

基于 Geodetector 模型的鄂北岗地土壤 有机质空间格局及影响因素分析 ——以枣阳市为例

高浩然 周勇 王丽 吴正祥¹

(1. 华中师范大学 地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070;

2. 华中师范大学 城市与环境科学学院, 湖北 武汉 430070)

【摘要】: 为探明鄂北岗地耕地土壤质量及影响因素情况, 以湖北省枣阳市为研究区, 选择样点 240 个, 以土壤有机质土壤有机质 (SOM) 含量为研究对象, 运用经典统计学、地统计学对耕地土壤有机质含量空间格局进行分析, 引入地理探测器 Geodetector 模型结合佩尔森 (Pearson) 相关系数法, 得出影响枣阳市土壤有机质含量空间格局的显著性因子。结果表明: (1) 枣阳市耕地土壤有机质含量分布空间格局呈弱变异, 空间变异模型为球状模型拟合, 分布格局呈现四周高, 中心向东北向偏低的空间格局; (2) 对土壤有机质含量单因子影响最强的 5 种因子均为降水量、土壤类型、NDVI、地表起伏度、公路距离; (3) 各因子交互作用解释力均大于单因子作用解释力, 表现为非线性协同作用。该研究将地理信息科学与遥感、统计学以及地理探测器等多学科技术相结合, 为探索控制鄂北岗地土壤养分的空间格局及其因素提供方法途径, 尝试为水稻种植区及盆地地区进行农业管理、施肥管控及土壤养分空间预测等研究工作提供基础。

【关键词】: 鄂北岗地 土壤有机质 空间格局 地统计学 地理探测器

【中图分类号】: S153.6 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)01-0166-13

耕地作为农业的根本生产资料, 其土壤质量的改善和提高是农业生产和粮食安全的基础^[1]。土壤有机质 (SOM) 是评估土壤肥力尤其是耕地土壤质量的关键指标。土壤有机质含量影响着土壤的理化性质和整体健康状况, 是土壤质量的关键参数和土壤肥力指标^[2]。除了为农作物和其他生物提供养分外, 土壤有机质含量还影响着土壤物理性质及土壤结构等基本属性, 并能将土壤颗粒结合成团聚体, 以提高土壤保水持水能力。因此, 对耕地土壤有机质含量的空间分异情况及其影响因素进行研究, 对地区城市化发展、农业管理与农业结构调整、土壤的可持续利用及耕地质量提升都具有重要意义。

由于土壤的形成和成土过程比较复杂, 受自然及人为因素影响, 故土壤性质表现出不同的空间异质性。耕地土壤有机质的时空分布及其影响因素一直是农学、作物学、生态学、环境科学以及地理学等学科关注的重点。许多研究证实, 土壤有机质含量与

¹**作者简介:** 高浩然 (1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤地理学、土地利用与农业生态环境. E-mail: ghr_9393@mails.ccnu.edu.cn; 周勇 E-mail: yzhou@mail.ccnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42171061); 自然资源部国土整治中心重点项目 (2018-02-10); 农业农村部耕地质量等级调查监测评价项目

多种环境因素联系密切。Meersmans 等^[3]通过土壤—景观建模对土壤有机质含量分布进行空间预测。由于该模型需充分考虑土壤有机质含量和环境变量之间的关系,因此利用该模型可以充分描述土壤属性的空间变化规律,Gu 等^[4]使用了一种地面高光谱数据,利用小波变换和随机森林算法创建的高频系数来检索土壤有机质含量与环境之间的关系。He 等^[5]通过土壤有机质含量与土壤质地和气候之间的关系作为影响因子,评估了土壤有机质含量形成和转化的控制。

通过对现有的研究结果进行梳理发现,众多学者以地理信息系统(GIS)技术为基础,并结合地统计学规律与传统统计学^[6,7]、普通克里格及回归克里格^[8]插值等方法结合对平原农业集约区^[9]、不同土地利用方式地区以及高原^[7]、山地及河流湿地不同地貌类型等不同自然地理环境背景下,对土壤有机质含量及全氮的空间分布及变异特征进行了研究,还有学者研究了不同尺度^[10]、采样点密度下,运用随机森林模型^[11,12]、多光谱遥感反演^[4]、空间模型结构方程^[13]、传统多元线性回归及其扩展地理加权法(GWR 方法)^[14]、径向基函数神经网络模型(RBFNN)主成分分析(PCA)方法等^[15],对不同环境背景下土壤有机质含量及全氮的进行了时空变异特征、空间分布预测、以及土壤有机质含量、全氮与粮食产量的相关性^[16]等研究。

地理探测器,一种可以作为探测变量之间潜在的空间相关关系的有力模型工具,它独立于任何线性假设,目前已逐步应用于自然地理学^[17,18]、环境污染^[19]、经济地理学与空间格局^[20,21]旅游地理学^[22]以及中国乡村振兴战略^[23,24]等领域的研究。

鉴于耕地土壤有机质含量空间格局及其影响因素研究的重要性,本文将结合现有成熟研究方法(如GIS技术等)与地统计学、地理探测器模型,选取鄂北岗地南部的枣阳市为研究区,并尝试识别控制土壤有机质含量的影响因素,深入了解土壤有机质含量及影响因子的影响力。旨在揭示鄂北岗地县域耕地土壤有机质含量的空间格局的内在规律,探索控制盆地地区土壤养分的空间格局及其因素提供方法途径,尝试为水稻种植区及盆地地区进行农业管理、施肥管控以及土壤养分空间预测等研究工作提供基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

枣阳市位于湖北省西北部,鄂豫两省交界处,112° 30' E~113° 00' E 和 31° 40' N~32° 40' N,全市总面积 3277km²,属鄂北岗地与南襄盆地交汇处,地势起伏较低,境内海拔高差 700m 左右。属北亚热带半湿润半干旱季风气候。全市多年平均降雨量约为 723.1mm,多年平均气温 15.4℃^[25]。土壤类型以水稻土、黄棕壤与黄褐土为主,少部分的潮土、紫色土以及沙姜黑土。成土母质以第四纪黏土、第四纪老冲积物、泥质类岩风化物、红色砂岩类风化物以及河湖沉(冲)沉积物为主,少量分布紫色砂页岩、近代河流冲积物和第四纪黏土和泥质岩类。主要农作物为水稻、玉米、小麦。

1.2 土壤样品采集与计算

1.2.1 土壤样本

本研究以枣阳市土地利用现状矢量图与枣阳市耕地图斑为依据,并综合考虑行政区划、地形地貌、土壤类型、土地利用、耕作制度、管理水平等作为布设野外调查和土样采集点位的基础。配合全球定位系统(GPS)仪定位的使用,于 2018 年 10 月低至 11 月中旬,在枣阳市耕地土壤范围内,采用 S 点取样法选取 0~20cm 深度范围内枣阳市耕地土壤样点 240 记录各采样点坐标,利用 ArcGIS10.2 软件进行投影变换,生成采样分布图(图 1)。土壤类型、土地利用方式、耕作制度等信息通过野外调查获取。对第二次土壤普查土壤图进行矢量化后通过 ArcGIS10.2 软件提取个采样点成土母质信息。

