

于芳,李海明. 基于地统计学和 GIS 的湖北省土壤有机质空间变异性研究[J]. 江苏农业科学,2019,47(15):282-286.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.15.065

基于地统计学和 GIS 的湖北省土壤有机质空间变异性研究

于芳,李海明

(天津科技大学海洋与环境学院,天津 300222)

摘要:基于湖北省 157 个土壤样品数据,分析土壤有机质含量特征,并应用地统计学和地理信息系统(GIS)技术研究其空间变异性,利用相关分析和回归分析探讨其变异性的影响因素。结果表明,湖北省土壤有机质含量为 (23.04 ± 6.39) g/kg,变异系数达 27.73%,属中等程度变异;土壤有机质以高斯模型拟合最佳,块金比为 0.33,呈中等程度空间自相关性,表明以结构变异为主。研究区土壤有机质含量总体上呈条带状分布,由鄂中向鄂西和鄂东增加,其中东西方向上变异性高于南北方向。研究区土壤有机质含量空间变异是地形、化学养分指标、土地利用类型、土壤质地等因素综合作用的结果,其中海拔、土壤质地分别解释了 41.5%、22.1% 的变异信息,是其主控因素。

关键词:土壤有机质;地统计学;空间变异;影响因素

中图分类号: S127;S153.6⁺21

文献标志码: A

文章编号: 1002-1302(2019)15-0282-05

有机质是维系土壤生命机能的核心指标之一,对于保持土地生产力、促进农业发展具有重要意义,同时作为地球生态系统重要的碳库,有机质在土体中的迁移转化速率影响着全球碳循环的平衡^[1]。受成土环境因素与人为干扰影响,土壤有机质含量在不同时空尺度呈不恒定分布,这种非均质特性不仅增加了耕作过程中养分精确管理的难度,还导致了碳素迁移转化过程模拟的不确定性^[2]。研究土壤有机质空间分布格局,可为科学保护土壤资源和生态过程建模提供基础信息。

国内外农业历史上很早就关注到土壤肥力质量差别,但直到地统计学和地理信息系统(GIS)技术得到应用后,土壤属性分布格局及其影响因素得以可视化与定量表达^[3],随着研究的深入,学者们发现,其空间异质性受结构性、随机性因素控制。如 Schulp 对荷兰农业景观土壤有机质时空变异研究发现,土地利用的变迁能够很好地解释有机质的总体变化^[4];Hu 等研究表明,在相同土地利用条件下,土壤质地对有机物质积累具有显著影响^[5];陈洋等在长三角地区的研究中指出,土壤有机质含量与母质类型存在良好的空间相关性^[6];Huang 等探究了江苏沿江地区有机质含量的历史变化,认为耕作制度与施肥管理是其主控因素^[2];吴昊等分析了秦岭山地地形因子对土壤有机质的积累效应,结果表明,有机质含量与海拔呈显著正相关关系,与坡向呈负相关关系^[7]。这些研究大多基于中微观尺度,着重分析了某一类型因子对土壤有机质空间变异的影响机制,而对省域尺度上复杂环境因素影响下有机质变异性的研究较少。湖北省是我国重要的水

源供应和粮食生产基地,随着城镇化与工业化的推进,土地资源开发利用强度增大,局部土壤面临着退化、污染的风险。基于此,本研究以土壤普查和相关文献资料为基础,运用地统计学和 GIS 技术初步揭示土壤有机质空间分异特征,旨在为省域土壤肥力调控、土地利用规划提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

湖北省位于我国中部秦巴与大别山断连交汇处,地理坐标为 29°05′~33°20′N、108°21′~116°07′E,区域面积为 18.59 万 km²。属于亚热带季风气候区,气候温暖湿润、雨热同期,年平均气温与降水量分别为 12~16℃、800~1600 mm。境内地势由东西两侧向中南部倾斜,高程为 20~3105 m,形成了山地、丘陵、平原等阶梯状地貌。省域属长江与汉江汇流区,河网密度、湖泊星罗,水资源丰富,是全国重要的水利发展基地。植被以亚热带常绿阔叶林为主,具有垂直地带性分布特征。第 2 次土壤普查表明,全省主要存在水稻土、潮土、黄棕壤、黄褐土、石灰岩土、红壤、黄壤、紫色土等 8 个土类,其中前三者为主要耕作土壤。

