

黄土高原沟壑区小流域土壤养分空间变异特征及其影响因素

杨静涵, 刘梦云, 张杰, 张萌萌, 曹润珊, 曹馨悦

(西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 了解表层土壤有机质与全量养分的空间变异规律及其影响因素, 能够为黄土高原生态脆弱带的土壤养分管理提供参考。基于王东沟的93个野外采样点, 综合多种地统计学方法, 分析了土壤养分的空间变异特征及其影响因素。结果表明: 研究区表层土壤养分含量处于中等水平, 空间变异大小依次为全磷 > 全氮 > 有机质 > 全钾, 均由结构性因素主导; 有机质、全氮较全磷、全钾变异尺度小、空间自相关性弱、空间复杂程度高。有机质、全氮的分布格局为南高北低, 主要影响因素包括海拔、坡度、曲率和土地利用; 全磷呈现相反的北高南低分布, 海拔、坡度、土地利用、土壤机械组成和人类活动对其影响较大; 全钾则为内部高四周低, 分布较破碎, 坡向和土壤机械组成作用较强。据此建立了9个环境因子与土壤养分之间的回归预测模型, 以期研究区土壤资源的可持续利用提供数据支持。

关键词: 土壤养分; 空间变异; 地统计学; 影响因素; 黄土高原沟壑区

土壤有机质和全量氮磷钾既是植物生长必需的营养来源, 也是评价土壤质量的重要指标, 对其空间变异规律及其影响因素的研究可作为土壤资源科学管理的依据, 用于指导精准农业。同时, 由于气候、母质、植被、地形及人类活动等因素的综合作用, 土壤养分存在高度的空间变异, 成为不均一变化的时空连续体^[1]。自20世纪80年代以来, 地统计学方法被引入到土壤科学中, 开始通过半方差函数和插值技术来探明土壤养分的空间变异特征, 弥补了经典统计学方法在空间体系下的缺陷, 被越来越多的学者所推崇^[2]。尤其是近年来, 结合地统计学、遥感和地理信息系统, 各个区域各个尺度的土壤养分空间变异研究取得了众多成果^[3-15]。其中, 大尺度的工作能够为宏观决策提供理论依据, 如吕真真等^[3]研究五省多县市土壤有机质、全氮与速效养分的空间变异规律, 评价了环渤海沿海区域的土壤肥力情况; 赵明松等^[4]研究江苏省近20年土壤有机质的时空变异特征, 阐明了农业生产管理措施和土地利用变化的重要影响。此外, 逐渐深入的小尺度研究能够指导具体的生产活动, 如Wang等^[5]揭示了地形与植被对山西太岳山流域土壤养分空间变异的影响机制。但整体来看, 当前研究多利用半方差函数来探讨空间变异规律, 方法较为单一, 从不同角度结合多种分析方法的研究仍然较少。

黄土高原沟壑区土壤侵蚀严重、生态环境脆弱, 探明流域尺度的土壤养分空间变异

收稿日期: 2019-01-24; 修订日期: 2019-07-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501703); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2017JZ008); 陕西省重点研发计划(2017NY-063)

作者简介: 杨静涵(1995-), 女, 河南灵宝人, 硕士, 主要从事土地资源与空间信息技术研究。

E-mail: yangjinghan_gis@163.com

通讯作者: 刘梦云(1973-), 女, 陕西蒲城人, 博士, 副教授, 主要从事土地生态恢复及地理信息系统研究。

E-mail: lmy471993@163.com

规律是农户合理施肥和水土流失治理的关键。但在王东沟水土流失综合治理试验示范区,已有研究多处于描述各养分要素的空间分布特征^[16,17],对其内部空间相关程度的探讨不够深入,且缺少开展治理以来的研究。因此,本文选择王东沟流域为研究区,通过收集资料、野外详查和采样分析,运用经典统计学、地统计学与GIS方法,揭示土壤表层有机质与全量氮磷钾的空间分异规律,探讨地形、土地利用、土壤机械组成和人类活动等环境因子的影响,并建立回归预测方程,以期为该流域的生态恢复重建工作提供科学依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

王东沟流域地处陕西省长武县西部的陕甘两省分界处(107°40'~107°42'E, 35°12'~35°16'N),土地面积9.43 km²,海拔984~1251 m,隶属黄土高原沟壑区中部的长武塬。该地区为暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温9.1 °C,年总日照2226 h,年平均降水量578 mm,雨量集中在夏秋两季,年平均无霜期171 d。主要土壤类型为黑垆土,母质类型为深厚的中壤质马兰黄土。塬面是地势平坦的粮果种植区,塬坡主要以林草措施进行水土流失治理。

1.2 数据来源与预处理

在考虑科学性、代表性、均质性等原则的同时,结合研究区主要植被和地形条件,于2016年7月使用直径3 cm的土钻采集表层(0~10 cm)土壤样品93个(图1)。由于塬坡处地形、土地利用等情况较塬面上复杂,在布设样点时适当缩小间距。采样点均以