1.2.2 土壤理化性质测定

将外业采集到的土壤样本,去除携带的植被残体、碎石、杂物等并依据采样深度 20、25cm 分类装袋,带回实验室后室温(25℃)

条件下风干,并将各土壤样本充分混合在一起。每个采样点取混合土约 0.5kg,取样研磨,使样品通过 0.25mm×0.25mm 筛网分筛。土壤有机质含量采用油浴加热重铬酸钾氧化容量法测定^[26]。

1.2.3 异常值提取

对于化验和测量结果进行数据处理之前,往往要进行异常值的剔除工作。格拉布斯检验法适用于未知标准差情形下正态总体异常值判断^[27],本研究则采用格拉布斯法与临近点数据比较法相结合,检验出异常值点位 3 个,并对存在异常值的样点进行识别并剔除,保留研究区样点 237 个。

1.3 影响因子选取

现有研究结果对土壤有机质含量分布的影响因子进行了讨论^[28]。自然因素和人为因素都对表土的形成起着重要作用。本研究结合研究区实际情况及样点采集数据信息获取难易程度等方面,且研究区内交通线网密布、人类活动频繁,且耕作制度^[29],土壤母质、海拔高度^[30]对土壤有机质含量综合影响作用较强。综上,结合研究区实际,选取以下因子:地形因子,包括:高程、坡度、坡向、地表起伏度;气候因子,包括年均温、年降水量;土壤属性因子,包括成土母质、土壤类型、土壤 pH;生物因子,即植被归一化指数 (NDVI);人类活动及其他影响:包括土地利用方式、作物种类、公路距离影响及河流水库距离影响。共 4 个方面 14 个变量。

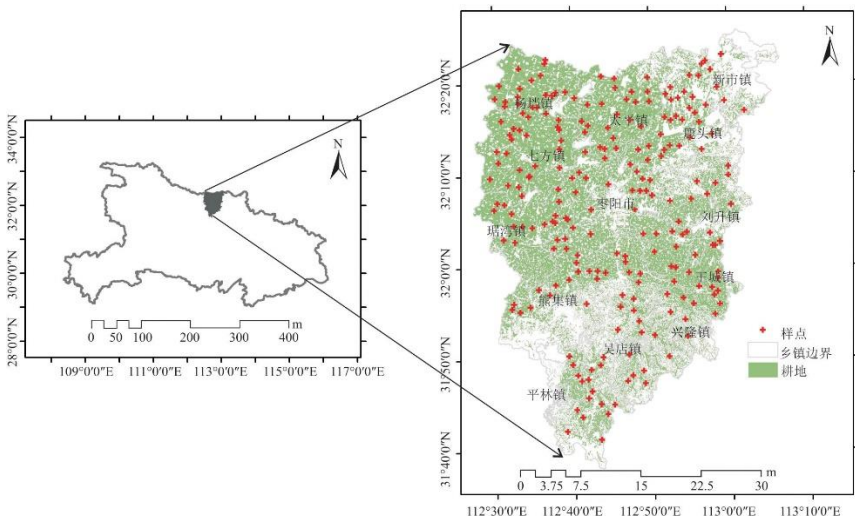


图 1 枣阳市地理位置及调查样点分布图

表 1 枣阳市土壤有机质含量空间格局影响因子

类型	变量	因素	单位	类型	变量	因素	单位
地形因素	X1	海拔高度	m	土壤因素	X8	成土母质	—
	X2	坡度	°		X9	土壤类型	—
	X3	坡向	—		X10	土壤 pH	—
	X4	地表起伏度	—		X11	土地利用类型	—

气候因素	X5	年均降水量	mm	人类活动因素	X12	作物类型	—
	X6	年均温度	℃		X13	公路距离	m
生物因素	X7	NDVI	—		X14	河流水库距离	m

1.3.1 数据来源及处理

通过“地理空间数据云平台(www.gscloud.cn)”,获取枣阳市数字高程遥感影像,利用 ArcGIS10.2 软件制作枣阳市 DEM 图,并计算和生成枣阳市地形坡度图、地形坡向图和地表起伏度图。选择 2018 年的 Landsat8 产品,获取 2018 年 8 月 21 日枣阳市遥感影像(条代号: 124;云量 12.8%),利用 ENVI5.3 对归一化植被指数(NDVI)计算,并导入 ArcGIS10.2 进行掩膜提取最后获得枣阳市 NDVI 图。通过中国科学院资源环境科学与数据中心(www.resdc.cn)获取年平均气温和年平均降水量数据(2016 年),并计算和生成枣阳市年平均降水量图和年平均气温图。其他影响因子数据均在枣阳市土地利用现状矢量数据库中进行提取与分析。在 ArcGIS10.2 软件中对土地利用现状矢量数据库中辅助图斑内公路、河流水库等地物图斑进行提取,利用欧式距离分析法,即可获取采样点与附近公路用地、河流水系的距离关系。

