

黄土高原小流域土壤容重及水分空间变异特征

连 纲^{1,2}, 郭旭东¹, 傅伯杰², 虎陈霞²

(1. 国土资源部土地利用重点实验室, 北京 100035; 2. 中国科学院生态环境研究中心系统生态重点实验室, 北京 100085)

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变异的重要因素。在横山县朱家沟小流域采集了 82 个样点,选取土壤容重和水分作为研究对象,分析比较不同土地利用及不同景观位置下二者的变异及分布特征;分析了土壤容重和水分与地形因素的关系并利用地形与土地利用信息进行了回归分析。结果表明,不同土地利用类型之间,土壤容重变异较小,其大小次序为:灌木林地 > 荒草地 > 梯田 > 坝地 > 林地 > 坡耕地;土壤水分变化相对较大,大小次序为:坝地 > 荒草地 > 灌木林地 > 坡耕地 > 林地 > 梯田。在不同景观位置,土壤容重大小变化表现为:坡顶 > 沟平地 > 坡下 > 坡上 > 坡中;土壤水分大小变化为:沟平地 > 坡中 > 坡下 > 坡上 > 坡顶。基于数字地形分析技术,提取相关地形指数,与土壤容重和水分进行相关分析并进行多元回归分析,结果表明:土壤容重与复合地形指数 CTI 正相关;土壤水分与高程呈现负相关关系,和剖面曲率正相关。建立了多元线性回归模型,结果发现模型对土壤容重预测结果比较理想,但对于土壤水分的预测存在较大的平滑效应,残差较大,须进一步探讨。

关键词:土壤容重及水分;空间变异;地形因子;回归分析

文章编号:1000-0933(2006)03-0647-08 中图分类号:Q948 文献标识码:A

Spatial variability of bulk density and soil water in a small catchment of the Loess Plateau

LIAN Gang^{1,2}, GUO Xu-Dong¹, FU Bo-Jie², HU Chen-Xia² (1. Key Laboratory of Land Use, Ministry of Land and Resources, Beijing, 100035; 2. Key Laboratory of Systems Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing, 100085). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 647-654.

Abstract: Topography and land use types are key factors which affect soil properties variability on catchment scale in the loess hilly area. Spatial variation of bulk density and soil water were analyzed according to different land use types and different landscape positions, based on data from 82 points in Zhujiagou catchment in Hengshan county. Correlation analyses were carried out between bulk density, soil water and terrain attributes. Finally, terrain attributes and land use types were used to predict bulk density and soil water spatial distribution by multiple-linear regression analysis. There is little difference in bulk density among different land use types, but there is a tendency: shrub land > grassland > terrace farmland > check-dam farmland > woodland > slope farmland. For soil water content, that the tendency is: check-dam farmland > grassland > shrub land > slope farmland > woodland > terrace farmland. The bulk density series for bulk density according to landscape position is: crest > flat > lower slope > upper slope > middle slope. For soil water content the positions order is: flat > middle slope > lower slope > upper slope > crest. Correlation analyses were carried out between bulk density, soil water and terrain indices. It was found that there is positive correlation between bulk density and compound topographic index (CTI); There is a strong negative correlation between soil water and elevation, and a positive correlation between soil water and profile curvature (Kv). The regression model is precise for the soil bulk density, but the variation is rather large and there is a more smoothing effect on the predicted values for soil water.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40201004)

收稿日期:2005-08-30;修订日期:2006-01-05

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

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

Received date: 2005-08-30; Accepted date: 2006-01-05

Biography: LIAN Gang, Ph. D. candidate, mainly engaged in environment protection, landscape and land quality. E-mail: frank.lian@sohu.com

Key words: bulk density and soil water; spatial variation; terrain attributes; regression analysis

土壤属性变异包括系统变异和随机变异,系统变异是由母质、气候、地形、生物、时间等的差异引起的,而随机变异是由取样、分析等的误差引起的。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^[1]。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^[2],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。

地形是影响土壤性质的一个重要因素,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。数字地形模型是采用系统定量的方法来分析和模拟地表以及地形、水文及生物之间的关系,由于可以获得相关定量化的环境变量,因此,越来越被广泛的应用于地学问题的研究,特别是用于分析和预测土壤属性的空间分布^[3]。

