

# 基于环境相关法和地统计学的土壤属性空间分布预测

连 纲<sup>1,2</sup>, 郭旭东<sup>2</sup>, 傅伯杰<sup>3</sup>, 虎陈霞<sup>4</sup>

(1. 浙江省环境监测中心, 杭州 310012; 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:** 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。正确理解并充分考虑土壤空间变异, 对于在景观尺度上建立生态、环境过程模型是必不可少的。在黄土高原横山县采集了 254 个样点, 应用数字地形与遥感影像分析技术, 获取相关地形因子与遥感指数, 分析土壤属性(土壤容重、有机质和全磷)与环境因子相互关系, 并利用环境变量进行空间预测。结果表明, 土壤容重、有机质与地形因子和遥感指数之间存在较好相关性, 而全磷与地形因子相关性不大; 多元线性逐步回归模型对于土壤容重和有机质拟合较好, 而对于全磷, 预测结果较差; 回归—克里格预测有效地减小了残差, 消除了平滑效应, 与实测值较为接近。

**关键词:** 土壤属性, 环境因子, 空间预测, 黄土高原

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.07.043

中图分类号: S159

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-7-0237-06

连 纲, 郭旭东, 傅伯杰, 等. 基于环境相关法和地统计学的土壤属性空间分布预测[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 237—242.

Lian Gang, Guo Xudong, Fu Bojie, et al. Prediction of the spatial distribution of soil properties based on environmental correlation and geostatistics[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 237—242. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

研究土壤属性空间变异及其分布特征和环境因子的关系, 对于了解生态系统的过程具有重要意义。土壤空间异质性存在于多尺度且不同尺度上的主要影响因子有显著差异。当中小尺度上气候差异不显著时, 景观因子和土地利用等对于土壤属性空间变异的作用更为明显<sup>[1]</sup>。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正确理解的基础之上的, 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一个重要组成部分<sup>[2]</sup>, 也是目前地学研究一大热点与亟待解决的关键问题。

传统统计方法在土壤空间变异研究方面取得了很大的成功, 但其只能概括土壤属性变化的全貌, 而不能反映其局部变化特征。随着对土壤属性空间变异研究的不断深入, 土壤科学工作者发现土壤的许多参数并非是独立的, 不属于纯随机变量, 而是在一定范围内存在空间上的相关性<sup>[3]</sup>。传统的统计方法已不能对土壤属性空间变异做出充分的解释, 这就需要寻找新的方法来对土壤属性空间变异做出更加科学的解释。

地统计学是以区域化变量理论为基础, 以半方差函数为基本工具的一种数学方法, 被大量用于预测土壤理化性质的空间分布<sup>[4-5]</sup>, 并取得了相当大的成功。但也不可否认, 在很多情况下, 其预测结果的准确性还有待进一步提高, 尤其在地形较为破碎的地区。地统计学的应

用基础首先要符合内蕴假设, 而土壤性质的空间变异性是否符合内蕴假设尚不清楚<sup>[6]</sup>; 此外, 半方差函数的拟合曲线选择受主观因素影响较大, 同时取样数目直接影响变异程度的高低, 如何合理确定采样点间距尚待进一步解决<sup>[7-8]</sup>。

许多研究表明, 量化的环境因子与土壤属性之间存在很好的相关性, 可用以预测土壤属性<sup>[9-11]</sup>。随着 3S 技术的发展, 环境相关法 (environmental correlation) 日益受到重视, 越来越多的研究倾向于利用更为详尽的辅助变量来指导土壤制图和相关属性空间分布研究。近年来, 结合克里格方法和辅助数据进行土壤属性空间分布预测的混合插值 (hybrid interpolation) 技术得到了快速发展, 结合回归分析和普通克里格进行预测的回归—克里格方法 (regression-Kriging) 就是其中最有效的方法之一<sup>[12-13]</sup>。