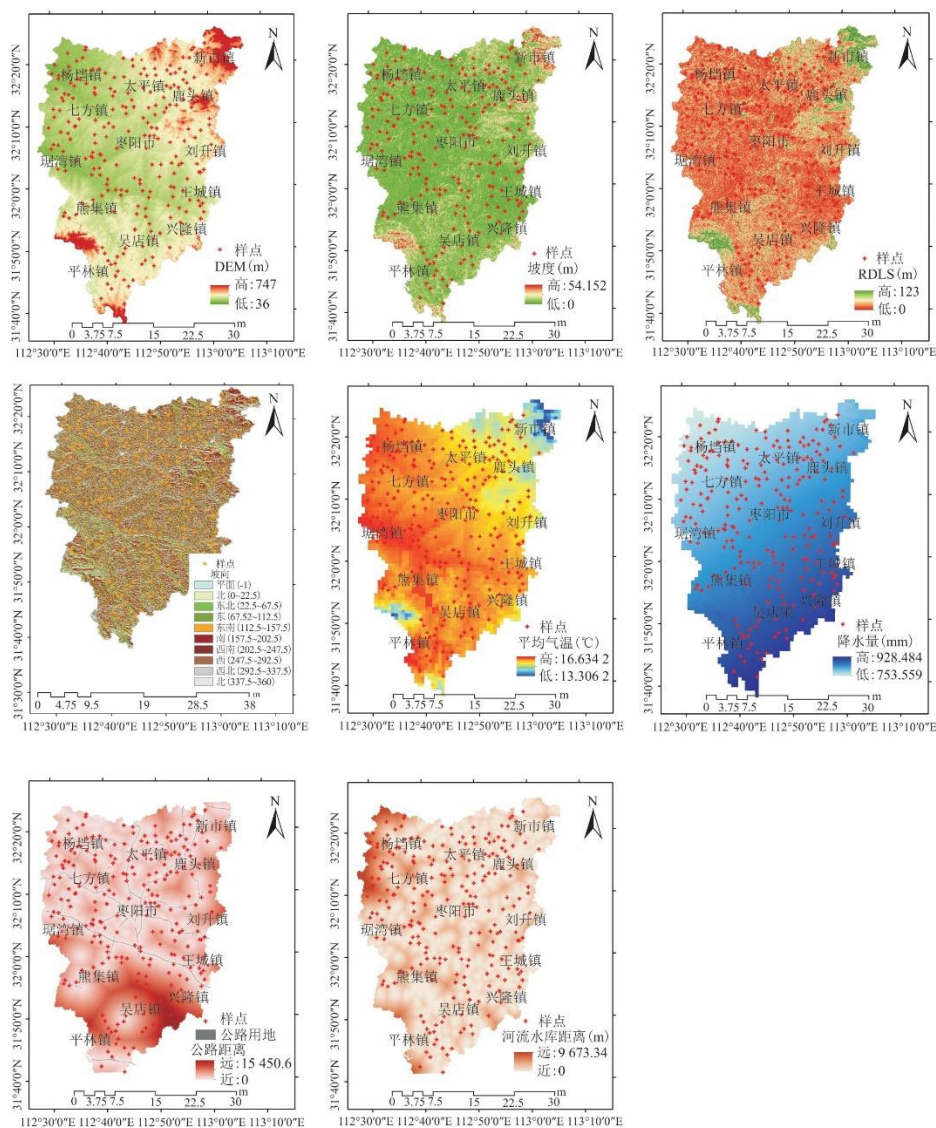


图 2 枣阳市耕地土壤有机质含量各影响因子分布图

1.4 地理探测器

地理探测器是一种新的空间统计方法和定量技术，它可用于检测空间异质性，确定地质统计变量的空间分布是否类似于自变量的空间分布^[31]，使用空间方差来量化单个因素的相对重要性及其与响应变量的隐性交互作用^[32]。应用地理探测器模型研究枣阳市耕地土壤有机质含量空间分布的影响因素，共包括 2 个探测器工具：

(1) 分异及因子探测：

用来探测因变量 Y(有机质)的空间分异性，及自变量 X(各影响因子)对 Y 值空间分异的解释程度，用 q 值表达。计算公式为：

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

$$Q = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (2)$$

式中：q 值即为因变量空间变异影响因子探测指标的解释力大小，值域为 [0, 1]，值越大表示各因子的解释力越强；h=1, 2, 3……L 为 Y 或 X 的分类或分区；N_h 和 N 分别代表与全区范围的样点个数；σ_h² 和 σ² 分别为层 h 和全区 y 的方差。SSW 与 SST 代表层内方差和区域总方差。

(2) 交互作用探测器：

即用来衡量两因子之间的交互作用，即两个因子共同作用相对于单因子作用时强度的大小。交互作用类别可分为以下几类。

非线性协同：q(X1 ∩ X2) > q(X1) + q(X2)；

相互独立：q(X1 ∩ X2) = q(X1) + q(X2)；

双因子协同：q(X1 ∩ X2) > MAX(q(X1), q(X2))；

单因子非线性拮抗：MAX(q(X1), q(X2)) > q(X1 ∩ X2) > MIN(q(X1), q(X2))；

非线性拮抗：q(X1 ∩ X2) < MIN(q(X1), q(X2))。

交互作用探测器可用来检验环境因子是独立作用还是相互作用，若是相互作用，是相互增强还是相互减弱。

利用 Geodetector 模型对枣阳市土壤有机质含量分布的各影响因子进行计算前，需要将各因子进行离散化处理。根据《全国第二次土地调查技术规程》并结合研究区实际情况，将高程分为 <100、100~120、120~150、150~180、>180m 5 类，坡度分为 <1.5°、1.5°~3°、3°~5°、5°~7.5°、>7.5° 5 类；以北方向为基准，坡向分为平面、阴坡(0°~45°、315°~360°)、半阴坡(45°~90°、270°~315°)、半阳坡(90°~135°、225°~270°)、阳坡(135°~225°) 5 类。地形起伏度分为 <4、4~8、8~12、12~16、>16m 5 类；pH 分为 <4.5、4.5~5.5、5.5~6.5、6.5~7.5、>7.5 这 5 类。平均气温、降水量、NDVI、公

路距离影响、河流水库距离影响按自然断点法分为 5 类；成土母质、土壤类型、土地利用类型、农作物种类按类型进行划分。

2 结果与分析

2.1 枣阳市耕地土壤有机质含量基本统计特征

使用 Minitab.18 软件对 2018 年枣阳市剔除异常值后的耕地采样点经化验所得土壤有机质含量数据进行统计，统计特征如表 2 所示。由统计结果可知：枣阳市耕地土壤有机质含量区于 18.997~29.067g/kg 之间，平均值为 24.889±3.768g/kg。对研究区土壤有机质含量进行分级处理。依据为“全国第二次土壤普查肥力分级标准”，分为 6 个等级(表 3)。

表 2 枣阳市耕地土壤有机质含量基本统计特征值

变量	最大值 (g/kg)	最小值 (g/kg)	平均值 (g/kg)	均方差 (q²)	变异系数 CV (%)	偏度	峰度
有机质	29.067	18.997	24.889	3.768	7.80	-0.650	0.300

表 3 枣阳市耕地土壤有机质含量各级样本数分布统计

等级	土壤有机质 含量 (g/kg) 范围	样品数量	比例 (%)
I	40<SOM	0	0
II	30≤SOM<40	0	0
III	20≤SOM<30	232	98
VI	10≤SOM<20	5	2
V	6≤SOM<10	0	0
VI	SOM<6	0	0

其中，枣阳市耕地土壤有机质含量仅有三级、四级两类，且 237 个样点中有 97.89%样点土壤有机质含量位于三级，含量处于中等水平，基本能够满足当地农作物生长条件。但通过样点测得土壤有机质含量过于集中且属于中等丰富水平，未见缺乏及以下含量的样点，极值小，空间变异性弱，考虑研究区耕地土壤有机质含量本底较好，但存在无针对性的盲目平均施肥情况，使得耕地土壤有机质含量较为一般且土壤养分均一化，有悖于农田生态效益发展方向^[33]。