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^[4]。本文利用地形分析技术,提取了相关地形因素,分析不同土地利用类型、不同景观位置及地形因素等对土壤容重和质量含水量的影响,空间分布规律并进行预测,以期为该区生态系统恢复与有效治理提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于陕西省北部横山县朱家沟流域(北纬 37°56' ~ 37°59', 东经 109°21' ~ 109°24'), 面积 11.3 km²。区域气候为半干旱大陆性季风气候,年平均温度 8.6℃,平均日照时数为 2815h,无霜期 146d 左右,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

购买研究流域所在区域 2000 年 1:1 万地形图,经数字化生成栅格为 5m 的高精度 DEM,利用 2004 年 4 月 Quickbird 影像(全色和多光谱),通过人工目视解译,结合野外调查生成土地利用现状图,小流域的土地利用类型分为坡耕地、梯田、坝地、草地、林地和灌木林地 6 类,其中坝地包括一些沟谷平地。根据土地利用,参考地形图,首先在 GIS 下有针对性的布置 100 个样点,记录各样点坐标,输入手持 GPS 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,取 0~20cm 的表层土壤,每个样点设置 3 次重复。为了减少降水等因素的影响,该区域外业采样前期一周内无降水,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 82 个样点,样点分布见图 1。土壤容重采用环刀法测定,土壤含水量采用烘干法测定。

2.2 数据来源与分析方法

地形属性可以划分为基本属性和派生(或复合)属性,基本属性可以利用地形分析技术从 DEM 直接计算获得,而复合地形属性可以利用基本属性通过相关运算获得,其可以反映景观中某一特定过程的空间变异特征。在 GIS 平台下,利用样点信息,通过 DEM 数字地形分析技术,在空间分析模块下获取相关地形属性。选取的地形属性主要有:

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

复合属性——复合地形指数 CTI (compound topographic index),汇流动力指数 SPI (Stream power index)。

高程以 m 为单位;在具体分析过程中,坡度转化为百分比表示;坡向是一环形变量($^\circ$),按顺时针方向从 0 $^\circ$ (正北)到 360 $^\circ$ 来度量;平面曲率是垂直于坡向的表面曲率,剖面曲率是潜在坡度变化率的一个量度,二者对于水分和沉积物的运移过程有着重要影响。

复合地形指数 *CTI*(亦称为地形湿度指数)和汇流动力指数 *SPI*(亦称为径流强度指数)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^[5,6]。计算公式为:

$$CTI = \ln\left(\frac{Ac}{\tan\beta}\right) \quad SPI = \ln(Ac + \tan\beta \times 100)$$

Ac 垂直于水流方向的特定汇流面积,可通过 ArcGIS 下水文分析模型计算;

β 坡度(弧度),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;

本文中描述性统计分析、单因素方差分析、相关分析及多元线性逐步回归均在 SPSS11.0 上完成。

2.3 多元回归方程的检验

从 82 个样点数据随机抽取 20 个样点作为验证数据集验证其余 62 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^[7], *MPE* 和 *RMSPE* 的计算方法如下:

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

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

其中 *n* 为验证数据集中采样点的个数。 *MPE* 反映了预测的偏差,对于无偏预测其值应接近于 0,反映了预测值高于或低于或接近于观测值的程度。 *RMSPE* 表示预测的平均精度,其值越小越好,反映了预测准确性和预测方法系统误差。

3 结果与分析

3.1 小流域土壤容重和质量含水量的基本统计学特征

从表 1 可见,土壤容重介于 1.119 ~ 1.424g/cm³ 之间,平均为 1.261 g/cm³;土壤质量含水量变化于 1.176% ~ 8.726% 之间,平均为 4.314%。变异系数 *C_v* 反映了特性参数的空间变异程度,揭示区域化变量的离散程度。一般认为, *C_v* < 0.1 为弱变异性, 0.1 ≤ *C_v* ≤ 1 为中等变异性, *C_v* > 1 为高度变异性^[8]。从变异系数来看,二者空间变异不大,质量含水量变异相对较高,为中等变异。经单样本 *K-S* 检验,二者均符合正态分布。

