

湖北省两种地形区耕地土壤肥力 指标空间格局与主控因素

高浩然^{1,2}, 周勇^{1,2}, 刘甲康^{1,2}, 王丽^{1,2}, 吴飞^{1,2}, 田杨^{1,2}

(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 430000; 2.华中师范大学 城市与环境科学学院, 湖北 武汉 430000)

摘要: [目的] 研究湖北省 2 种地形的土壤肥力指标分异空间格局及主控因素差异, 为不同地形区土壤质量改良, 农业生态环境及耕地质量提升提供一定理论依据。[方法] 选取土壤有机质、全氮、全磷、全钾 4 种土壤肥力指标, 并收集整理土地利用类型、成土母质、土壤类型、高程 (DEM)、地表起伏度、坡度、植被覆盖度指数 (NDVI)、平均气温、平均降水量以及道路、工矿用地、城镇居民点、河流水库 13 种环境影响因子, 利用基本统计学、地统计学、反距离权重和地理探测器模型, 分析不同地形区每种土壤肥力指标的空间分布特征以及每种土壤肥力指标与环境因子之间的相关性, 并识别对比不同地形区土壤肥力指标含量分异的主控因子。[结果] 襄州区土壤肥力指标主控因素主要有降水量、平均气温, 以及道路用地、城镇居民点用地、工矿用地、河流水库距离; 房县土壤肥力指标主控因素主要有降水量、平均气温、坡度、坡向、地表起伏度以及河流水库距离。[结论] 襄州区与房县因地形因素影响其土壤肥力指标空间格局分异主控因素存在差异, 平原区更易受人类活动影响。

关键词: 汉江中游平原; 鄂西北山区; 土壤肥力指标; 反距离权重; 地理探测器; 主控因素

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)05-0283-10

中图分类号: S153.6

文献参数: 高浩然, 周勇, 刘甲康, 等. 湖北省两种地形区耕地土壤肥力指标空间格局与主控因素[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 283-292. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20220829.003; Gao Haoran, Zhou Yong, Liu Jiakang, et al. Spatial patterns and main control factors of soil fertility indicators in arable land in two topographic regions of Hubei Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 283-292.

Spatial Patterns and Main Control Factors of Soil Fertility Indicators in Arable Land in Two Topographic Regions of Hubei Province

Gao Haoran^{1,2}, Zhou Yong^{1,2}, Liu Jiakang^{1,2}, Wang Li^{1,2}, Wu Fei^{1,2}, Tian Yang^{1,2}

(1. Key Laboratory for Geographical Process Analysis & Simulation of

Hubei Province, Central China Normal University, Wuhan, Hubei 430000, China;

2. College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan, Hubei 430000, China)

Abstract: [Objective] The spatial pattern of a soil fertility index and differences in the main controlling factors for two topographical areas in Hubei Province was determined in order to provide a theoretical basis for soil quality improvement, agroecological environment, and arable land quality enhancement in different topographical areas. [Methods] Data for four soil fertility indicators (soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, and total potassium), along with 13 environmental impact factors [land use type, soil-forming parent material, soil type, elevation (DEM), surface relief, slope, normalized difference vegetation index (NDVI), average temperature, average precipitation, roads, industrial and mining sites, urban settlements, and rivers and reservoirs], were collected and compiled. Basic statistics, geostatistics, inverse distance

收稿日期: 2022-03-21

修回日期: 2022-04-17

资助项目: 国家自然科学基金项目“40 年来两湖平原耕地质量变化与粮食产能的时空响应机理研究”(42171061)

第一作者: 高浩然(1996—), 男(汉族), 河南省郑州市人, 硕士研究生, 主要从事土壤地理学、土地利用与农业生态环境等方面研究。Email: ghr_9393@mails.ccnu.edu.cn.

通信作者: 周勇(1964—), 男(汉族), 湖南省益阳市人, 博士, 教授, 主要从事土地资源调查与评价, 耕地质量与粮食安全, 土地利用与生态安全, 地理信息系统等方面的研究。Email: yzhou@mails.ccnu.edu.cn.

weighting, and a geographic detector model were used to analyze the spatial distribution characteristics of each soil fertility index in different topographic areas and to determine the correlation between each soil fertility index and environmental factors. The main controlling factors of the soil fertility index content differentiation in different topographic areas were identified and compared. [Results] The main controlling factors for the soil fertility indexes in Xiangzhou District were precipitation, average temperature, and the distance of road land, urban settlement land, industrial and mining land, and rivers and reservoirs. The main controlling factors for soil fertility indexes in Fang County were precipitation, average temperature, slope, slope direction, surface relief, and the distance of rivers and reservoirs. [Conclusion] The spatial patterns of soil fertility indicators in Xiangzhou District and Fang County differed in their main controlling factors due to topographic factors, and the plain areas were more susceptible to human activities.

Keywords: Middle Hanjiang River Plain; Northwest Hubei Mountainous area; soil fertility index; inverse distance weighting; geographic detector; main controlling factors

土壤有机质和氮磷钾元素被认为是农作物生长过程中最为重要且必要的营养元素^[1],同时也是评价土壤肥力质量的养分含量指标^[2]。耕地土壤受自然环境及人类活动影响,其养分含量及相关理化性质表现出不同的空间异质性。化肥的施用会直接影响耕地土壤养分及相关理化性质的变化^[3],过量施肥导致土壤理化性质失衡^[4]、土壤水污染^[5]以及河流化学污染等问题也应当引起重视。因此,对耕地土壤养分含量的空间格局及其主控因素进行研究可以较好地掌握某地自然环境本底情况及人类活动对耕地土壤养分含量的影响情况,也可以在一定程度上反映土壤营养元素及耕地土壤肥力指标丰缺度,并对研究区针对性施肥、土壤污染管控及后续农业生产及土壤肥力评价与质量提升有较高的参考价值。

不少学者对土壤肥力指标含量的空间分异^[6-10]、土壤养分空间预测^[11-13]、土壤养分空间自相关性^[14-15]以及空间分异的影响因素及其相关性程度^[16-20]研究较多。还有学者对人类活动强度^[21]、工矿用地^[22]、居民点距离^[23]等人类活动因子对土壤养分及理化性质等影响因素进行了研究,其中对有机质含量研究较多,对全量氮磷钾含量格局分异及环境影响因素相关性程度研究不够充分,且研究区地形条件较为单一。土壤全量养分含量是对某地自然环境本底情况及土壤综合肥力情况进行评价和判断的重要指征,并且掌握其空间格局及影响因素的情况对农业生产及土壤肥力评价与质量提升有较高的参考价值。地理探测器(GDM)模型提供了一组用来揭示某种变量其背后驱动力的统计学方法^[24],其优势在于它不仅可以通过单因子模型来计算某单一变量对研究对象的解释力强度,还可以通过交互因子模型计算不同变量对研究对象的交互作用解释力强度。目前,地理探测器多与地理信息技术、主成分分析、地统计学和

