

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

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 研究土壤属性空间变异及其分布特征与环境因子的关系, 对于了解生态系统的过程具有重要意义。以横山县为例, 采集了 254 个耕层 (0~20 cm) 土样, 利用数字地形与遥感影像分析技术, 提取相关地形与遥感指数, 分析不同土地利用、地形条件下土壤养分空间变异及分布特征, 并结合回归分析与地统计学进行空间分布预测。结果表明, 不同土地利用类型其养分含量差异显著, 水田和川地的有机质和全氮含量明显高于其他土地利用类型, 而全磷含量以梯田最高。不同坡度分析表明, “0~3°” 坡度等级有机质和全氮含量显著高于其他坡度等级; 不同坡向土壤养分含量差异均不显著, 但存在一个明显的趋势, 即阴坡有机质和全氮含量整体上要较阳坡高。土壤有机质与高程 H 呈现负相关, 与坡向的余弦值 \cos 、复合地形指数 CTI 修正后的土壤调节植被指数 $MSAVI$ 及湿度指数 WI 呈正相关。土壤全氮与相关环境因子的关系基本与有机质的一致。而土壤全磷与修正后的土壤调节植被指数 $MSAVI$ 及湿度指数 WI 正相关。土壤有机质和全氮用相关环境变量的多元线性逐步回归模型拟合预测较好, 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, 预测精度高于多元线性逐步回归预测。

关键词 土壤养分; 环境因子; 空间变异; 黄土高原

中图分类号 S159 文献标识码 A

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。分析、预测土壤属性空间变异, 开展区域土地质量评价是可持续土地利用的重要组成部分^[1], 对提高农田水肥利用效率, 改善田间管理, 最终实现土地可持续利用具有重要意义^[2]。黄土高原地区水土流失严重, 是我国乃至世界典型的生态脆弱区^[3], 研究该区不同尺度土壤属性空间变异特征, 可为区域退化土地的恢复重建、合理利用土地资源提供科学依据。

以往传统的土壤调查方法, 虽然精度较高, 可以不考虑大气、植被的影响, 但在区域等大尺度上, 很难保证高密度样点分布, 代表范围有限, 人力财力消耗大, 以点代面, 宏观性得不到体现, 结合 3S 技术与野外调查取样, 可以克服以上的缺陷。3S 技术在土壤地理、调查制图、动态监测和土地资源管理

等方面已被广泛应用, 并取得了丰硕的研究成果, 在不同尺度土壤养分空间变异特征研究中发挥着重要作用^[4]。

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, 以往的方法较难得出理想的空间预测结果^[5]。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因素等显著影响^[3]。本研究结合 3S 技术与野外调查取样, 利用数字地形与遥感影像分析技术, 提取了相关地形与遥感指数, 分析不同土地利用类型、不同地形条件等对土壤养分的影响, 并利用相关环境因子结合回归分析与地统计学进行土壤养分空间分布预测, 探索区域尺度上快速、准确、经济的土壤质量调查、评价手段, 以期为该区生态系统恢复与有效治理提供理论依据。

* 国家自然科学基金项目 (40201004, 40321101) 资助

作者简介: 连 纲 (1977~), 男, 陕西彬县人, 讲师, 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

收稿日期: 2007-08-21; 收到修改稿日期: 2007-11-25

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 4333 km², 海拔 887~1560 m, 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, 年均降水量 400 mm 左右, 降水多集中在 7 月至 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 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

利用横山县 1:5 万地形图插值生成 DEM (栅格为 30m × 30m) 及 2004 年 SPOT2.5 卫星遥感影像目视解译所生成土地利用图, 在 GIS 平台下进行叠加分析, 根据土地利用、地形、地貌及行政单元划分等特征, 有针对性预设 300 个样点, 记录各样点坐标, 输入 GPS (SF-2040G, NavCom) 作为野外采样参照点。于 2004 年 8 月进行野外采样, 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 0~20 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, 最终共采取 254 个土样, 样点分布见图 1。获取的土壤样品经自然风干、过 1 mm 筛后进行室内养分测定。土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定; 全氮采用开氏定量法测定; 全磷采用硫酸高氯酸消煮-ICP 测定。

