

鄂西北山区耕层土壤有机质空间 变异及影响因子分析

吴正祥^{1, 2} 周勇¹ 刘婧仪¹ 徐涛¹¹

(1. 华中师范大学 城市与环境科学学院, 湖北 武汉 430079;

2. 南阳师范学院 环境科学与旅游学院, 河南 南阳 473061)

【摘要】: 为揭示鄂西北山区耕层(0~20cm)土壤有机质的空间变异特征及其影响因子, 以十堰市为研究区, 基于地统计学方法, 分析耕层土壤有机质含量空间变异规律, 并结合地理探测器进一步探讨土壤有机质空间变异的影响因子及其之间的交互作用。结果表明:研究区土壤有机质平均含量为 17.48g/kg, 总体上处于缺乏状态;变异系数为 45.59%, 属于中等变异强度;块金系数为 0.496, 存在中等程度的空间自相关;空间变异各向异性显著, 在 45°方向上变异程度最剧烈。土壤有机质含量呈现随高程降低而不断减小的趋势。年降水量、种植制度和高程对研究区土壤有机质空间分布的解释力最强, 是决定十堰市耕层土壤有机质空间分布格局的主导因子, 而成土母质和土地利用解释力相对较弱, 各环境因子两两之间为非线性增强或者双因子增强。土壤有机质含量的空间变异性是各影响因子共同作用的结果, 揭示了耕层土壤有机质含量空间异质性影响因子的多样性和复杂性, 研究结果可为研究区土壤有机质的精准管理、耕地土壤改良、耕地质量的提升及促进农业生产等提供理论依据。

【关键词】: 鄂西北山区 土壤有机质 地理探测器 交互作用

【中图分类号】: S158 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)05-1141-12

土壤有机质(Soil Organic Matter, SOM)是土壤的重要组成部分, 是植物矿物质营养的主要来源^[1], 与土壤环境质量、土壤肥力、作物生长以及区域生态环境质量等密切相关^[2]。SOM 是反映土壤质量的核心指标^[3], 也是地球陆地碳库的重要组成部分, 其含量和动态直接影响着全球碳循环及全球气候变化^[4, 5]。因此, 揭示区域 SOM, 尤其是农田 SOM 空间变异规律及其主要影响因子, 对区域耕地质量培育及农业可持续利用具有重要的指导作用, 对制订农田土壤固碳减排、应对全球气候变化也具有重要的参考价值。

目前地统计模型已被成熟地应用于 SOM 空间变异规律的研究中^[6, 7], 随着现代“3S”技术的发展, 将两者相结合对土壤理化性状空间变异规律及分布格局进行研究, 已经成为当今土壤学领域的热点^[8, 9]。目前, 已有众多学者从研究尺度^[10, 11]、土地利用^[12, 13]、地貌类型^[14~16]、流域^[17, 18]、土壤类型^[19, 20]等方面对 SOM 空间变异特征及其影响因子进行了研究, 还有学者研究了不同环境背景下 SOM 的时空变异特征^[21~23]、空间分布预测^[24]等, 均取得了丰富的成果。

作者简介: 吴正祥(1981~), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为土壤地理学。E-mail:wzhxiangnynu.edu.cn
周勇, E-mail:yzhoumail.ccnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271534);自然资源部国土整治中心重点项目(2018-02-10);河南省软科学研究项目(212400410081)

多数研究表明,不同区域内 SOM 表现出明显不同的空间变异特征,地形条件、气候、成土母质等结构性因素和土地利用方式、土壤管理等随机性因素均会在不同程度上影响 SOM 的空间变异。但以往研究多侧重于单一因子对 SOM 空间分布的影响,而关于多种因素交互作用对 SOM 空间分布影响的研究尚不多见。

地理探测器作为探测变量之间潜在空间相关关系的有力工具^[25],最初用于地方性疾病及其相关地理影响因子的研究^[26],近年来,已被应用于环境^[27]、社会^[28]和经济^[29]等方面的研究,并取得了较好的研究结果。因此,地统计学方法与地理探测器的结合,用于 SOM 空间变异特征分析,将有助于阐明 SOM 空间变异规律与影响因子之间的内在联系,能够更加全面客观地分析 SOM 空间分布的特征和机理,同时对拓展地理探测器的实践应用领域也有积极的意义。

