

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2021.03.001

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

宁 静¹, 王 婷¹, 刘佳会², 张鑫宇², 李 哲²

(1. 东北农业大学 公共管理与法学院, 黑龙江 哈尔滨 150030;

2. 东北农业大学 资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要: 黑土的利用与保护是一项较为复杂的系统工程, 涉及国家发展战略布局、国民经济结构调整、粮食安全、生态环境安全等多个领域。明确黑土土壤养分空间分布规律和影响因素是黑土保护重要的基础和切入点。本文以典型黑土区黑龙江宾县为例, 利用传统统计学和地统计学模型并结合“3S”技术对黑土土壤中有有机质、全氮、速效钾和有效磷的空间分析规律和影响因素进行了研究。结果表明研究区土壤有机质、有效磷和速效钾均具有中等强度空间变异性, 全氮具有较强烈的空间变异性, 极易受人为因素影响。土壤养分含量的空间聚集特征显著, 其中 HH 高值聚类主要分布在糖坊镇和满井镇, LL 低值聚类主要分布在经建乡、民和乡和摆渡镇。在成土母质和土壤类型方面, 河水冲击物和暗棕下的土壤养分最高。据相关性分析与回归分析得出海拔、坡度、坡度变率和侵蚀密度与各土壤养分含量呈不同程度的正相关。磷肥和钾肥的空间分布主要取决于人为施用量。

关键词: 土壤养分; 空间变异; 影响因素; 宾县

中图分类号: S158

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2021)03-0301-10

Spatial distribution characteristics and influencing factors of soil nutrients in typical black soil region of northeast China: taking Binxian County of Heilongjiang Province as an example

NING Jing¹, WANG Ting¹, LIU Jiahui², ZHANG Xinyu², LI Zhe²

(1. School of Public Administration and Law, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. School of Resource and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: The utilization and protection of black soil is a complicated systematic project, which involves the layout of national development strategy, the adjustment of national economic structure, food security, ecological and environmental security and other fields. It is an important basis and breakthrough point for black soil conservation to make clear the spatial distribution law of soil nutrients and the influencing factors. In this paper, we take Bin County, Heilongjiang, a typical black soil region, as an example, with the spatial analysis and influencing factors of organic matter, total nitrogen, available potassium and available phosphorus in black soil studied by using traditional statistical and geostatistical models combined with “3S” technique. The results showed that soil organic matter, available phosphorus and available potassium all have medium spatial variability, and total nitrogen has strong spatial variability, which is easily influenced by human factors. The high value HH cluster is mainly distributed in Tangfang Town and Manjing Town, with the low value LL cluster mainly distributed in Jingjian Town, Minhe Town and Baidu Town. In terms of parent material and soil type, river impingement and dark brown soil

收稿日期: 2021-01-23; 网络出版日期: 2021-03-18

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20210318.1249.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41971217)

第一作者: 宁静, 女, 博士, 副教授, 研究方向为土地生态问题及 3S 技术。E-mail: njing_today@163.com

nutrients are the highest. According to the correlation analysis and regression analysis, elevation, slope, slope variability and erosion density are positively correlated with soil nutrient content in different degrees. The spatial distribution of phosphorus and potassium fertilizers depends mainly on the amount of man-made application.

Key words: oil nutrients; spatial variability; influencing factors; Binxian

土壤属于一种自然连续体,表现出很明显的空间变异性特征^[1],其养分的变异会对作物生长产生多方面影响^[2-4]。土壤有机质和氮磷钾不仅是植物生长必须的营养元素,也是评价土壤质量的重要标准,其空间变异性及影响因素的研究为指导精准农业提供依据^[5]。

目前土壤养分空间分布研究领域,地统计学方法开始广泛应用,而这方面的研究也为环境治理,以及土壤生态保护提供支持^[6]。迟凤琴等^[7]探究了方正县土壤养分的空间分布情况,结果表明结构性因素会明显地影响到其空间异质性。王婕等^[8]对陕西省耕地农田表层土壤养分空间异质性的研究,表明有机质、全氮的变异性主要和结构性因素有关,而速效钾养分则由随机性因素主导,受施肥、作物消耗等因素影响较大。

近年来,土壤养分影响因素的研究也成为国内外关注的热点问题。张柏等^[9]对东北典型农业县研究发现除了海拔和坡度等地形因素外,土壤类型同样对土壤养分含量有一定影响。陈兴等^[10]对贵州省怀仁市土壤养分的影响因素研究发现,耕地土壤养分的含量及分布不仅受自然因素影响,还与土地利用方式等人为活动有关。赵越等^[11]研究阐明土壤养分含量主要与地形、成土母质方面的因素有关,与水利和交通等随机因素影响较弱。综上所述,环境因素与土壤养分之间存在显著的关联性,除此之外,部分人为因素也会对土壤养分施加一定作用。

