

# 基于信息熵的耕地土壤养分与环境影 因子空间相关性研究

高浩然<sup>1,2</sup>, 周勇<sup>1,2</sup>, 刘甲康<sup>1,2</sup>, 王丽<sup>1,2</sup>

(1.华中师范大学 城市与环境科学学院, 湖北 武汉 430000; 2.地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430000)

**摘要:** [目的] 探究耕地土壤养分含量空间格局及与环境因子的空间相关性, 为区域耕地土壤施肥管控及农业生态环境保护等相关工作提供理论依据。[方法] 以湖北省枣阳市耕地为研究对象, 选取土壤有机质、全氮、速效钾、缓效钾和有效磷 5 种土壤养分指标, 并收集整理成土母质、土壤类型、土壤 pH 值、高程 (DEM)、地表起伏度、坡度、植被覆盖度指数 (NDVI)、平均气温、平均降水量和土地利用方式 10 种环境影响因子, 利用普通克里金插值和熵原理, 分析每种土壤养分的空间分布特征以及每种土壤养分空间分异特征与环境因子的相关性。[结果] 枣阳市土壤缓效钾空间异质性不明显, 全域含量水平较高; 其他 4 种养分均表现出不同程度的空间异质性。信息熵结果表明, 5 种土壤养分含量空间格局与成土母质、土壤类型和气候因子相关性均较强但相关程度存在差异; 地形因子与全氮和有机质含量空间相关性较强, 土壤 pH 值与土壤速效钾、缓效钾和有效磷相关性较强。[结论] 枣阳市土壤养分格局受自然因素影响较强, 但相关性指数  $K$  值都较低, 说明受到人为施肥与农作物消耗以及灌溉排水导致的土壤水化学反应及养分流失的影响。

**关键词:** 信息熵; 土壤养分; 普通克里金插值; 空间相关性; 枣阳市

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2021)06-0226-11

**中图分类号:** S153.6

**文献参数:** 高浩然, 周勇, 刘甲康, 等. 基于信息熵的耕地土壤养分与环境影因子空间相关性研究[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 226-236. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.06.030; Gao Haoran, Zhou Yong, Liu Jiakang, et al. Spatial correlation between soil nutrients and environmental factors in cultivated land based on information entropy [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 226-236.

## Spatial Correlation Between Soil Nutrients and Environmental Factors in Cultivated Land Based on Information Entropy

Gao Haoran<sup>1,2</sup>, Zhou Yong<sup>1,2</sup>, Liu Jiakang<sup>1,2</sup>, Wang Li<sup>1,2</sup>

(1. College of Urban and Environmental Science, Central China Normal University, Wuhan 430000, Hubei, China; 2. Hubei Provincial Main Lab. of Geographic Process Analysis and Simulation, Wuhan 430000, Hubei, China)

**Abstract:** [Objective] The spatial pattern of soil nutrient content in cultivated land and its spatial correlation with environmental factors were studied, in order to provide a theoretical basis for regional cultivated land soil fertilization control and agricultural ecological environmental protection. [Methods] Taking the cultivated land in Zaoyang City of Hubei Province as the research object, five soil nutrient indicators including soil organic matter, total nitrogen, available potassium, slow-acting potassium and available phosphorus were selected, and 10 environmental factors including soil parent materials, soil types, soil pH value, Elevation (DEM), surface undulation, slope, vegetation coverage index (NDVI), average temperature, average precipitation, and land use types were collected to analyze the spatial distribution characteristics of each soil nutrient and the correlations between the spatial differentiation characteristics of each soil nutrients and environmental factors by using ordinary Kriging interpolation and information entropy principle. [Results]

收稿日期: 2021-06-03

修回日期: 2021-06-21

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”(D0103); 农业农村部耕地质量等级调查监测评价项目

第一作者: 高浩然(1996—), 男(汉族), 河南省郑州市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤地理学、土地利用与农业生态环境、水土保持等。Email: ghr\_9393@mails.cnu.edu.cn.

通讯作者: 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等方面的研究。Email: yzhou@mails.cnu.edu.cn.

The spatial heterogeneity of soil slow-acting potassium in Zaoyang City was not obvious, and the content of the whole area was relatively high; the other four nutrients all showed different degrees of spatial heterogeneity. The results of information entropy showed that the spatial patterns of the five soil nutrient contents were strongly correlated with soil-forming parent materials, soil type and climate shadow, but the degree of correlation was different; the topographic factors had a strong spatial correlation with total nitrogen and organic matter contents, and soil pH value. The value had a strong correlation with soil available potassium, slow-acting potassium and available phosphorus. [Conclusion] The soil nutrient pattern in Zaoyang City is strongly affected by natural factors, but the correlation index  $K$  value is low, indicating that it is affected by the chemical reaction of soil water and nutrient loss caused by man-made fertilization, crop consumption and irrigation and drainage in the later period.

**Keywords:** information entropy; soil nutrient; ordinary Kriging interpolation; spatial correlation; Zaoyang City

土壤养分是土壤中能直接或经转化后被植物根系吸收的矿质营养成分。土壤有机质、氮、磷、钾作为土壤养分中最常见的元素,不仅是植物生长必需的营养物质,也是评价土壤质量的重要标准<sup>[1]</sup>。土壤有机质对土壤团粒结构及保水能力起着至关重要的作用,而土壤钾和磷元素又是农作物生长过程及土壤化学过程中不可或缺的元素<sup>[2]</sup>。当缺乏某种营养元素并低于农作物生长所需含量时,则会造成植物生长缓慢甚至死亡,进而导致农作物减产,并可能造成土壤化学成分失衡。而过量的施用肥料同样也会造成农田土壤和水污染<sup>[3]</sup>,而且不同农作物生长所需的营养元素配比也存在差异。土壤有机质和全氮影响着土壤的理化性质,是土壤质量的关键参数和土壤肥力指标<sup>[4]</sup>;土壤全磷是耕地土壤肥力和质量的主要决定因素和指标<sup>[5]</sup>;速效钾是土壤钾素供应能力尤其是耕地土壤表征钾素丰缺的重要指示性指标<sup>[6]</sup>,但由于土壤钾素在各形态间存在一定的渐变动态平衡,即外源钾素影响下的速效态钾易向缓效态转化<sup>[7]</sup>。目前,针对土壤有机质含量<sup>[8-10]</sup>的相关研究较多,对土壤钾和磷元素研究较少。许多研究成果为土壤养分和影响因素的相关性研究提供了一定的思路启发,如冯新新<sup>[11]</sup>等人研究了太谷区桃园养分投入与土壤养分的关系;张金燕<sup>[12]</sup>等人对于干旱荒漠区不同土地利用方式下土壤养分时空特征进行研究;谢仕达<sup>[13]</sup>等人对不同调理剂与土壤养分之间的关系进行讨论,并且解释了土壤微生物群落与之相关性。邹佳何<sup>[14]</sup>等人对吉林汪清天然云冷杉阔混交林的土壤养分影响因素进行了研究;金明清等人对四川省盐源县植烟土壤氮磷钾空间变异特征及影响因素进行了研究<sup>[15]</sup>。在农田土壤养分相关研究中,已有学者对地形条件<sup>[16-18]</sup>、气候条件<sup>[19-21]</sup>、河流水库<sup>[22]</sup>等环境因子以及土地利用方式<sup>[23-24]</sup>、种植模式<sup>[25]</sup>等人为因子与土壤养分状况进行了相关性分析,而基于县域尺度的多种养分因子与多种环境要素的相关性研究较少。