鄂西北山区是我国典型的山地农业区,农耕历史悠久,耕地资源匮乏,坡耕地面积较大,土壤侵蚀严重,生态环境容易遭受破坏,耕地保护形势严峻。其耕地质量的维持和提升关系到该区域粮食产能的提升和农业的可持续发展。本研究拟以鄂西北山区十堰市为案例区,尝试通过实地采样分析,借助 ArcGIS10.7 平台,利用地统计学方法分析耕层 SOM 的空间变异特征;并结合地理探测器对十堰市耕层 SOM 空间变异特征的影响因子及其交互作用进行探讨,与期为研究区 SOM 的精准管理、耕地土壤改良、耕地质量的提升及促进农业生产等提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

十堰市位于湖北省西北部(109° 29' E~111° 16' E、31° 30' N~33° 16' N),面积为 23680km²。境内主要河流为汉江和堵河,堵河自西南向东北注入汉江,汉江自西向东穿越全境。十堰市整个地势南北高,中间低,自西南向东北倾斜,高程在 83~2571m 之间(图 1a)。

属亚热带季风气候,受地形影响,气候复杂多样,具有垂直分布的特点,域内多年平均气温 15.4℃,多年平均降水量为 870mm,4~10 月是降水丰水期,占全年降雨量的 85%左右,降雨量表现为东南部多西北部少,年平均日照 1650h,年平均无霜期 224d。土壤类型以黄棕壤、石灰土和水稻土为主。成土母质主要有泥质岩类风化物,第四纪老冲积物,红砂岩类冲积物,碳酸盐类风化物,石英质岩类风化物,河湖冲沉积物,还有少量紫色岩类风化物及结晶盐类风化物。耕地以水田、旱地为主,水浇地面积较小,主要粮食作物为玉米、小麦和水稻。

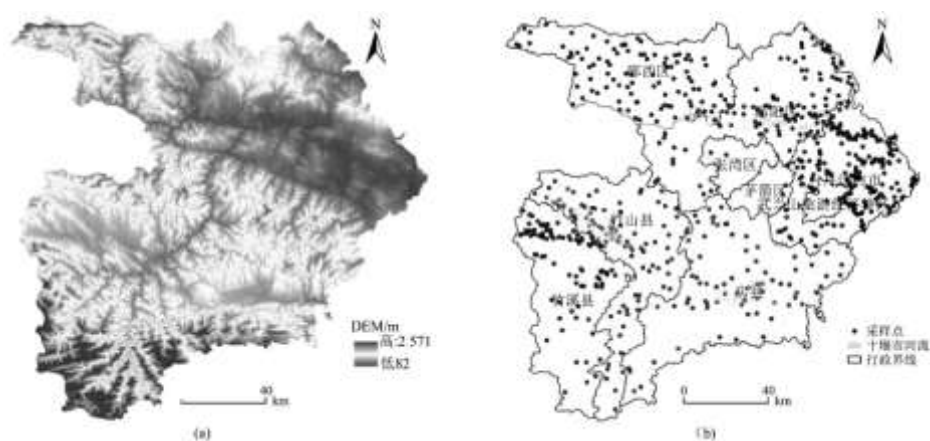


图 1 研究区高程图(a)及样点分布图(b)

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 土壤样品数据

研究数据来源于十堰市各县市区 2017 年耕地质量调查与评价项目。于 2017 年农作物秋收后土壤施肥前,综合考虑研究区行政区划、地形、水文、成土母质、土壤类型、土地利用、耕作制度、管理水平等因素进行布点采样,采样时避开路边、田埂、沟边、肥堆点等特殊部位,同时使用 GPS 仪记录每个采样点的地理坐标、高程及周边环境情况,通过走访农户获得采样点所在地块的种植制度、秸秆还田情况、近 5 年该地块农作物的平均产量等基本信息共计 40 余项,共采样 701 个(图 1b),其中旱地样点 424 个,水田样点 263 个,水浇地样点 14 个。

土样选取 0~20cm 表层土壤,每个土样根据地块大小采用“星”型或“S”型混合土样,将全部土壤样品捏碎混匀、去除其中明显的石头、根系残茬等,采用四分法保留 1kg 装袋以备分析。参照《土壤分析技术规范》^[30],采用重铬酸钾容量法测定 SOM 含量。

1.2.2 影响因子数据

已有研究对 SOM 相关影响因子的探讨,主要集中在地形、气候、成土母质、土地利用及土壤管理 5 个方面。本文在已有研究的基础上,结合研究区数据获取的难易程度,选取与该尺度上耕地 SOM 空间变异关系最密切的影响因子进行研究。选取以下因子:高程、坡度、坡向、地形起伏度、地形湿度指数、地表粗糙度、年均温、年降水量、成土母质、土地利用、种植制度。