1.2 数据来源

以湖北省表层土壤有机质含量为研究对象,土壤数据一部分根据《湖北土种志》整理得到,另外部分出自 2000 年以来相关研究文献,有效样点共计 157 个(图 1)。辅助数据有 DEM(digital elevation model)和 MODIS(moderate-resolution imaging spectroradiometer)遥感影像数据,分别由地理空间数据云网站和美国航空航天局(NASA)网站提供,前者空间分辨率达 30 m,后者采用的是 2016 年逐月归一化植被指数(normalized difference vegetation index,简称 NDVI)数据,产品编号为 MOD13Q1,空间分辨率为 1 km。

1.3 研究方法

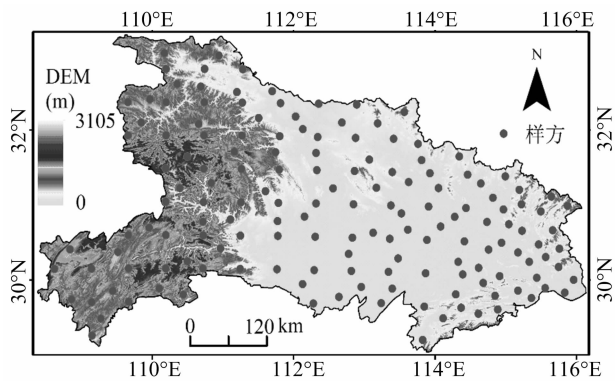
1.3.1 地统计学 地统计学是 Matheron 创立的一种空间统

收稿日期:2018-03-10

基金项目:国家重点基础研究发展规划(编号:2015CB452701)。

作者简介:于芳(1993—),女,天津人,硕士,主要从事资源环境监测研究。E-mail:307336877@qq.com。

通信作者:李海明,博士,教授,主要从事资源环境与地下水系统模拟研究。E-mail:lhm@tust.edu.cn。



点位表示土壤样方，色带表示DEM

图1 土壤样点分布

计方法,其通过邻近度观测检测空间连续性变量的随机不恒定变化与空间位置之间的关系,以界定其影响因素的重要性并估测土壤各属性变量在空间分布特征^[8]。半方差函数(semivariogram)是地统计学的理论基础,本研究主要应用其中的面域模式解释土壤空间变异结构,其计算公式如下:

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

式中: $r(h)$ 表示距离为 h 时的半方差; h 为空间间距; $N(h)$ 表示间距为 h 的所有观测点对数; $Z(x_i)$ 是空间位置 x_i 上的实测值, $Z(x_i + h)$ 是空间位置 $(x_i + h)$ 上的实测值。设定 $h = 0$ 时, $r(h)$ 的值为块金值 C_0 ;随着 h 的增大, $r(h)$ 维持在稳定水平时,该处 $r(h)$ 为基台值 $C_0 + C$;此时点对间距为变程 A_0 ,变量在变程范围内的临近空间上具有良好自相关性,超出变程,自相关性消失。块基比 $C_0/(C_0 + C)$ 可度量变量空间不恒定性影响因素的作用大小,即空间结构。根据变量在局部存在空间自相关性,可对其广域特征使用 Kriging 插值法进行估

算,具体公式如下:

$$Z(x_0) = \sum_{i=0}^n \lambda_i(x_i). \quad (2)$$

式中: $Z(x_0)$ 表示变量在 x_0 处的估计值、实测值; λ_i 为加权系数; λ 表示临近点对其影响程度,即权值。

1.3.2 数据处理 将土壤样品数据导入 ArcGIS 10.3 平台中,与 DEM 和遥感数据统一导入 WGS-84 投影系统。以 DEM 数据为基础,运用 Surface 模块计算研究区坡度、坡向、坡位等地形指数。对 MODIS 逐月数据进行最大值合成,用以表示区域 NDVI 整体水平。在此基础上,采取将值提取至点的方法,提取各样方的地形和 NDVI 信息。运用经典统计学方法,于 SPSS 21.0 软件中对土壤有机质含量的均值、极值、标准差等特征进行统计,通过 LSD 单因素方差多重比较法分析其与土地利用类型、土壤质地之间的关系,采用 Person 双变量相关性分析检验其与地形因子的相关性。半方差函数模式拟合与参数计算在 GS+9.0 地统计软件中进行,基于模型参数,使用 ArcGIS 软件中的 Geostatistical Analysis 模块对土壤有机质含量进行空间插值,并生成空间趋势面。