信息熵最早由 Shannon 于 1948 年首次引入,多用于经济学<sup>[26-27]</sup>、统计学<sup>[28-29]</sup>等领域的研究。由于信息熵能够最大化地利用现有数据,并且允许采用基于经验的主观信息方法进行分析研究<sup>[30]</sup>,近年来广泛用于地理学研究中,如易晶晶等人<sup>[31]</sup>引入信息熵原理研究了 1980—2015 年广东省用水结构的时空演变特征。阳艾利等人<sup>[32]</sup>对香溪河流域降雨—径流相关性进行了分析。陈彦光等人<sup>[33]</sup>利用熵值定律对郑州等城市的土地利用结构进行分析研究。李秀霞等人<sup>[34-35]</sup>通过引入信息熵原理,研究了黄河流域土壤侵蚀的空间影响因素以及南京市土壤 Cr 含量的空间分布与土地利用方式的相关性。本研究引入信息熵理论和技术,以枣阳市为研究区,以现有耕地为研究对象,选取土壤有机质、全氮、速效钾、缓效钾、有效磷 5 种土壤样分指标和 10 种环境影响因子,深入分析各种土壤养分含量的空间分布特征,探讨各种土壤养分含量与环境因子之间的相关性,以期对枣阳市耕地农作物产量提升,耕地土壤施肥管控、土壤养分提升及耕地质量提升、农业生态环境保护等相关工作提供理论依据和技术支撑。

## 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,南襄盆地东南部,是湖北省降水量最少的地区,旱灾频繁<sup>[36]</sup>。枣阳市位于东经 112° 30'—113° 00',北纬 31° 40'—32° 40' 之间。该市多年平均降雨量约为 723.1 mm,多年平均气温 15.4 °C<sup>[37]</sup>。根据 2018 年枣阳市统计年鉴,2018 年末枣阳市耕地总面积 160 315 hm<sup>2</sup>,其中旱地面积 89 232 hm<sup>2</sup>,约占全部耕地面积的 55.7%,水田 69 285 hm<sup>2</sup>,占全部耕地面积 43.2%,水浇地面积 1 798 hm<sup>2</sup>,仅占该市所有耕地面积的 1%,耕地面积占总面积的 4.9%。

## 1.2 耕地土壤养分影响因子选择与数据处理

1.2.1 土壤样本采集与养分含量测定 土壤采样是相关研究工作开展的前提和基础<sup>[38]</sup>,根据《全国耕地质量等级评价指标体系》和《耕地质量等级》(GB/T33469-2016)等相关规程的技术要求,结合研究区自然环境、耕作制度、管理水平等相关因素进行采样点布设,枣阳市共布设 240 个耕地土壤样本,并在 2019 年 10 月末至 11 月中旬(秋收后)进行野外采集工作,获取 2019 年枣阳市地表以下 0—20 cm 范围内耕层土壤样本,并记录各采样点土地利用方式。将土壤样本带回室内进行称重、过筛、除杂、风干等工作,并采用油浴加热重铬酸钾氧化容量法测定有机质含量<sup>[39]</sup>;采用半微量开氏蒸馏法测定全氮含量;采用乙酸铵浸—提火焰光度计法测定速效钾含量<sup>[40]</sup>;热硝酸浸提—火焰光度计法测定缓效钾含量<sup>[41]</sup>;采用浸提—钼锑抗比色法测定土壤有效磷含量<sup>[42]</sup>。按照《土壤农业化学常规分析方法》,土壤 pH 值含量通过电位法测得。由于野外采样及实验室化验受人为因素影响,养分含量实测值存在异常值的情况,本研究采用格拉布斯法<sup>[43]</sup>与临近点数据比较法相结合,对存在异常值的样点进行识别并剔除,剔除后保留研究区样点 237 个。

1.2.2 影响因子选择与处理 参考相关研究<sup>[44-46]</sup>,结合枣阳市实际情况,选择土壤类型、成土母质、土壤 pH 值、高程(DEM)<sup>[47]</sup>、坡度、地表起伏度、植被覆盖度指数(NDVI)、气温和降水量 9 个自然环境因子与土地利用方式 1 个人类活动因子。运用 ArcGIS 10.2 软件,以 ASTER GDEM 30 m 分辨率数字高程数据产品(地理空间数据云 <http://www.gscloud.cn/>)为基础,获取高程(DEM)、坡度和地表起伏度。利用 ENVI 5.3 软件,基于从地理空间数据云平台获取的 2018 年 Landset 8 遥感图像,提取归一化植被指数(NDVI)。年平均气温和年平均降水量数据(2016 年)来源于中国科学院资源环境科学与数据中心([www.resdc.cn](http://www.resdc.cn))。运用 ArcGIS 10.2 软件对枣阳市“第二次土壤普查”土壤类型图进行矢量化,提取成土母质和土壤类型。

## 1.3 研究方法

1.3.1 克里金法 克里金法(Kriging)作为某一个指标的空间分布<sup>[48]</sup>及空间预测的研究手段<sup>[49]</sup>,其计算公式为<sup>[50]</sup>:

$$Z(X) = \mu + e(X) \quad (1)$$

式中: $\mu$  代表未知常数,通常被视为区域变量的平均值; $x$  代表任意位置  $x$  上具有随机残差的区域化变量; $e(x)$  均值和单位方差为零。

1.3.2 信息熵 “熵”是一个物理学概念,表示某个系统的存在状态,熵的变化可以表征系统的演化方向,也有学者把“熵”直接理解为一个信息源发出的信号状态的不确定程度<sup>[51]</sup>。1948 年 Shanno<sup>[52]</sup>将熵的概念引入信息论,用来表示某一信息源所发出的多种信息的平均信息量<sup>[30]</sup>。设  $x_i$  为离散型随机变量,其分布概率则为  $P(x_i)$ ,设  $n$  为样本总体,则信息源  $X$  信息熵  $H(X)$  计算原理为:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_a P(x_i) \quad (2)$$

当出现二维随机变量  $X, Y$  时,先计算两个信息源的信息熵  $H(X)$  和  $H(Y)$ ,且联合分布概率则为  $P(X_i, Y_j) (i=1, 2, 3, \dots, n; j=1, 2, 3, \dots, m)$ ,则信息源  $X, Y$  的联合信息熵  $H(X, Y)$  为<sup>[53]</sup>:

$$H(X, Y) = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P(x_i, y_j) \log_a P(x_i, y_j) \quad (3)$$