地理加权回归等方法相结合,在空间相关性方面研究广泛,并且逐渐开始在土壤养分、土壤重金属影响因素等方面进行研究。

本研究利用地理信息技术、基本统计学和反距离权重插值(inverse distance weight, IDW)、地理探测器(geodetector)等方法,选择湖北省不同地貌区(鄂西北山地区、汉江中游平原区)范围内的房县和襄州区两地,对湖北省不同地貌区耕地土壤有机质、全氮、全钾和全磷 4 种土壤肥力质量养分指标含量空间格局进行分析,以期得出空间分异特征,并对影响土壤养分格局分异的影响因子相关性进一步研究,掌握不同地区土壤肥力质量的自然基础和人类活动影响力强度,对针对性施肥及农业生产管理、控制和治理农田土壤及水污染、耕地质量及粮食产量提升等工作具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

襄州区隶属于湖北省襄阳市,居汉江中游。地理位置为 111°44′—112°23′E, 31°46′—32°28′N,北与河南省的邓州市、新野县、唐河县接壤。交通便利,是鄂、豫、川、陕 4 省的交通枢纽。北部岗垄平行排列,似波状平原;中部为河流冲积平原,隶属于鄂北岗地与江汉平原交汇处,长江中下游区一级农业区——长江中游平原农业水产区二级农业区。

房县属于湖北省十堰市,地理位置为 110°02′—111°15′E, 31°34′—32°31′N,四周高山环绕,山势巍峨陡峭,略呈盆地地形。最高海拔 2 486 m;平坝、丘陵占总面积的 17.1%,高山区占 38.5%,隶属鄂西北山区—西南区一级农业区—秦岭大巴山林农区二级农业区。

1.2 土壤样品采集与测定

1.2.1 土壤样品采集 数据来自“农业农村部耕地

质量提升与化肥减量增效项目——2019 耕地质量等级调查与评价”进行的外业采样所得测土配方数据,采样时间在 2019 年秋收后(10 月底至 11 月中旬)完成,以“三调土地利用现状矢量图—耕地图斑”为基础,综合考虑两个地区耕地面积、地形地貌、耕地管理水平等情况,分别在襄州区和房县共布设 206 和 380 个采样点 0—20 cm 深度耕层土壤进行土壤样品采集,记录各采样点经纬度,利用软件生成采样点分布。并记录土地利用方式、土壤类型等信息。

1.2.2 室内化验与数据整理 将外业土壤样品带回后,依次进行除杂、室温风干、研磨过筛等基本处理工作后,将每个样点土壤样品进行称重分成若干等份备用。①土壤有机质含量采用油浴加热重铬酸钾氧化容量法测定^[25];②土壤全氮含量采用全自动凯氏定氮仪测定;③土壤全磷含量采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法测全磷法;④土壤全钾含量采用 NaOH 熔融—火焰光度法测定^[26]。对两个研究区各样点所测的肥力指标进行整理,采用格拉布斯法^[27]对存在异常值的样点进行识别并剔除,最终保留襄州区 195 个,房县 376 个有效样点数据。

1.3 影响因子数据获取与处理

结合以往针对土壤养分影响因素相关研究成果并结合本研究区实际情况及数据获取难易程度,选择土地利用类型、成土母质、土壤类型、气候因子(降水量、气温)、地形因子(高程、坡向、坡度、地表起伏度)、人类影响水平(居民点、工矿、道路、河流水库距离)作为土壤肥力指标全量养分的相关性因子。以研究区第二次土壤普查及地方农业农村局耕地质量保护工作站所提供的相关资料,获取并修正成土母质、土壤类型信息;气候因子通过中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)获取全国平均降水量和平均气温 1 km 分辨率栅格图(2018 年),通过掩膜提取获取研究区平均降水量和平均气温栅格图;地形因子通过地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>),获取分辨率为 30 m 的数字高程产品,运用 ArcGIS10.2 计算相关地形因子指数;对研究区土地利用类型矢量数据进行提取,并运用欧氏距离计算出人类活动因子至各个样点之间的距离。

1.4 土壤肥力指标空间格局与影响因素分析

1.4.1 反距离权重(IDW) 反距离权重(inverse distance wighted, IDW)也称为距离倒数乘方法,是一种全局加权平均插值方法,因其计算简单且精度误差较小,被广泛应用于插值及空间预测分析^[28-32]。其计算原理如下:

$$Z(x_0) = \sum_{i=0}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (1)$$

式中: $Z(x_0)$ 是待预测点 x_0 的预测值; n 为样本数量; $Z(x_i)$ 为已知点 x_i 的实测值; λ_i 为权重系数。

权重系数的计算公式为:

$$\lambda_i = \frac{d_i^{-t}}{\sum_{i=1}^n d_i^{-t}} \lambda_i = 1 \quad (2)$$

式中: t 为指数值,一般为 2; d_i 为待预测点到第 i 个点的距离。

1.4.2 地理探测器(geodetector) 地理探测器作为一种用于分析和探测空间分异性的工具,能够计算某因子对因变量空间分异的解释力与影响程度,从而揭示因变量呈现空间差异的原因^[24],其计算公式如下:

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

式中: $h=1, \dots, n$; L 是自变量 X 的层数; N_h 和 N 分别是 h 层和总区域样本单元数; σ_h^2 和 σ^2 表示 h 层和该区域的方差;SSW 表示各层空间方差之和,SST 表示区域内 Y 的总方差。

在导入地理探测器之前,需要对自变量数据进行离散化处理:将土壤类型、成土母质、土地利用类型等描述型数据按照类别进行划分;将地形因子数据(高程、坡度、坡向、地表起伏度)、气候因子数据(平均降水量、平均气温)、人类活动因子(居民点、工矿用地、居民点、河流水库距离)按照自然断点法分为 7 类。所有影响因子见表 1。

表 1 土壤肥力影响因子变量统计

变量	影响因子	变量	影响因子
X_1	土地利用类型	X_8	坡度/(°)
X_2	土壤类型	X_9	高程/m
X_3	成土母质	X_{10}	城镇居民点距离/m
X_4	平均气温/°C	X_{11}	道路用地距离/m
X_5	平均降水量/mm	X_{12}	工矿用地距离/m
X_6	地表起伏度	X_{13}	河流水库距离/m
X_7	坡向		