2.2 地形属性的提取

利用 DEM 和样点信息, 通过数字地形分析技术, 提取和计算相关地形指数, 主要有:

基本属性—高程 H (m), 坡度 (θ), 坡向 (ϕ);

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)。

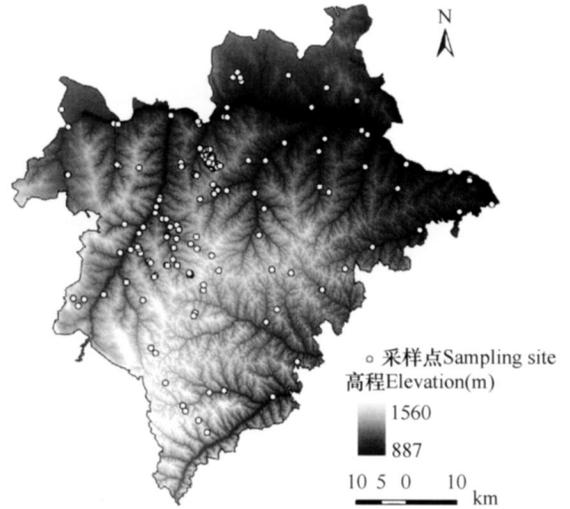


图 1 县域样点分布

Fig. 1 DEM of Hengshan and the distribution of sampling sites

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, 定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^[6-8]。计算公式为:

$$CTI = \ln \left(\frac{Ac}{\tan \theta} \right) \quad (1)$$

$$SPI = \ln (Ac \times \tan \theta \times 100) \quad (2)$$

$$STI = \left(\frac{Ac}{22.13} \right)^{0.6} \left(\frac{\sin \theta}{0.0896} \right)^{1.3} \quad (3)$$

式中, Ac 为垂直于水流方向的特定汇流面积 (m²), 可通过 ArcGIS 水文分析模型计算; θ 为坡度 ($^\circ$), 为了避免分母为 0, 对于那些坡度为 0 的栅格赋以极小值 0.000 1;

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, 本研究选用了修正后的土壤调节植被指数 (MSAVI)^[9]。相关研究表明^[10], 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。其计算公式如下:

$$MSAVI = (2TM_4 + 1 - \sqrt{(2TM_4 + 1)^2 - 8(TM_4 - TM_3)}) / 2 \quad (4)$$

式中, TM_4 为近红外波段, TM_3 为红色波段。

缨帽变换 (Tasseled Cap)是由 Kauth和 Thomas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^[11,12]。在多维光谱空间中,通过线性变换、多维空间的旋转,将植物、土壤信息投影至多维空间的一个平面上。其抓住了地面景物,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。本研究采取经过缨帽变换得到的湿度特征 (WI)作为相关评价的一个指标因子,其计算如下:

$$WI = 0.1446 TM_1 + 0.1761 TM_2 + 0.3322 TM_3 + 0.3396 TM_4 - 0.6210 TM_5 - 0.4186 TM_7 \quad (5)$$

2.4 数据验证

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^[13], MPE 和 $RMSPE$ 的计算如下:

$$MPE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (z_j - \hat{z}_j) \quad (6)$$

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (z_j - \hat{z}_j)^2} \quad (7)$$

其中, n 为验证数据集中采样点的个数。

3 结果与分析

3.1 描述性统计分析

从统计分析可见(表 1),表层土壤养分含量均很低。从变异系数来看,县域土壤养分空间变异不大,有机质、全氮和全磷中等变异。经单样本 $K-S$ 检验,三者均符合正态分布。

表 1 土壤养分基本统计学特征

Table 1 Descriptive statistics of soil nutrients

	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	正态分布检验 K-S
有机质 OM ($g\ kg^{-1}$)	6.09	5.43	0.95	24.42	23.47	3.61	0.59	0.52
全氮 TN ($mg\ kg^{-1}$)	442.6	410.0	80.0	1900	1820	230	0.51	0.19
全磷 TP ($mg\ kg^{-1}$)	847.8	782.8	222.5	1594	1371	290.4	0.34	0.24