对于黄土高原不同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<sup>[14-16]</sup>, 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, 多源数据的无缝衔接等问题。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<sup>[11]</sup>。黄土高原地形破碎, 加之各种人类活动干扰, 土壤属性空间变异程度大, 其空间分布受土地利用和地形显著影响<sup>[17]</sup>。本文结合 3S 技术, 利用数字地形和遥感影像分析技术, 提取相关地形因子与遥感指数, 分析土壤属性与环境因子之间的关系, 并利用土地利用、地形等相关环境变量进行土壤属性空间分布预测, 以期为该區生态系

收稿日期: 2007-08-30 修订日期: 2008-11-11

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

作者简介: 连 纲 (1977—), 男, 陕西彬县人, 博士, 高级工程师, 主要从事环境科学、景观生态学及土地质量研究。杭州 浙江省环境监测中心, 310012。Email: lian.gang@163.com

统恢复与有效治理提供理论依据。

## 1 研究区概况

横山县位于陕西省北部(北纬 37°22′~38°14′, 东经 108°56′~110°02′), 无定河中游, 属黄河中上游黄土高原丘陵沟壑区。总面积 4 332.7 km<sup>2</sup>, 海拔 887~1 560 m, 地势大致呈西南高而东北低, 地形起伏较大, 北部地区相对较为平坦, 由于临近毛乌素沙漠南缘, 这一地区受沙化影响较大。区域气候为半干旱大陆性季风气候, 年平均降水量 400 mm 左右, 降水多集中在 7~9 月, 年际变率大。研究区地形破碎, 沟壑纵横, 土壤以黄绵土为主, 土质疏松, 抗蚀性差, 水土流失严重。土地利用以坡耕地、梯田、坝地、川水地、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 may* 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

利用横山县 1:5 万地形图所生成的 DEM (栅格为 30 m×30 m) 及 2004 年 SPOT2.5 卫星遥感影像目视解译所生成的县域土地利用图, 在 GIS 平台下根据土地利用、地形、地貌及行政单元划分等特征, 在县域有针对性的预设 300 个样点, 记录各样点坐标, 输入 GPS (SF-2040G, NavCom; 水平精度 0.15 m) 作为野外采样参照点。于 2004 年 8 月进行外业采样, 依据 GPS 定位尽量与内业预设样点相一致, 并记录实际采样点坐标及详细的样地特征信息。每个样地取 0~20 cm 的表层土壤, 设置 3 次重复, 所有采样在 7 d 内完成。由于受野外实际条件限制, 最终外业采样共 254 个样点, 样点分布见图 1。将土样风干、过筛后分析相关土壤属性, 具体分析如下, 容重: 环刀法; 有机质: 重铬酸钾容量法; 全磷: 硫酸—高氯酸消煮—ICP 测定。

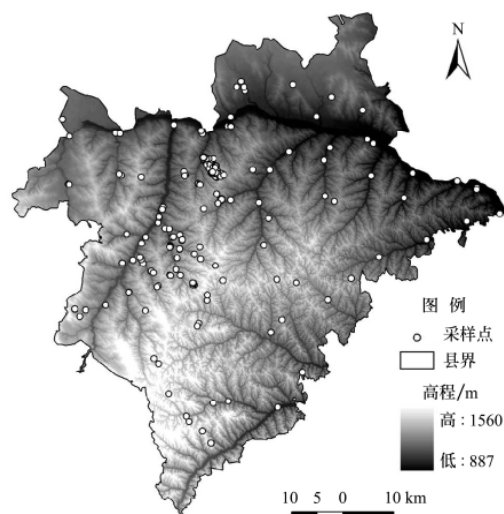


图 1 横山县 DEM 及样点分布格局

Fig.1 DEM and distribution pattern of sampling sites in Hengshan county

### 2.2 地形属性的提取

利用县域 1:5 万地形图所生成的 DEM (栅格为 30 m×30 m), 结合样点信息, 通过数字地形分析技术获取相关地形属性。提取的地形指数主要有:

基本属性——高程 ( $H$ ), 坡度 ( $\beta$ ), 坡向 ( $\alpha$ );