2 结果与分析

2.1 土壤肥力指标基本统计学特征

依据第二次土壤普查中的分级标准(表 2)对襄州区和房县 4 种土壤肥力指标进行分级处理,使用 minitab18 软件对两个地区各土壤肥力指标进行基本统计学分析,结果见表 3。

由统计结果可知,两地 4 种土壤肥力指标均存在空间变异情况,且土壤全氮变异系数在两个地区变异

性都较高,属于高强度变异,房县全磷含量在空间上也表现高强度变异,其余肥力指标含量表现为中等强度变异。对两个地区采样点化验结果数据进行统计,为体现空间分异特征,将房县的肥力指标划分标准进行了适当调整,结果见表 4。结合表 3 统计结果可知,襄州区各土壤肥力指标含量都较为集中,有机质含量平均值较低,含量水平位于第四级;全氮含量水平较差,近 98% 的样点所测含量水平位于最后一级,属极度缺乏;全磷、全钾含量水平较为平均,平均值均位于第三级水平。房县有机质含量水平分布较为平均且含量较为丰富,位于第三、第四级水平较多,极大值含量为 54.904 g/kg;全氮与全磷含量水平较高且丰富,平均值均高于国标一级标准,属于极丰富水平,

但空间分异较为明显,分别出现 0.01 g/kg 与 0.15 mg/kg 的极小值,说明存在某些地区的氮磷元素缺乏;全钾含量水平较为集中,多集中于第三级水平,空间分异性不强,含量分布较均匀。

表 2 土壤肥力指标分级标准

等级	有机质/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	全磷/ (mg · kg ⁻¹)	全钾/ (mg · kg ⁻¹)
一级	>40	>2	>1	>25
二级	30~40	1.5~2	0.8~1	20~25
三级	20~30	1~1.5	0.6~0.8	15~20
四级	10~20	0.75~1	0.4~0.6	10~15
五级	6~10	0.5~0.75	0.2~0.4	5~10
六级	<6	<0.5	<0.2	<5

表 3 湖北省两地 4 种土壤肥力指标基本统计学分析

地区	变量	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数
襄州区	有机质/(g · kg ⁻¹)	0.94	32.48	14.978	4.915	32.81%
	全氮/(g · kg ⁻¹)	0.042 2	1.002	0.113 51	0.102 57	90.36%
	全磷/(mg · kg ⁻¹)	0.168 4	1.062 8	0.605 63	0.126 99	20.97%
	全钾/(mg · kg ⁻¹)	3.431	23.044	15.672	3.318	21.17%
统计量						
地区	变量	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数
房县	有机质/(g · kg ⁻¹)	4.458	54.904	22.496	9.5	42.23
	全氮/(g · kg ⁻¹)	0.01	14.27	2.787	2.298	82.46
	全磷/(mg · kg ⁻¹)	0.15	68.98	8.352	6.6	79.03
	全钾/(mg · kg ⁻¹)	6.53	55.63	25.428	7.598	29.88

表 4 湖北省两地 4 种肥力指标含量按样点数统计结果

地区	有机质			全氮			全磷			全钾		
	含量/ (g · kg ⁻¹)	样点数	比例/%	含量/ (g · kg ⁻¹)	样点数	比例/%	含量/ (mg · kg ⁻¹)	样点数	比例/%	含量/ (mg · kg ⁻¹)	样点数	比例/%
襄州区	≥40	0	0	≥2	0	0	>1	2	1.03	>25	0	0
	30~40	2	1.03	1.5~2	0	0.00	0.8~1	12	6.15	20~25	16	8.21
	20~30	23	11.79	1~1.5	1	0.51	0.6~0.8	78	40.00	15~20	104	53.33
	10~20	145	74.36	0.75~1	1	0.51	0.4~0.6	99	50.77	10~15	68	34.87
	6~10	18	9.23	0.5~0.75	2	1.03	0.2~0.4	3	1.54	5~10	4	2.05
	<6	7	3.59	<0.5	191	97.95	<0.2	1	0.51	<5	3	1.54
房县	>40	19	5.05	>3.00	135	35.90	>5.00	293	77.93	>25	199	52.93
	30~40	64	17.02	2.50~3.00	33	8.78	4.50~5.00	13	3.46	20~25	89	23.67
	20~30	122	32.45	2.00~2.50	36	9.57	4.00~4.50	19	5.05	15~20	56	14.89
	10~20	142	37.77	1.50~2.00	39	10.37	3.50~4.00	6	1.60	10~15	27	7.18
	6~10	24	6.38	1.00~1.50	60	15.96	3.00~3.50	21	5.59	5~10	5	1.33
	<6	5	1.33	<1.00	73	19.41	<3	24	6.38	<5	0	0

2.2 反距离权重(IDW)插值空间格局分析

襄州区和房县 4 种土壤肥力指标插值结果如

图 1 和图 2 所示,并结合采样点实测值以乡镇类型统计结果(表 5 和表 6)可知:襄州区土壤有机质含量格

局呈斑块状分散,高值区以东南部张家集镇、峪山镇、黄龙镇和北部黄集镇、古驿镇为主,低值区位于中部张湾镇和主城区附近;土壤全氮含量在全区范围内均非常低,大部分地区全氮含量均小于 0.5 g/kg 水平,仅在峪山镇、黄龙镇有含量较丰富的地区,考虑部分样点的实测值较高,但这些乡镇的其余地区全氮含量仍属于低水平,与有机质含量在襄州区总体格局分布情况差异较为明显;襄州区土壤全磷和全钾含量分布情况也呈斑块状较为分散,且地区差异也较为明显,但土壤全钾含量相对全磷含量总体较丰富,且空间格局特征更为明显,具体表现为,襄州区土壤全钾含量以北高南低的总体格局为主,极高值分布在张湾镇,全境总体含量以大于 20 mg/kg 为主,属于三级以上水平,土壤全磷含量总体格局以 $0.4 \sim 0.6 \text{ mg/kg}$ 含量水平分布最广,高值区不明显,主要分布于东津镇境内。

房县主要以山区为主,耕地主要位于中部地势较为平缓的地区,而南部和北部以山区为主,且南部总体海拔要高于北部。有机质含量空间分异程度较高,且较为复杂,其中极高值主要位于南部上龛乡和野人谷镇,中部和北部含量较低,全境有机质含量以大于 20 g/kg 水平为主,以三级以上水平为主,总体含量水平较高;房县土壤全氮含量格局与有机质类似,其南部含量水平明显高于北部地区,高值区以南部九道镇和野人谷镇为主,在空间上表现出与土壤有机质空间一致性水平较高,可认为房县土壤有机质与全氮存在同源性;全磷含量全县均较低,主要以小于 3.0 mg/kg 含量水平为主,仅在南部上龛乡存在部分高值区;土壤全钾含量全县总体水平较为丰富,但空间格局呈现斑块状破碎分散,空间异质性水平较高,其中在五台乡和门古寺镇存在土壤全钾的极高值,极低值则零散分布于全境,但分布面积较少。