表 1 土壤容重和质量含水量的基本统计学特征

Table 1 Descriptive statistics for soil bulk density and soil water

项目 Item	平均值 Mean	中数 Median	最小值 Min	最大值 Max	极差 Range	标准差 Standard deviation	变异系数(%) Coefficient of variation	K-S
容重 Bulk density(g/cm ³)	1.261	1.267	1.119	1.424	0.305	0.080	6.327	0.619
质量含水量 Soil water(%)	4.314	3.930	1.176	8.726	7.55	1.939	44.958	0.747

3.2 不同土地利用及景观位置土壤容重和质量含水量变化

3.2.1 不同土地利用土壤容重和质量含水量变化 表 2、表 3 分别反映了不同土地利用下土壤容重和质量含水量的变化,从变异系数来看,不同土地利用下土壤容重变异较小,属于弱变异,其中尤以坝地的变异最小,究其原因,一是由于土壤容重本身变异较小,二是可能由于小流域坝地较少,受样本量的影响而致。许多研究表明,土地利用对土壤容重有重要影响^[9,10]。研究表明:不同土地利用土壤容重的大小次序为,灌木林地 > 荒草

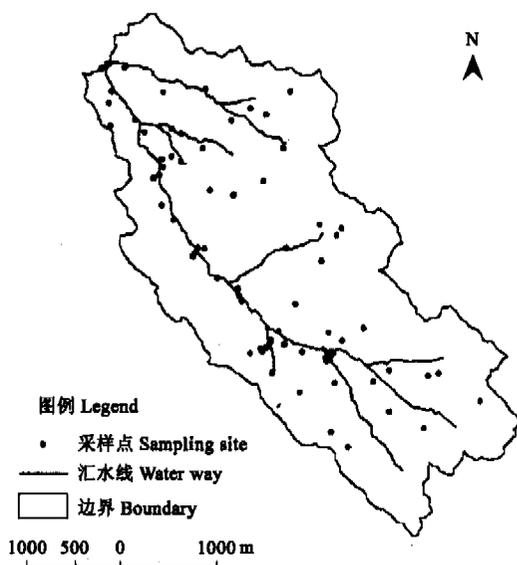


图 1 小流域样点分布格局

Fig.1 Distribution pattern of sampling sites

地 > 梯田 > 坝地 > 林地 > 坡耕地, 坡耕地由于耕作及水土流失的影响, 造成耕层土壤疏松多孔, 所以容重比较低; 当地成年林地较少, 且郁闭度很低, 较多林地均为近年来退耕还林地, 大多采用鱼鳞坑种植, 人为干扰较大, 因此其容重也比较低。从容重大小分布来看, 受人为耕作影响频繁的土地, 如坝地、坡耕地的土壤容重较小。土壤容重在不同土地利用类型上主要是受人为耕作的影响较大。

表 2 不同土地利用土壤容重变化 (g/cm^3)

Table 2 Change of bulk density in different land use types

项目 Item	坡耕地	梯田	坝地	林地	灌木林地	荒草地
	Slope farmland	Terrace farmland	check-dam farmland	Woodland	Shrubland	Grassland
平均值 Mean	1.230a *	1.287a	1.267a	1.264a	1.296a	1.289a
中数 Median	1.217	1.279	1.261	1.267	1.289	1.291
最小值 Min	1.119	1.195	1.256	1.135	1.175	1.160
最大值 Max	1.335	1.383	1.278	1.369	1.387	1.424
极差 Range	0.216	0.188	0.022	0.234	0.222	0.264
标准差 Standard deviation	0.068	0.133	0.011	0.079	0.095	0.094
变异系数 Coefficient of variation	5.549	10.329	0.868	6.241	7.330	7.278

* LSD 多重比较 ($p < 0.05$), 相同字母表无显著性差异 Values in each row with the same letter are not significantly ($p < 0.05$, LSD) different among land use