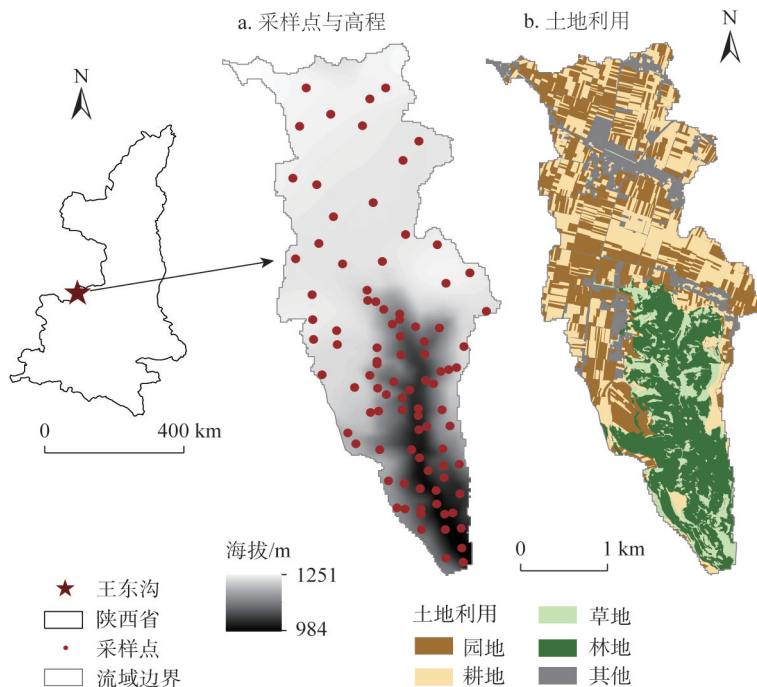


图1 研究区采样点分布、海拔与土地利用

Fig. 1 Distribution of sample points, altitude, and land use types in the study area

GPS定位,同时记录海拔高度、植被种类等信息。样品在实验室经风干、磨细、过筛后进行指标测定,其中有机质含量采用重铬酸钾外加热氧化法,全氮含量采用半微量凯氏定氮法,全磷含量采用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法,全钾含量采用氢氧化钠熔融—火焰光度计法,土壤粒径采用激光粒度仪法。所用激光粒度仪为马尔文公司生产的Master-size 2000型,结果以美国农业部提出的USDA制分类输出,分为黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.050 mm)和砂粒(0.050~2.000 mm)。对研究区1:5万地形图数字化得到10 m分辨率的数字高程模型,进而提取各地形因子;对研究区2016年正射影像(空间分辨率为0.48 m)进行目视解译得到土地利用数据。

采用三倍标准差法进行异常值剔除,识别到的异常值使用剔除后的最大最小值替代,以保持原始样本量^[6]。使用SPSS 22.0进行正态分布检验、转换与统计分析;采用GS+ 9.0和GeoDa 0.9.5进行地统计学与空间回归分析;借助ArcGIS 10.2进行地形因子提取、Kriging插值等操作。

1.3 地统计学分析方法

1.3.1 半方差函数

土壤养分含量同时具有随机性和结构性特征,可用半方差函数对其进行空间连续变异的描述,计算公式^[7]如下:

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

式中: $\gamma(h)$ 是间距为 h 时的半方差; h 是间隔距离(m); $N(h)$ 是间距为 h 时的样本点对总数(个); $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别是对应点在 x_i 和 $x_i + h$ 处的实测值($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

在半方差分析得到的参数中,基台值表示空间总变异,块金值表示随机变异,变程表示空间变异的尺度范围,块基比描述随机变异的占比情况,反映土壤养分含量的空间相关程度。一般认为块基比 $\leq 25\%$ 时空间相关性较强,在 $25\% \sim 75\%$ 之间时空间相关性中等, $\geq 75\%$ 时空间相关性较弱;且块基比 $< 50\%$ 时空间变异由结构性因素主导, $> 50\%$ 时由随机性因素主导^[8]。

1.3.2 分形维数

土壤养分含量具有不同的分形特征,可用分形维数对其进行空间异质性的度量,计算公式^[7]如下:

$$F_D = 2 - H, H = \frac{1}{2} \lg \gamma(h) \propto \lg h \quad (2)$$

式中: H 是双对数关系在间距 h 范围内线性回归直线斜率的一半; F_D 是分形维数,取值范围为(1, 2]。

F_D 无量纲,可通过比较不同土壤养分要素的 F_D 值,来判断其空间异质程度的大小。斜率越大, F_D 值越小,表示结构性越强,空间连续性越好;反之斜率越小, F_D 值越大,表示随机性越强,空间分布越复杂。

1.3.3 全局Moran's I 指数

土壤养分含量在空间位置上相互依赖,可用全局Moran's I 指数探明其空间自相关程度,计算公式^[8]如下:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中： x_i 和 x_j 分别是位置 i 和 j 处的实测值（ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ）； \bar{x} 是平均值（ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ）； w_{ij} 是空间权重矩阵； n 是样本数（个）。

全局Moran's I 指数范围为 $[-1, 1]$ ，取值为正表示空间正相关，取值为负表示空间负相关；绝对值越接近1，空间自相关性越强，越接近0，越趋向于随机分布。进行标准化处理后可判断相关性的显著程度， ± 1.96 、 ± 2.58 是空间自相关显著、极显著的分界值。

对传统Moran's I 指数进行改造提出了双变量Moran's I 指数，可用来解释空间中土壤养分含量与其相邻位置环境因子的相关关系，改造后表达式^[18]如下：

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{y})(x_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

式中： x_i 和 x_j 分别是位置 i 和 j 处相应的环境因子值； \bar{y} 是中心要素平均值，其他不变，同样可采用标准化 Z 值对其显著性进行表述。

1.4 空间回归分析方法

空间回归分析能够为土壤养分选择合适的拟合模型。拟合模型主要有经典回归模型、空间滞后模型和空间误差模型，其选择依据是经典回归计算得到的拉格朗日算子。首先比较滞后型拉格朗日算子和误差型拉格朗日算子的显著性，若只有一个显著，则选择拉格朗日算子显著的模型；若都不显著，则选择经典回归模型；若都显著，则进一步比较稳健型的拉格朗日算子，选择稳健型格朗日算子显著的模型^[19]，一般形式^[19]为：

$$y = \rho w_1 y + x\beta + \lambda w_2 u + \varepsilon \quad (5)$$

式中： y 是被解释变量； x 是解释变量； ρ 是空间滞后项 $w_1 y$ 的系数； β 是与解释变量 x 相关的参数向量； λ 是空间误差项 $w_2 u$ 的回归系数； w_1 、 w_2 是与被解释变量和残差的空间自回归过程相关的权重矩阵； ε 是误差项。