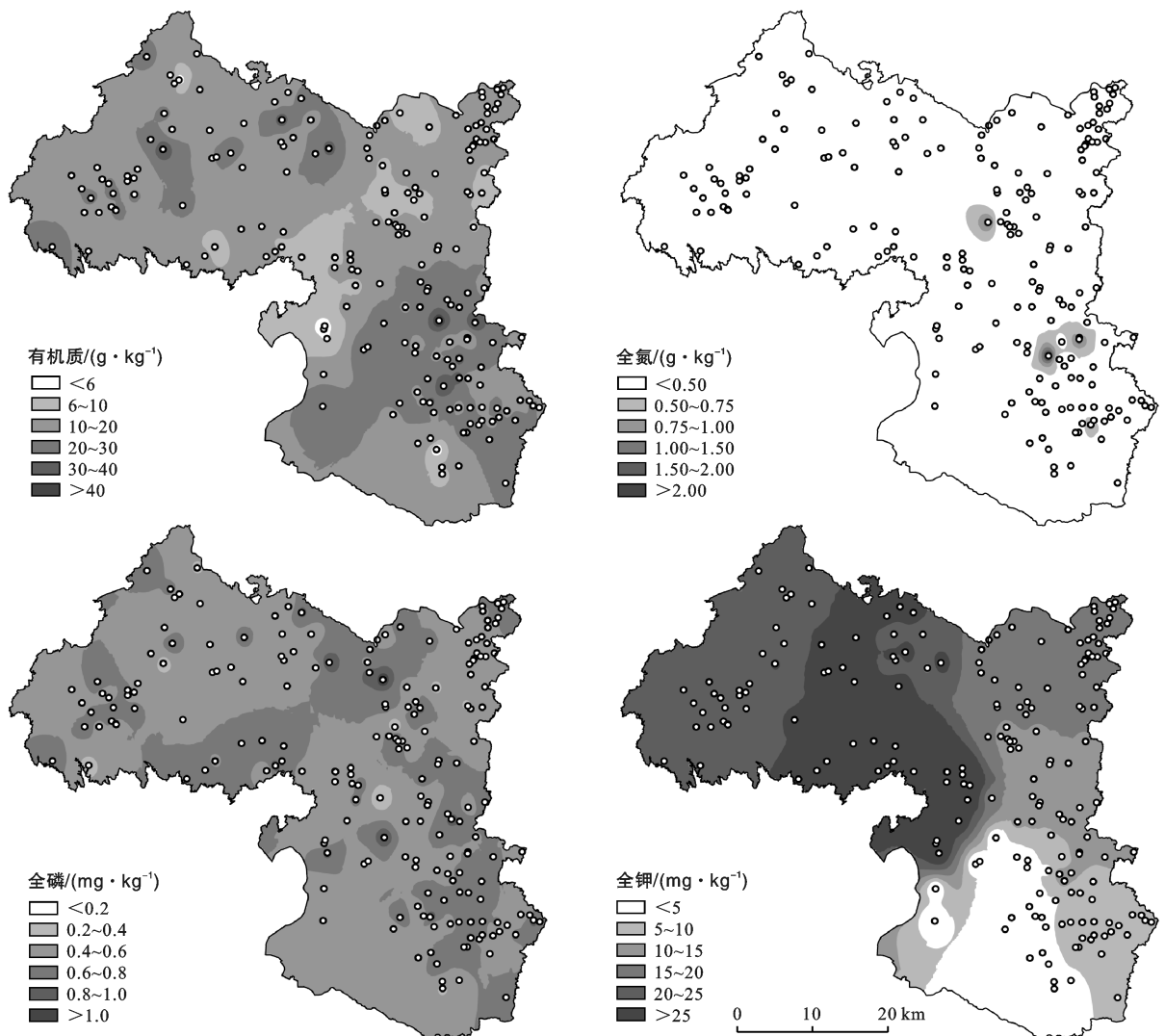


图 1 襄州区 4 种土壤肥力指标含量空间格局分布

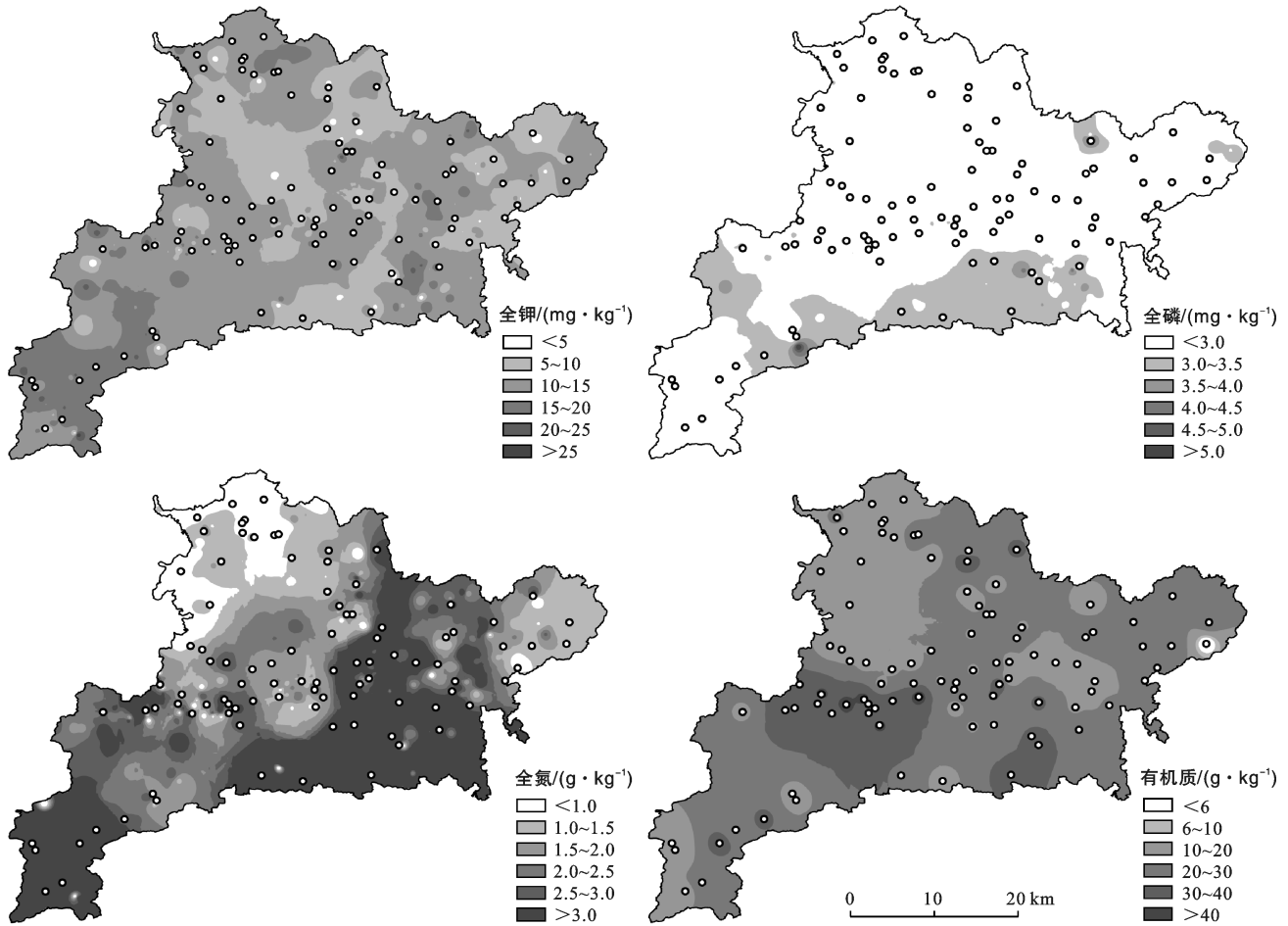


图 2 房县 4 种土壤肥力指标含量空间格局分布

表 5 襄州区样点实测土壤肥力指标含量按乡镇划分

乡镇名称	样点数	有机质/(g · kg ⁻¹)		全氮/(g · kg ⁻¹)		全磷/(mg · kg ⁻¹)		全钾/(mg · kg ⁻¹)	
		平均值±标准差	变异系数/%	平均值±标准差	变异系数/%	平均值±标准差	变异系数/%	平均值±标准差	变异系数/%
程河镇	26	13.158±3.101	23.56	0.095±0.024	25.64	0.575±0.105	18.20	16.482±2.946	17.87
东津镇	5	20.260±2.810	13.85	0.123±0.282	22.97	0.631±0.170	26.46	16.660±25.820	25.82
古驿镇	16	15.710±4.330	27.58	0.130±0.140	107.70	0.611±0.125	20.36	13.280±6.630	49.95
黄集镇	9	17.010±4.860	28.58	0.105±0.011	10.86	0.553±0.102	18.60	13.587±2.357	17.35
黄龙镇	25	16.956±4.197	24.75	0.130±0.098	75.13	0.642±0.120	18.75	16.024±2.365	14.76
伙牌镇	10	12.950±4.040	31.23	0.092±0.008	9.64	0.656±0.112	17.06	16.368±2.627	16.05
龙王镇	19	15.283±3.172	20.75	0.097±0.016	16.21	0.604±0.099	16.45	15.553±2.794	20.75
石桥镇	8	14.170±5.490	38.75	0.102±0.020	19.78	0.573±0.078	13.67	14.759±2.360	15.99
双沟镇	14	13.856±3.301	23.83	0.099±0.032	31.82	0.579±0.213	36.68	14.721±1.842	12.51
峪山镇	19	15.830±6.050	38.11	0.157±0.206	131.80	0.589±0.134	22.79	15.271±2.710	17.74
张家集镇	19	19.240±5.550	28.87	0.144±0.180	124.90	0.608±0.116	19.08	15.709±2.875	28.87
张湾镇	14	9.6340±3.139	32.58	0.081±0.018	22.07	0.593±0.092	15.52	18.411±2.249	12.22
朱集镇	11	10.910±3.501	32.04	0.089±0.032	35.85	0.576±0.084	17.44	0.670±0.173	25.75

2.3 地理探测器 (geodetector) 模型结果与影响因子解释力强度分析

2.3.1 土壤有机质及全量养分含量格局影响因素单

因子分析 襄州区与房县 4 种土壤肥力指标通过“因子探测器 (factor detector)”模型 q 解释力计算结果如表 7 和表 8 所示。