2 结果与分析

2.1 土壤有机质描述性特征

如表 1 所示,157 个土壤样品的有机质含量为 8.52 ~ 42.95 g/kg,平均值为 23.04 g/kg,依据第 2 次全国土壤普查养分分级标准属中等水平。其中位数为 22.53 g/kg,略小于平均值,表明其整体分布呈左偏趋势;经单样本 K-S 检验,其渐进显著性双尾值为 0.468,基本符合正态分布(图 2),说明本研究中的土壤样品具有较好的代表性。变异系数反映了变量整体的离散性,研究区土壤有机质的变异系数达 27.73%,呈中等程度变异。

表 1 土壤化学指标描述统计

土壤养分	含量范围 (g/kg)	均值 (g/kg)	标准差 (g/kg)	变异系数 (%)	偏度	峰度	P 值
有机质	8.52 ~ 42.95	23.04	6.39	27.73	-0.115	0.194	0.468

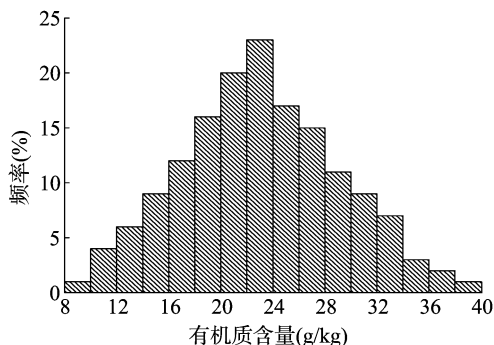


图2 研究区土壤有机质含量整体分布

2.2 土壤有机质变异结构特征

为全面解析土壤有机质变异结构特征,采用高斯、指数、球面、线性 4 种模型予以拟合。由表 2、图 3 可知,各模型半方差初始值均不为 0,表明不同模型拟合下均存在块金值,说明该采样尺度下存在耕作、施肥、土地利用变化等人为干扰引起的随机性变异。系统方差中的基台值大于块金值,说明研

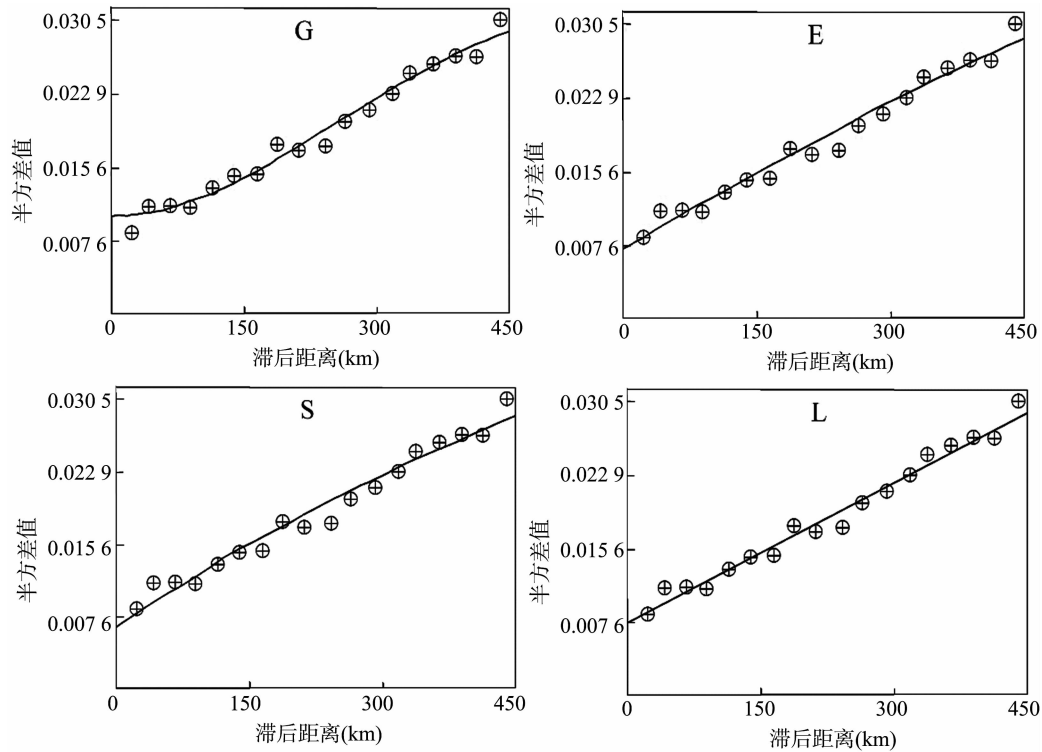
究区地形、气候、基岩、水文等自然因素对土壤有机质含量分布的影响高于人为因素。各模型中块金值以高斯模型拟合最大(0.010 3),表明该高斯模型能够描述更多的微域变异。从变程来看,线性模型的变程最小,为 411 km,主要因为该模型收敛速度快;而指数模型收敛较慢,在 695 km 处变异函数达到稳定状态;球面与高斯模型的变程相差不大,为 590、544 km,在此范围内样方观测值具有空间关联性。各模型下的块基比存在一定差异,高斯、线性模型拟合的土壤有机质块基比为 0.33、0.35,在该尺度下其具有中等空间自相关性;而球面、线性模型的块基比为 0.22、0.12,显示为强烈空间自相关。按照决定系数(R^2)最大、残差(RSS)最小的原则^[9],确定高斯模型为研究区土壤有机质拟合最适模型。