当 $\rho \neq 0$ 、 $\beta \neq 0$ 、 $\lambda = 0$ 时，为空间滞后模型，该模型反映被解释变量不仅受到本区域解释变量的影响，还受到了邻近区域被解释变量的影响；当 $\rho = 0$ 、 $\beta \neq 0$ 、 $\lambda \neq 0$ 时，为空间误差模型，该模型反映被解释变量同时受到本区域的解释变量、邻近区域的被解释变量和解释变量的影响；当 $\rho = 0$ 、 $\beta \neq 0$ 、 $\lambda = 0$ 时，为经典回归模型，该模型反映被解释变量受本区域解释变量的影响。

2 结果分析

2.1 土壤养分的描述统计分析

对比研究区表层土壤各养分均值（表1）与全国第二次土壤普查养分分级标准^[20]，可以发现有机质含量处于中下（四级）水平，全氮、全磷、全钾含量处于中上（三级）水平。根据Nielsen标准^[10]，四个养分指标均属中等程度变异，土壤养分在各样点间存在一定差异，其中有机质、全氮的变异系数高于全磷、全钾，离散程度较高。除全磷外，有机质、全氮、全钾进行Box-Cox转换后服从正态分布，满足半变异函数计算与Kriging插值的要求^[9]。

2.2 土壤养分的地统计学分析

运用GS+软件计算土壤养分的全向半方差函数，以决定系数接近于1、残差趋向于0

表1 土壤养分的描述统计特征

Table 1 Descriptive statistical characteristics of soil nutrients

土壤养分	最大值/ (g · kg ⁻¹)	最小值/ (g · kg ⁻¹)	均值/ (g · kg ⁻¹)	标准差	变异 系数/%	正态分布 转换方法
有机质	39.99	7.82	17.06	6.77	39.70	Box-Cox
全氮	2.11	0.52	1.02	0.35	34.73	Box-Cox
全磷	1.35	0.51	0.77	0.15	20.17	N
全钾	33.83	15.73	19.60	2.70	13.80	Box-Cox

注: N代表数据符合正态分布, 无需转换。

的标准进行最优理论模型的选择, 发现有机质、全氮符合球状模型, 全磷、全钾符合指数模型 (表2), 4个半方差函数的决定系数均大于0.6, 理论模型拟合具有一定合理性。土壤表层有机质和全量氮磷钾均具有一定的基台值, 说明受地形、土壤、植被和人类活动等因素所控制; 块金值均为正值, 说明存在随机误差。由块基比可知, 各养分指标由结构因素主导, 而受随机因素的影响较小; 除全钾是强烈的空间相关性之外, 有机质、全氮、全磷均属中等程度的空间相关性。其中有机质与全氮的相关性极显著 ($R^2=0.86$), 呈现出较一致的空间变异规律, 全磷的空间异质性最大, 全钾相对前三者较稳定。土壤养分只在变程以内具有空间相关性, 有机质、全氮的变程较小, 说明其空间分布更趋向于破碎, 空间自相关的范围较全磷、全钾更小。

表2 土壤养分的半方差模型参数、分形维数及全局 Moran's I 指数

Table 2 Semi-variance theoretical model parameters, global Moran's I index and fractal dimension of soil nutrients

土壤养分	理论模型	块金值	基台值	块基比/%	变程/m	R^2	分形维数	全局 Moran's I	Z
有机质	Spherical	0.106	0.389	27.27	388	0.613	1.873	0.222**	2.904
全氮	Spherical	0.021	0.077	27.73	370	0.654	1.882	0.236**	3.076
全磷	Exponential	0.009	0.025	37.22	1941	0.763	1.826	0.324**	4.106
全钾	Exponential	0.001	0.010	12.50	1062	0.876	1.811	0.278**	3.579

注: **代表在0.01水平上显著 ($|Z|>2.58$), 下同。

表2中, 全局 Moran's I 指数表明土壤养分间存在极显著的空间自相关 (Moran's I > 0.05, Z > 2.58), 呈聚集分布。其中全磷的空间自相关性最强, 全钾稍弱, 最后是有有机质和全氮, 且两者较为接近。分形维数是有机质、全氮偏高, 说明空间格局较复杂, 对尺度的依赖性较大; 尽管全磷的空间异质性较大, 但其分形维数偏低, 说明全磷的空间连续性较好, 结构因素影响较大; 全钾的分形维数最小, 说明其空间依赖性强, 这与全钾空间结构比最大、具有强空间相关性是一致的。

半方差函数通过块基比揭示全钾的空间相关程度高于其他三者, 通过变程反映全磷、全钾空间变异的尺度范围大于有机质、全氮, 其一系列参数能够为 Kriging 插值提供依据, 进而描述土壤养分的空间格局, 但无法对空间相关的显著性和正负性提供统计学检验。全局 Moran's I 指数从相关性角度描述四种养分在空间内的聚集, 采用随机条件下近似正态分布假设的标准差对其标准化, 以置信区间双侧检验阈值为界限, 得出土壤养分均呈极显著正相关的结论。半方差函数与全局 Moran's I 指数在对全磷的描述上不完全统一, 引入分形维数进行印证。作为一种无量纲的综合指标, 通过直接对比其值大小, 能够从空间复杂性和相似性的角度比较养分的空间异质性结构, 全磷的分形维数较有机