表 6 房县样点实测土壤肥力指标含量按乡镇划分

乡镇名称	样点数	有机质/(g·kg ⁻¹)		全氮/(g·mg ⁻¹)		全磷/(g·mg ⁻¹)		全钾/(g·mg ⁻¹)	
		平均值±标准差	变异系数/%	平均值±标准差	变异系数/%	平均值±标准差	变异系数/%	平均值±标准差	变异系数/%
白鹤镇	42	20.97±9.01	42.98	3.506±1.774	50.61	5.408±2.407	44.50	23.538±5.053	21.47
大木厂镇	13	17.27±7.83	45.30	0.895±0.46	51.33	7.192±2.469	34.34	28.16±6.78	24.06
红塔镇	6	25.96±12.55	48.33	2.333±1.444	61.91	7.090±2.890	40.86	24.85±5.59	22.50
九道乡	26	20.67±8.76	42.40	6.901±3.444	49.90	6.991±2.377	34.00	32.32±9.62	29.77
军店镇	34	24.63±9.30	37.75	1.666±0.805	48.30	8.401±2.854	33.97	22.138±4.807	21.71
门古寺镇	51	22.21±8.34	37.56	2.709±2.073	76.51	8.150±3.496	42.90	26.165±6.660	25.46
青峰镇	40	19.65±7.81	39.76	2.958±1.557	52.64	7.02±9.54	135.92	26.66±6.35	23.81
沙河乡	16	20.72±5.32	25.67	1.194±0.559	46.77	8.371±3.710	44.32	22.90±7.03	30.68
上龛乡	14	36.98±7.90	21.37	2.079±0.934	44.92	14.00±16.29	116.38	29.81±8.08	27.12
土城镇	33	24.66±6.94	28.16	1.779±1.377	77.41	5.702±2.448	42.93	22.88±7.61	33.24
万峪河乡	12	21.28±8.52	40.05	2.364±1.229	51.98	5.649±3.141	55.60	21.00±5.156	24.55
五台林场	8	24.25±10.63	43.82	3.036±1.021	33.63	13.47±15.09	112.08	31.98±7.07	22.11
姚坪乡	23	14.131±4.198	29.70	0.884±0.542	61.34	6.928±2.757	39.80	22.42±7.78	34.69
窑淮乡	5	25.62±11.48	44.81	1.422±1.230	86.52	7.98±3.04	38.15	27.45±4.84	17.63
野人谷镇	29	29.48±11.47	38.90	5.140±2.795	54.38	15.85±7.32	46.16	24.27±9.52	39.21
尹吉甫镇	3	7.11±3.05	42.89	2.080±1.548	74.42	3.85±2.30	59.68	21.23±6.84	32.23
中坝乡	21	24.14±7.40	30.65	2.542±0.731	28.74	12.72±5.27	41.44	28.16±7.54	26.78