从中科院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>)下载 30m 分辨率的 ASTERGDEM 高程数据,在 ArcGIS10.7 中提取研究区高程、坡度、坡向、地形起伏度、地形湿度指数和地表粗糙度 6 种地形因子。气候数据(1980~2010 年)来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),将湖北省 76 个气象站点的月平均降雨量(1~12 月)和月平均气温(1~12 月)数据汇总,求取年均温及年降水量,采用普通克里格插值法进行插值,对湖北省年降水量和年均温进行空间模拟,利用 ArcGIS 平台将采样点数据与气候空间模拟数据相叠加,提取气候要素值到采样点。成土母质数据则利用 ArcGIS 平台对十堰市各县市第二次土壤普查土壤图进行矢量化后提取。从土地利用现状数据中提取耕地,分为水田、水浇地及旱地 3 类。

1.2.3 数据预处理

利用 Minitab17.1 软件对 SOM 含量进行数据变换处理,选取最优的正态分布拟合系数 λ ;使用 SPSS24.0 进行描述性统计分析及相关分析;所有矢量数据和栅格数据统一采用 Xian_1980_3_Degree_GK_Zone_37 投影坐标。根据地理探测器要求输入的变量为类别数据的要求,成土母质、土地利用、排水能力及灌溉能力数据根据类别进行分类;高程、地形湿度指数、地形起伏度、地表粗糙度、气温、降水等连续性数据依照自然断点法分为 3 类。

坡度按照国际地理学会地貌调查与制图委员会的坡度分级标准^[31]分为 $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 、 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 、 $>15^{\circ}$ 3 类,坡向按方位^[32]分为阴坡[北($337.5^{\circ} \sim 22.5^{\circ}$)和东北($22.5^{\circ} \sim 67.5^{\circ}$)],半阴坡[东($67.5^{\circ} \sim 112.5^{\circ}$)和西北($292.5^{\circ} \sim 337.5^{\circ}$)],半阳坡[东南($112.5^{\circ} \sim 157.5^{\circ}$)和西($247.5^{\circ} \sim 292.5^{\circ}$)],阳坡[南($157.5^{\circ} \sim 202.5^{\circ}$)和西南($202.5^{\circ} \sim 247.5^{\circ}$)]4 类。

1.3 研究方法

1.3.1 地统计学方法

半方差函数是地统计学的理论基础,在本研究中用来反映土壤 SOM 在研究区内的空间变异与相关程度。计算公式如下:

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

式中: $r(h)$ 为半方差函数; $N(h)$ 是以 h 为间距的所有观测点的成对数目; h 为两个样本点的分隔距离; $Z(x_i)$ 和 $Z(x+h)$ 分别为区域化变量 $z(x)$ 在 x_i 和 x_i+h 处的实测值。

1.3.2 地理探测器

地理探测器包括风险探测、因子探测、生态探测和交互探测 4 部分^[25]。本研究中因子探测器用于检验某影响因子多大程度上解释了 SOM 的空间变异,用 q 值度量,其值域为 $[0, 1]$, q 值越大说明该因子解释力越强,由此可对研究区 SOM 空间变异的主导因子进行判别。模型如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (2)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad SST = N \sigma^2 \quad (3)$$

式中: $h(h=1, \dots, L)$ 为变量 Y 或因子 X 的分层; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差。 SSW 和 SST 分别为层内方差之和及全区总方差。

交互作用探测器用来衡量两个影响因子之间的交互作用是否会增加或减弱对 SOM 空间变异的解释力。若 q 值越靠近 1,则表示两个因子的交互作用越明显,本文根据因子探测和交互作用探测的结果,找出影响十堰市耕层 SOM 空间变异的主导因子和双因子交互作用结果。

2 结果与分析

2.1 SOM 描述性统计特征分析

本研究对 SOM 进行分级处理,按照第二次土壤普查中 SOM 含量分级标准,结合研究区实际,将研究区 SOM 分为 6 级,详见表 2。SOM 含量在 >40 、 $30 \sim 40$ 、 $20 \sim 30$ 、 $10 \sim 20$ 、 $6 \sim 10$ 、 <6 各级别的样本数分别为 1%、6.42%、25.82%、49.79%、13.84%及 3.14%。其中中等和缺乏两个级别占总数的 75.61%。SOM 含量变化范围为 2.00~53.22g/kg,平均值为 17.48g/kg,偏度和峰度均为 0.82,变异系数为 45.59%,这表明,研究区总体上 SOM 处于缺乏状态,属于中等程度变异,变异系数较高,表明研究区 SOM 含量已经受到人为因素干扰。经 K-S 检验表明,研究区 SOM 含量不符合正态分布,进行 box-cox 变换 ($\lambda=0.36$) 后符合正态分布 ($p>0.05$),满足地统计学分析的要求。