质、全氮低,肯定了全磷受结构性因素影响相对较大的分析。三种地统计学方法从不同角度出发,相互印证,更客观全面地描述土壤养分的空间结构特点。

2.3 土壤养分的空间分布格局

基于半方差模型参数插值可获得研究区土壤表层养分含量的空间分布(图2),与采样点原始值对比,插值结果存在一定的压缩,但仍能表述养分的分布规律。流域有机质与全氮分布规律较一致,低值分布在南部海拔最低处,北部塬面含量中等;高值分布在中部偏南的塬坡处,呈现出由西北、东南方向向内逐渐增加而南部变化较北部快的格局。全磷分布规律与有机质、全氮相反,低值分布在南部塬坡处,高值分布在北部塬面靠近居民点处,呈现出由高值区向西北、东南方向递减的格局。全钾从流域四周向内部增加,流域中部含量较高,各个级别呈斑块状分布,沿某一方向变化的规律性不强。

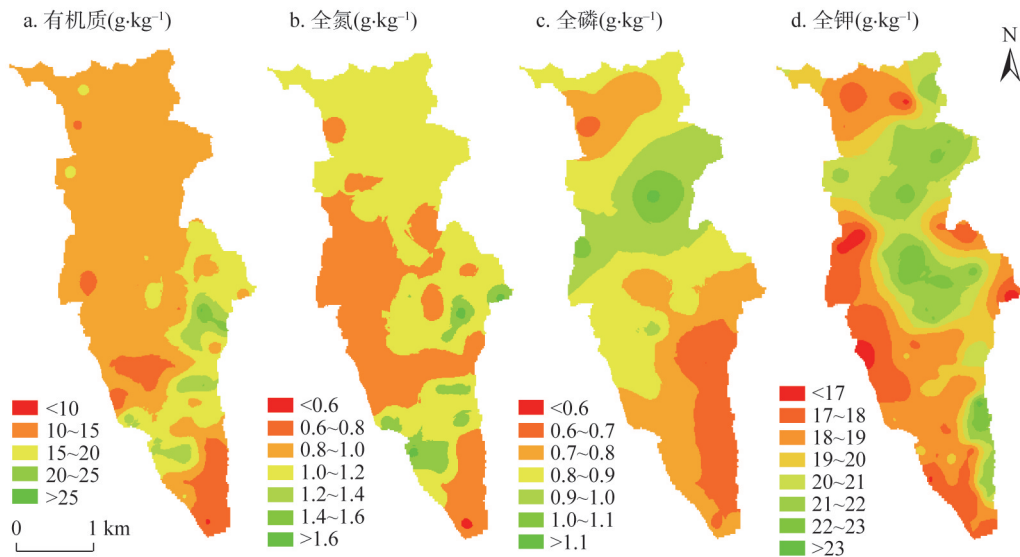


图2 土壤养分含量的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil nutrients in the gully region of the Loess Plateau

2.4 土壤养分与环境因子的关系

在初步揭示结构性因素对土壤养分空间变异起主导作用的基础上,选取高程、坡度、坡向、平面曲率、剖面曲率、黏粒、砂粒、NDVI、距居民点距离共9个环境因子,结合土壤养分进行双变量Moran's *I*分析(表3),结果显示所选因子不同程度影响养分分布。其中地形方面,有机质、全氮与除坡向外的其他地形因子呈负相关,且与坡度、平面曲率、剖面曲率达到显著水平;全磷与高程极显著正相关,与坡度极显著负相关;全钾与坡向显著正相关。机械组成方面,有机质、全氮、全钾与黏粒含量正相关,与砂粒含量负相关;全磷呈现显著相反关系。土地利用以NDVI量化指代,发现其与四种养分要素均呈显著正相关,且方差分析结果显示全磷在不同土地利用下的组间差异达到极显著水平。以距各居民区中心的最短距离表征人类活动强度,全磷呈现极显著正相关。

统计各地形带的插值结果(表4),定量研究不同地形条件下的土壤养分分布情况。本文未针对曲率因子进行地形带的划分,但易发现除全钾与剖面曲率正相关外,其余均

表3 土壤养分与环境因子的双变量 Moran's *I* 指数Table 3 Bivariate Moran's *I* index between soil nutrients and environmental factors

土壤养分	高程	坡度	坡向	平面曲率	剖面曲率	黏粒	砂粒	植被指数	距居民点距离
有机质	-0.095	-0.122*	0.007	-0.210*	-0.154*	0.062	-0.036	0.166*	-0.061
全氮	-0.088	-0.130*	0.049	-0.239*	-0.204*	0.088	-0.049	0.180*	-0.078
全磷	0.448**	-0.359**	-0.092	-0.101	-0.116	-0.164*	0.188*	0.160*	0.356**
全钾	0.009	0.049	0.291*	-0.089	0.033	0.184*	-0.093	0.151*	0.052

注: *代表在0.05水平上显著 ($|Z| > 1.96$)。

与曲率因子呈现不同程度的负相关, 认为坡度变化的越快, 养分越不容易积累。不同海拔带间温度、湿度的差异影响土壤中化学元素的积累、迁移与分解, 进而导致土壤养分的变化^[21]。以 100 m 为间隔划分海拔带, 研究区大部分位于大于 1200 m 的等级 (67.4%), 其余等级面积相差不大。随着海拔升高, 有机质、全氮含量呈现先增大后减小的趋势, 在 1000~1200 m 处含量较高且变化较大; 全磷、全钾含量随海拔高度增加而增大, 在大于 1200 m 的区域最大。坡度影响物质堆移与水热分配, 随之导致土壤养分的差异^[21]。根据耕地坡度分级标准划分, 研究区以小于 2° 的坡度为主 (56.0%), 其余等级均匀分布。有机质、全氮在大于 6° 的区域含量较高且分布集中; 全磷随坡度增加呈减小趋势; 全钾在不同坡度级别间含量相差不大。不同坡向处雨热条件不等, 间接影响土壤含水量与微生物活动, 表现出养分含量的不同^[21]。划分坡向为阴坡 (0~45°, 315~360°)、半阳坡 (45~135°)、阳坡 (135~225°)、半阴坡 (225~315°)^[12]。有机质、全氮、全磷含量在坡向带上的变化规律不明显; 全钾在阴坡处含量较低。