2.3 土壤有机质空间分布特征

“2.2”节的结果表明,研究区土壤有机质含量在该样方尺度下存在较好的空间自相关性,因此可运用 Kriging 法进行插值估计。由图 4 可知,研究区土壤有机质含量为 10.73 ~ 43.55 g/kg,均值、标准差分别为 22.43、8.74 g/kg,均与实测

表 2 土壤有机质半方差模型及参数

模型	块金值	基台值	块基比	R^2	RSS	变程(km)
高斯	0.010 3	0.031 14	0.33	0.988	1.270×10^{-5}	544
线性	0.008 0	0.022 78	0.35	0.982	1.310×10^{-5}	411
球面	0.007 6	0.035 14	0.22	0.978	1.278×10^{-5}	590
指数	0.007 0	0.060 10	0.12	0.875	1.492×10^{-5}	695



图中 G 为高斯模型, L 为线性模型, S 为球面模型, E 为指数模型

图3 土壤有机质半方差函数

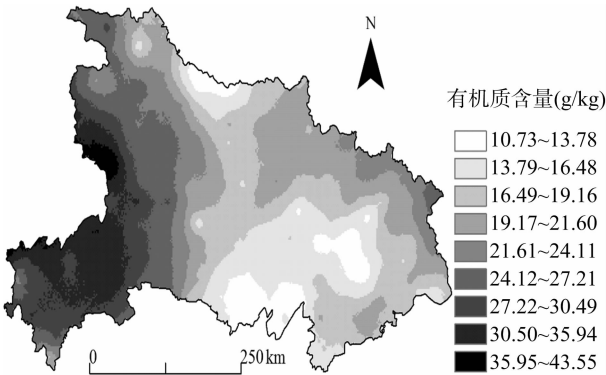


图4 研究区土壤有机质空间分布和趋势性

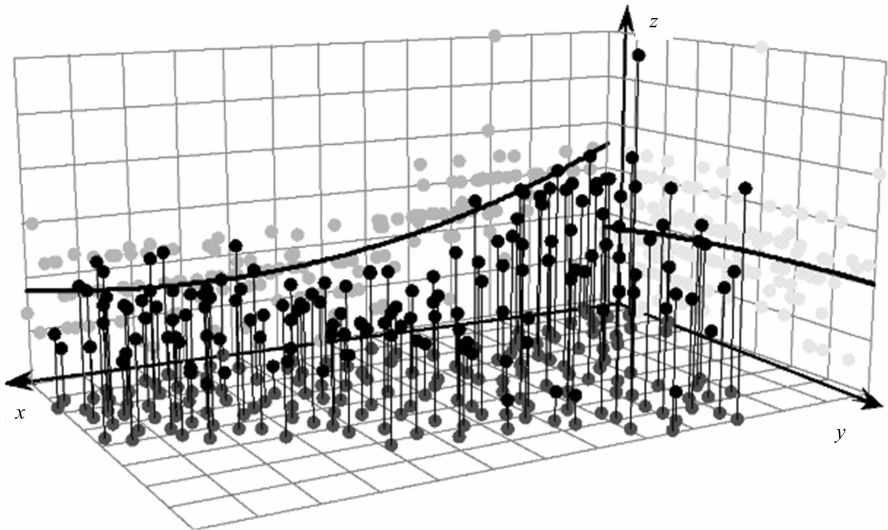
值不同,其原因可能是由于在插值过程中采用对数转换增强了数据的平滑性,但其全局趋势性得到保留。研究区土壤有机质含量呈明显的地带性分布特征,鄂西地区有机质含量最高,在 21.60 ~ 43.55 g/kg 之间,局部有高值区分布,达到 30.00 g/kg 以上;鄂东大别山地区含量次之,介于 19.16 ~ 30.49 g/kg 之间;荆襄和江汉平原中南部地区含量低于平均水平,局部小于 13.00 g/kg。由此表明,该省土壤有机质含量分布与农业发展不协调,省域中部地形平坦,用地类型以耕地为主,是农业和粮食主产区,有机质含量相对缺失易导致土壤