不同土地利用土壤质量含水量的变异较大, 从变异系数来看, 属中等变异, 其中以林地变异最大, 主要是由于不同林地郁闭度及树龄差异所致。质量含水量大小顺序为: 坝地 > 荒草地 > 灌木林地 > 坡耕地 > 林地 > 梯田; 坝地相对较高的主要原因是其处于沟谷地带, 淤地坝拦截了来自高处的物质运移, 较多的接纳了水分, 而且坝地一般地势较平, 地块较大, 具有较好的保水能力, 因此水分含量相对较高。植被类型不同, 根系分布深度及密度具有很大的差异, 从而土壤的蒸发和植被的蒸腾量不同, 由此引起的土壤干燥化程度和土壤的水分分布也不相同。一般地, 多年生植被生育期长, 根系分布较深, 年蒸发蒸腾量大于一年生植被^[11]。草地和灌木林地相对比较茂密, 长势较好, 蒸发作用相对低些, 土壤含水量也相对较高。而林地由于郁闭度较低, 且部分为近几年退耕林, 长势一般, 虽采取鱼鳞坑种植, 但由于蒸发等因素影响, 含水量较低; 此外, 林下缺少枯枝落叶和草本植物, 不利于截留降水, 加之树木根系较深和树冠蒸腾及耗水量较大, 也是导致林地水分较低的原因之一。一些研究也表明在黄土高原沟壑区坡耕地、园地、草地和林地中, 林地的土壤贮水量最低^[11]; 当地的梯田都是老式梯田, 一般地块较小, 保水能力一般, 受人渗和蒸发等因素影响, 耕层水分很低。尤其在较干旱年间, 土壤含水量不易满足作物生长的需求, 作物较易枯萎, 在当地农户调查中普遍反映了这一现象^[12], 因此含水量最小。从分析结果来看, 草地和灌木林地土壤含水量较高, 土壤涵水能力较强, 实际调查来看, 生长情况也相对较好, 对于该区实施退耕还林还草工程是一个有益的启示。

表 3 不同土地利用土壤质量含水量变化 (%)

Table 3 Change of soil water in different land use types

项目 Item	坡耕地	梯田	坝地	林地	灌木林地	荒草地
	Slope farmland	Terrace farmland	Check-dam farmland	Woodland	Shrubland	Grassland
平均值 Mean	4.275a *	3.037a	6.053a	3.754a	4.383a	4.906a
中数 Median	3.931	3.037	5.963	2.486	4.263	4.438
最小值 Min	2.093	2.850	5.076	1.176	2.756	2.455
最大值 Max	7.936	3.223	7.121	8.726	8.311	8.248
极差 Range	5.843	0.373	2.045	7.550	5.555	5.793
标准差 Standard deviation	1.580	0.264	1.025	2.891	1.864	1.912
变异系数 Coefficient of variation	36.957	8.686	16.941	77.009	42.528	38.974

* LSD 多重比较 ($p < 0.05$), 相同字母表无显著性差异 Values in each row with the same letter are not significantly ($p < 0.05$, LSD) different among land use

在不同土地利用类型下, 土壤容重和质量含水量均有一定的差异, 但方差分析表明, 不论是土壤容重还是质量含水量, 各土地利用类型之间差异并不显著。

3.2.2 不同景观位置土壤物理性质变化 许多研究表明, 不同的景观位置土壤理化性质特征变异明显^[13]。根据 Brubaker 划分坡面景观位置的方法^[14], 结合野外调查的实际情况, 划分为坡顶 (包括梁、峁顶等)、坡上、

坡中、坡下及沟平地(包括坝地)5 种类型来比较其差异。

在不同景观位置,土壤容重变异不大,属于弱变异性(表 4)。土壤容重在不同景观位置上的大小次序为:坡顶 > 沟平地 > 坡下 > 坡上 > 坡中。坡顶容重较大的原因主要是因为坡顶部土壤在遭受侵蚀冲刷过程中自身结构变得愈加致密,而其它坡位接受中上部冲刷物后变得疏松,容重减小。沟平地由于地势低洼,淤积冲刷泥沙,土壤本身较为板结,容重较大,仅次于坡顶,与前面不同土地利用类型土壤容重变化相比,决定因素发生变化。方差分析表明:坡顶与坡上、坡中及坡下之间差异达到了显著水平,其它不同坡位之间土壤容重差异不显著。