一般来说,  $H(X, Y) \leq H(X) + H(Y)$ ,且可用  $H(X, Y) / [H(X) + H(Y)]$  来表示变量  $X, Y$  的相关性<sup>[54]</sup>,通常情况下,两个信息源相关性用  $K$  来表示:

$$K = 1 - \frac{H(X, Y)}{H(X) + H(Y)} \quad (4)$$

其中,  $K \in [0, 1]$ ,  $K$  值越大,则证明二者相关性越强,反之,当  $K=0$  时说明二者不存在相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤养分含量统计分析

依据《全国第二次土壤普查肥力分级标准》,将研究区 5 种土壤养分含量划分为 6 个等级(表 1)。对枣阳市 237 个样点进行基本统计分析(表 2)并依据分级标准对 237 个有效样点实测值进行分类统计(表 3),结果表明,土壤有机质含量为 19.00~29.07 g/kg,平均值为 24.89 g/kg,变异系数小于 10%,属于空间弱变异,含量集中于 2,3 级水平(10~30 kg/g),且 98% 的样点有机质含量处于 3 级水平。全氮含量位于 0.38~2.29 g/kg 范围内,平均值 1.50 g/kg,变异系数 24.49%,分布相对均匀,但集中分布于 2,3 级水平,与有机质含量分布相似。速效钾含量水平较高,位于 45~302 g/kg 范围内,变异系数 33.34% 属于中等强度变异,多集中于 1,2,3 级水平处。缓效钾含量位于 284~1466 g/kg 范围内,变异系数 29.27%,基本处在高级别水平(83.54% 的样点处于 1 级水平),表明枣阳市耕地土壤速效钾与缓效钾含量较为丰富。有效磷含量位于 3.20~28.90 g/kg 之间,变异系数 36.74%,含量分布变异性属 5 种指标中最高,含量水平级别分布较为均匀。

表 1 枣阳市 5 种土壤养分分级标准

土壤养分	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )	缓效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )
1 级	≥40	≥2	≥200	≥500	≥40
2 级	30~40	1.5~2	150~200	400~500	20~40
3 级	20~30	1~1.5	100~150	300~400	10~20
4 级	10~20	0.75~1	50~100	200~300	5~10
5 级	6~10	0.5~0.75	30~50	100~200	3~5
6 级	<6	<0.5	<30	<100	<3

表 2 枣阳市 5 种土壤养分基本统计特征值

项目	最大值	最小值	平均值	标准差 SD	变异系数 C <sub>v</sub> /%
有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	29.07	18.997	24.89	1.94	7.78
全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	2.29	0.38	1.50	0.37	24.49
速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )	302.00	45.00	162.36	54.12	33.34
缓效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )	1 466.00	284.00	681.27	199.38	29.27
有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	28.90	3.20	15.86	5.83	36.74

表 3 枣阳市 5 种土壤养分含量分级按样点分类统计

土壤 养分 级别	有机质			全氮			速效钾			缓效钾			有效磷		
	含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	样点数	比例/ %	含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	样点数	比例/ %	含量/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	样点数	比例/ %	含量/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	样点数	比例/ %	含量/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	样点数	比例/ %
1 级	≥40	0	0	≥2	10	4.22	≥200	62	26.16	≥500	198	83.54	≥40	21	8.86
2 级	30~40	0	0	1.5~2	126	53.16	150~200	76	32.07	400~500	31	13.08	20~40	52	21.94
3 级	20~30	232	97.89	1~1.5	72	30.38	100~150	73	30.80	300~400	7	2.95	10~20	89	37.55
4 级	10~20	5	2.11	0.75~1	20	8.44	50~100	25	10.55	200~300	1	0.42	5~10	34	14.35
5 级	6~10	0	0	0.50~0.75	6	2.53	30~50	1	0.42	100~200	0	0.00	3~5	22	9.28
6 级	<6	0	0	<0.50	3	1.27	<30	0	0	<100	0	0.00	<3	19	8.02

## 2.2 正态分布检验

在进行克里金插值前需要对土壤样本实测含量值进行正态分布检验。使用 Minitab18 软件进行 K-S 分析,枣阳市 5 种土壤养分含量实测值均符合正态分布( $p > 0.005$ )。

## 2.3 地统计学分析

使用 GS<sup>+</sup> 9.0 对枣阳市样点土壤养分进行半变

异函数分析,结果详见表 4。根据  $R^2$  越接近于 1, RSS 越小的原则,选择克里金插值分析模型。土壤有机质、全氮、速效钾和缓效钾的块金值较高,表明其空间变异性受到自然环境因素和人类活动因素共同影响<sup>[55]</sup>,而有效磷块金值较低,且低于 0.25,说明枣阳市土壤有效磷空间变异性因素主要受自然因素影响。

表 4 枣阳市土壤养分半变异函数模型

指标	模型	块金值 (C <sub>0</sub> )	基台值 (C <sub>0</sub> +C)	块金系数 (C <sub>0</sub> /C <sub>0</sub> +C)	变程/ km	决定系数 (R <sup>2</sup> )	残差 (RSS)
有机质	球状模型	0.542	1.085	0.5	19.48	0.953	0.017 3
全氮	指数模型	0.525	1.098	0.522	23.94	0.962	0.010 1
有效磷	球状模型	0.006 2	0.363	0.017	38.97	0.520	0.13
缓效钾	球状模型	1.781	3.961	0.500	16.54	0.958	0.362
速效钾	球状模型	1.969	3.939	0.5	21.62	0.973	0.133

## 2.4 耕地土壤养分克里金插值分析

本研究利用 ArcGIS 10.2 的插值分析工具,选取

普通克里金(OK)法,对枣阳市 237 个有效样点测得的土壤有机质、全氮、速效钾、缓效钾、有效磷 5 种土

壤养分指标进行空间插值,栅格大小设置为  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ ,得到 5 种土壤养分含量空间分布图(图 1)。由于有机质含量水平较为单一,为体现出空间分布差异,则在插值过程中对有机质含量分级进行适当调整,并对 237 个样点的 5 种土壤养分含量以乡镇分类统计(表 4)。从图 1 和表 5 可知,有机质含量在平林、七方、太平镇分布较高,枣阳市郊、杨垱、刘升镇等含量分布稍低,但枣阳市范围内有机质含量水平基本一致,考虑当地有机质含量积累较好,或存在人为影响使得有机质含量保持相对单一且较为丰富的水平。全氮含量较为丰富的地区为太平、七方、平林镇等,平均值超过  $1.65\text{ g/kg}$  以上,刘升镇与枣阳市郊全氮含量较差,平均值不足  $1.5\text{ g/kg}$ ,且极低值位于刘升镇,与有机质含量分布类似,这与武治华等人提到土壤中的氮有 95% 是以有机状态存在且证明了有机质与全氮含量存在强相关性<sup>[56]</sup>的研究结果相似。土壤速效钾含量在分布格局上存在一定差异,其中锯湾镇、鹿头镇平均值最高,高值区位于锯湾镇境内,存在两个