3.2 土地利用对土壤养分的影响

不同土地利用类型土壤有机质含量变化在 $2.73 \sim 10.96\ g\ kg^{-1}$ 之间(表 2),其养分差异达到了极显著的水平 (F 检验, $p < 0.001$)。采用最小显著差法进行多重比较,其中灌木地的有机质含量最低,并与其他土地利用类型(林地除外)的差异显著;而水田的有机质含量最高,显著高于川地外的其他土地利用类型;草地有机质含量为 $5.30\ g\ kg^{-1}$,显著高于林地和灌木地。全氮含量变化范围为 $188.0 \sim 746.0\ mg\ kg^{-1}$,变化趋势基本与有机质相同。

全磷含量以梯田最高,为 $1015\ mg\ kg^{-1}$,显著高于除川地和坝地外的其他土地利用类型,而灌木地的全磷含量最低。梯田主要分布在山区,相对于河谷地带的农户而言,旱地农户对耕地依赖性较大,而梯田耕作条件相对较好,具有较好的水土保

持能力,旱地农户也愿意将有限的肥料施用到梯田。值得注意的是,虽然水田有机质和全氮含量很高,但全磷只有 $802.3\ mg\ kg^{-1}$,可能与其生产、管理措施相关。

在黄土高原地区,土壤养分含量通常林地 >灌木地 >荒地 >坡耕地^[14]。但本研究中,林地和灌木地养分含量最低,分析可能有以下原因导致:

(1)与分布位置有关,林地和灌木地大多分布在坡顶位置。坡顶位置,受侵蚀影响较大,养分易于流失;(2)由于北部与毛乌素沙漠邻近,受沙化影响,而林地和灌木地大多分布在这一区域;(3)相当一部分为近年退耕林,长势一般,林下缺少枯枝落叶和草本植物,且人为扰动较大。土壤改良是一长期过程,在黄土高原退耕还林还草的相关研究^[15]也说明了这一点。

表 2 不同土地利用类型土壤养分变化

Table 2 Variation of soil nutrients in soils different in land use

土地利用类型 Land use	有机质 OM (g kg^{-1})	全氮 TN (mg kg^{-1})	全磷 TP (mg kg^{-1})
坡耕地 Slope fam land	5.15ac	394.6a	863.2a
梯田 Terrace fam land	7.76de	542.0b	1015b
坝地 Check - dam fam land	6.30cd	458.2ab	875.4abc
川地 Valley fam land	9.08ef	649.7c	927.9ab
水田 Paddy field	10.96f	746.0c	802.3ad
林地 Woodland	3.44b	252.5d	687.1cd
灌木地 Shrub land	2.73b	188.0d	518.1 d
草地 Grass land	5.30ac	369.4a	728.0ad

注:LSD多重比较 ($p < 0.05$),同一列中相同字母表示无显著性差异 Note: Values in each column with the same letter are not significantly ($p < 0.05$, LSD) different

3.3 坡度及坡向对土壤养分的影响

不同坡度及坡向具有不同的水热分配条件和物质运移堆积的特点,地貌差异对土壤养分元素的分布存在明显影响^[16]。本研究结果表明,不同坡度有机质和全氮含量存在显著差异 (F 检验, $p < 0.05$),多重比较表明,“ $0 \sim 3^\circ$ ”这一坡度等级有机

质和全氮含量显著高于其他坡度等级(表 3)。而全磷在不同坡度分级没有显著差异,可能是其含量本身不高,空间变异不大;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坡度的作用;再者,空间数据的不确定性也可能是影响因素之一。

表 3 不同坡度的土壤养分含量

Table 3 Variation of soil nutrients along the slope gradient

坡度 Slope ($^\circ$)	有机质 OM (g kg^{-1})	全氮 TN (mg kg^{-1})	全磷 TP (mg kg^{-1})
0~3	7.84a	557.6a	819.2
3~8	5.32b	383.1b	813.6
8~15	6.19b	448.3b	837.7
15~25	5.80b	429.6b	887.5
>25	5.34b	388.3b	870.7