研究区土地利用主要以园地 (29.34%)、耕地 (28.75%)、林地 (21.86%)、草地 (7.78%) 为主, 其间管理措施与凋落物量的差异改变着土壤养分。对插值结果中各土地利用方式下的养分含量进行统计 (图 3), 可知林地的有机质、全氮含量最高, 耕地、园地的全磷含量高于草地、林地, 全钾含量则无明显规律。

表4 不同地形带下土壤养分含量的分布特征统计

Table 4 Distribution characteristics of soil nutrients in different topographical zones (g·kg⁻¹)

		有机质	全氮	全磷	全钾
高程/m	≤1000	10.95±0.33	0.67±0.01	0.70±0.01	18.32±0.44
	1000~1100	15.64±3.68	0.94±0.20	0.69±0.04	18.90±1.12
	1100~1200	16.76±3.41	1.01±0.18	0.74±0.07	19.55±1.49
	>1200	15.25±1.25	0.93±0.07	0.86±0.08	19.65±1.55
坡度/(°)	≤2	15.29±1.18	0.93±0.06	0.87±0.08	19.63±1.53
	2~6	15.14±2.21	0.94±0.13	0.80±0.07	19.25±1.57
	6~15	15.80±3.22	0.96±0.18	0.73±0.07	19.65±1.48
	15~25	16.38±3.51	0.99±0.19	0.73±0.07	19.34±1.40
	>25	15.81±3.93	1.00±0.20	0.71±0.07	19.00±1.16
坡向	阴坡	15.32±2.24	0.92±0.12	0.84±0.09	18.39±0.97
	半阳坡	15.53±2.40	0.93±0.11	0.82±0.09	19.25±1.44
	阳坡	15.59±2.27	0.96±0.13	0.81±0.11	19.93±1.54
	半阴坡	15.67±2.62	1.02±0.17	0.82±0.14	19.85±1.12

2.5 土壤养分与环境因子的回归分析

为进一步说明所选环境因子对土壤养分的影响,采用空间回归分析来选择合适的拟合模型。本文中(表5),有机质、全氮对应的滞后型拉格朗日算子和误差型拉格朗日算子的 P 值均小于0.05,进而比较稳健型拉格朗日算子,均是稳健型误差拉格朗日算子更为显著,故选择空间误差模型;全磷、全钾对应的拉格朗日算子 P 值均大于0.05,故选择经典回归模型。

对各环境因子进行标准化处理,与四种土壤表层养分按照相应模型进行回归拟合,得到如下表达式:

$$SOM = 30.42 - 12.98x_1 - 5.01x_2 + 1.96x_3 - 7.46x_4 - 9.25x_5 + 4.98x_6 - 19.95x_7 + 16.26x_8 - 12.73x_9 + 0.37w_\mu \quad (6)$$

$$TN = 1.43 - 0.41x_1 - 0.08x_2 + 0.01x_3 - 0.29x_4 - 0.35x_5 + 1.76x_6 - 0.02x_7 + 0.44x_8 - 0.40x_9 + 0.15w_\mu \quad (7)$$

$$TP = 1.09 + 0.22x_1 - 0.12x_2 - 0.09x_3 - 0.01x_4 - 0.02x_5 - 1.67x_6 + 0.70x_7 + 0.19x_8 + 0.02x_9 \quad (8)$$

$$TK = 15.72 + 0.98x_1 + 1.71x_2 + 2.29x_3 - 0.45x_4 + 0.02x_5 + 16.95x_6 - 6.35x_7 + 4.64x_8 + 0.63x_9 \quad (9)$$

式中: SOM 、 TN 、 TP 、 TK 分别为土壤表层有机质、全氮、全磷、全钾含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); x_1 为海拔; x_2 为坡度; x_3 为坡向; x_4 为平面曲率; x_5 为剖面曲率; x_6 为黏粒含量; x_7 为砂粒含量; x_8 为NDVI; x_9 为距居民点距离; w_μ 为空间残差矩阵。

表5 土壤养分回归分析算法的检验和预测模型选择

Table 5 Test of regression algorithm and choice of forecast model in soil nutrients

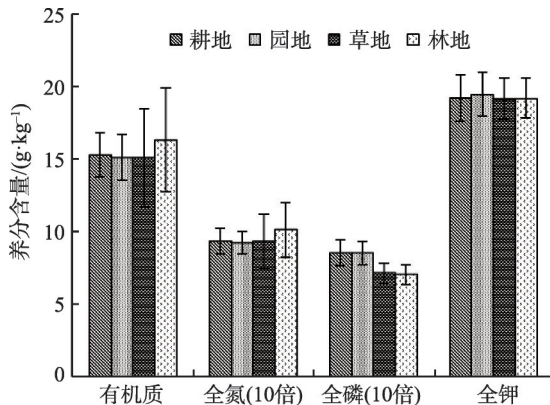
土壤养分	滞后型	误差型	稳健型滞后	稳健型误差	模型选择
	拉格朗日算子	拉格朗日算子	拉格朗日算子	拉格朗日算子	
有机质	7.53(0.006)	9.79(0.002)	1.61(0.205)	3.87(0.038)	SEM
全氮	5.91(0.015)	8.09(0.004)	1.29(0.256)	3.47(0.042)	SEM
全磷	2.36(0.124)	1.42(0.234)	1.43(0.232)	0.48(0.489)	OLS
全钾	1.49(0.222)	0.99(0.319)	0.77(0.379)	0.27(0.602)	OLS