根据结果可知,影响襄州区耕地土壤肥力指标含量空间格局 13 个影响因子的 q 解释力中,前 6 位主控因素依次为如下。有机质: X_5 (平均降水量) $>X_1$ (土地利用类型) $>X_2$ (土壤类型) $>X_7$ (坡向) $>X_{13}$ (河流水库距离);全氮: X_5 (平均降水量) $>X_7$ (坡向) $>X_{13}$ (河流水库距离) $>X_2$ (土壤类型) $>X_{10}$ (城镇居民点距离) $>X_{11}$ (道路用地);全钾: X_{10} (城镇居民点距离) $>X_8$ (坡度) $>X_5$ (平均降水量) $>X_7$ (坡向) $>X_{11}$ (道路用地) $>X_6$ (地表起伏度);全磷: X_{11} (道路用地) $>X_6$ (地表起伏度) $>X_5$ (平均降水量) $>X_{13}$ (河流水库距离) $>X_7$ (坡向) $>X_4$ (平均气温)。对位于汉江中游平原的襄州区而言,自然环境因子与人类活动因子对土壤全量养分含量格局均存在较为显著的影响。

影响房县耕地土壤肥力指标含量空间格局 13 个影响因子的 q 解释力中,前 6 位的主控因素如下。有机质: X_1 (土地利用类型) $>X_4$ (平均气温) $>X_5$ (平均降水量) $>X_2$ (土壤类型) $>X_{13}$ (河流水库距离) $>X_8$ (坡度);全氮: X_4 (平均气温) $>X_2$ (土壤类型) $>X_5$ (平均降水量) $>X_{11}$ (道路用地) $>X_{13}$ (河流水库距离) $>X_8$ (坡度);全磷: X_4 (平均气温) $>X_2$ (土壤类型) $>X_5$ (平均降水量) $>X_8$ (坡度) $>X_6$ (地表起伏度) $>X_{13}$ (河流水库距离);全钾: X_4 (平均气温) $>X_7$ (坡向) $>X_3$ (成土母质) $>X_8$ (坡度) $>X_{13}$ (河流水库用地) $>X_{11}$ (道路用地)。由结果可知,位于鄂西北山区的房县其养分含量格局受自然环境因素影响较强烈,人类活动因子也存在一定的影响但并不十分显著,仅对土壤全氮影响力较强。

表 7 襄州区土壤肥力指标单因子作用计算结果

影响因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}
有机值	0.119	0.046	0.006	0.003	0.192	0.023	0.039	0.018	0.018	0.021	0.035	0.018	0.036
全氮	0.005	0.023	0.011	0.009	0.078	0.015	0.054	0.014	0.009	0.020	0.017	0.015	0.027
全磷	0.001	0.021	0.001	0.007	0.042	0.030	0.035	0.054	0.009	0.065	0.032	0.020	0.024
全钾	0.001	0.002	0.010	0.020	0.043	0.043	0.028	0.014	0.015	0.015	0.048	0.005	0.039

注:所有影响因素均通过显著性检验: $p < 0.05$ 。下同。

表 8 房县土壤肥力指标单因子作用计算结果

影响因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}
有机值	0.120	0.043	0.012	0.107	0.100	0.013	0.027	0.031	0.018	0.027	0.009	0.003	0.034
全氮	0.002	0.076	0.029	0.189	0.039	0.007	0.012	0.031	0.017	0.013	0.034	0.019	0.034
全磷	0.010	0.026	0.016	0.106	0.025	0.017	0.013	0.024	0.008	0.014	0.012	0.011	0.020
全钾	0.007	0.008	0.019	0.080	0.012	0.013	0.036	0.019	0.008	0.008	0.013	0.007	0.024

根据此探测器结果综合对比分析可知,平均降水量、城镇居民点距离、道路用地、河流水库用地、土地利用类型和土壤类型对襄州区和房县的耕地土壤肥力指标的影响均较强,其中对襄州区各土壤肥力指标影响力最强的因素分别为平均降水量、城镇居民点距离和道路用地距离,且河流水库距离对各土壤肥力指标影响均较强;对房县各土壤肥力指标影响力最强的因素分别为土地利用类型和平均降水量,其中平均降水量对土壤全氮、全钾和全磷影响力最强,且土壤类型、坡度和地表起伏度等地形因子对房县耕地土壤肥力指标影响力均较强;可以看出,影响汉江中游平原地区土壤肥力指标的因素中,人类活动因子影响程度高于自然环境影响程度,而鄂西北山区土地利用方式对土壤有机质含量空间格局影响程度较高以外,其余人类活动因子的影响程度均小于自然环境因子的影响程度。

2.3.2 土壤有机质及全量养分格局影响因素交互作用因子分析 将上述影响襄州区于房县 4 种土壤全量养分格局的 13 个影响因子继续导入交互因子探测器计算可知,每种全量养分的每对交互作用因子(共 91 对) q 解释力均大于其单因子 q 解释力。

襄州区环境因子对土壤有机质含量交互作用表现为: X_5 (平均降水量)与各影响因子交互作用 q 解释力均较高,其中 X_5 (平均降水量)与 X_{13} (河流水库距离)($q=0.420$)、 X_{11} (公路距离)($q=0.369$)、 X_2 (土壤类型)($q=0.372$)、 X_7 (坡向)($q=0.346$)和 X_{10} (城镇距离)($q=0.337$)为影响土壤有机质的交互作用 q 解释力最强的 5 种环境因子组合,说明单因子影响程度较高的环境因子,两两间的交互作用力也较强;环境因子对全氮含量交互作用因子 q 解释力表现为, X_5 (平均降水量)与各因子,以及 X_7 (坡向)与各因子交互作用力较强,其中 X_5 (平均降水量)与 X_{10} (城镇距离)的交互作用 q 解释力最强($q=0.469$)、 X_5 (平均降水量)与 X_4 (城镇距离)($q=0.455$)、 X_{13} (河流水库距离)($q=0.357$)和 X_7 (坡向)($q=0.346$),以及 X_7 (坡向)与 X_{13} (河流水库距离)($q=0.378$)的交互作用力较为明显,为影响全氮空间格局解释力最强的 5 种环境因子组合;环境因子对全磷含量交互作用解释力强度没有有机质和全氮明显,其中 X_{13} (河流水库距离)与 X_7 (坡向)($q=0.329$)、 X_{11} (公路距离)($q=0.306$)、 X_5 (平均降水量)($q=0.239$)和 X_{10} (城镇距离)($q=0.295$),以及 X_5 (平均降水量)与 X_7 (坡向)($q=0.265$)对有效磷的交互作用解释力均较为明显。环境因子对全钾含量交互作用 q 解释力也呈现出自然因子和人类活动因子之间交互作用 q 解释力较强,