注:LSD多重比较 ($p < 0.05$),同一列中相同字母表示无显著性差异 Note: Values in each column with the same letter are not significantly ($p < 0.05$, LSD) different

将坡向从正北方向以 45° 为间隔划分为 8 类,分析不同坡向养分含量变化(图 2)。不同坡向土壤有机质、全氮及全磷含量差异均不显著。但细致观察发现,不同坡向有机质、全氮含量存在一个明显的趋势,阴坡有机质和全氮含量整体上要较阳坡高。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^[17]。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较高^[18]。

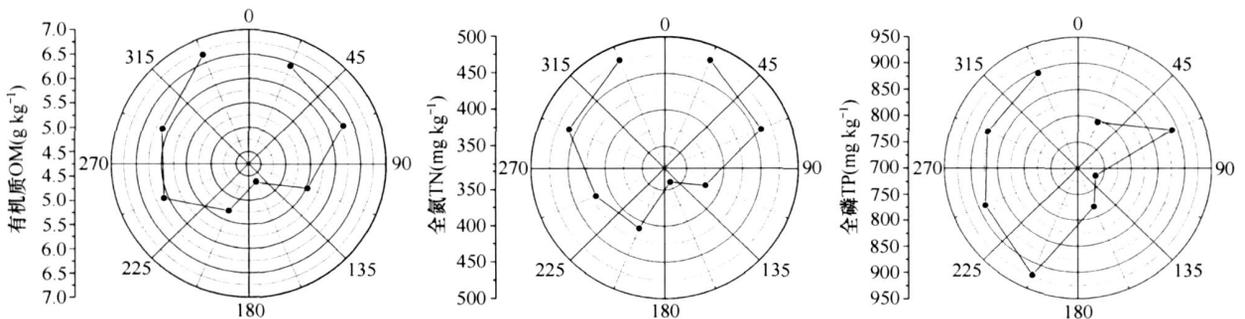


图 2 不同坡向土壤养分变化

Fig. 2 Variation of soil nutrients with the slope aspects

3.4 土壤养分与地形指数的关系及预测

相关分析结果见表 4。土壤有机质与高程 H 显著负相关。一般来说,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;有机质与坡向的余弦值 \cos 正相关,而坡向的余弦值

表示朝北的程度,这与养分随坡向变化的规律一致;有机质与复合地形指数 CTI 正相关,间接地反映了土壤有机质与地表汇流和坡度的关系。此外,有机质和修正后的土壤调节植被指数 $MSAVI$ 及湿度指数 WI 显著正相关,说明从遥感影像提取相关指

数进行分析研究是可行的。土壤全氮与相关环境因子的关系基本与有机质的相一致。而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。

表 4 土壤养分与环境因子的相关矩阵

Table 4 Correlation matrix of soil nutrients and environment indicators

环境因子 Environment indicators	有机质 OM	全氮 TN	全磷 TP
高程 Elevation (H)	-0.314**	-0.282**	0.000
坡度 Slope (°)	-0.112	-0.085	0.080
坡向余弦值 Cos(aspect) cos	0.160*	0.181**	-0.028
坡向正弦值 Sin(aspect) sin	-0.026	-0.022	-0.115
复合地形指数 Compound topographic index(CTI)	0.150*	0.082	-0.018
汇流动力指数 Stream power index(SPI)	-0.053	-0.085	0.041
沉积物运移指数 Sediment transport index(STI)	0.043	-0.009	0.099
修正后的土壤调节植被指数 Modified soil adjusted vegetation index(MSAVI)	0.413**	0.430**	0.193**
湿度指数 Wetness index(WI)	0.494**	0.451**	0.206**

*表示显著性水平为 0.05 Correlation is significant at the 0.05 level; **表示显著性水平为 0.01 Correlation is significant at the 0.01 level