表 4 不同景观位置土壤容重变化(g/cm^3)

Table 4 Change of bulk density in different landscape position

项目 Item	坡顶 Crest	坡上 Upper slope	坡中 Middle slope	坡下 Lower slope	沟平地 Flat
平均值 Mean	1.344 ^{a*}	1.243 ^b	1.223 ^b	1.250 ^b	1.267 ^{ab}
中数 Median	1.343	1.251	1.208	1.213	1.261
最小值 Min	1.290	1.119	1.158	1.135	1.256
最大值 Max	1.422	1.320	1.304	1.424	1.278
极差 Range	0.132	0.201	0.146	0.289	0.022
标准差 Standard deviation	0.052	0.062	0.053	0.093	0.011
变异系数 Coefficient of variation	3.848	4.984	4.305	7.472	0.868

* LSD 多重比较 ($p < 0.05$), 相同字母表无显著性差异 Values in each row with the same letter are not significantly ($p < 0.05$, LSD) different among landscape positions

在不同景观位置,土壤质量含水量变异比容重要大,属于中等变异,从土壤质量含水量的大小来看:沟平地 > 坡中 > 坡下 > 坡上 > 坡顶;黄土高原地区降雨产流以超渗产流为主^[15],坡顶由于接纳的水分来源单一,主要来自于降水,而其他景观位置除了降水输入,还有来自较高景观位置水分的输入,降水在坡面发生再分配,因此比坡顶的含水量都要高,尤以沟平地最大。此外,坡顶的潜在蒸散量大于其他部位^[11],坡顶部位的太阳辐射强度较大,风速较高,从而造成这一景观位置上蒸发、蒸腾比其他景观位置强烈的多;有研究表明土壤稳渗率和产流历时数值均随坡位由上而下逐渐增加^[16],因此也会影响含水量。有些研究表明,受地貌、植被、土地类型等因素影响,土壤水分一般表现为:坡下部 > 坡中部 > 坡上部^[17]。但研究表明不同坡位间以坡中部土壤水分最大,这与黄奕龙等的研究结果相一致^[18]。虽然不同景观位置土壤质量含水量存在一定差异,但方差分析表明,各组间差异并不显著,可能是由于不同坡位条件下,组内差异较大,所以组间的差异不显著。

表 5 不同景观位置土壤质量含水量变化(%)

Table 5 Change of soil water in different landscape position

项目 Item	坡顶 Crest	坡上 Upper slope	坡中 Middle slope	坡下 Lower slope	沟平地 Flat
Mean	3.188 ^a	4.307 ^a	5.298 ^a	4.328 ^a	6.053 ^a
中数 Median	3.071	3.312	5.700	3.930	5.963
最小值 Min	2.008	2.093	3.895	1.176	5.076
最大值 Max	4.438	8.726	6.513	8.248	7.121
极差 Range	2.430	6.633	2.618	7.072	2.045
标准差 Standard deviation	1.000	2.348	0.936	2.360	1.025
变异系数 Coefficient of variation	31.358	54.511	17.660	54.517	16.941

* LSD 多重比较 ($p < 0.05$), 相同字母表无显著性差异 Values in each row with the same letter are not significantly ($p < 0.05$, LSD) different among landscape positions

3.3 土壤容重和质量含水量与地形指数的关系及回归预测

地形属性可以刻画、表征汇流特征,也可反映土壤属性^[5]。利用所提取的地形指数,分别和容重及土壤质量含水量进行相关分析。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^[19,20],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。

土壤容重、水分与地形指数的相关分析结果见表 6, 分析表明土壤容重与复合地形指数 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容重与地表汇流和坡度的关系。土壤容重与其它地形指数相关关系不显著。土壤水分与地形指数的相关分析表明, 土壤水分与高程呈现负相关关系, 统计分析表明达到了极显著水平; 一般来说, 随着海拔的升高, 风力加大, 太阳辐射增强, 土壤水分物理蒸发加大; 此外, 海拔与坡位密切相关, 海拔越高, 上坡径流补充却越少^[20,21], 因此土壤水分和高程负相关; 此外, 土壤水分和剖面曲率正相关, 说明其微地形也是影响土壤水分的一个因素。