显著低值区,位于枣阳市兴隆镇境内。缓效钾空间异质性较弱,全域含量水平较高,考虑耕作时施肥量和施肥强度较大使得部分样点含量远超过国家标准(极值为  $1466\text{ mg/kg}$ ),高值区位于锯湾镇境内,但也存在一个明显的低值区,位于兴隆镇境内。有效磷分布空间异质性较强,且全域含量水平较低,锯湾镇及枣阳市西北部含量较高,而枣阳市郊、兴隆镇等大多乡镇有效磷含量水平较低,后期应当加强上述地区土壤有效磷含量的提升和施肥管控。

## 2.5 土壤养分与环境因子相关性分析

为进一步分析土壤养分含量的空间分布差异性,需要对土壤养分含量和环境影响因子的相关性进行探讨,10 种影响因子类型及评价指标详见表 6。本研究采用信息熵原理对土壤养分含量与影响因子的相关性进行分析,计算土壤养分含量与环境影响因子的分布概率以及二者的联合分布概率,以全氮含量和成土母质为例,枣阳市成土母质与全氮含量联合分布概率矩阵详见表 7。

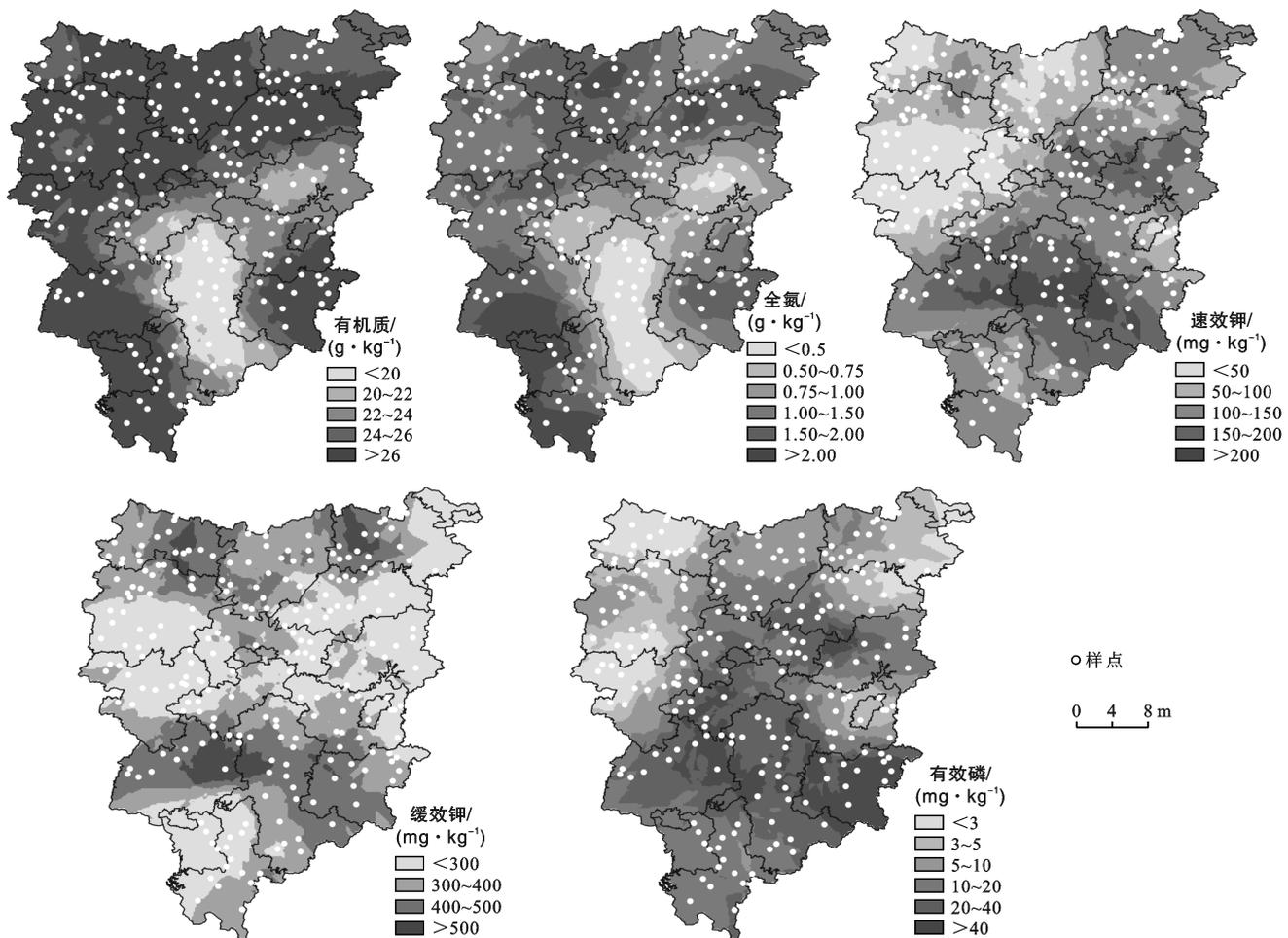


图 1 枣阳市 5 种耕地土壤养分空间分布

表 5 枣阳市耕地土壤养分按乡镇分类

乡镇名	样点数	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )		全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )		速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )		缓效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )		有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	
		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/%	平均值±标准差	变异系数/%
枣阳市郊	22	24.761±1.676	6.78	1.463±0.317	21.67	160.269±51.432	32.09	664.004±165.132	24.87	15.801±5.821	36.84
踞湾镇	20	24.815±1.606	6.47	1.482±0.304	20.5	171.069±49.810	29.12	716.497±146.169	20.40	15.856±5.775	36.42
刘升镇	11	24.621±1.349	5.478	1.445±0.256	17.65	163.814±46.409	28.33	677.221±113.070	16.70	15.631±5.866	37.53
鹿头镇	19	24.703±1.314	5.32	1.461±0.249	17.02	171.618±50.865	29.64	724.118±180.823	24.97	15.973±5.840	36.56
平林镇	18	25.702±1.14	4.44	1.650±0.216	13.08	162.707±52.613	32.34	679.728±184.971	27.21	15.879±5.837	36.76
七方镇	28	25.750±1.141	4.43	1.659±0.246	13.02	165.144±51.323	31.08	684.365±170.018	24.84	15.892±5.816	36.60
太平镇	23	25.784±1.119	4.34	1.665±0.212	12.71	162.764±49.675	30.52	666.736±143.375	21.50	15.767±5.842	37.05
王城	13	25.533±2.841	11.13	1.655±0.254	15.34	154.867±47.588	30.73	628.149±122.703	19.53	15.671±5.932	37.86
吴店	22	25.279±3.846	15.22	1.644±0.291	17.71	152.917±48.987	32.03	626.665±139.111	22.20	15.521±5.853	37.71
新市	15	25.020±4.632	18.51	1.632±0.326	19.96	163.502±49.760	30.43	675.888±154.591	22.87	15.767±5.827	36.96
兴隆	16	24.762±5.292	21.37	1.619±0.357	22.04	157.547±48.972	31.08	645.585±142.955	22.14	15.688±5.832	37.17
熊集镇	13	24.505±5.871	23.96	1.607±0.387	24.07	162.472±53.479	32.92	679.621±191.819	28.22	15.892±5.892	36.68
杨垌镇	17	24.247±6.388	26.34	1.595±0.414	25.98	163.98±48.528	29.59	675.439±133.682	19.79	15.854±5.797	36.56