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)。

各地形指数的获取及其物理意义, 可参见文献 [18-19]。

### 2.3 遥感指数的提取

为了获取更多环境变量来辅助预测, 进一步提高预测的精度, 利用同期 ETM+ 卫星遥感影像不同波段数据, 进行了相关遥感指数的提取。

植被指数 (VI) 法是从遥感影像获取大范围植被信息常用的经济且有效的办法。为了减少土壤背景的影响和使植被信息/土壤噪音比更大, 本文选用了修正后的土壤调节植被指数 ( $MSAVI$ ) [20]。相关研究表明 [21], 其不仅能增强植被信号, 并能大大减小土壤背景的影响, 同时又能宏观地反映该地区植被类型的分布状况, 是黄土高原地区目前提取植被信息较好的植被指数。计算如下

$$MSAVI = (2TM_4 + 1 - \sqrt{(2TM_4 + 1)^2 - 8(TM_4 - TM_3)}) / 2 \quad (1)$$

缨帽变换 (Tasseled Cap) 是由 R.J.Kauth 和 G.S.Thomas 两位学者提出的一种经验性的多波段图像线性正交变换, 也称 K-T 变换。在多维光谱空间中, 通过线性变换、多维空间的旋转, 将植物、土壤信息投影到多维空间的一个平面上。它抓住了地面景物, 特别是植被和土壤在多光谱空间中的特征, 同时实现了空间数据的压缩。经 K-T 变换得到的第三分量为湿度, 该分量反映了可见光与近红外波段 1~4 与波长较长的红外 5、7 波段的差值, 而 5、7 两波段对土壤湿度和植被湿度最为敏感, 易于反映出湿度特征 [22-23]。采取经过缨帽变化得到的湿度特征 ( $WI$ ) 作为相关评价的一个指标因子, 其计算如下:

$$WI = 0.1446TM_1 + 0.1761TM_2 + 0.3322TM_3 + 0.3396TM_4 - 0.6210TM_5 - 0.4186TM_7 \quad (2)$$

### 2.4 数据分析及验证

从 254 个样点数据随机抽取 50 个样点作为验证数据集验证其余 204 个样点数据产生的回归预测模型。通过比较验证数据点位置  $j$  上土壤属性的实际观测值  $z_j$  和估计值  $\hat{z}_j$  可以评价预测精度, 通常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 [12,19]。

## 3 结果与分析

### 3.1 描述性统计分析

表 1 是县域土壤属性描述性统计分析, 从变异系数而言, 各属性空间变异不大, 土壤容重为弱变异, 其他二者为中等变异。经单样本  $K-S$  检验, 三者均符合正态

分布。

表 1 土壤属性基本统计学特征  
Table 1 Basic descriptive statistics of soil properties

	平均值	中数	最小值	最大值	极差	标准差	变异系数/%	K-S
容重/g·cm <sup>-3</sup>	1.29	1.28	0.99	1.72	0.73	0.12	9.5	0.90
有机质/%	0.61	0.54	0.10	2.44	2.35	0.36	59.2	0.52
全磷/mg·kg <sup>-1</sup>	847.78	782.83	222.52	1 594.00	1 371.48	290.44	34.3	0.24

3.2 土壤属性与环境变量的关系

地形属性可以刻画、表征汇流特征，也可反映土壤属性<sup>[18]</sup>。地形是成土过程中的一个重要因素，定量化的地形信息常被用于土壤学研究，包括土壤属性建模及预测<sup>[2,18]</sup>。尤其在黄土高原地区，地形是影响土壤性质的主要因素之一，因为其控制了水分和沉积物的运移。由于坡向是一环形变量，分别对其求正弦、余弦值进行变换，生成新的两个亚变量<sup>[15,24]</sup>，进行相关分析，正弦值表示朝东的程度，余弦值表示朝北的程度。利用所提取的地形因子和遥感指数，与所测土壤属性进行相关分析，分析结果见表 2。