表 6 土壤容重、水分与地形指数相关矩阵

Table 6 Correlation between bulk density, soil water and terrain indices

	h	β	$\text{COS}\alpha$	$\text{SIN}\alpha$	K_v	K_h	CTI	SPI
容重 Bulk density	0.185	-0.089	-0.034	-0.010	-0.236	-0.148	0.427**	0.052
质量含水量 Soil water	-0.462**	0.009	0.199	-0.046	0.327*	0.038	-0.023	0.008

** 表示在 0.01 水平上显著 Correlation is significant at the 0.01 level; * 表示在 0.05 水平上显著 Correlation is significant at the 0.05 level

分别以土壤容重和土壤水分为因变量, 以相应的地形指数为自变量, 并综合考虑土地利用类型的影响, 将不同的土地利用类型作为虚拟自变量进行回归分析^[22], 采用最小二次方的方法进行拟合, 多元线性逐步回归分析结果如下:

$$BD = 1.149 + 0.016CTI - 0.01K_v \quad R^2 = 0.40 \quad (p < 0.001)$$

$$SWC = 28.866 - 0.022h \quad R^2 = 0.213 \quad (p < 0.001)$$

其中 BD 表示土壤容重, 经多元线性逐步回归最终进入模型的自变量为复合地形指数 CTI 和剖面曲率 K_v , $R^2 = 0.40$ ($p < 0.001$), 从该方程的方差分析结果来看, 残差平方和为 0.168, 回归模型对总方差的解释为 40%; SWC 表示土壤质量含水量, 满足条件进入回归模型的只有高程 h , $R^2 = 0.213$ ($p < 0.001$), 从该方程的方差分析结果来看, 残差平方和为 130.2, 回归模型对总方差的解释为 21.3%。

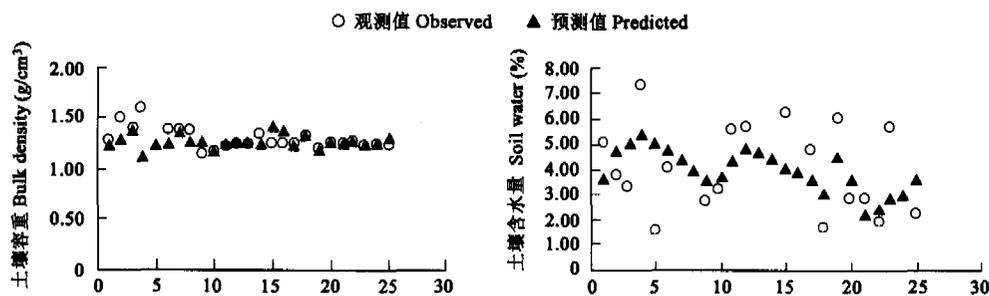


图 2 实测值与预测结果比较

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

应用验证数据集数据分别对土壤容重和土壤水分预测偏差及预测准确性进行检验, 即对模型进行验证, 对于土壤容重的预测结果较为理想, 平均预测误差 ($MPE = 0.009$) 和均方根预测误差 ($RMSPE = 0.127$) 均很小; 而土壤水分预测结果相对较差, 平均预测误差 ($MPE = 0.065$) 和均方根预测误差 ($RMSPE = 1.362$), 这可能与空间变异程度有关, 土壤容重变异很弱, 因而模拟预测准确性较高。另外在验证过程中 (图 2), 土壤水分预测模型平滑效应较强, 预测数据有一个趋中趋势, 预测效果不理想, 须对残差再进行预测以降低预测残差, 提高预测精度, 有待于进一步研究。

4 结论与讨论

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。分析、预测土壤属性空间变异及其动态是区域土地质量评价和可持续土地利用的一个重要组成部分。研究土壤属性在景观尺度上的变异已成为当前许多生态研究热点之一^[23]。土壤属性是土壤质量的重要决定因素, 并最终

影响土地利用和生态过程。利用气候、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^[24],理解生态系统运行机制^[25]和评估未来土地利用变化对土壤属性的影响^[26]至关重要。