表 6 土壤养分 10 种影响因子类型及其评价指标

成土母质	土壤类型	pH 值	土地利用方式	高程/m	地表起伏度	坡度/(°)	归一化植被覆盖指数	降水量/mm	平均气温(°C)
第四纪冲积物	潮土	<4.5	水田	68~100	≤4	>1.5	0.1>	750~800	15~15.5
第四纪黏土	黄褐土	4.5~5.5	旱地	100~120	4~8	1.5~3	0.1~0.2	800~850	15.5~16
第四纪黏土和泥质岩类	黄棕壤	5.5~6.5	水浇地	120~150	8~12	3~5	0.2~0.3	850~900	16~16.5
河湖冲积物	沙姜黑土	6.5~7.5		150~180	12~16	5~7	0.3~0.4	900~950	16.5≤
红砂岩类风化物	水稻土	>7.5		180≤	16<	7<	0.4~0.5		
近代河流冲积物	紫色土						0.5≤		
泥质岩类风化物									
紫色砂页岩									

表 7 枣阳市成土母质与全氮含量联合分布概率矩阵

成土母质	全氮含量分级/(g·kg <sup>-1</sup> )						P(y <sub>j</sub> )
	2<TN	1.5≤TN<2	1≤TN<1.5	0.75≤TN<1	0.5≤TN<0.75	TN<0.5	
第四纪冲积物		5/237	2/237			1/237	8/237
第四纪黏土	9/237	106/237	61/237	16/237	5/237	2/237	199/237
第四纪黏土和泥质岩类					1/237		1/237
河湖冲(沉)积物		4/237	1/237	1/237			6/237
红砂岩类风化物	1/237	4/237	2/237	2/237			9/237
近代河流冲积物		1/237					1/237
泥质岩类风化物		5/237	5/237	1/237			11/237
紫色砂页岩		2/237					2/237
P(x <sub>i</sub> )	10/237	127/237	71/237	20/237	6/237	3/237	

将该矩阵带入公式(2)–(3)得出成土母质与全氮含量的空间相关系数  $K = 0.031$ , 说明枣阳市全氮含量与成土母质之间存在相关性, 且不单一受成土母质影响。其他影响因子(土壤类型、土壤 pH 值、高程、坡度、地表起伏度、土地利用方式、NDVI、平均气

温和平均降水量)与全氮含量相关系数以及其他养分含量(有机质、速效钾、缓效钾、有效磷)与影响因子的相关系数计算方法如上所示, 最后计算得出各土壤养分与各环境因子的相关系数  $K$  值(表 8)。

5 种土壤养分含量与影响因子的相关性大小排

序如图 2 所示,与各土壤养分含量相关性最强的 5 种影响因子分别为:全氮含量,坡度>成土母质>土壤类型>平均降水量>高程>;有机质含量,坡度>成土母质>土壤类型>平均降水量>高程>;速效钾含

量,成土母质>平均气温>土壤 pH 值>平均降水量>土壤类型>;缓效钾含量,成土母质>平均气温>土壤 pH 值>坡度>平均降水量>;有效磷含量,成土母质>土壤类型>平均降水量>土壤 pH 值>坡度。

表 8 枣阳市 5 种土壤养分与环境因子相关系数 K 值统计结果

养分	各影响因子间相关性 K 值									
	成土母质	土壤类型	pH 值	高程	坡度	地表起伏度	土地利用方式	归一化植被覆盖指数	平均气温	平均降水量
全氮	0.027	0.026	0.006	0.018	0.031	0.013	0.012	0.018	0.013	0.021
有机质	0.025	0.024	0.010	0.021	0.027	0.011	0.018	0.016	0.016	0.022
速效钾	0.031	0.016	0.018	0.013	0.013	0.011	0.006	0.008	0.026	0.017
缓效钾	0.019	0.008	0.016	0.010	0.015	0.006	0.005	0.012	0.017	0.014
有效磷	0.034	0.032	0.022	0.011	0.017	0.013	0.005	0.006	0.015	0.026

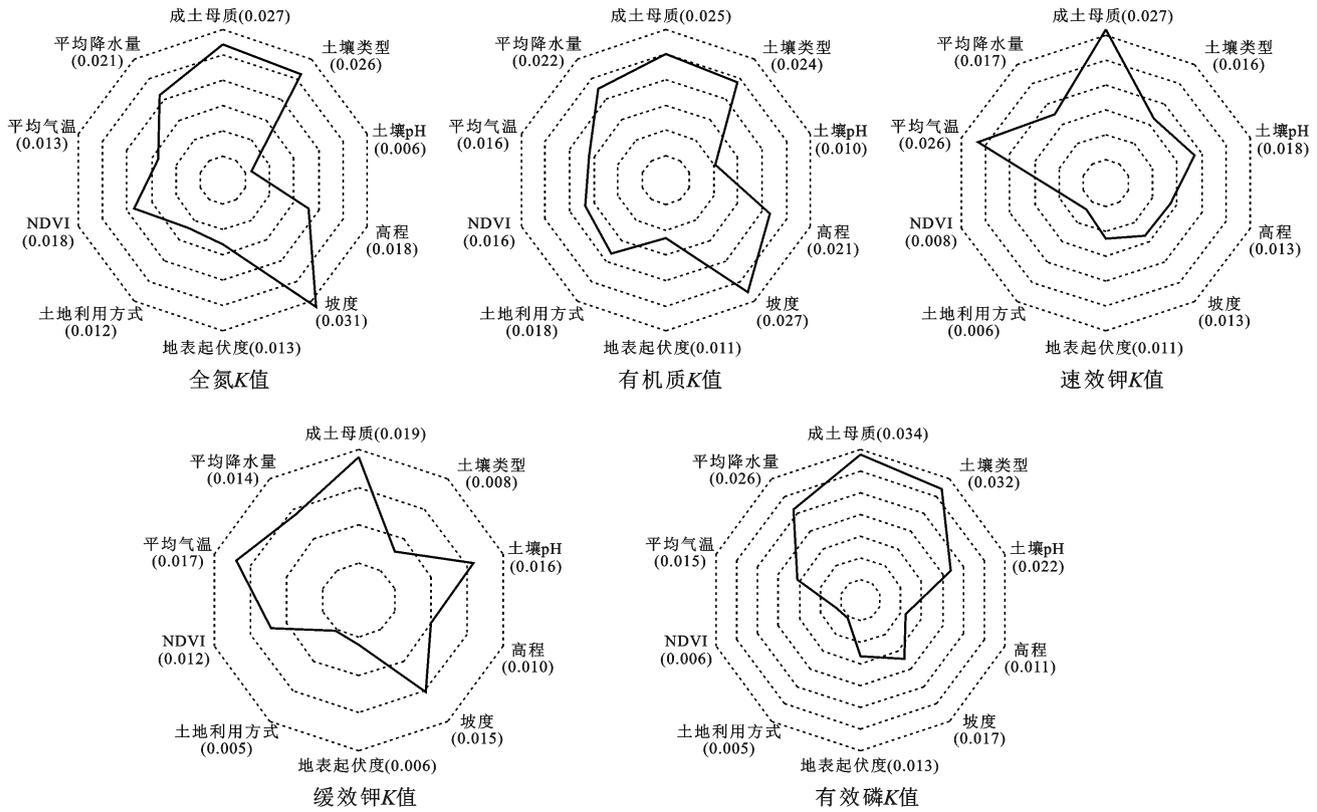


图 2 枣阳市 5 种土壤养分与影响因子相关性统计

## 3 讨论

### 3.1 地形对土壤养分空间格局的影响

根据信息熵模型计算结果可知,枣阳市海拔与坡度两种地形因子与土壤养分含量存在一定的相关性。其中,海拔(高程)为土壤有机质和全氮含量格局的 5 种主控因素之一;坡度为土壤有机质、全氮、缓效钾和有效磷含量的 5 种主控因素之一。平均气温为土壤根据以往研究结果,海拔越高,气温越低,土壤有机质