2.2 耕地土壤有机质含量空间变异结构特征

地质统计学(Geostatistics)技术是一种处理空间变异性有效科学方法，对现有数据进行插值，并预测未采样位置的值，以便进行精确的土壤有机质含量状况调查。目前已广泛应用于土壤养分、土壤盐分、土壤重金属等空间变异研究中^[34]。运用 Minitab18 软件采用对数 (LOG) 转换方法来改善数据的正态性^[35]。使用质量工具对数据进行对数转换后，样点化验数据均符合正态分布 (P>0.05)，满足使用 GS+9.0 进行半变异分析及插值的要求。

对耕地土壤有机质含量空间变异性分析结果如表 4 所示。依据决定系数 R^2 接近 1、残差平方和 (RSS) 最小，模型解释度越优的原则^[36]，枣阳市耕地土壤有机质含量选择球状 Spherical 模型来进行半变异函数拟合分析。

表 4 枣阳市耕地土壤有机质含量半变异函数和拟合模型

模型	块金值 C0	基台值 C0+C	块基系数 C0/C0+C	变程 km	决定系数 R^2	残差平方和 RSS
Linear	2.783	4.274	0.349	39.580	0.703	1.240
Spherical	1.969	3.939	0.500	21.620	0.973	0.133
Exponential	1.781	3.972	0.555	25.410	0.963	0.156
Gaussian	1.980	3.961	0.500	16.540	0.958	0.362

空间变异是自然现象在一定空间范围内的变化。块金值 C0 表示反映的是最小抽样尺度以下变量的变异性及测量误差。根据地统计学结果分析可知，枣阳市耕地土壤有机质含量和块金值 C0 分别为 1.969，表示由随机部分的空间异质性^[37]。块基比(块金值(C0)与基台值(C0+C)的比)表示由随机因素引起的空间变异程度大小，如果该比值较高，说明由随机部分引起的空间变异程度较大；相反，则由空间自相关部分引起的空间变异程度比较大；如果该比值接近于 1，则说明该变量在整个尺度上具有恒定的变异。从结构性因素角度分析，块金系数可以表示系统变量的空间相关性程度，如果比例<25%，说明变量具有强烈空间相关性；在 25%~75%之间，变量具有中等的空间相关性；当块基比>75%时变量空间相关性很弱^[38]。根据地统计结果可知，枣阳市耕地土壤有机质含量最优模型块基比位于 25%~75%之间，属于中等程度空间自相关性，并且结构性因素与随机性因素对研究区耕地土壤有机质含量的空间变异共同作用，由于块金值均在 50%左右，说明结构性因素与随机性因素影响强度大致相同。

2.3 枣阳耕地土壤有机质含量空间格局特征

本研究在地统计结果的基础上，根据 GS+9.0 软件进行半变异方程模型拟合结果，选择普通克里格一球状模型对枣阳市耕地土壤有机质含量进行空间插值；选择普通克里格一指数模型对枣阳市土壤有机质含量进行空间插值，并绘制出土壤有机质含量空间分布图(图 3)。分别对两种土壤养分进行空间分布特征的具体分析。

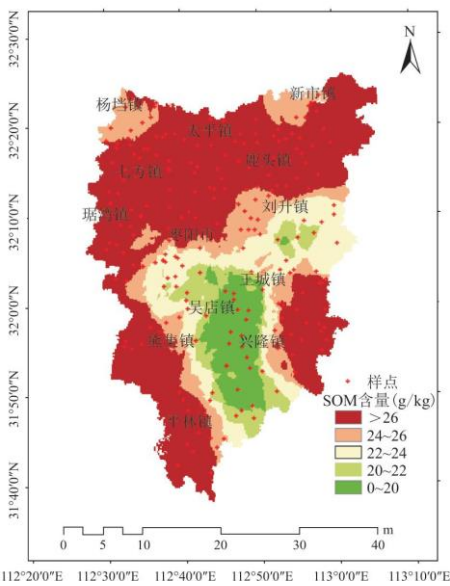


图 3 枣阳市耕地土壤有机质含量空间分布图

按“全国第二次土壤普查养分分级标准”将枣阳市耕地土壤有机质含量分为“丰富”、“一般”两类，由于枣阳市土壤有机质含量较为集中，无法直观分析其含量的空间分布特征，因此针对空间差值结果对耕地土壤有机质含量分类进行适当调整。如图 3, 耕地土壤有机质含量空间插值结果表明，含量在 26~30g/kg 之间的分布范围最广，且属于土壤有机质含量高值区。主要分布于枣阳市北部太平镇、七方镇，以及西南部熊集镇、平林镇。枣阳市耕地土壤有机质含量低值区分布较为集中，小于 20g/kg 含量的低值区集中在枣阳市中部的吴店镇，且低值区分布特征大致沿南北向—东北向延伸的基本空间格局。

表 5 枣阳市耕地土壤有机质含量按乡镇分类

乡镇名	样点数	土壤有机质含量(g/kg)	
		平均值±标准差	变异系数 CV(%)
枣阳市郊	22	24.761±1.676	6.78
锯湾镇	20	24.815±1.606	6.47
刘升镇	11	24.621±1.349	5.478
鹿头镇	19	24.703±1.314	5.32
平林镇	18	25.702±1.14	4.44
七方镇	28	25.750±1.141	4.43
太平镇	23	25.784±1.119	4.34
王城	13	25.533±2.841	11.13
吴店	22	25.279±3.846	15.22
新市	15	25.020±4.632	18.51
兴隆	16	24.762±5.292	21.37
熊集镇	13	24.505±5.871	23.96
杨岗镇	17	24.247±6.388	26.34

2.4 Geodetector 模型对土壤有机质含量影响因素响应的计算结果

2.4.1 因子探测器(Factor detector)

利用因子探测器对枣阳市土壤有机质含量的 14 个影响因素的影响力进行计算得出结果如表 6 所示。其中，高程、坡度、土地利用 3 个影响因素不显著 ($p>0.1$)，其它因子显著性均达到显著水平 ($p<0.05$)。

如图 4 可知，对枣阳市耕地土壤有机质含量分布影响解释力(q 值)强度最大的前五位因子为 X5 降水量>X13 公路距离>X4 地

表起伏度>X9 土壤类型>X7NDVI。降水量成为影响枣阳市耕地土壤有机质含量空间分布格局的主导结构性因子，而公路距离作为随机性因子中的主导因子对枣阳市土壤有机质含量空间格局也产生影响。NDVI 作为土壤有机质含量的主要影响因子，但影响程度存在差异。坡度、坡向因子不显著，说明枣阳市坡度与坡向对土壤养分作用力强度较弱，而枣阳市耕地土地利用类型影响力不显著，因其空间分异格局表现不明显，所以作为随机性因子对枣阳市土壤养分影响力较弱。

表 6 因子探测器输出结果

	影响因子	解释力(q)
地形因子	X1 海拔高度***	0.0125
	X2 坡度**	0.0083
	X3 坡向**	0.0014
	X4 地表起伏度**	0.0545
气候因子	X5 年均降水量***	0.1237
	X6 年均气温***	0.0247
生物因子	X7NDVI**	0.0449
土壤特征因子	X8 成土母质**	0.0342
	X9 土壤类型**	0.0543
	X10 土壤 pH***	0.0097
人类活动因子	X11 土地利用类型**	0.0043
	X12 作物类型**	0.0116
	X13 公路距离***	0.1012
	X14 河流水库距离**	0.0326

注：***、**分别代表显著性 P<0.01、0.05.