研究表明,黄土高原小流域土壤容重变异不大,为弱变异性;土壤水分变异较大,为中等变异。该区表层土壤水分含量普遍偏低,因此在进行植被建设时,要注意土壤水分补给,确保植被在幼苗期水分的供给,提高成活率。此外,由于受采样时间及天气因素等的影响,导致表层土壤水分偏低。采样前期一周内无降水,且天气晴好,耕层土壤水分受其影响较大。没有研究土壤剖面不同层次以及不同时间土壤水分变异,是我们目前研究工作的不足之处,也是下步工作的重点。

气候、母质、地形和生物因素影响土壤的发育形成^[27,28],但气候通常在较大区域尺度上发挥其影响作用。研究所在的小流域土壤母质相对较为均一,因此当地土壤属性变异很大程度上可能受土地利用和地形因素的影响。在研究区小流域,不同土地利用类型对于土壤容重和水分有着重要影响,受人为耕作因素的影响较大,表现出一定的规律性,但方差分析表明,无论是土壤容重还是土壤水分,各土地利用类型之间并无显著性差异。不同景观位置土壤容重变异不大,但方差分析表明,坡顶与坡上、坡中及坡下之间差异达到了显著水平,其它不同坡位之间土壤容重差异不显著。在不同景观位置,土壤质量含水量变异比容重要大,属于中等变异,尤以坡面不同景观位置的变异为大。但方差分析表明,各组间差异并不显著,可能是由于不同坡位条件下,组内差异较大,所以组间的差异不显著。

地形是地表过程的决定性因素,景观中土壤的形成、发展与地表和亚表层水分、沉积物运移密切相关。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。从地形分析入手,提取相关地形指数,研究量化地形特征与土壤性质之间的关系。分析表明土壤容重与复合地形指数 *CTI* 正相关,间接的反映了土壤容重与地表汇流和坡度的关系。土壤水分与高程呈现负相关关系,和剖面曲率正相关。地形指数与土壤容重和土壤水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,表层土壤属性变化主要受土地管理活动的影响。有研究表明^[29],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。

结合地形因子和土地利用类型,进行了多元线性逐步回归,分别对土壤容重和土壤水分进行回归分析。从回归模型和验证数据集验证结果来看,对于空间变异较小的土壤容重,回归模型预测精度较高,而对于土壤水分,预测结果不甚理想,存在一个平滑效应,对于残差解释相对较低,须进一步研究以更好的解释残差。对于回归分析, R^2 均不是很高,但可以接受。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也是不太现实的。

References:

- [1] Florinsky I V, Eilers R G, Manning G R, Fuller L G. Prediction of soil properties by digital terrain modeling. *Environmental Modelling & Software*, 2002, 17:295 ~ 311.
- [2] Qiu Y, Fu B J, Wang J, Chen L D. 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.
- [3] Neil J M, Philip J R. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma*, 1999, 89:67 ~ 94.
- [4] 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. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54 (3):241 ~ 246.
- [5] Moore I D, Gessler P E, Nieslen G A, Peterson G A. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of American Journal*, 1993, 57: 443 ~ 452.
- [6] Gessler P E, Moore I D, Mckenzie N J, Ryan P J. Soil-landscape modeling and spatial prediction of soil attributes. *Int. J. Geographical Information Systems*, 1995, 4:421 ~ 432.
- [7] Tomislav Hengl, Gerard B M, Heuvelink, *et al.* A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma*, 2004,