采用多元线性逐步回归方法,利用土地利用、地形属性和遥感指数来解释所测土壤养分的变异。将定性变量作为虚拟变量(Dummy variables),进行 0/1 赋值^[19],引入回归方程,采用最小二次方的方法进行拟合,分析结果如下:

$$OM = 12.56 + 0.189WI - 0.0076H - 1.88WL + 1.72TF + 4.49MSAVI \quad (8)$$

$$R^2 = 0.35 \quad (p < 0.05)$$

$$TN = 277.35 + 5.78WI + 337.09MSAVI - 117.89WL + 138.17TF + 245.83RD + 156.68CHD \quad (9)$$

$$R^2 = 0.36 \quad (p < 0.001)$$

$$TP = 536.27 + 267.85TF + 742.54MSAVI + 133.46SFL - 51.56\sin \quad (10)$$

$$R^2 = 0.15 \quad (p < 0.05)$$

其中, OM 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 $MSAVI$, $R^2 = 0.35$ ($p < 0.05$); TN 表示全氮含量,最终进入模型的自变量为湿度指数 WI 、修正后的土壤调节植被指数 $MSAVI$ 、林地 WL 、梯田 TF 、水田 RD 和川地 CHD , $R^2 = 0.36$ ($p < 0.001$); 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 \sin , $R^2 = 0.15$ ($p < 0.05$)。

对于回归分析,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, 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。通过相关及回归分析发现,提取的遥感指数与土壤养分存在较好的关系。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土壤养分预测准确性进行检验(表 5,图 3),从预测误差和散点图可以看出,对于土壤有机质和全氮,回归拟合较好;而对于全磷,预测结果较差,预测值远离实测值,且平滑效应强烈。

表 5 预测结果准确性分析

Table 5 Test of prediction accuracy

土壤养分 Soil nutrients	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 MPE	均方根预测 误差 RMSPE	平均预测 误差 MPE	均方根预测 误差 RMSPE
有机质 OM	0.11	3.05	-0.01	1.39
全氮 TN	-16.12	186.49	-0.08	130.69
全磷 TP	44.13	287.48	-12.69	234.87

为了进一步提高预测精度,考虑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,再对所测各土壤属性回归残差分别进行克里格插值^[13,20],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 4 所示。回归 克里格预测增大了预测值的极差,对于局部的变异及地形的关系体现更为细化,从空间分布情况来看,更为接近现实情况。从对预测准确性分析来看(表 5),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 3 也可直观地看出,回归 克里格预测较为理想,其预测值与实测值较为接近,预测精度高于回归预测。