注:括号内数据为 P 值。SEM:空间误差模型;OLS:经典回归模型。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 王东沟流域表层土壤有机质的平均含量属中等偏下水平,全量氮磷钾含量属中等偏上水平。土壤养分的空间变异大小依次为全磷>全氮>有机质>全钾,均由结构性因素主导。有机质、全氮含量相比全磷、全钾含量,变异尺度较小,空间自相关性较弱,空间复杂程度较高,随机因素对其空间变异的影响不可忽视,在对该区域有机质、全氮含量进行研究时可适当缩短采样间距。



注:为统一显示,全氮全磷值扩大十倍。

图3 不同土地利用下土壤养分的分布特征统计

Fig. 3 Distribution characteristics of soil nutrients in different land use types

(2) 有机质、全氮含量的空间分布总体上为南高北低,南部变化较北部快,主要受海拔、坡度、曲率和土地利用的影响,在海拔1000~1200 m、坡度大于6°处的林地含量较高;全磷含量呈现相反的北高南低趋势,环境因子中海拔、坡度、土地利用、土壤机械组成和人类活动的作用更多,在海拔较高、坡度较小、黏粒含量较低的农用地含量较高;全钾含量为斑块状分布,内部高四周低,坡向、土壤机械组成对其空间分布的影响较大,阴坡处含量较低。

(3) 所选环境因子与有机质、全氮含量的空间误差模型和与全磷、全钾含量的经典回归模型,能够配合插值结果为研究区土壤养分精准管理提供理论依据和数据支持,同时,今后需要将更多相关的环境因子纳入考虑以进一步探讨。

3.2 讨论

本文显示王东沟表层土壤养分含量处于中等水平,与2002年王旭刚等^[22]在该流域的研究相比,有机质、全氮和全磷含量有所提升,能够肯定生态治理措施对土壤养分的改善作用;土壤钾素的主要来源是母质风化,推测全钾含量稍有下降的原因是土壤风化程度的减弱。文中半变异函数、分形维数和全局Moran's *I*指数三种分析方法的结果较一致,土壤养分的空间变异由结构性因素主导,其中全钾的变异程度最弱,与刘志鹏^[23]、刘文杰等^[23]的研究结论相吻合,推测与黄土矿物组成较好的均一性有关。有机质、全氮含量相对于全磷、全钾含量的空间自相关性较弱,变程较小,分布更趋向于破碎。与王军等^[24]、Moore等^[25]在黄土高原区得到的磷素含量较氮素、有机质含量空间状态更加稳定的结论一致,研究区涉及全钾的相关文章较少,这里未做对比论证。究其原因,可能是伴随着水土流失治理与农业结构调整,王东沟从开始的以农耕地为主逐渐出现耕地向园地、草地向林地流转的现象^[26],土地利用方式不断优化,园地、林地的凋落物与腐殖质高于耕地和草地,植被分布格局的改变导致有机质的空间结构复杂且自相关性较弱;土壤碳氮在生物地球化学过程中紧密联系^[11],全氮与有机质空间结构较相似,且氮素易流失淋溶^[27],使得全氮含量的空间变异程度也较高。而全磷含量更倾向于受土壤母质中矿物的控制,全钾含量受黄土本身特性的影响,较之前两者更加稳定,空间自相关性较高。

整个流域上,有机质、全氮含量的分布规律较为相似。前人研究证实各环境因子与其分布存在一定的联系,但具体结论不一致,宋轩等^[18]认为海拔是主要影响因素,董莉丽等^[28]的研究则表现为退耕年限。本文认为海拔、坡度、曲率和土地利用可能是影响有机质和全氮含量空间分布的主要结构因子。海拔适中、坡度较大、地形变化复杂的塬坡上为开展水土流失治理多进行植树造林,多年积累的枯枝落叶使腐殖化作用明显,有机质含量增高,矿化释放的氮随之升高,草地较林地保水保肥能力差、腐殖质少而肥力较低^[29];海拔较高、坡度较小、地形单一的塬面上多为粮果种植区,人为干扰与作物吸收降低了有机质与全氮的含量。全磷含量的分布规律与有机质、全氮含量相反,研究发现海拔、坡度、土地利用、土壤机械组成和人类活动的影响较大。海拔越高、坡度越小的区域越利于农业生产,施用磷肥多,作物对磷的吸收利用效率又较低^[29],造成全磷含量较高;中坡陡坡处无外源磷肥补充,磷素随泥沙流失而含量较低;土壤机械组成差异又导致肥力保护机制和矿化分解速率的不同,对全磷含量产生影响^[14]。这与郑剑英等^[30]的研究在除海拔负相关以外的部分一致,推测针对海拔观点不同是由于其研究区沟底平整而王东沟塬面平整,导致同一海拔处不同的用地方式,侧面反映土壤全磷含量受多个因

子的综合作用影响。全钾含量在流域内分布的规律性稍弱,整体呈较为破碎的斑块状,研究认为坡向和土壤机械组成对其影响较大。坡向通过土壤水分影响溶质运移、通气状况和根系生长,进而作用于土壤钾素的释放、运移和吸收^[29];此外,黄土中的主要黏土矿物富含钾,土壤机械组成也影响土壤的全钾含量^[13],两者的影响在包耀贤等^[31]、吴若玉^[32]的研究中均有体现。

本文未量化各环境因子对表层土壤养分含量的影响,故空间回归分析时将其全部纳入,选择最佳的拟合模型来建立环境因子与土壤养分含量的定量关系。其中有机质、全氮选择的空同误差模型是在拟合之后利用回归残差的滞后变量来推算空间因素引起的回归误差,此时的空同依赖性大多是因为忽略了某些变量而产生的,反映出所选的环境因子不够全面,比如表征自然地理条件综合变化的土壤类型、人为干预作用产生的施肥水平等未纳入考虑,还需进一步研究分析。