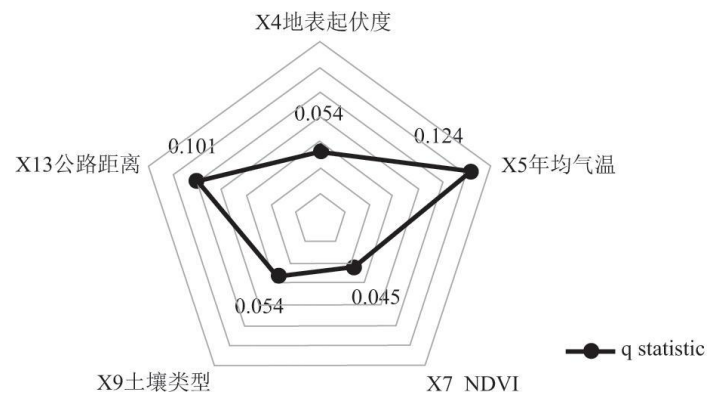


图 4 影响耕地土壤有机质含量空间格局解释力前五的因子

2.4.2 交互作用探测器

如表 7 所示,通过交互因子探测器计算,获得土壤有机质含量解释力最强的五种交互作用因子。可以看出,枣阳市耕地土壤有机质含量交互作用因子解释力强度均高于单因子作用解释力强度。降水量(X5)坡向因素(X3)作为单因子影响因素时,对耕地土壤有机质含量解释力仅为 0.0014,但坡向与降水量(X5)交互作用因子对土壤有机质含量解释力达到了 0.275 说明坡向通过影响降水量的大小间接影响土壤有机质含量的空间格局,且可以说明局地微地形差异可以造成小尺度水热条件的差异,进而共同影响土壤养分的空间变异^[37]。计算结果表示,枣阳市耕地土壤有机质含量空间格局影响因子均不存在单因子作用,各交互因子对耕地土壤有机质含量表现均为非线性协同提高(Enhance, nonlinear)作用。

表 7 交互因子模型输出解释力前五类的交互作用因子

交互作用因子	土壤有机质含量	
	变量	解释力(q)
1	X3∩X5	0.275
2	X4∩X5	0.282
3	X5∩X7	0.275
4	X5∩X13	0.311
5	X7∩X13	0.286

注: X3 坡向、X4RDLS、X5P 年均降水量、X7NDVI、X8 成土母质、X10 土壤 pH、X13 公路距离。

3 土壤有机质含量空间格局影响因素分析

3.1 地形因子对枣阳市耕地土壤有机质含量的影响

地形是 5 种成土因素之一,因此,对土壤理化性质及土壤成分的空间格局与时空变化会造成显著影响^[38]。海拔高度方面,气温往往随海拔高度升高而降低,则会抑制耕地土壤有机质含量分解^[39]。如表 8 所示,枣阳市不同等级海拔高度下耕地土壤有机质含量分布情况。

根据统计结果,土壤有机质含量平均值出现随海拔高度升高而升高的情况,这与先前研究成果结论一致^[40,41]。但空间离散程度较低,说明在相同海拔高度范围内,空间变异性程度较差,并且根据本研究所使用 Geodetector 模型中的 Factor-detector 模型输出结果可知,海拔高度(高程 DEM)对土壤有机质含量解释力为 $q(\text{土壤有机质含量})=0.0125$ ($p<0.05$)、表示海拔高度对枣阳市耕地土壤有机质含量影响程度较弱。并且出现高海拔(154m)地区存在土壤有机质含量低值(20.443g/kg)的点位。考虑盆地地区海拔高差较小,未对土壤有机质含量空间格局造成显著影响力。Yang 等^[42]在利用地形指数预测土壤有机质含量过程中引入地表起伏度因子,获得地表起伏度(RDLS)与土壤有机质含量空间分布呈中度正相关这一结论。由表 9 可知,枣阳市耕地土壤有机质含量随地表起伏度增大而出现了略微增加。本研究使用 Geodetector 输出结果表明地形起伏度(RDLS)对枣阳市耕地土壤有机质含量与空间格局解释力分别为 $q(\text{土壤有机质含量})=0.054$,属于单因子中解释力较强的因子,这与 Yang 等^[42]研究结果一致。

表 8 枣阳市耕地土壤有机质含量在不同海拔高度等级含量分布

等级	高程范围 (m)	样本数量	土壤有机质含量 (g/kg)	
			平均值±方差	变异系数 (CV)
I	68≤DEM<100	55	24.697±1.811	7.33%
II	100≤DEM<120	58	24.958±1.589	6.37%
III	120≤DEM<150	80	25.052±1.572	6.27%
IV	150≤DEM<180	32	25.149±1.572	6.25%
V	180≤DEM	12	25.589±1.188	4.64%

表 9 枣阳市耕地土壤有机质含量在不同地表起伏度等级含量分布

等级	地表起伏度 (RDLS)	样本数量	土壤有机质含量 (g/kg)	
			平均值±方差	CV
I	RDLS≤4	162	24.889±1.937	7.78%
II	4<RDLS≤8	57	24.962±1.830	7.32%
III	8<RDLS≤12	14	24.944±2.303	9.23%
IV	12<RDLS≤16	3	24.788±3.173	12.80%
V	16<RDLS	1	26.687	0

3.2 气候因子对土壤有机质含量空间格局影响

气候因子作为五种成土因素中的一种,除上文提及考虑地形影响下的气温降低对土壤有机质含量积累的影响以外,WDAN 等^[43]研究发现,在温度大于 10℃时,气温升高可以加快土壤有机质含量分解速率。降水量^[44]也可以通过对植被和微生物的直接影响进而间接对土壤有机质含量形成与积累造成影响。由于枣阳市多年平均气温和降水量空间格局差异不显著(平均气温范围 15.3℃~16.6℃,平均降水量 762.5~917.2mm),因此将其等级类型分为 4 类。