2.2 SOM 空间变异特征分析

运用 GS+9.0 软件对研究区 SOM 的各向同性半方差函数进行拟合,得到研究区 SOM 各向同性条件下不同半方差函数的相关拟合参数,根据拟合结果中的决定系数 (R^2) 和残差 (RSS) 的数值选择最佳拟合模型^[33]。指数模型的决定系数为 0.896,残差为 1.198E-03,能有效的反映空间结构特征,是进行研究区 SOM 半方差分析的最佳拟合模型;块金值为 0.107,说明在当前采样尺度

下存在着由随机因素引起的变异;块金系数为 0.496, 介于 0.25~0.75 之间, 区域内具有中等程度的空间自相关, 说明结构性因素及随机性因素共同对研究区耕地 SOM 空间变异起作用;变程为 52800m, 说明 SOM 在此空间范围内分布连续, 存在空间自相关性, 超出此范围空间自相关性消失。

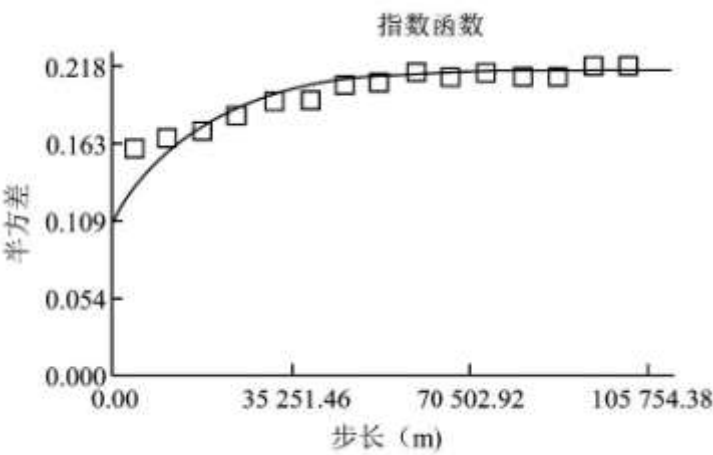


图 2 SOM 各向同性半方差函数

为更深入了解研究区 SOM 的空间变异特征, 用 GS+9.0 软件对 0°、45°、90°、135° 方向上的半方差函数进行拟合, 进一步分析空间变异的各向异性。由表 5 可知, 0° 方向和 45° 方向块金值和基台值基本相同, 主轴变程和亚轴变程差别较大, 各项异性比分别为 1.68 和 2.43, 表明 SOM 各向异性特征极为显著;90° 和 135° 方向上块金值和基台值均相同, 主轴变程和亚轴变程相等, 各项异性比均为 1, 表现为各向同性。

这可能与十堰市地形特点有关, S-N0° 和 NE-SW45° 方向自北向南依次穿过秦岭山区、汉江河谷低丘地区、武当山区、山间盆地及大巴山区, 地形起伏比较大;E-W90° 和 SE-NW135° 方向上处于汉江及其支流的河谷地带, 多为耕作区, 土地利用方式简单, 地势及地表景观变化小, SOM 空间变化微弱, 造成 0°、45° 方向的变异较 90°、135° 方向复杂。总体而言, 十堰市 SOM 具有较为明显的空间异质性, 适于进一步的插值分析。

2.3SOM 空间格局分析

将 GS+9.0 模拟克里格插值最优参数输入 ArcGIS10.7 中, 选用指数模型, 通过普通克里格插值绘制 SOM 的空间分布图(图 3)。结合图 3 和图 1a 可知, 高值区主要分布在高程较高的区域:竹溪县和房县南部;低值区主要分布在高程较低的 3 个区域:郧西县中南部、郧阳区中部和丹江口市的丹江口水库周边区域、竹山县和房县交界处;研究区 SOM 含量空间特征与研究区地形变化具有较强的一致性:SOM 含量呈现随高程降低而不断减小的趋势, 在 NE-SW45° 方向上 SOM 变异最为剧烈。这与上文分析 SOM 在不同方向上的变异程度差异相互印证, 其空间分布可能受地形及由其产生的地表环境差异的影响较大。

