回归预测对比,回归-克里格预测平均预测误差(*MPE*)和均方根预测误差(*RMSPE*)均有所减小;预测准确性均有较大幅度的提高。从实测值和预测值所做的散点图(图 2)也可直观看出,回归-克里格预测较为理想,消除了平滑效应,与实测值较为接近,预测精度远远高于回归预测。

表 5 预测结果准确性分析
Table 5 Test of prediction accuracy

土壤属性 Soil property	多元线性回归预测 Multiple-linear regression		回归-克里格预测 Regression-Kriging	
	平均预测误差 <i>MPE</i>	均方根预测误差 <i>RMSPE</i>	平均预测误差 <i>MPE</i>	均方根预测误差 <i>RMSPE</i>
有机质 SOM	0.32	1.53	-0.02	0.96
全氮 TN	-0.04	0.21	-0.01	0.10
全磷 TP	-0.05	0.32	0.01	0.08

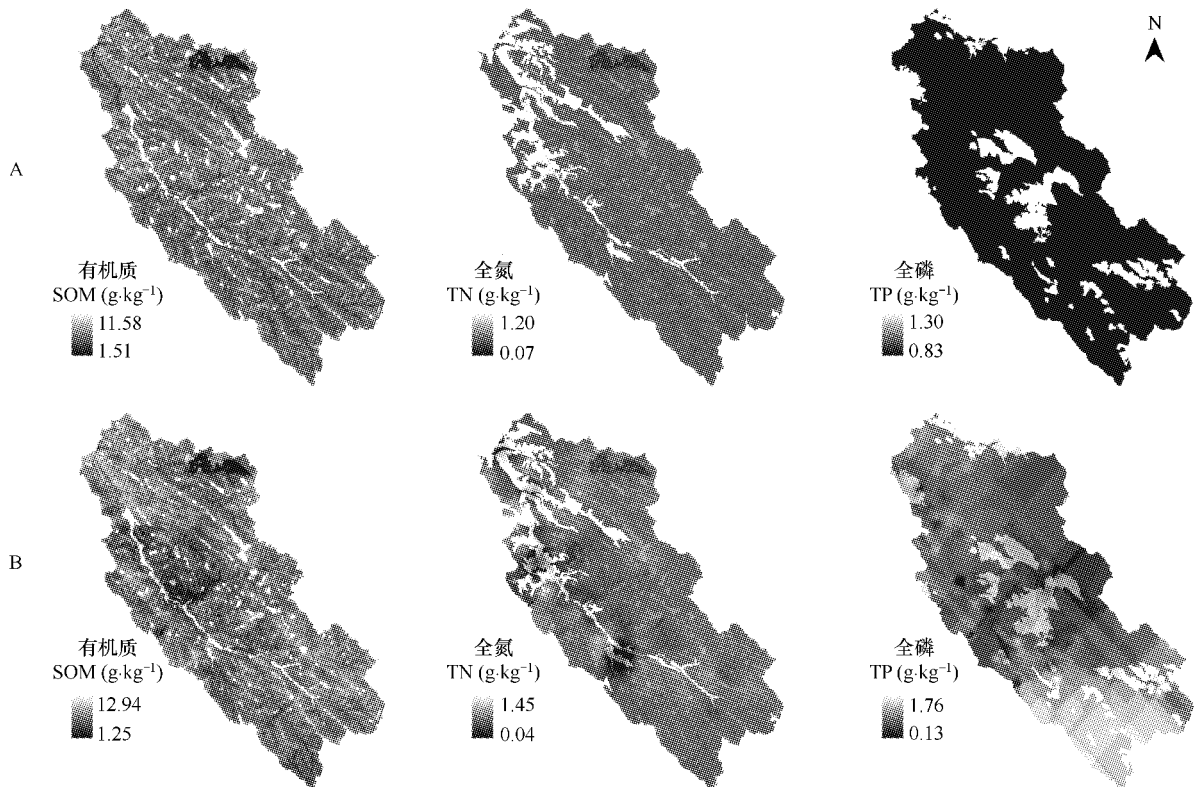


图 3 不同方法预测的土壤属性空间分布

Fig. 3 Spatial distribution map of soil properties obtained by different methods

A 多元线性回归方法预测 Multiple-linear regression; B 回归-克里格方法预测 Regression-Kriging

4 结论

(1)小流域土壤表层养分含量均很低,从变异系数来看,土壤养分空间变异不大,为中等变异。不同土地利用类型,土壤养分均存在显著性差异。多重比较表明,坝地有机质含量最高,而灌木地有机质含量最低;草地有机质含量要显著高于林地和灌木地;土壤全氮表现出了与土壤有机质相一致的规律;梯田全磷含量显著高于坝地外其他土地利用类型。在不同景观位置,沟平地有机质和全氮含量显著高于其他景观位置,而全磷含量差异不显著。

(2)土壤养分与地形指数之间存在一定的相关关系,土壤有机质与复合地形指数 *CTI*、汇流动力 *SPI*、沉积物运移指数 *STI* 显著负相关,全氮与沉积物运移指数 *STI* 显著负相关,而全磷只与坡度 β 显著负相关。