质量退化、农业减产;而鄂东、西部地区土壤有机质含量较高,能够较好地促进生态环境建设。

为宏观描述研究区土壤养分在空间方向上的分布特征,绘制了土壤有机质含量分布趋势面(图 5)。在东西方向上有有机质含量呈东西两端高、中部低,西部高于东部的分布特征;在南北方向上略呈南低北高趋势。总体来看,其分布趋势性与前述有机质含量空间插值结果一致。

2.5 土壤有机质与环境因子的关系

2.5.1 土壤有机质与地形因子的关系 地形梯度产生的地表景观分异直接影响着土壤空间变异过程,同时支配着水文、气候、辐射等资源的再分配,从而间接作用着土壤养分迁移。Pearson 相关分析表明,有机质含量与海拔呈极显著正相关关系($r^2 = 0.532, P < 0.01$),即海拔越高,有机质含量越丰富,这与图 4 的结果一致。多数研究表明,海拔引起人为活动强弱差异对土壤有机质含量具有重要影响^[10]。研究区鄂西、鄂东山地区域人口密度较小,相较于江汉平原地区的耕作和土地利用强度较小,土壤有机质含量较高;并且该山地区域是华中亚热带森林集中分布区,丰富的动植物残体矿化分解后促进了有机质的积累。有机质含量与坡度亦呈正相关关系($r^2 = 0.197, P < 0.05$),主要由于坡度较平坦处土地开发利用强度大,而陡坡主要集中于山地地带,土壤自然状态较好。



图中 x 、 y 分别表示正东、正北方向， z 为有机质含量大小，正交平面上的曲线为有机质含量投影值的拟合趋势线

图5 土壤有机质的趋势面分析

研究区坡向主要分布在省域东西两侧，南坡为迎风坡，降水量较多，土壤可蚀性高于北坡；加之坡向越向阳，气温越高而干燥，不利于有机物质分解，流失较快，不利于土壤肥化^[11]。坡位是基于高程的派生地地形因子，其与土壤有机质含量呈显著正相关关系($r^2=0.232, P<0.05$)。

2.5.2 土壤有机质与植被的关系 为探究土壤有机质与植被长势之间的关系，将土壤样品有机质含量与 NDVI 进行拟合，结果(图 6 和表 3)表明，随着 NDVI 增大，有机质含量呈线性升高趋势。植被的冠形结构、根系组织能够减弱养分物理迁移速率，其残体是有机质的重要来源；植被群落形成的生态系统亦能改善土条件，因而植被对土壤有机质具有重要而复杂的影响^[12]。

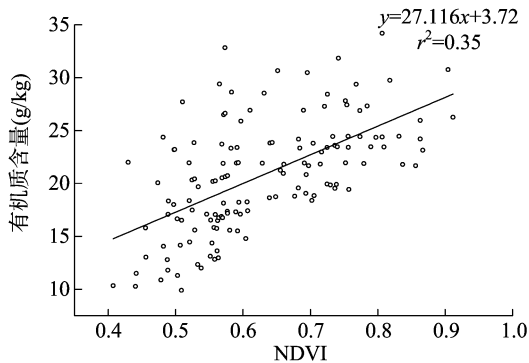


图6 土壤有机质含量与 NDVI 的线性相关性

表 3 土壤有机质与环境因子的 Pearson 相关关系

相关性	海拔	坡度	坡位	土地利用	土壤质地	NDVI
Pearson 相关性	0.532 **	0.197 *	0.232 *	0.342 *	0.433 *	0.352 *
显著性(双侧)	0.004	0.040	0.032	0.020	0.015	0.019