表 2 土壤属性与环境因子的相关矩阵

地形因子	土壤属性		
	容重	有机质	全磷
海拔 <i>H</i>	-0.256**	-0.314**	0
坡度 $\beta$	-0.126*	-0.112	0.080
cosa	-0.023	0.160*	-0.028
sina	0.181**	-0.026	-0.115
复合地形指数 <i>CTI</i>	0.045	0.150*	-0.018
汇流动力指数 <i>SPI</i>	-0.029	-0.053	0.041
沉积物运移指数 <i>STI</i>	-0.044	0.043	0.099
土壤调节植被指数 <i>MSAVI</i>	-0.136*	0.413**	0.193**
湿度指数 <i>WI</i>	-0.106	0.494**	0.206**

注： $\alpha$  为坡向；\*表示显著性水平为 0.05；\*\*表示显著性水平为 0.01。

土壤容重与海拔 *H*、坡度  $\beta$  和土壤调节植被指数 *MSAVI* 负相关，与坡向的正弦值 *sina* 正相关。土壤容重与海拔、坡度和坡向的关系，与小流域尺度上的研究结果截然相反<sup>[15,19]</sup>。究其原因，可能是由于尺度发生了变化，导致影响因子作用不同，相关研究也说明了这一点<sup>[1]</sup>；此外可能与土地利用及当地特定的环境条件（沙漠化影响）有关，多种因素交互作用，掩盖了海拔等地形因子的作用。土壤调节植被指数 *MSAVI* 反映了地表植被情况，其值越高，说明植被生长越好，而良好的地表覆被能有效的减少侵蚀的影响，防止细小土粒的流失和土壤板结，因此影响土壤容重。

土壤有机质与高程 *H* 负相关。一般而言，随着海拔的升高，风力加大，太阳辐射增强，水热条件导致有机质分解较快。土壤有机质与坡向的余弦值 *cosa* 正相关，而余弦值表示朝北的程度，不同的坡向所接受的太阳辐射不同，因而水热条件不同，影响植被生长状况，最终影响有机质含量。土壤有机质含量水平通常随热量条件的增加而降低，随湿润度的增加而增高<sup>[25]</sup>。一般说来，

阳坡干燥，土壤有机质分解较快，N、P 等养分含量低；而阴坡和半阴坡土壤养分比较高<sup>[26]</sup>；土壤有机质含量与复合地形指数 *CTI* 正相关，由于复合地形指数与地表汇流和坡度有关，分析结果间接的反映了土壤有机质与地表汇流和坡度的关系。此外，土壤有机质和修正后的土壤调节植被指数 *MSAVI*，以及湿度指数 *WI* 正相关，达到了极显著水平，反映了有机质含量与植被盖度及土壤湿度之间的密切关系。而土壤全磷与地形因子相关性不大，只与修正后的土壤调节植被指数 *MSAVI* 及湿度指数 *WI* 正相关。

地形指数与土壤属性的关系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。这可能与土地利用有关，表层土壤属性变化主要受土地管理活动的影响。相关研究表明，在较新形成的冲积单元上，地形与土壤属性的关系远比其他景观单元上密切<sup>[9]</sup>。土壤属性与所提取的遥感指数之间存在较好的相关性，从一定程度上说明从遥感影像提取相关指数进行分析研究是可行的。

3.3 土壤属性环境变量空间预测及验证

采用多元线性逐步回归方法，利用土地利用、地形因子和遥感指数来预测土壤属性空间分布。将定性变量作为虚拟变量（Dummy variables）引入回归方程，采用最小二次方的方法进行拟合，回归分析结果如下

$$BD=1.751-0.096SFL-0.322MSAVI-0.079TF-0.00027H-0.05CHD+0.031sina+0.139SL+0.091RD$$
$$R^2=0.40 \quad (p<0.05) \tag{3}$$

$$SOM=1.256+0.0189WI-0.00076H-0.188WL+0.172TF+0.449MSAVI$$
$$R^2=0.346 \quad (p<0.05) \tag{4}$$

$$TP=536.268+267.852TF+742.539MSAVI+133.455SFL-51.560sina$$
$$R^2=0.152 \quad (p<0.05) \tag{5}$$