其中 X_7 (坡向)与 X_{13} (河流水库距离)($q=0.302$)、 X_5 (平均降水量)与 X_4 (平均气温)($q=0.289$)、 X_7 (坡向)($q=0.284$)、 X_{10} (城镇距离)($q=0.275$),以及 X_4 (平均气温)与 X_7 (坡向)($q=0.271$)交互作用 q 解释力最强。

房县各环境因子对土壤有机质含量空间格局的交互作用力表现为, X_5 (平均降水量)与 X_1 (土地利用类型)($q=0.276$)、 X_4 (平均气温)($q=0.273$)、 X_7 (坡向)与 X_{13} (河流水库距离)($q=0.260$),以及 X_4 (平均气温)与 X_7 (坡向)($q=0.246$)、 X_1 (土地利用类型)($q=0.257$)的交互作用力较强,为最强的 5 种组合,可以看出,气温、降水量、地形因子和土地利用类型为主要的因素。各环境因子对全氮含量交互作用影响表现为: X_4 (平均气温)与各影响因子交互作用 q 解释力均较强,这与山区的平均气温区域差异有关,其中 X_4 (平均气温)与 X_{13} (河流水库用地)($q=0.394$)、 X_5 (平均降水量)($q=-0.385$)、 X_7 (坡向)($q=0.352$)、 X_2 (土壤类型)($q=0.327$)和 X_8 (坡度)($q=0.325$)的 q 解释力为最高的 5 种组合,主要为自然因子之间的交互作用力,这说明山区人类活动对全氮空间格局的影响力较低;各环境因子对全磷含量交互作用 q 解释力与全氮含量相似,其中, X_4 (平均气温)与各因子交互解释力 q 值作用均较高, X_4 (平均气温)与 X_{10} (城镇距离)($q=0.343$)的交互作用力最高,说明不同气温条件下可能存在人类活动对土壤全磷含量的影响存在差异, X_4 (平均气温)与 X_9 (高程)($q=0.340$)的交互作用力也较强,与房县所处山区的原因相关,此外 X_4 (平均气温)与 X_5 (平均降水量)($q=0.253$)、 X_7 (坡向)($q=0.253$)和 X_{13} (河流水库距离)($q=0.228$)的 q 解释力也较强,同样表现出明显的气候与地形因子的强烈交互作用。各环境因子对全钾含量交互作用因子表现为, X_4 (平均气温)与气候因子、地形因子、人类活动因子解释力均较强,而 X_7 (坡向)与 X_{13} (河流水库距离)($q=0.255$)交互作用最强,水源与坡向对土壤全钾的叠加作用力较为明显。

3 讨论

根据地理探测器结果可知,各影响因子在鄂西北山区(房县)和汉江中游平原区(襄州区)对相同全量养分空间格局影响因子单因子 q 解释力与交互因子 q 解释力存在差异。平原地区人类活动影响因子对土壤全量养分空间格局的影响力较鄂西北山区表现更明显。其中,气候因子,尤其是降水量对两个地区土壤样分空间格局分异的影响力都较强,这与宗宁等^[19]、全思懋等^[21]的研究结果相似;地形因子方面,

坡向、坡度对两个地区土壤全量养分含量影响均较强,这与 Fan 等^[17]对坡向和有机质含量相关性及其影响力相关研究结果一致,但与秦富仓等^[19]对坡向对有机质含量不存在显著性影响结论相悖,考虑研究区特点及其他辅助因素变量存在差异,且地形因子对房县土壤全量养分含量单因子 q 解释力较襄州区更为显著,说明山区较平原地区土壤肥力指标受地形影响较为显著;土壤类型、成土母质对房县四种土壤全量养分含量的单因子 q 解释力也较强,而对襄州区土壤全量养分解释力则较弱,表明自然环境对山区耕地土壤肥力指标含量影响为主要影响类型,尤其是鄂西北山区土壤全量养分的积累主要来自于自然环境积累;结合人类活动因子方面分析,土地利用方式对襄房县土壤有机质含量影响力较强,说明平原地区土壤有机质受人类活动影响更为显著,这与 Fan 等^[17]研究结果一致,同时,道路用地距离对襄州区土壤全磷、城镇居民点距离对土壤全钾的影响力较强,考虑平原地区耕地土壤较山区受人类活动影响力更强烈,其土壤养分含量受人为活动控制因素更多,考虑平原地区受人类活动影响程度较高,且襄州区耕地总面积远高于房县耕地总面积,说明鄂西北山区因地形因素影响,施肥条件、耕作方式及灌溉措施与平原地区均有所差异,造成各土壤肥力指标含量水平低于平原地区,且空间格局情况主要受自然环境累积。

根据交互因子探测器结果分析可知,除气候因子与其他因子交互作用在两个地区对土壤全量养分解释力均较强以外,襄州区城镇居民点、道路用地、工矿用地距离以及河流水库用地与其他因子对 4 种土壤养分含量的交互 q 解释力影响均较为明显;房县地区坡向、坡度及土地利用方式与其他因子的交互作用 q 解释力较强,说明襄州区耕地土壤肥力指标受强烈的人类活动影响,其含量空间格局的主控因子主要以人类活动类别,而房县地区土地利用方式的单因子影响 q 解释力较低,但与其他因子的交互作用的 q 解释力较高,说明鄂西北山区土地利用方式与自然环境对耕地土壤肥力指标空间格局的叠加影响效果较强,同时也可以进一步说明在湖北省不同地形区的土壤养分含量的主控因素存在差异。

因耕地土壤受人类活动影响程度较强烈,结果表明,不同地形区由于人类活动影响程度及影响范围等因素的差异,导致其对襄州区和房县土壤养分影响因子 q 解释力存在差异,并且各种因子的影响强度也存在一定差异,如海拔高度对土壤养分含量分异解释力均不强。因此,在今后的农业生产管理及耕地质量提升与治理等方面应当进一步针对性施策。

4 结论

(1) 襄州区和房县耕地土壤肥力指标含量及空间格局存在一定的差异。两地土壤肥力指标空间格局分异表现为:襄州区 4 种土壤肥力指标格局分布呈斑块状分布,规律性不明显,房县地区土壤养分分异格局大致呈现“北丰南缺”格局,这与房县地区地形因子特征存在一定的相似性,表明鄂西北山区耕地格局也主要受制于地形条件约束。