参考文献(References):

- [1] 姜秋香,付强,王子龙.空间变异理论在土壤特性分析中的应用研究进展.水土保持研究,2008,15(1):250-253. [JIANG Q X, FU Q, WANG Z L. Research progress of the spatial variability theory in application to soil characteristic analysis. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(1): 250-253.]
- [2] 李艳,史舟,徐建明,等.地统计学在土壤科学中的应用及展望.水土保持学报,2003,17(1):178-182. [LI Y, SHI Z, XU J M, et al. Utilization and perspective of geostatistics in soil sciences. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(1): 178-182.]
- [3] 吕真真,刘广明,杨劲松,等.环渤海沿海区域土壤养分空间变异及分布格局.土壤学报,2014,51(5):944-952. [LYU Z Z, LIU G M, YANG J S, et al. Spatial variability and distribution pattern of soil nutrients in Bohai coastal area. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(5): 944-952.]
- [4] 赵明松,张甘霖,吴运金,等.江苏省土壤有机质含量时空变异特征及驱动力研究.土壤学报,2014,51(3):448-458. [ZHAO M S, ZHANG G L, WU Y J, et al. Temporal and spatial variability of soil organic matter and its driving force in Jiangsu province, China. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(3): 448-458.]
- [5] WANG T, KANG F, HAN H, et al. Spatial variability of organic carbon and total nitrogen in the soils of a subalpine forested catchment at Mt. Taiyue, China. Catena, 2017, 155: 41-52.
- [6] 陈涛,常庆瑞,刘京,等.黄土高原南麓县域耕地土壤速效养分时空变异.生态学报,2013,33(2):554-564. [CHEN T, CHANG Q R, LIU J, et al. Temporal and spatial variability of soil available nutrients in arable lands of Heyang county in South Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 554-564.]
- [7] 陈洋,齐雁冰,王茵茵,等.多重密度布点对土壤有机质空间特性的解析.自然资源学报,2016,31(12):2099-2110. [CHEN Y, QI Y B, WANG Y Y, et al. Spatial characters of soil organic matter with multi-sampling density. Journal of Natural Resources, 2016, 31(12): 2099-2110.]
- [8] 李龙,姚云峰,秦富仓,等.赤峰市黄花甸子流域土壤有机碳含量的空间变异特征研究.环境科学学报,2014,34(3):742-748. [LI L, YAO Y F, QIN F C, et al. Spatial variations of organic carbon of Huanghuadianzi Watershed in Chifeng. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(3): 742-748.]
- [9] 宋根鑫.县域农田养分动态监测的方法优化和应用研究.杭州:浙江大学,2014. [SONG G X. County farmland nutrient dynamic monitoring method optimization and application research. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.]
- [10] 于雷,魏东,王惠霞,等.江汉平原县域尺度土壤有机质空间变异特征与合理采样数研究.自然资源学报,2016,31(5):855-863. [YU L, WEI D, WANG H X, et al. Spatial variability of soil organic matter and appropriate number of samples on county scale in Jianghan Plain. Journal of Natural Resources, 2016, 31(5): 855-863.]
- [11] 俞月凤,何铁光,宋同清,等.桂西北喀斯特地区石灰土养分空间变异特征.生态学报,2018,38(8):2906-2914. [YU Y F, HE T G, SONG T Q, et al. Spatial variability of limestone soil nutrients in a karst area of Northwestern Guangxi. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(8): 2906-2914.]
- [12] 邓欧平,周稀,黄萍萍,等.川中紫色丘区土壤养分空间分异与地形因子相关性研究.资源科学,2013,35(12):2434-2443. [DENG O P, ZHOU X, HUANG P P, et al. Correlations between spatial variability of soil nutrients and topographic factors in the purple hilly region of Sichuan. Resources Science, 2013, 35(12): 2434-2443.]