其中*BD*表示土壤容重，最终进入模型的自变量为坡耕地*SFL*、土壤调节植被指数*MSAVI*、梯田*TF*、海拔*H*、川地*CHD*、坡向的正弦值*sina*、灌木地*SL*和水田*RD*，其残差平方和为2.61，回归模型对总方差的解释为40%。*SOM*表示土壤有机质，最终进入模型的自变量有湿度指数*WI*、高程*H*、林地*WL*、梯田*TF*和修正后的土壤调节植被指数*MSAVI*，其残差平方和为21.53，回归模型对总方差的解释为34.6%；*TP*表示全磷，最终进入模型的自变量有梯田*TF*、修正后的土壤调节植被指数*MSAVI*、坡耕地*SFL*和坡向的正弦值*sina*，残差平方和为18090885，回归模型对总方差的解释为15%。

整体而言，对于回归分析，*R*<sup>2</sup>均不是很高，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,如综合考虑土壤类型、气温等因素,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,在较大尺度上预期很好的回归结果也是不太现实的。此外,通过相关及回归分析发现,提取的遥感指数与土壤属性存在较好的关系。虽然遥感在这方面的应用存在较多的局限性,但在一定程度上,尤其在较大的区域尺度上,将其作为辅助变量,不失为一种相对快速、准确、经济的调查、评价手段。

应用验证数据集数据对所测土壤属性预测准确性进行检验(表 3,图 2),从预测误差及散点图可以看出,回归预测对于土壤容重和有机质较为理想,但对于全磷,预测结果较差,预测值远离实测值,且平滑效应强烈。

表 3 预测结果准确性分析  
Table 3 Test of prediction accuracy

土壤属性	多元线性回归预测		回归-克里格预测	
	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>
容重	-0.024	0.130	0	0.085
有机质	0.011	0.305	-0.001	0.139
全磷	44.126	287.477	-12.688	234.873

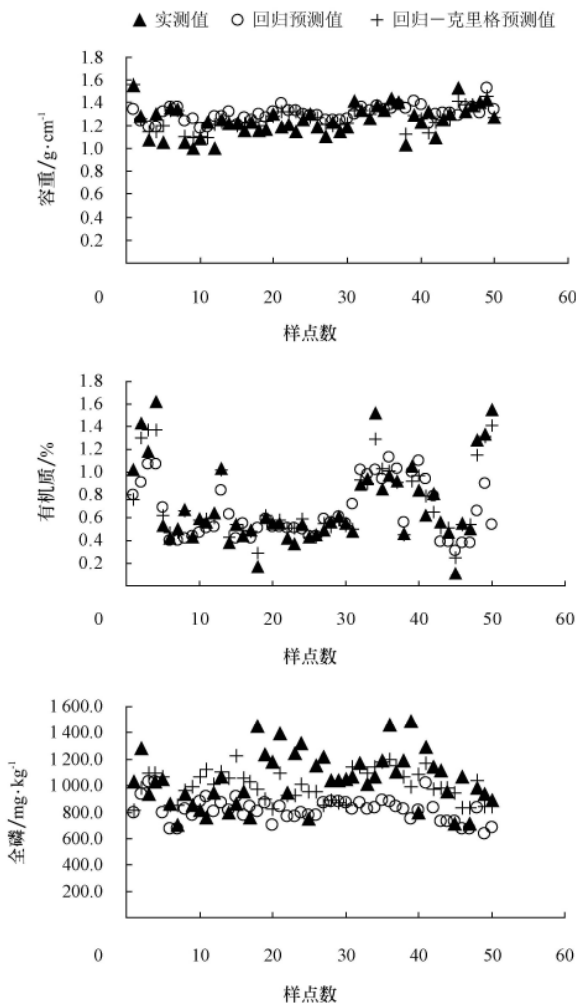


图 2 实测值与预测值比较

Fig.2 Comparison of observed and predicted values of soil properties

为进一步提高预测精度,将环境变量的线性组合作为外部漂移趋势项来分离残差,再对所测各土壤属性回归残差分别进行克里格插值,进行土壤属性空间分布预测。最终的回归-克里格预测结果如图 3 所示。回归-克里格预测有效地减小了残差,消除了平滑效应,增大了预测值的极差,对于局部的变异及其与地形和土地利用的关系体现更为细化,从空间分布来看,更为接近现实情况。从预测准确性分析来看(表 3),回归-克里格预测优于多元线性回归预测,平均预测误差(*MPE*)和均方根预测误差(*RMSPE*)均有所减小;从图 2 也可直观的看出,回归-克里格预测较为理想,其预测值与实测值较为接近,预测精度远高于回归预测。利用多元回归方法,将环境变量的线性组合作为外部漂移趋势项来分离残差、消除不平稳性,进而再对残差进行克里格插值,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,期可作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的有效手段之一。