(3)土壤有机质和全氮用多元线性逐步回归分析预测较好,而对于全磷,预测结果不甚理想。回归-克里格预测有效地解决了这一问题,减小了残差,消除了平滑效应,与实测值较为接近,预测精度高于回归预测。利用回归残差克里格插值,既解决了回归残差较大的问题,又避免了高度异质景观地统计插值应用的局限性,可为黄土高原丘陵沟壑区土壤属性要素由点到面的空间扩展提供有益的借鉴。

References:

- [1] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, *et al.* Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Science Society of American Journal*, 1994, 58: 1501 — 1511.
- [2] Florinsky I V, Eilers R G, Manning G R, *et al.* Prediction of soil properties by digital terrain modeling. *Environmental Modelling & Software*, 2002, 17: 295 — 311.
- [3] Yang K B, Li J L, Guo P C, *et al.* Law of soil moisture change in terrace land section in loess hilly region. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, 5(2): 64 — 69.
- [4] Fu B J, Chen L D, Ma K M. The effect of land use change on the regional environment in the YangJianGou catchment in the Loess Plateau of China. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54 (3): 241 — 246.
- [5] Qiu Y, Fu B J, Wang J, *et al.* Spatial prediction of soil moisture content using multiple-linear regressions in a gully catchment of the Loess Plateau, China. *Geographical Research*, 2001, 20(6): 739 — 751.
- [6] Qiu Y, Fu B J, Wang J, *et al.* Variability of the soil physical properties on the loess plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(5): 587 — 592.
- [7] Wang J, Fu B J, Qiu Y, *et al.* Spatial Heterogeneity of Soil Nutrients in a Small Catchment of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(8): 1173 — 1178.
- [8] Jia Y P, Su Z Z, Duan J N. Spatial Variability of Soil Organic Carbon at Small Watershed in Gully Region of Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(1): 31 — 34.
- [9] Schimel D S, Kittel T G F, Knapp A K, *et al.* Physiological interactions along resource gradients in tallgrass prairie. *Ecology*, 1991, 72: 672 — 684.
- [10] Townsend A R, Vitousek P M, Trumbore S E. Soil organic matter dynamics along gradients in temperature and land use on the island of Hawaii. *Ecology*, 1995, 76: 721 — 733.
- [11] Kosmas C, Gerontidis S, Marathanou M. The effect of land use change on soils and vegetation over various lithological formations on Lesbos (Greece). *Catena*, 2000, 40: 51 — 68.
- [12] Editorial Committee. Soil physical and chemical analysis and description of soil profiles. Beijing: Standard Press of China, 1996.
- [13] Moore I D, Gessler P E, Nieslen G A, *et al.* Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of American Journal*, 1993, 57: 443 — 452.
- [14] Gessler P E, Moore I D, McKenzie N J, *et al.* Soil-landscape modeling and spatial prediction of soil attributes. *Int. J. Geographical Information Systems*, 1995, 4: 421 — 432.
- [15] McKenzie N J, Ryan P J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma*, 1999, 89: 67 — 94.
- [16] Hengl T, Gerard B M, Heuvelink, *et al.* A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma*, 2004, 120: 75 — 93.
- [17] Fu B J, Chen L D, Ma K M, *et al.* The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the Loess Plateau in northern Shaanxi, China. *Catena*, 2000, 39: 69 — 78.
- [18] Islam K R, Weil R R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2000,

79:9—16.

- [19] Brubaker S C, Jone A J, Lewis D T, *et al.* Soil properties associated with landscape position. *Soil Science Society of American Journal*, 1993, 57: 235—239.
- [20] Pierson F B, Mulla D J. Aggregate stability in the Palouse region of Washington: effect of landscape position. *Soil Science Society of American Journal*, 1990, 54: 1407—1412.
- [21] Zheng J Y, Wu R J, Zhai L N. Distribution of soil fertility in Zhifang gully watershed of the loess hilly region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1996, 16(4): 26—30.
- [22] Florinsky I V, McMahon S, Burton D L. Topographic control of soil microbial activity: a case study of denitrifiers. *Geoderma*. 2004, 119: 33—53.
- [23] Edward Batschelet. *Circular statistics in biology*. New York: Academic Press, 1981.
- [24] McKenzie N J, Austin M P. A quantitative Australian approach to medium and small scale surveys based on soil stratigraphy and environmental correlation. *Geoderma*, 1993, 57: 329—355.

参考文献:

- [3] 杨开宝, 李景林, 郭培才, 等. 黄土丘陵区第 I 副区梯田断面水分变化规律. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 5(2): 64~69.
- [4] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明. 黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响. *地理学报*, 1999, 54(3): 241~246.
- [5] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分空间预测的统计模型. *地理研究*, 2001, 20(6): 739~751.
- [6] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土壤物理性质的空间变异. *地理学报*, 2002, 57(5): 587~594.
- [7] 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.
- [8] 贾宇平, 苏志珠, 段建南. 黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳空间变异. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 31~34.
- [12] 编辑委员会. *中国生态系统研究网络观测与分析标准方法*. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [21] 郑剑英, 吴瑞俊, 翟连宁. 黄土丘陵沟壑区小流域土壤养分的分布特征. *水土保持通报*, 1996, 16(4): 26~30.