- [13] 刘志鹏. 黄土高原地区土壤养分的空间分布及其影响因素. 杨凌: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2013. [LIU Z P. Spatial distribution of soil nutrients and the impact factors across the Loess Plateau of China. Yangling: Institute of Soil and Water Conservation of Chinese Academy of Sciences, 2013.]
- [14] 赵明松, 张甘霖, 王德彩, 等. 徐淮黄泛平原土壤有机质空间变异特征及主控因素分析. 土壤学报, 2013, 50(1): 1-11. [ZHAO M S, ZHANG G L, WANG D C, et al. Spatial variability of soil organic matter and its dominating factors in Xuhuai Alluvial Plain. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(1): 1-11.]
- [15] 江叶枫, 孙凯, 郭熙, 等. 南方红壤区不同侵蚀程度下土壤有机质空间变异的影响因素研究. 自然资源学报, 2018, 33(1): 149-160. [JIANG Y F, SUN K, GUO X, et al. Spatial variability of organic matter and its influencing factors in red soil with different erosion degrees in South China. Journal of Natural Resources, 2018, 33(1): 149-160.]
- [16] 郭胜利, 车升国, 梁伟, 等. 黄土高原沟壑区王东沟小流域土壤有机碳空间分布. 生态学报, 2010, 30(1): 52-59. [GUO S L, CHE S G, LIANG W, et al. SOC spatial distribution at small Wangdonggou watershed in gully region of the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(1): 52-59.]
- [17] 郭胜利, 车升国, 梁伟, 等. 小流域土壤磷的积累特征及其环境效应: 以黄土高原沟壑区王东沟小流域为例. 自然资源学报, 2009, 24(7): 1171-1180. [GUO S L, CHE S G, LIANG W, et al. Phosphorus accumulation in soils of a catchment on the Loess Plateau and potential environmental implications. Journal of Natural Resources, 2009, 24(7): 1171-1180.]
- [18] 宋轩, 李立东, 寇长林, 等. 黄河小流域土壤养分分布及其与地形的关系. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3163-3168. [SONG X, LI L D, KOU C L, et al. Soil nutrient distribution and its relations with topography in Huangshui River Drainage Basin. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(12): 3163-3168.]
- [19] 霍霄妮, 李红, 孙丹峰, 等. 北京耕地土壤重金属空间自回归模型及影响因素. 农业工程学报, 2010, 26(5): 78-82. [HUO X N, LI H, SUN D F, et al. Spatial autogression model for heavy metals in cultivated soils of Beijing. Transactions of the CASE, 2010, 26(5): 78-82.]
- [20] 国家环境保护总局. 土壤环境质量标准. 北京: 中国标准出版社, 1995. [National Environmental Protection Agency. Environmental Quality Standard for Soils. Beijing: China Standards Press, 1995.]
- [21] 刘芳, 张红旗. 伊犁新垦区土地利用和地形对表层土壤养分变异性的影响. 资源科学, 2012, 34(4): 758-768. [LIU F, ZHANG H Q. Effects of land use and topographic factors on the variability of soil nutrients in newly reclaimed area in Yili. Resources Science, 2012, 34(4): 758-768.]
- [22] 王旭刚, 郝明德, 张春霞, 等. 王东沟小流域土壤养分变化研究. 水土保持研究, 2003, 10(1): 81-84. [WANG X G, HAO M D, ZHANG C X, et al. Study on soil nutrient variation of Wangdonggou Small Valley. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(1): 81-84.]
- [23] 刘文杰, 陈生云, 胡凤祖, 等. 疏勒河上游土壤磷和钾的分布及其影响因素. 生态学报, 2012, 32(17): 5429-5437. [LIU W J, CHEN S Y, HU F Z, et al. Distributions pattern of phosphorus, potassium and influencing factors in the upstream of Shule River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5429-5437.]
- [24] 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. [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.]
- [25] MOORE I D, GESSLER P E, NIELSEN G A, et al. Soil attribute prediction using terrain analysis. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(2): 443-452.
- [26] 张嘉宁, 王继军. 黄土高原沟壑区王东沟流域土地利用/覆被变化过程初探. 中国农学通报, 2009, 25(6): 231-235. [ZHANG J N, WANG J J. Research on land use and cover change in Wangdonggou watershed on regional gully watershed on Loess Plateau. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(6): 231-235.]
- [27] 陈皓, 章申. 黄土地区氮磷流失的模拟研究. 地理科学, 1991, 11(2): 142-148. [CHEN H, ZHANG S. Nitrogen and phosphorus movement from loess tillage under modeling the rainfall-runoff erosion processes. Scientia Geographica Sinica, 1991, 11(2): 142-148.]
- [28] 董莉丽, 杨波, 李晓华, 等. 陕西省土壤有机质含量及其与影响因素的关系. 水土保持通报, 2017, 37(4): 85-91. [DONG L L, YANG B, LI X H, et al. Content of soil organic matter and its relationships with influencing factors in Shaanxi province. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4): 85-91.]
- [29] 邱扬, 王勇, 傅伯杰, 等. 土壤质量时空变异及其与环境因子的时空关系. 地理科学进展, 2008, 27(4): 42-50. [QIU Y, WANG Y, FU B J, et al. Spatiotemporal variation in soil quality and its relation to the environmental factors. Progress in Geography, 2008, 27(4): 42-50.]
- [30] 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. [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.]

- [31] 包耀贤, 徐明岗, 赵志强, 等. 乌兰布和沙区绿洲农田土壤钾素特征及其对土壤性质的响应. 西北农业学报, 2011, 20(8): 168-174. [BAO Y X, XU M G, ZHAO Z Q, et al. Characteristics of soil potassium in oasis farmlands of the Ulanbuh sandy areas. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2011, 20(8): 168-174.]
- [32] 吴若玉. 环溪河流域土壤钾素空间分布及影响因素研究. 雅安: 四川农业大学, 2007. [WU R Y. Study on spatial distribution and influence factors of soil potassium in Huanxi River Valley. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2007.]

Spatial variability of soil nutrients and its affecting factors at small watershed in gully region of the Loess Plateau

YANG Jing-han, LIU Meng-yun, ZHANG Jie, ZHANG Meng-meng,
CAO Run-shan, CAO Xin-yue

(Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: Studying the spatial variability and its affecting factors of surface soil organic matter and total nutrients can provide reference for soil management in the ecological fragile zone of the Loess Plateau. Based on the 93 soil sampling points in Wangdonggou watershed, this paper used a variety of geostatistical methods to analyze the spatial variability and its influencing factors of soil nutrients in the gully region of the Loess Plateau. The results showed that soil nutrient contents in the study area were at a moderate level. The spatial variability was in the following order: Total phosphorus > total nitrogen > organic matter > total potassium, and they were dominated by structural factors. Compared with total phosphorus and total potassium, organic matter and total nitrogen had smaller variation scale, weaker spatial autocorrelation and higher spatial complexity. Soil organic matter and total nitrogen presented a distribution pattern of high in the south and low in the north, and their main influencing factors included elevation, slope, curvature and land use. Total phosphorus was opposite to the former two, namely high in the north and low in the south. Elevation, slope, land use, soil mechanical composition and human activity had great influence on it. Total potassium was high in the center and low in the periphery, and its distribution was relatively scattered, and aspect and soil mechanical composition had a stronger effect on it. In view of the above results, regression prediction models between nine environmental factors and soil nutrients were established to provide data support for the sustainable use of soil resources in the study area.

Keywords: soil nutrients; spatial variability; geostatistics; influence factors; gully region of the Loess Plateau