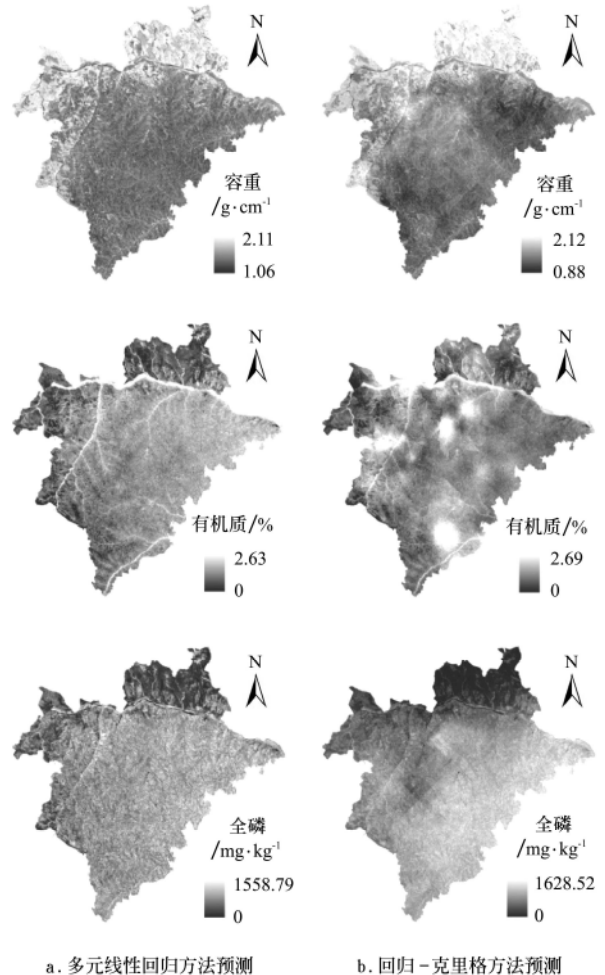


图 3 不同方法预测的土壤属性空间分布

Fig.3 Spatial distribution of soil properties with different methods

## 4 结 论

1) 所测土壤属性与地形因子之间存在较好的相关性,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; 修正后的土壤调节植被指数  $MSAVI$  及湿度指数  $WI$  与土壤属性存间在较好的关系。

2) 多元线性逐步回归方法预测土壤容重和有机质含量相对较好, 但对于全磷的预测结果不甚理想, 预测值远离实测值, 且平滑效应强烈。而回归—克里格预测有效的解决了这一问题, 减小了残差, 消除了平滑效应, 与实测值较为接近, 预测精度远高于回归预测。

本研究利用数字地形和遥感影像分析技术获取相关环境因子指数, 研究定量化环境变量与土壤属性之间的关系, 为黄土高原土壤属性空间变异与预测提供了方法上的一种尝试。然而环境相关法由于自身的特点, 其应用也存在一定的局限性。首先, 定量化环境信息的获取存在一定的争议。对于小尺度的研究, 可以采用实地测量的方法获取相关环境信息, 但在拓展到空间过程中, 如何实现空间数据的无缝衔接则是一大关键性问题; 而对于较大尺度研究, 实地测量方法不尽现实, 其需要消耗大量的人力、物力和时间, 且随机误差不易控制消除。结合 3S 技术, 获取相关环境信息成为必然, 而空间数据的不确定性成为不可回避的问题。其次, 环境相关法中无论是获取可以反映地形、气候和水文过程的环境变量, 还是最终空间拓展, 都需要广泛应用 DEM, 而 DEM 的精度及栅格大小的确定都将影响最终的分析结果。此外, 如何解决多元数据、空间数据集成的不确定性也是一大难题。所有这些, 都是今后需要进一步考虑和深入研究解决的问题。