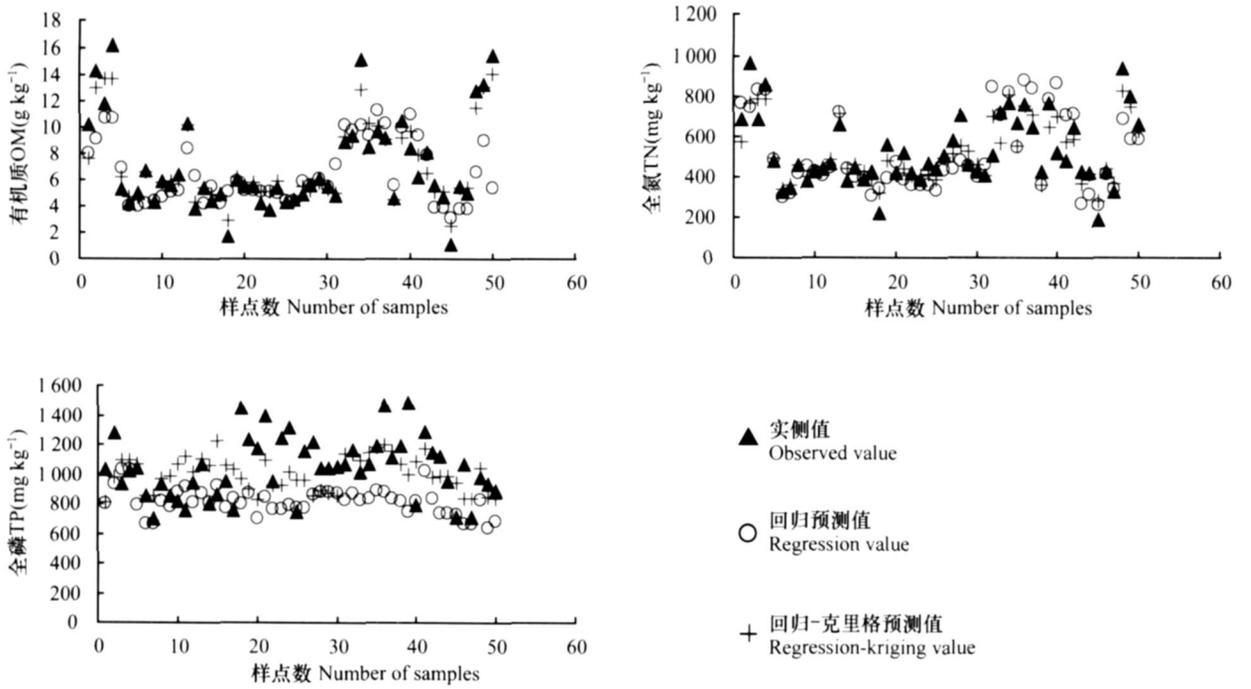
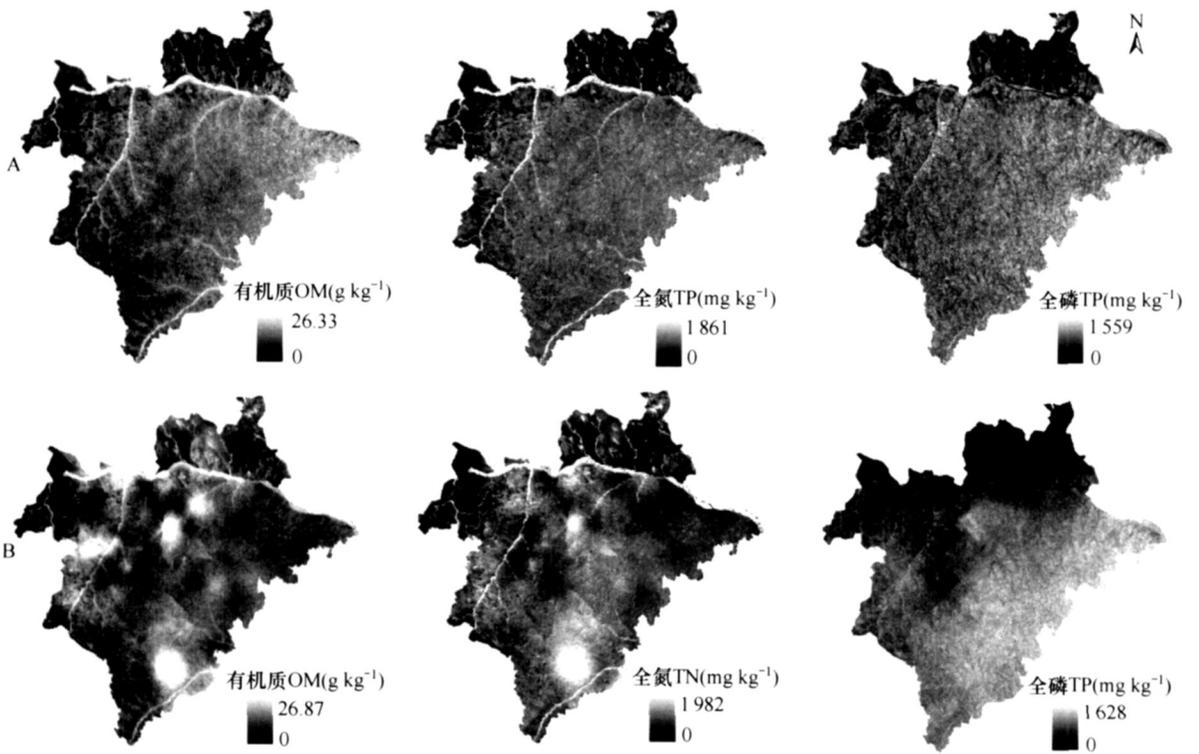