积累越明显<sup>[10]</sup>,而坡度则会影响耕地排水进而影响土壤养分的流失从而导致土壤养分丰缺的空间异质性。枣阳市大部分地区土壤有机质含量基本符合这一规律,但在高海拔地区(高程值>200 m)存在有机质含量为 28.813 g/kg,缓效钾含量为 1 466 g/kg,速效钾为 254 g/kg 的高值区,这与陈洋<sup>[15]</sup>等人对土壤养分与海拔高度呈显著正相关的研究结果不一致。枣阳市所处鄂北岗地与汉江平原交界,人类活动强度较大,因此考虑人为因素对耕地土壤养分含量的影响较大(表 9)。

表 9 不同海拔高度下土壤养分含量统计特征

等级划分	海拔/m	样点数	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )		全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	
			平均值±标准差	变异系数/%	平均值±标准差	变异系数/%
I	<100	55	24.697±1.811	7.33	1.460±0.343	23.50
II	100~120	58	24.958±1.589	6.37	1.509±0.301	19.92
III	120~150	80	25.052±1.572	6.27	1.527±0.297	19.47
IV	150~180	32	25.149±1.572	6.25	1.545±0.297	19.24
V	≥180	12	25.589±1.188	4.64	1.628±0.225	13.80

枣阳市坡度较为平缓,大部分样点位于坡度小于 2°的地区。其中,土壤有机质和全氮出现随坡度增加而养分含量平均值增加的情况,速效钾、缓效钾、有效磷含量随坡度增加而降低且均在坡度位于 8°~10°的范围内出现最低值,坡度>10°含量都有所增加,这与金明清<sup>[13]</sup>等人对坡度与土壤氮磷钾等元素相关性研

究结果存在出入,考虑本研究与其所选养分指标不同,可能受自然环境影响不明显,且土壤有机质和全氮变异系数随坡度增大而有所增加,根据信息熵研究模型计算结果可知,坡度与土壤有机质和全氮的相关性较强,考虑坡度较大的地区土壤养分流失变化及人为施肥作用共同影响,需进一步分析研究(表 10)。

表 10 不同坡度下土壤养分含量统计特征

等级	坡度/°	样点数	有机质(g·kg <sup>-1</sup> )		全氮(g·kg <sup>-1</sup> )		缓效钾(mg·kg <sup>-1</sup> )		有效磷(mg·kg <sup>-1</sup> )	
			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/%
I	<2	109	24.891±1.948	7.82	1.496±0.368	24.62	676.722±187.021	27.64	15.861±5.822	36.71
II	2~4	78	24.886±1.940	7.79	1.495±0.367	24.55	677.945±193.129	28.49	15.860±5.838	36.81
III	4~8	42	24.898±1.946	7.81	1.498±0.368	24.57	685.987±195.024	28.40	15.909±5.818	36.57
IV	8~10	4	25.019±2.006	8.01	1.520±0.379	24.95	622.519±79.990	12.85	15.532±5.899	37.98
V	≥10	4	25.203±2.101	8.34	1.555±0.397	25.55	659.952±55.650	8.43	15.666±5.469	34.92

### 3.2 气候因子对土壤养分空间格局影响

气候因子对土壤养分含量影响也较为显著,气温越高,土壤微生物活性越强,植物生长所消耗的养分速率越快,土壤有机质积累越缓慢,而降水丰缺对土壤微量元素的淋溶作用和土壤水蒸发速率的影响也较为明显<sup>[57]</sup>。本研究中,根据信息熵模型计算结果可知,平均气温与枣阳市耕地土壤速效钾、缓效钾、有效磷含量空间格局相关性较强(相关性  $K$  分别为 0.026, 0.017, 0.015),为这 3 种养分空间格局影响因子相关性大小前五位。结合样点分布情况将枣阳市平均气

温分为 5 个等别,并统计不同平均气温下 5 种土壤养分含量情况(表 11)。由表 11 可知,枣阳市土壤速效钾含量随程度气温升高而降低,这与吴利杰<sup>[58]</sup>等人对近万年以来气候变化与土壤钾素演变规律,发现年均气温越高,土壤中速效钾也越高这一结论不符合,缓效钾含量随气温变化规律同速效钾一致,并且枣阳市平均海拔较低,区域内年均气温变化不明显,同时由于海拔较低区域气候条件好,农作物生长速度快,对土壤钾素吸收率随气温升高而增加导致土壤养分含量降低。

表 11 不同温度条件下土壤养分含量统计特征

等级	温度/°C	样点数	速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )		缓效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )	
			平均值±标准差	变异系数/%	平均值±标准差	变异系数/%
I	<15.8	12	166.866±51.813	31.05	698.987±190.362	27.23
II	15.8~16.1	45	163.294±49.723	30.45	671.436±140.749	20.96
III	16.1~16.3	96	161.975±53.909	33.28	677.945±193.129	28.48
IV	16.3~16.5	52	160.575±51.339	31.97	665.367±164.218	24.68
V	≥16.5	32	160.826±52.634	32.73	666.522±171.514	25.73

降水量与枣阳市耕地土壤 5 种养分的相关性均较强。本研究按每 50 mm 对降水量分为 4 个等别对 5 种土壤养分含量进行统计。统计结果详见表 12 所示。

其中,土壤有机质含量在降水量<900 mm 时其含量随降水量升高而升高,在 850~900 mm 平均值最大,降水量>900 mm 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。全氮含量随降水量增加而增加,杨山<sup>[19]</sup>等人研究发现降水量通过提高土壤中的氮元素的转移进而促进植物对土壤氮元素的吸收利用且土壤氮素与降水量呈正相关。但水分过多会导致土壤

氮元素含量降低<sup>[15]</sup>,本研究则显示土壤全氮与降水量呈负相关,考虑平原区水田—旱地两季轮作,土壤原始矿质向土壤养分转化速率小于农作物对氮素吸收速率,还需结合种植模式与耕作制度等进一步分析。