#### [参 考 文 献]

- [1] 刘世梁, 郭旭东, 连纲, 等. 黄土高原土壤养分空间变异的多尺度分析: 以横山县为例[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 105—108.  
Liu Shiliang, Guo Xvdong, Lian Gang, et al. Multi-scale analysis of spatial variation of soil characteristics in Loess Plateau: Case study of Hengshan County[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(5): 105—108. (in Chinese with English abstract)
- [2] Florinsky I V, Eilers R G, Manning G R, et al. Prediction of soil properties by digital terrain modeling[J]. Environmental Modelling & Software, 2002, 17: 295—311.
- [3] Burrough P A. Soil variability: a late 20th century view[J]. Soils and Fertilizers, 1993, 56(5): 529—562.
- [4] 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: 变异函数与 Kriging 插值分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 555—566.  
Guo Xvdong, Fu Bojie, Chen Liding, et al. The spatio-temporal variability of soil nutrients in Zunhua plain of Hebei Province: semivariogram and kriging analysis[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(5): 555—566. (in Chinese with English abstract)
- [5] 黄智刚, 李保国, 胡克林. 丘陵红壤蔗区土壤有机质的时空变异特征[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 58—63.  
Huang Zhigang, Li Baoguo, Hu Kelin. Characteristics of the spatio-temporal changes of soil organic matter of sugarcane field in red soil hill areas[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22 (11): 58—63. (in Chinese with English abstract)
- [6] 秦耀东. 土壤空间变异研究中的定量分析[J]. 地球科学进展, 1992, 7(1): 44—49.
- Qin Yaodong. Quantitative analysis for soil spatial variability study[J]. Advance in Earth Sciences, 1992, 7(1): 44—49. (in Chinese with English abstract)
- [7] Andrew W W, Gunter B, Rodger B G. Geostatistical characterisation of soil moisture patterns in the Tarrawarra catchment[J]. Journal of Hydrology, 1998, 205: 20—37.
- [8] 潘成忠, 上官周平. 土壤空间变异性研究评述[J]. 生态环境, 2003, 12(3): 371—375.  
Pan Chengzhong, Shangguan Zhouping. Review of the research on soil spatial variability[J]. Ecology and Environment, 2003, 12(3): 371—375. (in Chinese with English abstract)
- [9] McKenzie N J, Austin M P. A quantitative Australian approach to medium and small scale surveys based on soil stratigraphy and environmental correlation[J]. Geoderma, 1993, 57: 329—355.
- [10] Odeh I O A, McBratney A B, Chittleborough D J. Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model[J]. Geoderma, 1994, 63: 197—214.
- [11] Qiu Y, Fu B J, Wang J, et al. Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Environments, 2001, 49: 723—750.
- [12] Hengl T, Heuvelink G B M, Stein A. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging[J]. Geoderma, 2004, 120: 75—93.
- [13] 赵永存, 史学正, 于东升, 等. 不同方法预测河北省土壤有机碳密度空间分布特征的研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(3): 27—33.  
Zhao Yongcun, Shi Xuezheng, Yu Dongsheng, et al. Different methods for prediction of spatial patterns of soil organic carbon density in Hebei Province, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(3): 27—33. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张光辉, 刘国彬. 黄土丘陵区小流域土壤表面特性变化规律研究[J]. 地理科学, 2001, 21(2): 118—122.  
Zhang Guanghui, Liu Guobin. Spatial and temporal variability of soil surface properties in Danangou catchment in loess hill and hilly region[J]. Scientia Geographica Sinica, 2001, 21(2): 118—122. (in Chinese with English abstract)
- [15] 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[J]. 地理学报, 2002, 57(5): 587—594.  
Qiu Yang, Fu Bojie, Wang Jun, et al. Variability of the soil physical properties on the loess plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(5): 587—592. (in Chinese with English abstract)
- [16] 胡伟, 邵明安, 王全九. 黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异的尺度性研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 11—16.  
Hu Wei, Shao Ming'an, Wang Quanjiu. Scale-dependency of spatial variability of soil moisture on a degraded slope-land on the Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(8): 11—16. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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[J]. 地理学报, 1999, 54 (3): 241—246.  
Fu Bojie, Chen Liding, Ma Keming. The effect of land use