由表 10 和表 11 可知,枣阳市耕地土壤有机质含量随气温升高而升高。综合分析枣阳市地形特征,考虑枣阳市气温变异特征不显著,对土壤有机质含量积累情况不显著,结合 NDVI 分布图可知,气温较低地区植被覆盖率也相对较低,对土壤有机质含量积累有一定影响。在降水量<900mm 时土壤有机质含量随降水量升高而升高。高降水量时土壤有机质含量有所降低,考虑降水对土壤养分的淋溶作用增大使得土壤有机质含量降低。使用 Geodetector 模型输出结果表明气温对土壤有机质含量空间格局单因素解释力为 $q=0.025$ 、降水量 $q=0.124$,解释力较强。并且降水量与坡向、地表起伏度、NDVI3 个自然因子交互作用对土壤有机质含量空间格局影响解释力更强(表 7),因此枣阳市降水量因子为气候因子中对土壤有机质含量空间格局影响的主导因子。

表 10 枣阳市土壤有机质含量在不同气温等级含量分布

等级	平均气温范围(℃)	样本数量	土壤有机质含量(g/kg)	
			平均值±方差	C.V(%)
I	15≤Tem.<15.5	1	152.828±0.000	0.00
II	15≤Tem.<16	37	25.183±1.606	6.38
III	16≤Tem.<16.5	197	25.228±1.562	6.19
IV	16.5≤Tem.	2	25.900±0.721	2.78

表 11 枣阳市土壤有机质含量在不同降水量等级含量分布

等级	降水量范围(mm)	样本数量	土壤有机质含量(g/kg)	
			平均值±方差	C.V(%)
I	750≤Pre.<800	57	24.889±1.937	7.78
II	800≤Pre.<850	114	24.962±1.830	7.32
III	850≤Pre.<900	62	25.025±1.749	6.98
VI	900≤Pre.<950	4	24.872±2.795	11.24

3.3 土壤属性对土壤有机质含量空间格局影响

土壤自身属性对土壤成分也会造成一定影响。Gerriit 等^[45]表明在相同气温、降水、植被条件下，土壤母质成分对土壤成分产生显著影响。Aranda 等^[46]研究表明成土母质对土壤有机质含量与质量差异造成影响。几种成土母质下土壤有机质含量分布情况(表 12)。枣阳市耕地土壤下成土母质主要以第四纪黏土、泥质岩类风化物和红砂岩类风化物为主。不同成土母质的土壤有机质含量差异表现为：近代河流冲积物>紫色砂页岩>河湖相冲积物>红色砂岩类风化物>第四纪黏土>第四纪老冲积物>泥质岩类风化物>第四纪黏土和泥质岩类。就空间变异情况来看，枣阳市八种成土母质对土壤有机质含量空间变异分布特征表现不强(CV 值<7.21%)，因此，成土母质对枣阳市土壤养分含量具有一定的影响力。这与先前研究结果类似。但由于土壤有机质含量多为输入性土壤养分，且不同成土母质对土壤有机质含量的作用机制及含量差异特点还需要进一步研究分析。

表 12 枣阳市耕地土壤有机质含量在不同成土母质的含量分布

成土母质	样本数量	土壤有机质含量(g/kg)	
		平均值±方差	CV
第四纪老冲积物	8	24.592±1.774	7.21%

第四纪黏土	199	24.914±1.903	7.64%
第四纪黏土和泥质岩类	1	19.798	0.00%
河湖相冲(沉)积物	6	25.101±1.680	6.69%
红砂岩类风化物	9	25.047±1.734	6.92%
近代河流冲积物	1	25.921	0.00%
泥质岩类风化物	11	24.362±1.264	5.19%
紫色砂页岩	2	25.492±0.110	0.43%

不同的土壤类型受成土母质、生物、气候、地形等成土因素和不同的成土过程影响，其土壤成分及其空间变异情况也有所不同。Kempen 等^[47]通过特定土壤深度函数进行三维映射研究发现，不同土壤类型下土壤有机质含量的分布有所不同，且土壤有机质含量层深度及分布不连续性具有一定差异。表 13 反应了枣阳市不同土壤类型下土壤有机质含量的分布特征。各类土壤类型下土壤有机质含量分布含量差异不大，其中土壤有机质含量最多在紫色土。水稻土分布范围最高，这与枣阳市农业结构与土地利用类型特点有关。该地区以平原及河流阶地为主，长期的水稻种植及人为熟化作用使水稻土分布广泛。黄棕壤土壤有机质含量最低，考虑由于黄棕壤较适宜耕作，使得土壤有机质含量积累大于消耗。根据 Geodetector 模型输出结果可知，土壤类型对土壤有机质含量解释力 q=0.054,属于枣阳市土壤有机质含量空间格局影响因子解释力较强的五种因子之一。这与胡贵贵等^[48]的研究结果一致。

表 13 枣阳市耕地土壤有机质含量在不同土壤类型下的含量分布

土壤类型	样本数量	土壤有机质含量 (g/kg)	
		平均值±方差	CV
潮土	3	25.383±0.942	3.71%
黄褐土	69	25.448±0.930	3.66%
黄棕壤	33	24.867±1.667	6.70%
沙姜黑土	8	24.967±1.628	6.52%
水稻土	122	25.067±1.616	6.46%
紫色土	2	25.492±0.110	0.43%

3.4 生物及人类活动对土壤有机质含量空间格局影响

结合 Bangroo 等^[8]、Yang 等^[13]对森林、水稻田等植被作物对土壤有机质含量的影响研究的基础，选取生物因子中的植被归一化指数 (NDVI) 与人类活动影响中作物类型为影响因素，进行分析。如表 14 反映了不同 NDVI 等级的土壤有机质含量的分布特征。枣阳市 NDVI 指数值域为-0.216~0.608。由表可知，当 NDVI 指数介于 0.1 至 0.5 之间时，土壤有机质含量随 NDVI 增大而

增加,当NDVI指数大于0.5时土壤有机质含量减小,考虑高植被覆盖度对土壤有机质含量消耗较大。根据Geodetector模型输出结果,NDVI单因子对土壤有机质含量影响解释力为 $q(\text{土壤有机质含量})=0.04$,NDVI与降水量、成土母质、以及公路距离等交互作用对土壤有机质含量解释力更强。而作物类型的影响因子解释力也达到了 $q(\text{土壤有机质含量})=0.116$,考虑生物尤其是植被可以作为枣阳市土壤有机质含量空间格局影响的典型影响因子。

表 14 枣阳市耕地土壤有机质含量和在不同 NDVI 等级的含量分布情况

等级	NDVI	样本数量	土壤有机质含量 (g/kg)	
			平均值±方差	CV
I	$0.1 < \text{NDVI}$	2	25.062 ± 1.38	5.50%
II	$0.1 \leq \text{NDVI} < 0.2$	23	24.574 ± 1.517	6.17%
III	$0.2 \leq \text{NDVI} < 0.3$	63	24.896 ± 1.887	7.58%
IV	$0.3 \leq \text{NDVI} < 0.4$	81	25.047 ± 1.734	6.92%
V	$0.4 \leq \text{NDVI} < 0.5$	66	25.196 ± 1.531	6.07%
VI	$0.5 \leq \text{NDVI}$	2	23.114 ± 1.449	6.27%