图3 实测值与预测值比较

Fig. 3 Comparison of observed and predicted values of soil nutrients



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

图4 不同方法预测的土壤养分空间分布

Fig. 4 Spatial distribution map of soil nutrients obtained by different methods

4 结 论

1) 县域土壤养分平均含量很低, 变异性较大, 不同土地利用类型的养分差异达到了极显著的水平。

2) 修正后的土壤调节植被指数 $MSAVI$ 及湿度指数 WI 与土壤养分存在较好的关系。在较大的区域尺度, 将遥感信息作为辅助变量, 不失为一种相对快速、准确、经济的调查、评价土壤属性手段。

3) 利用土地利用、地形属性和遥感指数, 采用多元线性逐步回归方法预测有机质和全氮含量相对较好, 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。回归 克里格预测可减小残差, 消除平滑效应, 与实测值较为接近, 预测精度高于回归预测。

由于土壤是一个具有明显时空特性的复杂系统, 本研究也只是一种方法上的探讨, 尝试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一个有益的借鉴。土壤特性空间变异是尺度的函数, 如何科学准确地布置样点以便最大程度地反映土壤的真实变异是当前研究面临的一个挑战。本研究从土地利用、地形等因素考虑布设样点, 可能存在一定的缺陷, 如何确定合理的采样尺度是需要进一步研究的问题。此外, 如何解决多元数据、空间数据集成的不确定性等问题也是今后研究的重点问题。

参 考 文 献

- [1] Stark C H E, Condron L M, Stewart A, *et al* Small-scale spatial variability of selected soil biological properties. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36 (4): 601 ~ 608
- [2] 孙波, 赵其国, 阎国年. 低丘红壤肥力的时空变异. *土壤学报*, 2002, 39 (2): 190 ~ 198. Sun B, Zhao Q G, Lu G N. Spatio-temporal variability of red soil fertility in low hill region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39 (2): 190 ~ 198
- [3] 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. Fu B J, Chen L D, Ma K M. The effect of land use change on the regional environment in the Yangjuangou catchment in the Loess Plateau of China (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54 (3): 241 ~ 246
- [4] 石元春. 土壤学的数字化和信息化革命. *土壤学报*, 2000, 37 (3): 289 ~ 295. Shi Y C. Digitalization and information revolution in soil science (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37 (3): 289 ~ 295
- [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. 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 (In Chinese). *Geographical Research*, 2001, 20 (6): 739 ~ 751
- [6] Moore ID, Gessler P E, Nieslen G A, *et al* Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Sci Soc Am J*, 1993, 57: 443 ~ 452
- [7] Gessler P E, Moore ID, McKenzie N J, *et al* Soil-landscape modeling and spatial prediction of soil attributes. *Int J Geographical Information Systems*, 1995, 4: 421 ~ 432
- [8] McKenzie N J, Ryan P J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma*, 1999, 89: 67 ~ 94
- [9] Qi J, Chehebouni A, Huete A R, *et al* Modified soil adjusted vegetation index (MSAVI). *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48: 119 ~ 126
- [10] 池宏康. 黄土高原地区提取植被信息方法的研究. *植物学报*, 1996, 38 (1): 40 ~ 44. Chi H K. Methods for collecting vegetation information in Loess Plateau (In Chinese). *Acta Botanica Sinica*, 1996, 38 (1): 40 ~ 44
- [11] 梅安新, 彭望球, 秦其明, 等. 遥感导论. 北京: 高等教育出版社, 2001. Mei A X, Peng W L, Qin Q M, *et al* Introduction to Remote Sensing (In Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2001
- [12] 党安荣, 王晓栋, 陈晓峰, 等. EARDAS MAGNE 遥感图像处理方法. 北京: 清华大学出版社, 2003. Dang A R, Wang X D, Chen X F, *et al* Methods of Remote Sensing Image Processing for EARDAS MAGNE (In Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 2003
- [13] Hengl T, Heuvelink G B M, Stein A. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma*, 2004, 120: 75 ~ 93
- [14] Wang J, Fu B J, Qiu Y, *et al* Soil nutrients in relation to land use and landscape position in the semi-arid small catchment on the loess plateau in China. *Journal of Arid Environments*, 2001, 48: 537 ~ 550
- [15] 郝仕龙, 安韶山, 李壁成, 等. 黄土丘陵区退耕还林(草)土壤环境效应. *水土保持研究*, 2005, 12 (3): 29 ~ 30. Hao S L, An S S, Li B C, *et al* Effects of converting farm land to forest and grass land in the hilly-gully region of Loess Plateau (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12 (3): 29 ~ 30
- [16] 唐将, 李勇, 邓富银, 等. 三峡库区土壤营养元素分布特征研究. *土壤学报*, 2005, 42 (3): 473 ~ 478. Tang J, Li Y, Deng F Y, *et al* Distribution characteristics of nutrition elements in the Three Gorges Reservoir District (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42 (3): 473 ~ 478
- [17] 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): 2 776 ~ 2 781. Huang Y F, Zhou Z Y, Yuan X Y, *et al* Spatial variability of soil organic matter content in an arid desert area (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (12): 2 776 ~ 2 781
- [18] 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. 应用生态学报, 2000, 11 (1): 37 ~ 39. Zhao Z, Li P, Wang N J. Distribution patterns of root systems of main planting tree species in Weibei Loess Plateau (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11 (1): 37 ~ 39
- [19] 余建英, 何旭宏. 数据统计分析与 SPSS 应用. 北京: 人民邮电出版社, 2003. Yu J Y, He X H. Data Statistics and Analysis, A Course in Applied SPSS (In Chinese). Beijing: People's Post & Telecommunications Publishing House, 2003
- [20] 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. 土壤学报, 2005, 42 (3): 27 ~ 33. Zhao Y C, Shi X Z, Yu D S, *et al*. Different methods for prediction of spatial patterns of soil organic carbon density in Hebei Province, China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42 (3): 27 ~ 33