- 120:75 ~ 93.
- [8] Zheng J Y, Shao M A, Zhang X C. Spatial variation of surface soil bulk density and saturated hydraulic conductivity on slope in loess region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004,18(3):53 ~ 56.
- [9] 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.
- [10] Fu B J, Guo X D, Chen L D, *et al.* Soil nutrient changes due to land use changes in Northern China: a case study in Zunhua County, Hebei Province. *Soil Use and Management*. 2001,17:294 ~ 296.
- [11] He F H, Huang M B, Dang T H. Soil water distribution characteristics in Wangdonggou watershed in gully region of Loess Plateau. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2002,22(4):6 ~ 9.
- [12] Lian G, Guo X D, Fu B J, *et al.* Farmer's perception and response towards grain-for-green program and eco-environment based on participatory rural appraisal. *Acta Ecologica Sinica*, 2005,25(7):1741 ~ 1747.
- [13] Miller P M, Singer M J, Nielsen D R. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills. *Soil Science Society of American Journal*, 1988,52:1133 ~ 1141.
- [14] 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.
- [15] Jiang D S. Soil and water loss and treatment model in Loess Plateau. Beijing: Chinese Water Conservancy and Hydroelectric Power Press, 1997. 106 ~ 122.
- [16] Yuan J P, Lei T W, Guo S Y, *et al.* Study on spatial variation of infiltration rates for small watershed in Loess Plateau. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001,10:88 ~ 92.
- [17] Xu X X, Liu Z W, Gao P, *et al.* The discussion on soil moisture distributional diversity in hilly loess plateau region. *Ecology and Environment*, 2003, 12 (1): 52 ~ 55.
- [18] Huang Y L, Chen L D, Fu B J, *et al.* The influence of topography land use on soil moisture spatial-temporal pattern in the hilly area of loess plateau. *Quaternary Sciences*, 2003,23(3):334 ~ 342.
- [19] Edward Batschelet. *Circular statistics in biology*. London; New York: Academic Press, 1981.
- [20] 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.
- [21] Huang M B, Kang S Z, Li Y S. A comparison of hydrological behaviors of forest and grassland watersheds in gully region of the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 1999,14(3):226 ~ 231.
- [22] Yu J Y, He X H. *Data statistics and analysis, A course in applied SPSS*. Beijing: People's Post & Telecommunications Publishing House, 2003.
- [23] Benning T L & Seastedt T R. Landscape-level interactions between topographic features and nitrogen limitation in tallgrass prairie. *Landscape Ecology*, 1995,10: 337 ~ 348.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Kosmas C, Gerontidis S & Marathanou M. The effect of land use change on soils and vegetation over various lithological formations on Lesvos (Greece). *Catena*, 2000,40: 51 ~ 68.
- [27] Jenny H. *The soil resource: origin and behavior*. Ecological studies 37. Springer-Verlag, New York, 1980.
- [28] Kosmas C, Danalatos N, Moustakas N, *et al.* The impacts of parent material and landscape position on drought and biomass production of wheat under semi-arid conditions. *Soil Technology*, 1993,6:337 ~ 349.
- [29] McKenzie N J and 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:

- [2] 邱扬,傅伯杰,王军,陈利顶.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.
- [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.
- [8] 郑纪勇,邵明安,张兴昌.黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征. *水土保持学报*, 2004,18(3):53 ~ 56.
- [11] 何福红,黄明斌,党廷辉.黄土高原沟壑区小流域土壤水分空间分布特征. *水土保持通报*, 2002,22(4):6 ~ 9.
- [12] 连纳,郭旭东,傅伯杰,等.基于参与性调查的农户对退耕政策及生态环境的认知与响应. *生态学报*, 2005,25(7):1741 ~ 1747.
- [15] 蒋定生.黄土高原水土流失与治理模式.北京:中国水利水电出版社,1997.106 ~ 122.
- [16] 袁建平,雷廷武,郭索彦,蒋定生.黄土丘陵区小流域土壤入渗速率空间变异性. *水利学报*, 2001,10:88 ~ 92.
- [17] 徐学选,刘文兆,高鹏,穆兴民.黄土丘陵区土壤水分空间分布差异性探讨. *生态环境*, 2003, 12(1): 52 ~ 55.
- [18] 黄奕龙,陈利顶,傅伯杰,等.黄土丘陵小流域地形和土地利用对土壤水分时空格局的影响. *第四纪研究*, 2003,23(3):334 ~ 342.
- [20] 邱扬,傅伯杰,王军,陈利顶.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 ~ 592.
- [21] 黄明斌,康绍忠,李玉山.黄土高原沟壑区森林和草地小流域水文行为的比较研究. *自然资源学报*, 1999,14(3):226 ~ 231.
- [22] 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.