根据地统计结果分析表明,枣阳市土壤有机质含量半变异拟合块基比为0.522,表明随机性因素对土壤有机质含量空间格局影响作用力较强。随机性因素主要以人为因素为主。人为因素作用中,土地利用类型未通过显著性检验($p > 0.5$,显著性极弱)(地理探测器),这与DORJI等^[7]的研究结果不一致,考虑本研究尺度较小,且耕地土地利用类型较为单一(水田、旱地、水浇地),使得参与评价的影响因子类别较少,造成就算结果未满足预期。本研究创新选取了公路距离及河流水系距离作为对农田土壤养分含量空间格局影响,发现通过根据Geodetector模型中Factor-detector模型输出的单因素影响,公路距离对土壤有机质含量和STN解释力较高,分别达到了 $q(\text{土壤有机质含量})=0.101$,并且公路距离与降水量、NDVI交互作用影响作为前五组交互作用因子,对土壤有机质含量空间格局解释力更高($q > 0.22$)。用皮尔森相关系数(Pearson)对公路距离与土壤有机质含量分析,得出相关系数 $q=-0.224$ ($p < 0.005$),说明公路距离作为土壤有机质含量空间格局分布影响因子,对土壤有机质含量影响呈负相关性。

4 结论

通过对枣阳市耕地土壤有机质含量空间格局及影响因素进行研究和讨论,得出以下结论:

- (1) 枣阳市耕地土壤有机质含量范围为18.997~29.067g/kg,平均值24.889g/kg,基本上处于III级水平,变异系数(CV)=7.8%,属于空间弱变异。半变异空间结构拟合分析结果选择球状模型拟合,块基比0.522,表明受结构性因素与随机性因素共同影响。其含量分布格局呈现四周高,中心向东北向偏低的空间格局。
- (2) 根据Geodetector模型中单因子模型(Factor-detector)结果可知,影响枣阳市土壤有机质含量分布格局因子解释力差异较为明显。对土壤有机质含量空间格局影响较强的五种因子为降水量($q=1.124$)>公路距离($q=0.101$)>地表起伏度($q=0.054$)>土壤类型($q=0.054$)大于NDVI($q=0.044$)。上述5种因子分别为影响土壤有机质含量空间格局单因子作用的显著性因子。交互因子模型(Interaction-detector)结果可知,各组双因子交互方式对土壤有机质含量空间格局影响均为非线性协同作用。对土壤有机质含量空间格局影响较强的前5组交互因子为,坡向∩降水量($q=0.275$),地形起伏度∩降水量($q=0.282$),降水量

$\cap$ NDVI ($q=0.275$), 降水量 $\cap$ 公路距离 ($q=0.311$), NDVI $\cap$ 公路距离 ($q=0.286$)。

(3)本研究选择了 14 种自然和人为因素着重分析了枣阳市全局耕地土壤有机质含量空间格局与环境因子的相关性进行了分析,运用 Geodetector 模型与皮尔森系数结合分析了影响因子与土壤有机质含量的相关性,为后期耕作与施肥管理,不同耕作区农作物种类及土壤有机质含量和氮素的改良,提供工作依据,并为后期大尺度研究及其它地形区耕地土壤养分与环境相关性分析、土壤养分改善与耕地质量提升以及其他研究工作提供新的统计学计算方法。

(4)本研究没有深入考虑距离影响下某一环境变量对土壤有机质含量空间分布影响情况力变化的情况,且生物多样性方面的变量选取较少,可能会忽略潜在的影响因子。在后续研究中应当进一步优化相关性研究,进一步考虑模型的适用性与可行性。为下一步更加全面的理解土壤理化性质与环境变量之间的内在联系,研究枣阳市土壤有机质时空变化及其驱动力等方面提供研究基础。

参考文献:

- [1]赵吉霞,和寿甲,张庆,等.近 20 年来旱地耕层土壤全氮和 pH 的变化特征——以云南墨江县为例[J].土壤通报,2016,47(4):868-875.
- [2]MARCHETTI A,PICCINI C,FRANCAVIGLIA R,et al.Spatial Distribution of Soil Organic Matter Using Geostatistics: A Key Indicator to Assess Soil Degradation Status in Central Italy[J].Pedosphere,2012,22(2):230-242.
- [3]MEERSMANS J,WESEMAEL B VAN,GOIDTS E,et al.Spatial analysis of soil organic carbon evolution in Belgian croplands and grasslands,1960-2006[J].Global Change Biology,2011,17(1):466-479.
- [4]GU X H,WANG Y C,SUN Q,et al.Hyperspectral inversion of soil organic matter content in cultivated land based on wavelet transform[J].Computers and Electronics in Agriculture,2019,167:105053.
- [5]HE M Z,JI X B,BU D S,et al.Cultivation effects on soil texture and fertility in an arid desert region of northwestern China[J].Journal of Arid Land,2020,12(4):701-715.
- [6]SHUKLA A K,BEHERA S K,LENKA N K,et al.Chaudhary.Spatial variability of soil micronutrients in the intensively cultivated Trans-Gangetic Plains of India[J].Soil & Tillage Research,2016,163:282-289.
- [7]DORJI T,ODEH I O A,FIELD D J,et al.Digital soil mapping of soil organic carbon stocks under different land use and land cover types in montane ecosystems,Eastern Himalayas[J].Forest Ecology and Management,2014,318:91-102.
- [8]BANGROO S A,NAJAR G R,ACHIN E,et al.Application of predictor variables in spatial quantification of soil organic carbon and total nitrogen using regression kriging in the North Kashmir forest Himalayas[J].Catena,2020,193:104632.
- [9]LI S,LI Q Q,WANG C Q,LI Bing,et al .Spatial variability of soil bulk density and its controlling factors in an agricultural intensive area of Chengdu Plain,Southwest China[J].Journal of Integrative Agriculture,2019,18(2):290-300.