SPATIAL VARIABILITY AND PREDICTION OF SOIL NUTRIENTS ON A COUNTY SCALE ON THE LOESS PLATEAU—A CASE STUDY OF HENGSHAN COUNTY, SHAANXI PROVINCE

Lian Gang^{1,2} Guo Xudong² Fu Bojie³ Hu Chenxia⁴

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

(2 Key Laboratory of Land Use, Ministry of Land and Resource, 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 Being the most important determinants of soil quality, soil properties significantly influence land use and ecological processes. Study on spatial variability of soil properties is vital for sustainable land management. Samples of surface soils (0 ~ 20 cm) collected from 254 sampling sites all over Hengshan County, on the Loess Plateau were analyzed to study spatial variation of soil nutrients (include soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP)) with land use types and topography conditions. Correlation analyses were carried out of soil nutrients with terrain attributes and remote sensing indices. Finally, environment indicators were used to predict soil nutrients spatial distribution by multiple-linear regression analysis and geo-statistics. Significant differences were found between different land use types in soil nutrients, with the highest values in SOM and TN measured in soils from paddy field, and the highest value of TP in soils from terrace farmland. Fields with slope gradients ranging in 0 ~ 3 were significantly higher than fields with higher slope gradient in SOM and TN. And little difference was found in soil nutrients between fields different in slope aspect, but a tendency was discovered that SOM and TN in fields on northern slopes was higher. Different correlations were found of soil nutrients with terrain attributes and remote sensing indices. The multivariate linear stepwise regression model was relatively precise for SOM and TN, but for TP, it was not so good. Such techniques may be applied as a first step in unmapped areas to guide soil sampling and model development. The regression-kriging method can effectively reduce residuals in prediction by eliminating smoothing effect. So its predicted values are quite close to the measured, demonstrating that the regression-kriging method improves accuracy of prediction.

Key words Soil nutrients; Environment indicators; Spatial variability; Loess Plateau