- change on the regional environment in the Yangjuangou catchment in the loess plateau of China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54 (3): 241—246. (in Chinese with English abstract)
- [18] Moore I D, Gessler P E, Nieslen G A, et al. Soil attribute prediction using terrain analysis[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1993, 57: 443—452.
- [19] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 等. 黄土高原小流域土壤容重及水分空间变异特征研究[J]. *生态学报*, 2006, 26(3): 11—19.
- Lian Gang, Guo Xvdong, Fu Bojie, et al. Spatial variability of bulk density and soil water in a small catchment of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 11—19. (in Chinese with English abstract)
- [20] Qi J, Chehebouni A, Huete A R, et al. Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48: 119—126.
- [21] 池宏康. 黄土高原地区提取植被信息方法的研究[J]. *植物学报*, 1996, 38(1): 40—44.
- Chi Hongkong. Methods for collecting vegetation information in Loess Plateau[J]. *Acta Botanica Sinica*, 1996, 38(1): 40—44 (in Chinese with English abstract)
- [22] 梅安新, 彭望球, 秦其明, 等. 遥感导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- Mei An'xin, Peng Wanglu, Qin Qiming, et al. Introduction to remote sensing[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001. (in Chinese)
- [23] 党安荣, 王晓栋, 陈晓峰, 等. EARDAS IMAGINE 遥感图像处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- Dang Anrong, Wang Xiaodong, Chen Xiaofeng, et al. Methods of remote sensing image processing for EARDAS IMAGINE[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)
- [24] Edward Batschelet. Circular statistics in biology[M]. Academic Press, 1981.
- [25] 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[J]. *生态学报*, 2004, 24(12): 2776—2781.
- Huang Yuanfang, Zhou Zhiyu, Yuan Xiaoyong, et al. Spatial variability of soil organic matter content in an arid desert area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2776—2781. (in Chinese with English abstract)
- [26] 赵忠, 李鹏, 王乃江. 渭北黄土高原主要造林树种根系分布特征的研究[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(1): 37—39.
- Zhao Zhong, Li Peng, Wang Naijiang. Distribution patterns of root systems of main planting tree species in Weiwei Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(1): 37—39. (in Chinese with English abstract)

## Prediction of the spatial distribution of soil properties based on environmental correlation and geostatistics

Lian Gang<sup>1,2</sup>, Guo Xudong<sup>2</sup>, Fu Bojie<sup>3</sup>, Hu Chenxia<sup>4</sup>

(1. Zhejiang Environmental Monitoring Center, Hangzhou 310012, 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, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100085, China; 4. College of Economics and Management, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** As the most important determinants of soil quality, soil properties significantly influenced land use and ecological processes. On the landscape scale, a comprehensive understanding and consideration of soil spatial variation was essential for establishing an ecological and environmental process modeling. Spatial variation of soil properties (include bulk density (BD), soil organic matter (SOM) and total phosphorus (TP)) was analyzed and predicted according to environmental indicators based on data from 254 points of surface soil (0–20 cm) by digital terrainin and remote sensing image analysis technique in Hengshan county on the Loess Plateau. The relationship between soil properties, terrain attributes and remote sensing indices was analyzed. Finally, environment variables were used to predict spatial distribution of soil properties by multiple-linear regression analysis and geo-statistical. The results showed that BD and SOM were positively correlated with terrain attributes and remote sensing indices, but TP has little significant correlation with remote sensing indices. The multiple-linear stepwise regression model was relatively precise for the BD and SOM, but for TP, the predicted result was poor. The regression-Kriging method can effectively reduce residuals in prediction by eliminating smoothing effect, and its predicted values are quite close to the measured.

**Key words:** soil properties, environment indicators, spatial prediction, loess plateau