表 12 不同降水条件下土壤养分含量统计特征

等级	降水量/ mm	样点数	有机质(g·kg <sup>-1</sup> )		全氮(g·kg <sup>-1</sup> )		速效钾(mg·kg <sup>-1</sup> )		缓效钾(mg·kg <sup>-1</sup> )		有效磷(mg·kg <sup>-1</sup> )	
			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/%	平均值± 标准差	变异 系数/%
I	<800	57	24.889±1.937	7.78	1.496±0.366	24.49	165.144±51.323	31.08	684.365±170.018	24.84	15.892±5.816	36.59
II	800~850	114	24.962±1.830	7.32	1.509±0.346	22.92	162.860±53.696	32.97	682.953±198.111	29.01	15.890±5.817	36.61
III	850~900	62	25.025±1.749	6.98	1.522±0.331	21.74	161.464±53.450	33.10	675.051±188.365	27.90	15.829±5.831	36.84
VI	≥900	4	24.872±2.795	11.24	1.521 1±0.338	22.24	159.750±46.633	29.19	648.565±69.437	10.71	15.558±5.589	35.93

### 3.3 土壤属性因子与土壤养分含量空间格局影响

土壤养分一部分主要来自于成土母质中原始矿物分解,不同的成土母质同时又决定了不同的土壤类型的发育情况。从相关性统计结果来看,成土母质、土壤类型与各土壤养分含量的相关性都比较强,表明成土母质对土壤成分起到了一定的决定作用,与万盼<sup>[9]</sup>等人的研究结果一致。但相关性指数  $K$  值都较低,说明受到后期人为施肥与农作物消耗以及灌溉排水导致的土壤水化学反应及养分流失的影响,这也是耕作土壤与天然土壤的典型区别之一。

土壤 pH 值是速效钾、缓效钾、有效磷三种土壤养分相关性较强的环境因子,考虑人为钾肥和磷肥的施用对土壤 pH 值存在一定的影响,而土壤过酸或过碱都会对农作物造成一定影响<sup>[59]</sup>,且不同农作物对土壤 pH 值的要求也不同,后期在进行施肥管控的过程中应当更加注重针对性管理。

## 4 结论

(1) 枣阳市 5 种土壤养分含量基本处于中等水平,且土壤有机质、缓效钾含量水平单一且较为丰富,而速效钾、有效磷含量在枣阳市范围内存在比较明显的丰缺差异(有效磷含量变异系数最高)。根据克里金差值结果可知,土壤缓效钾含量空间异质性较弱,其余养分含量均存在一定程度上的空间异质性。

(2) 运用信息熵原理对枣阳市 5 种土壤养分和 10 种环境因子的相关性进行分析,结果表示每种土壤养分与 10 种环境因子均存在一定程度上的相关性(相关系数  $K > 0$ ),其中,成土母质、土壤类型、平均降水量和平均温度与 5 种土壤养分含量均存在相关性,土壤 pH 与有效磷、速效钾和缓效钾也存在相关性,且每种土壤养分含量不受单一环境因子的影响。

(3) 由于样本及实验室条件限制,未获取与自然环境影响度更强的全磷、全钾等含量值,这在后续研究中应当进一步分析总结评价指标的选择,并注意采样及化验精度与技术。

(4) 根据研究结果,自然环境因子与枣阳市耕地土壤养分含量存在一定的相关性,但耕地土壤还应考虑施肥措施、种植制度等相关人类活动因子,在后续的研究中应当进一步分析人类活动因子对耕地土壤养分的类型,以期精准指导农田管理、施肥管控,提高枣阳市耕地质量,促进区域农业可持续发展。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 刘娟,张乃明,邓洪.勐海县茶园土壤养分状况及肥力质量评价[J].农业资源与环境学报,2021,38(1):79-86.
- [2] 王鹏.基于土壤的宝天曼自然土地质量特征及评价[D].河南 开封:河南大学,2019.
- [3] 曾迪,漆智平,周丹,等.海南儋州农用地土壤速效磷和速效钾的空间变异[J].热带生物学报,2018,9(1):54-60.
- [4] Marchetti A C, Piccini R, Francaviglia L M. 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.
- [5] Cheng Yuting, Li Peng, Xu Guoce, et al. Effects of soil erosion and land use on spatial distribution of soil total phosphorus in a small watershed on the Loess Plateau, China [J]. *Soil & Tillage Research*, 2018,184:142-152.
- [6] 陈洋,齐雁冰,王茵茵,等.秦巴中部山区耕地土壤速效钾空间变异及其影响因素[J].环境科学研究,2017,30(2):257-266.
- [7] 李秀双.秸秆还田与施用钾肥对提升农田土壤钾素肥力的效应研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [8] Repullo Ruibérriz de Torres Miguel A, Carbonell-Bojollo Rosa M, Moreno-García Manuel, et al. Soil organic matter and nutrient improvement through cover crops in