3 讨论

3.1 SOM 空间变异影响因素分析

3.1.1 地形对 SOM 变异的影响

地形作为环境因子的综合体现,通过影响局部小气候、土壤质地、土地利用方式及土壤管理等方式影响 SOM 的空间分布。研究区地形湿度指数与 SOM 空间分布显著正相关,说明湿度较高的区域 SOM 含量较高。受地形的影响,不同高程气温、降水及湿度等气候因子不同,导致动植物种类和微生物活动状况存在差异,进而影响土壤表层中各种化学元素的变化,使土壤养分含量出现差异性^[34]。

北部秦岭山区、中部武当山区及南部大巴山区等较高区域降水多、气温低、蒸发少,温度和湿度等环境条件适宜,有利于动植物残体分解和有机质的释放,SOM 矿化速率较慢,有利于 SOM 累积。而汉江及其支流堵河、马栏河河谷等较低地区,气温高,SOM 矿化速度快;另外,受农户干扰较强,密集种植农作物,农户施肥行为不合理,偏重氮磷钾等化肥投入,仅靠作物根茬、根系分泌物等作物归还难以维持土壤原有的有机质水平,造成土壤养分比例失衡,有机质含量偏低。这与 GallardoA 等^[36]的研究结果相似。

3.1.2 气候对 SOM 变异的影响

对 SOM 与气候因子进行 Pearson 相关分析,发现研究区 SOM 含量与年降水量显著正相关,与年均温显著负相关。一般而言,SOM 含量随降水量的增加而增加^[37],降水量较大区域,土壤含水量较高,过多的水分导致进入土壤的氧气减少,使有机质的分解和转化受到抑制,反映在 SOM 含量上就表现出较高的特征;年均温较高区域,土壤呼吸作用强,有机质分解快,SOM 含量低^[38]。

本研究结果与张鹏等^[38],秦小静等^[39]的研究结果相似,但赵明松等^[40]通过研究发现江苏省 SOM 含量与年均温和年均降雨量呈极显著正相关关系,钟聪等^[38]发现广西省 SOM 含量与气温和降水均呈负相关关系。由此看出气候因素对 SOM 的影响十分复杂,可能是由于不同研究区区位条件和研究尺度的差异造成的,具体原因有待于进一步分析。

3.1.3 成土母质对 SOM 变异的影响

成土母质是土壤形成的基础,它通过影响土壤的矿物组成和土壤质地,进而影响土壤理化性质。对各母质 SOM 含量进行统计分析,不同母质类型下 SOM 含量存在显著差异($P<0.05$, $F=4.723$),变异系数在 34.59%~58.33%之间;其中河湖冲(沉)积物中 SOM 含量最高(23.42g/kg),红砂岩类风化物中最低(15.10g/kg);碳酸盐类风化物和石英质岩类风化物中 SOM 含量接近,紫色岩类风化物和泥质岩类风化物中 SOM 含量无显著差异。

研究区河湖冲(沉)积物主要发育为潮土和水稻土,水稻土土壤长期处于滞水状态,而潮土地下水位较浅,两种土壤中 SOM 的分解速率明显低于其他土壤类型;另外,土壤质地以中壤为主,土壤颗粒组成较细,黏粒含量高,黏粒通过与有机物质结合形成有机-无机复合体,吸附稳定 SOM,有利于其积累。

红砂岩类风化物发育的土壤以紫色土为主,还有少量水稻土,紫色土是在频繁的风化作用和侵蚀作用下形成的,有机质含量普遍较低,土壤质地以轻壤为主,还有少部分中壤,砂粒含量较高,整体上土壤通透性好,好氧微生物活性强,有机质矿化速度快,不利于有机质的积累,SOM 含量偏低。

碳酸盐类风化物发育的土壤为石灰土和黄棕壤,还有少部分水稻土,土壤质地为中壤和轻壤;石英质岩类风化物主要发育为

黄棕壤及水稻土,土壤质地主要以中壤和轻壤为主;可能两者土壤质地接近,致使两者 SOM 含量差别较小。成土母质对研究区 SOM 空间分布的影响程度相对较高,所以在研究区耕层 SOM 精细化管理过程中,要考虑到各类母质的空间分布及其特性,充分了解各类母质的机械组成及物质组成基础。