注：**、* 分别表示在 0.01、0.05 水平(双侧)上显著相关。

2.5.3 土壤有机质与土地利用类型之间的关系 不同用地类型的成土环境以及人为活动强度存在差异，因而土体中有有机质也具有空间异质性^[13]。结果(图 7)表明，不同土地利用类型下土壤有机质含量存在一定差异，表明土地利用是影响区域有机质分布的重要因素之一。其中，林地土壤有机质含量最高，达到 28.21 g/kg；草地、水田的含量次之，分别为 26.38、24.32 g/kg；园地、旱地土壤有机质含量低于平均水平，仅为 20.54、16.53 g/kg。就变异性(表 4)来看，旱地、林地的变系数较大，达 43.25%、37.71%，其原因主要为旱地的种植制度、耕作强度差异较大，而林地则由于区域林分结构、林型的分布不同，也呈现较强的变异。园地土壤有机质含量主要受施肥影响，但年内人为干扰强度较小，其变系数小于旱地，为 30.52%。研究区亚热带灌草群落单一，其有机质含量差异较小，由于水田的种植制度相差不大，土壤中有有机质含量也较稳定。

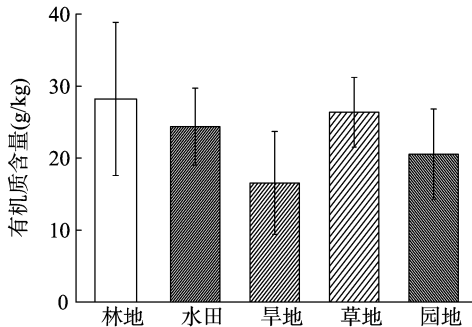


图7 不同土地利用类型土壤有机质含量

2.5.4 土壤有机质与土壤质地的关系 土体中的颗粒组成影响着土壤持水性、孔隙度等物理特性，而有机物质的迁移转化对其具有敏感响应^[14]。由图 8 可知，不同质地土壤中有有机质含量表现为黏土>壤土>沙土，并且其差异达到显著水平

表 4 不同土壤类型有机质数据含量特征

土壤类型	最大值	最小值	平均值	标准差	g/kg
					变异系数 CV (%)
林地	39.28	18.14	28.21	10.64	37.71
草地	31.75	21.05	26.38	4.84	18.34
水田	29.16	19.17	24.32	5.34	21.94
园地	27.96	15.32	20.54	6.27	30.52
旱地	23.15	9.98	16.53	7.14	43.25

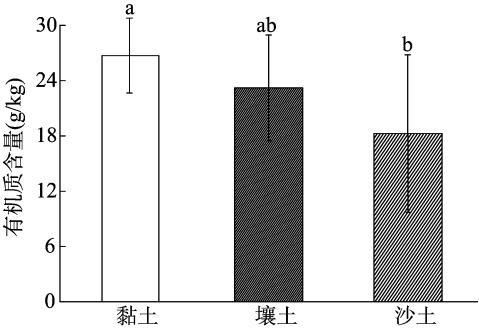


图 8 不同土壤质地有机质含量

($F=4.74, P<0.05$)。这与赵明松等的研究^[15]结果一致,黏土颗粒细小、黏粒组分居多,对矿化分解物质具有较好的吸附性;沙土中沙质成分较多、孔隙大、透水性强,不利于有机质的固结。另外,黏土中有机质含量的变异性最小,变异系数为 15.32%,壤土次之,变异系数为 24.73%,沙土变异性最大,变异系数达 46.81%。

2.5.5 不同因素对有机质变异性的影响程度 前述定性分析了不同因子对有机质含量的影响,却不能定量描述其影响程度的大小。以海拔、坡度、坡向、NDVI、土地利用类型、土壤质地为解释变量,以土壤有机质含量为目标变量,通过逐步回归分析识别各因子对有机质变异性的贡献力,结果如表 5 所示。当特征参数 R^2_{ξ} 越小、 ΔR^2 越大或 $R^2_{\text{偏}}$ 越大时,表示该变量相对重要性越大。可知,海拔因子独立解释了 41.5% 的变异信息,是湖北省土壤有机质空间变异的主要因子,土壤质地次之,达 22.1%,而其他环境变量的独立解释能力较小,表明它们是次要因素。