(2) 襄州区土壤肥力指标主控因素主要有降水量、平均气温,以及道路用地、城镇居民点用地、工矿用地、河流水库距离;房县土壤肥力指标主控因素主要有降水量、平均气温、坡度、坡向、地表起伏度以及河流水库距离,说明在平原地区耕地土壤养分更易受到人类活动因子影响而发生空间分异,而在鄂西北山区人类活动因子也表现出一定的影响强度,但因其复杂的地形因子影响,人类活动强度受限,其主控因子仍以自然环境,尤其是地形因子影响较为强烈。

(3) 本文所选研究因子涉及自然环境与人类活动两方面,且以土壤全量养分作为研究主体可以更加有效地掌握土壤氮磷钾及有机质含量的相关情况。但因所获取数据及实验室条件有限,仍缺少如灌溉条件、施肥模式及施肥制度、耕作制度与种植方式等人类活动因子,考虑上述因子对土壤养分及土壤性状(如土壤容重、土壤质地)等影响较强,在后续研究中应当进一步考虑相关因子对土壤养分含量的影响,以及土壤速效养分的调查与评价。

[参 考 文 献]

- [1] Liu Jianguo, Gou Xiaohua, Zhang Fen, et al. Spatial patterns in the C : N : P stoichiometry in Qinghai spruce and the soil across the Qilian Mountains, China [J]. *Catena*, 2021, 196: 104814.
- [2] 高君亮, 罗凤敏, 高永, 等. 阴山北麓不同土地利用类型土壤养分特征分析与评价 [J]. *草业学报*, 2016, 25(4): 230-238.
- [3] 温延臣, 李燕青, 袁亮, 等. 长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(7): 91-99.
- [4] Cui Naxin, Cai Min, Zhang Xu, et al. Runoff loss of nitrogen and phosphorus from a rice paddy field in the east of China: Effects of long-term chemical N fertilizer and organic manure applications [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 22: e01011.
- [5] 薛强. 常态下农田土壤污染防治关键问题分析 [J]. *现代农业研究*, 2021, 27(2): 39-40.
- [6] 江叶枫, 叶英聪, 郭熙, 等. 江西省耕地土壤氮磷生态化学

- 计量空间变异特征及其影响因素[J].土壤学报,2017,54(6):1527-1539.
- [7] Wang Yao, Xiao Ziliang, Aurangzeib M, et al. Effects of freeze-thaw cycles on the spatial distribution of soil total nitrogen using a geographically weighted regression Kriging method [J]. *Science of the Total Environment*, 2021,763:142993.
- [8] 宁静,王婷,刘佳会,等.东北典型黑土区土壤养分的空间分布特征及影响因素:以黑龙江省宾县为例[J].西安理工大学学报,2021,37(3):301-310.
- [9] 李龙,秦富仓,姜丽娜,等.区县域尺度土壤全氮的空间分布格局分析[J].生态学报,2020,40(5):1572-1579.
- [10] Song Fangfang, Xu Minggang, Duan Yinghua, 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.
- [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] 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.
- [13] 郭澎涛,李茂芬,罗微,等.基于多源环境变量和随机森林的橡胶园土壤全氮含量预测[J].农业工程学报,2015,31(5):194-200.
- [14] 陈英,冯定邦,蔡立群,等.耕作层土壤养分含量的空间自相关分析:以秦安县郭嘉镇为例[J].干旱地区农业研究,2016,34(1):66-73.
- [15] 高凤杰,鞠铁男,吴啸,等.黑土耕作层土壤 pH 空间变异及自相关分析[J].土壤,2018,50(3):566-573.
- [16] Mao Yingming, Sang Shuxun, Liu Shiqi, et al. Spatial distribution of pH and organic matter in urban soils and its implications on site-specific land uses in Xuzhou, China [J]. *Comptes Rendus Biologies*, 2014, 337(5):332-337.
- [17] Fan Manman, Lal R, Zhang Huan, et al. Variability and determinants of soil organic matter under different land uses and soil types in Eastern China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2020,198:104544.
- [18] 宗宁,石培礼,赵广帅,等.降水量变化对藏北高寒草地养分限制的影响[J].植物生态学报,2021,45(5):444-455.
- [19] 秦富仓,牛晓乐,杨振奇,等.冒山小流域不同地形和土地利用下的土壤养分空间变异特征[J].中国农业科技导报,2020,22(6):138-148.
- [20] 全思懋,管晓进,王绪奎,等.江苏省域农田土壤速效钾含量变化及其影响因子研究[J].土壤,2019,51(2):257-262.
- [21] 刘靖朝,熊黑钢,何旦旦,等.基于不同人为干扰的土壤全量氮磷钾空间变异性研究[J].干旱地区农业研究,2019,37(1):116-122.
- [22] 赵义博,雷少刚,刘英.胜利矿区土壤养分空间变异特征与影响因素[J].土壤,2020,52(2):356-364.
- [23] 王丽,杨涛,张军,等.拉萨地区居民点周边典型湿草甸湿地植被与土壤特征分析[J].生态科学,2019,38(3):9-17.
- [24] 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.
- [25] Kong Xiangbin, Zhang Fengrong, Wei Qi, et al. Influence of land use change on soil nutrients in an intensive agricultural region of North China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2006,88(1/2):85-94.
- [26] 袁知洋,邓邦良,郭晓敏,等.武功山山地草甸土壤全量氮磷钾分布格局及对不同退化程度的响应[J].西北林学院学报,2015,30(3):14-20.
- [27] 王军,李仲勤.区域内插点的分布对 GPS 高程异常的影响[J].测绘与空间地理信息,2018,41(7):160-163.
- [28] 吴亚坤,刘广明,杨劲松,等.基于反距离权重插值的土壤盐分三维分布解析方法[J].农业工程学报,2013,29(3):100-106.
- [29] 赵艳玲,赵彬程,王鑫,等.基于地形分区 IDW 的复垦排土场土壤养分空间分布[J].煤田地质与勘探,2020,48(4):199-205.
- [30] 刘静,蔡国学,刘洪斌.西南丘陵地区土壤有机质含量的空间插值法研究[J].西南大学学报(自然科学版),2008,30(3):107-112.
- [31] 解恒燕,张深远,侯善策,等.降水量空间插值方法在小样本区域的比较研究[J].水土保持研究,2018,25(3):117-121.
- [32] 刘静,蔡国学,刘洪斌.西南丘陵地区土壤有机质含量的空间插值法研究[J].西南大学学报(自然科学版),2008,30(3):107-112.