3.1.4 种植制度对 SOM 变异的影响

研究区农作物以轮作、间作、单作的方式种植,这种复杂的种植制度通过耕地利用强度、管理措施及作物生长等方式影响 SOM 含量的空间分布。研究区不同种植制度下 SOM 含量存在显著差异 ($P<0.05$, $F=9.849$),其中以单季水稻的 SOM 含量最高 (24.15g/kg),茶果种植的 SOM 含量最低 (16.54g/kg)。

从变异系数来看,不同种植制度下 SOM 含量的变异系数在 34.65%~49.51%之间,均表现出中等程度的变异。水稻单作种植 SOM 含量高可能是由于耕地利用强度较小,农作物从耕地带走土壤养分较少,能够做到用养结合,耕地得到充分休整。

蔬菜种植 SOM 含量较高,是因为蔬菜种植复种指数高、经济效益好,农户精耕细作,积极施用农家肥,投入生产资料较多;另外,农业部在 2017 年下发《果菜茶有机肥替代化肥行动方案》,地方政府积极出台惠农政策来推进政策的实施,农户在政策引导下和比较利益的驱使下,对菜地进行精细化管理,加大生产资料投入,积极实施有机肥替代化肥来提高蔬菜品质,提升了菜地 SOM 含量。茶果种植 SOM 含量最低,可能是农户在生产过程中过分重视化肥的施用,有机肥施用量小,导致 SOM 含量急剧下降,惠农政策出台后,有机肥施用时间短及施肥方式的差异,导致茶果种植 SOM 含量较低。

小麦-玉米轮作、油菜-玉米轮作、玉米-水稻轮作、小麦-水稻轮作、玉米单作等种植制度的耕地 SOM 含量均较低,一方面可能是由于粮食作物经济效益较低,农户耕种管理较为粗放,另一方面农作物从耕地带走较多土壤养分,而 SOM 却没有及时得到补充,导致含量偏低。在今后农业生产中,针对研究区不同的种植制度和土壤养分的空间分布特征,要及时调整耕种方式及施肥措施,注意土壤的培肥管理。

目前十堰市耕地的权属破碎化及自然破碎化情况比较严重,通过农户访谈了解到,当地农田集约化程度较低,基本上以农户为单位进行耕作和管理,施肥类型及施肥量、农田管理缺乏统一的标准;另外,由于外出务工人员较多,劳动力缺乏,农户农家肥利用情况不同、农作物收获后秸秆处理方式各异;这些差异会进一步对耕地 SOM 空间变异造成影响。

3.2 相关分析方法对比

在本研究中采用 Pearson 相关系数法进一步探究 SOM 空间分布与影响因子之间的正负相关性,发现与地理探测器的探究结果具有相似之处却存在一定差异。地理探测器对定量影响因子解释力的分析结果为年降水量 (0.1433)>高程 (0.1133)>年均温 (0.0511)>坡度 (0.0130),地形起伏度没有通过显著性检验 ($P>0.05$),解释力较弱,坡向、地形湿度指数及地表粗糙度对 SOM 的空间分布格局并不具解释力;Pearson 相关系数法分析结果为年降水量 (0.348)>高程 (0.312)>年均温 (-0.248)>地形湿度指数 (0.138),坡度、坡向、地形起伏度、地形粗糙度并没有通过显著性检验 ($P>0.05$)。

经上述分析发现,降水量、高程、年均温等对 SOM 空间分布格局的影响,两者分析结果相同;坡向、地表粗糙度、地形起伏度等对 SOM 空间分布格局的影响,两者分析结果大致相似;坡度和地形湿度指数对 SOM 空间分布格局影响力较小,在两种分析结果上存在差异:在地理探测器中坡度对 SOM 空间分布格局具有一定的解释力,地形湿度指数不具有解释力。

而在 Pearson 相关系数法中地形湿度指数与 SOM 含量存在相关关系,坡度则不存在相关关系。李雨等^[40]认为 Pearson 相关系数分析法主要是衡量研究对象与影响因子之间的线性关系,而地理探测器模型探测结果是两者之间线性关系和非线性关系的综合,分析结果更全面。

这种观点无法解释在 Pearson 相关系数法中地形湿度指数与 SOM 存在相关性，而在地理探测器方法中对 SOM 空间分布格局并无解释力的这种情况。可能是由于实验误差引起的，也可能是由于采用的 DEM 数据分辨率较低，进行坡度和地形湿度指数计算时数据误差较大造成的，或者是在利用地理探测器进行因子探测时，对连续型数据进行离散化处理时采用标准不同造成的，具体原因有待于在后期研究中做进一步分析。