-
- [10]HU K L,WANG S Y,LI H,et al.Spatial scaling effects on variability of soil organic matter and total nitrogen in suburban Beijing[J].Geoderma,2014,226-227.
- [11]刘明杰,徐卓揆,郜允兵,等.基于机器学习的稀疏样本下的土壤有机质估算方法[J].地球信息科学学报,2020,22(9):1799-1813.
- [12]SONG X D,YANG F,JU B,et al.The influence of the conversion of grassland to cropland on changes in soil organic carbon and total nitrogen stocks in the Songnen Plain of Northeast China[J].Catena,2018,171:588-601.
- [13]YANG J,YANG W H,WANG F,et al.Driving factors of soluble organic nitrogen dynamics in paddy soils:Structure equation modeling analysis[J].Pedosphere,2020,30(6):801-809.
- [14]XIE E Z,ZHANG Y X,HUANG B,et al.Spatiotemporal variations in soil organic carbon and their drivers in southeastern China during 1981-2011[J].Soil & Tillage Research,2021,205:104763.
- [15]LI Q Q,YUE T X,WANG C Q,et al.Spatially distributed modeling of soil organic matter across China:An application of artificial neural network approach[J].Catena,2013,104:210-218.
- [16]PAN G X,P SMITH,PAN W N.The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China[J].Agriculture,Ecosystems and Environment,2008,129(1):344-348.
- [17]董玉祥,徐茜,杨忍,等.基于地理探测器的中国陆地热带北界探讨[J].地理学报,2017,72(1):135-147.
- [18]WANG H,GAO J B,HOU W J.Quantitative attribution analysis of soil erosion in different geomorphological types in karst areas:Based on the geodetector method[J].Science Press,2019,29(2):271-286.
- [19]ZHAO R,ZHAN L P,YAO M X,et al.A geographically weighted regression model augmented by geodetector analysis and principal component analysis for the spatial distribution of PM_{2.5}[J].Sustainable Cities and Society,2019,56:102106.
- [20]莫悦,刘洋,朱丽芳.长江经济带城市土地价格空间分异特征及其影响因素[J].长江流域资源与环境,2020,29(1):13-22.
- [21]薛明月,王成新,窦旺胜,等.黄河流域传统村落空间分布特征及其影响因素研究[J].干旱区资源与环境,2020,34(4):94-99.
- [22]殷杰,杨艺同.我国展览业与旅游业协调发展的时空演化特征及其驱动因子[J].经济地理,2020,40(8):194-202.
- [23]孟颖,曹月娥.新疆农村贫困化空间分布及影响因素探究——以荒地镇为例[J].世界地理研究,2020,29(3):650-658.
- [24]张衍毓,唐林楠,刘玉.京津冀地区乡村功能分区及振兴途径[J].经济地理,2020,40(3):160-167.
- [25]徐畅,彭虹,夏晶晶.基于 SWAT 模型的枣阳市滚河流域非点源污染模拟与控制研究[J].水资源与水工程学报,

2019, 30(2):63-70, 80.

[26]KONG X B,ZHANG F R,WEI Q,et al.Influence of land use change on soil nutrients in an intensive agricultural region of North China[J].Soil & Tillage Research,2005,88(1).

[27]孙向东,沈朝建,刘拥军,等.动物流行病学正态样本异常值的判断和处理[J].中国动物检疫,2009,26(5):67-68.

[28]GRUNWALD S.Multi-criteria characterization of recent digital soil mapping and modeling approaches[J].Geoderma,2009,152(3):195-207.

[29]刘旭,贡璐,解丽娜.种植模式对阿克苏绿洲农田土壤肥力的影响[J].干旱区资源与环境,2019,33(8):100-106.

[30]SONG F F,XU M G,DUAN Y H,et al.Spatial variability of soil properties in red soil and its implications for site-specific fertilizer management[J].Journal of Integrative Agriculture,2020,19(9):2313-2325.

[31]ZHAO R,ZHAN L,YAO M,et al.A geographically weighted regression model augmented by Geodetector analysis and principal component analysis for the spatial distribution of PM_{2.5}[J].Sustainable Cities and Society,2020,56:102106.

[32]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.

[33]ELENA B,OKSANA M.Reproduction of agricultural land on the basis of ecological and economic rehabilitation [J].Procedia Economics and Finance,2014,14:78-81.

[34]李亮亮,依艳丽,凌国鑫,等.地统计学在土壤空间变异研究中的应用[J].土壤通报,2005(2):265-268.

[35]BOGUNOVIC I,MESIC M,ZGORELEC Z,et al.Spatial variation of soil nutrients on sandy-loam soil[J].Soil and Tillage Research,2014,144:174-183.

[36]李秀梅,周时学,罗胜军,等.地统计学在生态学中的应用[J].现代农业科技,2014(13):245,247.

[37]翟朝阳,邱娟,司洪章,等.微地形对大西沟新疆野杏萌发层土壤因子的影响[J].生态学报,2019,39(6):2168-2179.

[38]SCHILLACI C,ACUTIS M,LOMBARDO L,et al.Spatio-temporal topsoil organic carbon mapping of a semi-arid Mediterranean region:The role of land use,soil texture,topographic indices and the influence of remote sensing data to modelling[J].The Science of the Total Environment,2017:601-602.

[39]BANGROO S A,NAJAR G R,RASOOL A.Effect of altitude and aspect on soil organic carbon and nitrogen stocks in the Himalayan Mawer Forest Range[J].Catena,2017,158:63-68.

[40]DAI W,HUANG Y.Relation of soil organic matter concentration to climate and altitude in zonal soils of China[J].Catena,2006,65(1):87-94.

-
- [41]BU X, RUAN H, WANG L, et al. Soil organic matter in density fractions as related to vegetation changes along an altitude gradient in the Wuyi Mountains, southeastern China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2012, 52:42-47.
- [42]YANG Q Y, JIANG Z C, LI W J, et al. Prediction of soil organic matter in peak-cluster depression region using kriging and terrain indices[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 144:126-132.
- [43]WANG D, HE N P, WANG Q, et al. Effects of temperature and moisture on soil organic matter decomposition along elevation gradients on the Changbai Mountains, Northeast China[J]. *Pedosphere*, 2016, 26(3):399-407.
- [44]CHEN Q, NIU B, HU Y, et al. Warming and increased precipitation indirectly affect the composition and turnover of labile-fraction soil organic matter by directly affecting vegetation and microorganisms[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 714:136787.
- [45]ANGST G, MESSINGER J, GREINER M, et al. Soil organic carbon stocks in topsoil and subsoil controlled by parent material, carbon input in the rhizosphere, and microbial-derived compounds[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 122:19-30.
- [46]ARANDA V, AYORA-CANADA M J, DOMÍNGUEZ-VIDAL A, et al. Effect of soil type and management (organic vs. conventional) on soil organic matter quality in olive groves in a semi-arid environment in Sierra Mágina Natural Park (S Spain)[J]. *Geoderma*, 2011, 164(1-2):54-63.
- [47]KEMPEN B, BRUS D J, STOOORVOGEL J J. Three-dimensional mapping of soil organic matter content using soil type-specific depth functions[J]. *Geoderma*, 2011, 162(1-2):107-123.
- [48]胡贵贵, 杨联安, 封涌涛, 等. 基于地理探测器的宝鸡市农田土壤养分影响因子分析[J]. *土壤通报*, 2020, 51(1):71-78.