表 5 各因子对土壤有机质含量逐步回归分析结果

影响因素	R^2_{ξ}	ΔR^2	$R^2_{\text{偏}}$
海拔	0.399	0.415	0.431
坡向	0.801	0.013	0.092
坡度	0.79	0.024	0.075
NDVI	0.727	0.087	0.130
土地利用类型	0.76	0.054	0.125
土壤质地	0.593	0.221	0.246

注: R^2_{ξ} 表示排除该变量后其他变量对因变量回归的决定系数; ΔR^2 为增加该变量时,回归方程决定系数的增量; $R^2_{\text{偏}}$ 为新加入的变量所解释部分占缺少该变量的方程未能解释部分的比例。

3 结论

研究区土壤有机质含量为 8.52 ~ 42.95 g/kg,平均值为 23.04 g/kg,变异系数达 27.73%,属中等差异。土壤有机质拟合最适模型为高斯模型,块基比为 0.33,呈中等程度空间

自相关性,其空间变异以结构性为主。

研究区土壤有机质含量总体上呈条带状分布。有机质含量低值区(小于 13.78 g/kg)出现在江汉平原东南部和襄阳盆地,并以此为中心向鄂西、鄂东呈增加趋势,鄂西地区有机质含量最高,为 21.60 ~ 43.55 g/kg,鄂东地区次之,为 19.16 ~ 30.49 g/kg。土壤有机质在各方向上均存在空间变异,其中东西方向上变异性高于南北方向。

研究区土壤有机质含量与海拔呈极显著正相关关系,与坡度、NDVI 呈显著正相关关系,并且不同土地利用类型和土壤质地对土壤有机质含量具有显著影响。为提升土壤有机质涵养能力,需要加强养分分区管理,鄂中丘陵、江汉平原和襄阳盆地区应注重耕作强度调整,坚持秸秆还田或生物堆肥,并防治土壤污染;鄂西地区应加强水利建设和水土流失治理;鄂东地区主要应合理开发利用土地资源,兼顾生态环境保护,增强养分保持能力。

参考文献:

[1] 郑红波,吴健平,张 珊. 浙江宁海农用地土壤有机质和土壤养分空间变异分析[J]. 浙江林学院学报,2010,27(3):379-384.

[2] Huang B, Sun W X, Zhao Y C, et al. Temporal and spatial variability of soil organic matter and total nitrogen in an agricultural ecosystem as affected by farming practices[J]. Geoderma, 2007, 139(3/4): 336-345.

[3] Mirzaee S, Ghorbani - Dashtaki S, Mohammadi J, et al. Spatial variability of soil organic matter using remote sensing data [J]. Catena, 2016, 145: 118-127.

[4] Schulp C J E, Veldkamp A. Long-term landscape-land use interactions as explaining factor for soil organic matter variability in Dutch agricultural landscapes [J]. Geoderma, 2008, 146 (3/4): 457-465.

[5] Hu K, Wang S, Li H, et al. Spatial scaling effects on variability of soil organic matter and total nitrogen in suburban Beijing[J]. Geoderma, 2014, 226/227(1): 54-63.

[6] 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[J]. 自然资源学报,2016,31(12):2099-2110.

[7] 吴 昊. 秦岭山地松栎混交林土壤养分空间变异及其与地形因子的关系[J]. 自然资源学报,2015,30(5):858-869.

[8] Matheron G. Principles of geostatistics[J]. Economic Geology, 1963, 58(8):1246-1266.

[9] 陈桂香,高灯州,曾从盛,等. 福州市农田土壤养分空间变异特征[J]. 地球信息科学学报,2017,19(2):216-224.

[10] 李志国,张过师,刘 毅,等. 湖北省主要城市园林绿地土壤养分评价[J]. 应用生态学报,2013,24(8):2159-2165.

[11] 韩 丹,程先富,谢金红,等. 大别山区江子河流域土壤有机质的空间变异及其影响因素[J]. 土壤学报,2012,49(2):403-408.

[12] 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[J]. 土壤学报,2013,50(1):1-11.

[13] 邱莉萍,张兴昌,程积民. 土地利用方式对土壤有机质及其碳库管理指数的影响[J]. 中国环境科学,2009,29(1):84-89.

[14] 蒋 威,郜允兵,刘 玉,等. 北京市大兴区南部土壤有机质空间变异及其影响因素[J]. 浙江农业学报,2016,28(3):482-488.

[15] 赵明松,张甘霖,李德成,等. 江苏省土壤有机质变异及其主要影响因素[J]. 生态学报,2013,33(16):5058-5066.