- a Mediterranean olive orchard [J]. *Soil & Tillage Research*, 2021,210;104977.
- [9] Gu Xiaohu, Wang Yancang, Sun Qian, 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.
- [10] Meersmans J B, Van Wesemael, 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.
- [11] 冯新新,刘韶华,宋宇琴,等.太谷区桃园养分投入、土壤养分状况及其与桃果品质的关系[J].*经济林研究*, 2021(1):33-40.
- [12] 张金燕,毋兆鹏,于辉,等.干旱区精河流域绿洲化过程中土壤养分时空变异研究[J].*中国农业资源与区划*, 2020,41(2):252-260.
- [13] 谢仕祺,林正全,陈玉蓝,等.不同土壤调理剂对植烟土壤养分及细菌群落的影响[J].*河南农业大学学报*, 2021,55(3):523-530.
- [14] 邹佳何,王海燕,张美娜,等.温带云冷杉针阔混交林土壤养分的空间分布特征及影响因素[J].*应用与环境生物学报*, 2021,27(5):1-10.
- [15] 金明清,彭月月,王佩,等.四川省盐源县植烟土壤氮磷钾空间变异特征及影响因素[J].*土壤*, 2016,48(5):984-991.
- [16] 张万涛,许明祥,李彬彬,等.复合地貌区农田土壤有机质空间变异特征及其影响因素[J].*干旱地区农业研究*, 2021,39(1):175-181,190.
- [17] 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.
- [18] 陈洋,齐雁冰,王茵茵,等.秦巴中部山区耕地土壤速效钾空间变异及其影响因素[J].*环境科学研究*, 2017,30(2):257-266.
- [19] 吴旭东,季波,何建龙,等.控制降水梯度对荒漠草原优势植物叶功能性状及土壤养分的影响[J].*生态学报*, 2021,41(7):2719-2727.
- [20] 张彬,杨联安,杨粉莉,等.基于投影寻踪的土壤养分综合评价及影响因素研究[J].*土壤*, 2020,52(6):1239-1247.
- [21] 杨山,李小彬,王汝振,等.氨水添加对中国北方草原土壤细菌多样性和群落结构的影响[J].*应用生态学报*, 2015,26(3):739-746.
- [22] 张瑞,戴伟,庞欢,等.北京市北运河流域耕地土壤性质空间变异性[J].*生态学杂志*, 2014,33(12):3368-3373.
- [23] 万盼,胡艳波,张弓乔,等.2种不同土地利用方式对山麓耕地土壤养分的影响[J].*中南林业科技大学学报*, 2019,39(1):8-14,19.
- [24] 王维瑞.不同土地利用方式耕地土壤养分及其推荐施肥[J].*安徽农学通报*, 2020,26(21):110-113.
- [25] 黄天忠,曹国璠,赵明书,等.不同种植模式对油茶林地小气候和土壤养分含量的影响[J].*南方农业学报*, 2019,50(11):2512-2518.
- [26] 邵祥理.基于信息熵理论的我国保费收入结构研究[J].*保险研究*, 2011(4):22-27.
- [27] 王新苹,郝晶杰,陈玉花,等.基于信息熵的高楼层电梯费用分摊问题的研究[J].*数学的实践与认识*, 2018,48(21):267-272.
- [28] 李永新,朱石焕,余国林.关于最大熵与信息熵之差的上界讨论[J].*大学数学*, 2010,26(5):90-92.
- [29] 吴瑞明,胡代平.评价系统结构的信息熵方法[J].*情报杂志*, 2008(11):3-6.
- [30] 徐鹏程,王栋.信息熵在水文水资源科学中的研究进展[J].*华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2017,38(4):71-78.
- [31] 易晶晶,陈志和,杨创鹏,等.基于信息熵原理的区域用水结构时空演变特征研究[J].*水文*, 2019,39(4):12-17.
- [32] 阳艾利,黄国和,孔祥铭,等.基于最大熵-Copula 方法的香溪河流域降雨—径流相关性分析[J].*南水北调与水利科技*, 2016,14(1):84-89.
- [33] 陈彦光,刘明华.城市土地利用结构的熵值定律[J].*人文地理*, 2001(4):20-24.
- [34] 李秀霞,倪晋仁.土壤侵蚀及其影响因素空间相关性分析[J].*地理科学进展*, 2009,28(2):161-166.
- [35] 李秀霞,朱伟,张子豪,等.基于信息熵的土壤 Cr 含量空间分布与土地利用空间相关性研究[J].*生态与农村环境学报*, 2020,36(11):1437-1443.
- [36] 李新尧,孙小舟.鄂北岗地近 54 年来干湿指数变化[J].*南水北调与水利科技*, 2015,13(5):853-857.
- [37] 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.
- [38] 李俊颖,吴克宁,宋文.农用地土壤重金属空间变异及合理采样数确定[J].*中国农业资源与区划*, 2020,41(9):64-71.
- [39] 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 & Tillage Research*, 2005,88(1);85-94.
- [40] 孙兰香.乙酸铵浸提:火焰光度计法测定土壤速效钾[J].*现代农业科技*, 2008,17:199-199.
- [41] 邓万丽.热硝酸浸提—火焰光度计法测定土壤缓效钾方法的改进[J].*现代农业科技*, 2020(17):159-160.
- [42] 崔建宇,宋建兰,薛会英,等. Mehlich3-ICP 法快速测定土壤有效磷的研究[J].*土壤通报*, 2011,42(2):388-392.
- [43] 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):160-163,167.
- [44] Grunwald S. Multi-criteria characterization of recent digital soil mapping and modeling approaches [J]. *Geo-*

- derma, 2009, 152(3/4):195-207.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] Dai Wanhong, Huang Yao. Relation of soil organic matter concentration to climate and altitude in zonal soils of China [J]. Catena, 2005, 65(1):87-94.
- [48] Amrit K, Rajeev K M, Kiranmay S. Mapping spatial distribution of traffic induced criteria pollutants and associated health risks using kriging interpolation tool in Delhi [J]. Journal of Transport & Health, 2020, 18:100879.
- [49] Kim Sunyoung, Yi Seonju, Young Seobeum, et al. Ordinary Kriging approach to predicting long-term particulate matter concentrations in seven major Korean cities [J]. Journal of Environmental Toxicology, 2014, 29:e2014012-e2014012.
- [50] Dash J P, Sarangi A, Singh D K. Spatial variability of groundwater depth and quality parameters in the national capital territory of Delhi [J]. Environmental Management, 2010, 45(3):640-650.
- [51] 王宗明, 张柏, 黄素军, 等. 基于 GIS 和信息熵的松嫩平原土地利用结构演化分析: 兼论系统无序度、复杂性与多样性[J]. 农业系统科学与综合研究, 2005(3):196-200.
- [52] Shannon C E. A mathematical theory of communication [J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27(3):379-423.
- [53] 徐全智, 吕恕. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [54] Meyer W B, Turner B L. Change in Land Use and Land Cover: A Global Perspective( II ) [M]. London: Cambridge University Press, 1994.
- [55] 刘焕军, 谢雅慧, 潘越, 等. 黑土区田块土壤有机质空间分异及分布研究[J]. 土壤通报, 2018, 49(6):1445-1451.
- [56] 武治华, 牛继平. 青海省耕层土壤养分含量相关性分析研究[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(23):101-105.
- [57] Gu Xiaobo, Cai Huanjie, Fang Heng, et al. Soil hydrothermal characteristics, maize yield and water use efficiency as affected by different biodegradable film mulching patterns in a rain-fed semi-arid area of China [J]. Agricultural Water Management, 2021, 245:106560.
- [58] 吴利杰, 于娟, 王成敏, 等. 长尺度气候变化下土壤钾素演变规律的研究: 以泾河中游将军村黄土剖面为例[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2016, 34(1):69-73.
- [59] 孙笑梅, 闫军营, 程道全, 等. 河南省耕地土壤酸碱度状况与酸化土壤治理途径[J]. 中国农学通报, 2017, 33(24):91-94.

(上接第 225 页)

- [28] Lu Fan, Li Zizhen. A model of ecosystem health and its application [J]. Ecological Modeling, 2003, 170(1):55-59.
- [29] Ptthoff M, Jackson L E. Soil biological and chemical properties in restored perennial grassland in California [J]. Restoration Ecology, 2005, 13(1):61-73.
- [30] 王立新, 刘钟龄, 刘华民, 等. 内蒙古典型草原生态系统健康评价[J]. 生态学报, 2008, 28(2):544-550.
- [31] 薛睿, 郑淑霞, 白永飞. 不同利用方式和载畜率对内蒙古典型草原群落初级生产力和植物补偿性生长的影响[J]. 生物多样性, 2010, 18(3):300-311.
- [32] Rosen E, van der Maare E. Restoration of alvar vegetation on Oland, Sweden [J]. Applied Vegetation Science, 2000, 3(1):65-72.
- [33] Oosterheld M, McNaughton S J. Effects of stress and time for recovery on the amount of compensatory growth after grazing [J]. Oecologia, 1991, 85(3):305-313.
- [34] 李西良, 刘志英, 侯向阳, 等. 放牧对草原植物功能性状及其权衡关系的调控[J]. 植物学报, 2015, 50(2):159-170.
- [35] Fan Jianling, Jin Hao, Zhang Chuanhong, et al. Grazing intensity induced alternations of soil microbial community composition in aggregates drive soil organic carbon turnover in a desert steppe [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2021, 40(10):73-87.