4 结论

(1) 十堰市耕层 SOM 含量在 2.00~53.22g/kg，平均值为 17.48g/kg，总体上处于缺乏状态，SOM 含量变异系数为 45.59%，属于中等程度的空间变异性。空间结构采用为指数模型拟合较好，该区域 SOM 含量的空间自相关距离为 52800m，块金系数为 0.496，属于中等程度的空间自相关性；说明结构性因素和随机性因素对研究区 SOM 空间变异共同起作用。

空间变异各向异性显著，在 45° 方向上变异程度最剧烈。普通克里格插值结果表明：SOM 含量高值区分布在竹溪县和房县南部等较高的区域，低值区主要分布在汉江及其支流堵河河谷地带等较低区域；空间变化特征与研究区地形变化具有较强的一直性，SOM 含量呈现随高程降低而不断减小的趋势。

(2) 因子探测器运行结果表明，不同影响因子对研究区 SOM 空间变异的解释力具有显著差异，各影响因子的 q 值降序排列为年降水量、种植制度、高程、年均温、成土母质、土地利用、坡度、地表起伏度，地形湿度指数、坡向、地表粗糙度不具备解释力。其中年降水量、种植制度和高程对研究区 SOM 空间分布的解释力最强，是决定十堰市 SOM 空间格局的主导因子。

(3) 交互作用探测器检验结果表明，各环境因子两两之间为非线性增强或者双因子增强，表明耕层 SOM 的空间分布格局是由不同影响因子间的复杂互动共同推进的。各影响因子的交互作用大于单独作用，两种影响因子的协同作用会增强对 SOM 空间变异的解释力。其中年降水量∩种植制度(0.2416)对 SOM 空间分布解释力最强，然后依次为高程∩种植制度(0.2138)、成土母质∩种植制度(0.2118)、年降水量∩成土母质(0.2015)，交互作用的解释力均大于 0.2。

就交互综合作用而言，种植制度综合(1.2964)，随后依次为年降水量综合(1.2655)、高程综合(1.1336)，交互作用的综合作用解释力均大于 1。在对研究区耕地 SOM 精细化管理的过程中，不仅要考虑主导因子的影响，还要考虑到各因子的交互作用对耕地 SOM 空间变异的影响，从而为耕地土壤改良及耕地质量的提升、促进农业生产等提供理论依据。

参考文献:

- [1] 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[J]. 自然资源学报, 2018, 33(1): 149-160.
- [2] 高凤杰, 吴啸, 师华定, 等. 基于贝叶斯最大熵的黑土区小流域土壤有机质空间分布预测[J]. 环境科学研究, 2019, 32(8): 1365-1373.
- [3] 齐雁冰, 王茵茵, 陈洋, 等. 基于遥感与随机森林算法的陕西省土壤有机质空间预测[J]. 自然资源学报, 2017, 32(6): 1074-1086.
- [4] 韩杏杏, 陈杰, 王海洋, 等. 基于随机森林模型的耕地表层土壤有机质含量空间预测——以河南省辉县市为例[J]. 土壤, 2019, 51(1): 152-159.
- [5] 赵明松, 张甘霖, 李德成, 等. 苏中平原南部土壤有机质空间变异特征研究[J]. 地理科学, 2013, 33(1): 83-89.

-
- [6]LIU Y L, GUO L, JIANG Q H, et al. Comparing geospatial techniques to predict SOC stocks[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 148:46-58.
- [7]杜佩颖, 张海涛, 郭龙, 等. 平原丘陵过渡区土壤有机质空间变异及其影响因素[J]. 土壤学报, 2018, 55 (5):1286-1295.
- [8]林莎, 贺康宁, 王莉, 等. 基于地统计学的黄土高寒区典型林地土壤水分盈亏状况研究[J]. 生态学报, 2020, 40 (2):728-737.
- [9]杜可, 王乐, 张淑香, 等. 黑土区县域土壤养分空间分布特征及其影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (6):1465-1474.
- [10]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子[J]. 生态学报, 2013, 33 (16):5058-5066.
- [11]段丽君, 郭龙, 张海涛, 等. 基于改进 OK 模型的土壤有机质空间分布预测——以宜都市红花套镇为例[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27 (1):131-141.
- [12]刘鹏, 蒋忠诚, 蓝芙宁, 等. 土地利用对溶丘洼地土壤容重、水分和有机质空间异质性的影响——以南洞流域驻马哨洼地为例[J]. 中国岩溶, 2019, 38 (1):100-108.
- [13]孙莉, 高思佳, 储昭升, 等. 土地利用方式对洱海流域坝区土壤氮磷有机质含量的影响[J]. 环境科学研究, 2016, 29 (9):1318-1324.
- [14]郑昊楠, 王秀君, 万忠梅, 等. 华北地区典型农田土壤有机质和养分的空间异质性[J]. 中国土壤与肥料, 2019 (1):55-61.
- [15]连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 等. 黄土高原小流域土壤养分空间变异特征及预测[J]. 生态学报, 2008, 28 (3):946-954.
- [16]唐杰, 王昌全, 李冰, 等. 川中丘陵区土壤有机质和碱解氮空间变异特征研究[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19 (6):124-130.
- [17]刘文杰, 苏永中, 杨荣, 等. 黑河中游临泽绿洲农田土壤有机质时空变化特征[J]. 干旱区地理, 2010, 33 (2):170-176.
- [18]高凤杰, 马泉来, 韩文文, 等. 黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局[J]. 环境科学, 2016, 37 (5):1915-1922.
- [19]李玲, 张少凯, 吴克宁, 等. 基于土壤系统分类的河南省土壤有机质时空变异[J]. 土壤学报, 2015, 52 (5):979-990.
- [20]郑然, 郑宝林. 冀北栗钙土区耕层土壤有机质和全氮的空间变异特征[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32 (5):123-129.
- [21]姜赛平, 张认连, 张维理, 等. 近 30 年海南岛土壤有机质时空变异特征及成因分析[J]. 中国农业科学, 2019, 52 (6):1032-1044.
- [22]常栋, 葛少华, 李朋彦, 等. 乡镇尺度烟田土壤有机质时空变异性研究——以襄城县紫云镇为例[J]. 土壤, 2018, 50 (5):1006-1012.

-
- [23]韩迪,李蓬勃,徐东瑞,等.河北省土壤有机质时空变化分析[J].土壤通报,2016,47(1):65-72.
- [24]张国平,郭澎湃,王正银,等.紫色土丘陵地区农田土壤养分空间分布预测[J].农业工程学报,2013,29(6):113-120,294.
- [25]王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [26]WANG J F, HU Y, Environmental health risk detection with GeoDetector[J]. Environmental Modelling&Software, 2012, 33:114-115.
- [27]HE J H, PAN Z Z, LIU D F, et al. Exploring the regional differences of ecosystem health and its driving factors in China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 673:553-564.
- [28]叶妍君,齐清文,姜莉莉,等.基于地理探测器的黑龙江垦区农场粮食产量影响因素分析[J].地理研究,2018,37(1):171-182.
- [29]WANG S J, WANG J Y, WANG Y. Effect of land prices on the spatial differentiation of housing prices: Evidence from crossCounty analyses in China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(6):725-740.
- [30]杜淼,高祥照.全国农业技术推广服务中心.土壤分析技术规范.第二版[M].北京:中国农业出版社,2006:73-75.
- [31]李凤英,何小武,周春火.坡度影响土壤侵蚀研究进展[J].水土保持研究,2008,15(6):229-231.
- [32]李龙,姚云峰,秦富仓,等.黄花甸子流域土壤全氮含量空间分布及其影响因子[J].应用生态学报,2015,26(5):1306-1312.
- [33]吴正祥,周勇,木合塔尔·艾买提,等.鄂西北山区耕层土壤 pH 值空间变异特征及其影响因素研究[J].长江流域资源与环境,2020,29(2):488-498.
- [34]董悦,张永清,刘彩彩,等.晋中市土壤养分空间分布与影响因子的相关性[J].生态学报,2018,38(23):8621-8629.
- [35]GALLARDO A. Spatial variability of soil properties in a floodplain forest in northwest Spain[J]. Ecosystems, 2003, 6(6):564-576.
- [36]DAVIDSON E A, JANSSENS I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. Nature, 2006, 440(7081):165-173.
- [37]钟聪,李小洁,何园燕,等.广西土壤有机质空间变异特征及其影响因素研究[J].地理科学,2020,40(3):478-485.
- [38]张鹏,张涛,陈年来.祁连山北麓山体垂直带土壤碳氮分布特征及影响因素[J].应用生态学报,2009,20(3):518-524.
- [39]秦小静,孙建,王海明.三江源土壤养分分布特征及其对主要气候要素的响应[J].生态环境学报,2015,24(8):1295-1301.

[40]李雨, 韩平, 任东, 等. 基于地理探测器的农田土壤重金属影响因子分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50 (21) :4138-4148.