黑龙江省是我国重要的农业生产区与黑土区,黑土是优良的耕作土壤,具有良好的生物与物理特性,探究黑土区土壤养分的空间分布特征及其影响因素,是土地利用规划、科学管理与利用土地的前提。

因此,本文以黑龙江省典型黑土区宾县作为研究区,针对土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾进行半变异函数分析和空间自相关分析,围绕土壤养分四类因子展开空间 Kriging 插值分析和聚类分析,进而对相关养分空间分布特征进行研究。在此基础上选择地形因子、成土母质、土壤侵蚀强度、土壤类型和施肥条件对土壤养分的影响因素进行相关性分析。通过上述分析,对促进该地区农业经济发展、实施精准农业与生态文明建设具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宾县位于哈尔滨地区张广才岭和松江平原交汇处(见图 1)。区域总面积为 3 843 km²,海拔高度最高为 952 m,最低为 34 m,地势南高北低,以漫川漫岗和台地低丘地貌为主。该地区气候温和湿润,年平均温度 4.7℃,年降雨量均值为 450 mm,降雨集中在 5~9 月份,约占全年总降水量的 90%,无霜期为 110~114 天。土壤以黄黑土和黑土为主,存在少数的黏土和砂土。耕地面积约为 1 673.81 km²,以旱作农业为主,对应的耕地主要出现在北部平原区和中部丘陵区。耕作方式以旋耕起垄为主,耕作垄向多为横垄和顺垄,属于典型的黑土垄作区。长期旋耕起垄的耕作方式和农业生产强度的增加,导致土壤侵蚀的敏感性增强,侵蚀沟分布广泛,土壤养分含量下降,是黑龙江省 5 个国家黑土区水土流失治理重点县之一。

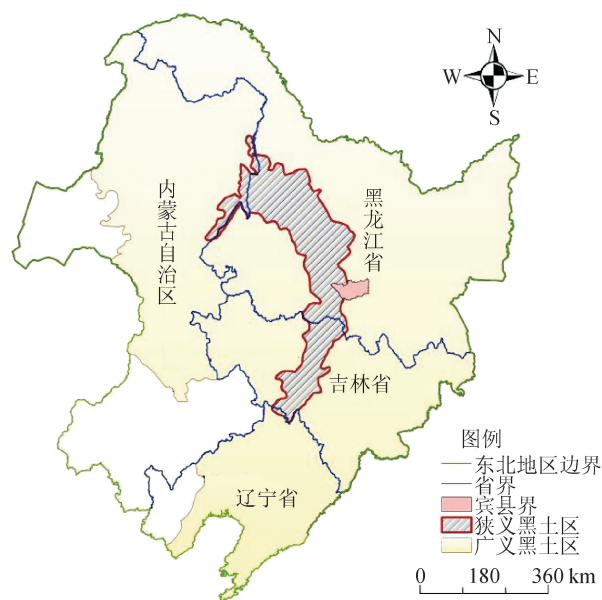


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram for the study area

1.2 数据来源与处理

1) 土壤养分数据提取

根据《全国耕地地力调查与质量评价技术规程》,以该地区地形等具体情况为基础,采用 LDSF (land degradation surveillance framework) 中的采

样分析方法^[12],在宾县各乡镇设置 244 个土壤采样点,获取 2019 年宾县土壤耕作层土壤样本(见图 2)。在室内对土样称重、编号且风干处理后,过筛并除杂。通过重铬酸钾外加热的手段进行有机质含量的测算,通过半微量开氏法进行全氮含量的测算,通过乙酸铵浸提-火焰光度计法进行速效钾含量的测算,有效磷含量则基于浸提-钼锑抗比色法确定出。

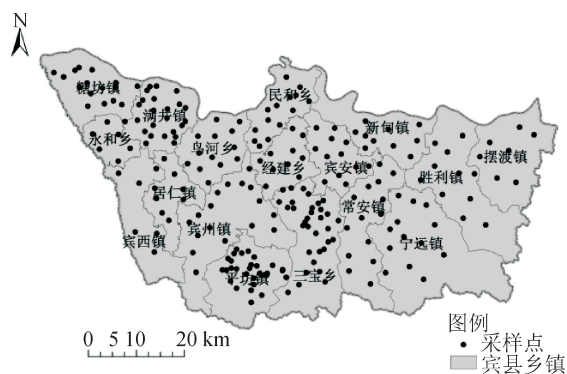


图 2 目标区域土壤采样分布图

Fig. 2 Distribution of soil sampling sites in the study area

2) 各影响因子数据获取

在室内判读和野外实地勘测的基础上对宾县侵蚀沟进行解译,根据宾县 2018 年 Landsat 影像和 Google Earth 影像对侵蚀沟进行室内判读。根据文献资料对侵蚀沟发育类型进行室内判读,结合影像信息和地形信息建立解译标志,并在道路通达的基础上,在 2019 年选取侵蚀沟总数的 2% 进行实地验证,解译精确度接近 96%。成土母质与土壤类型由全国第二次土壤普查绘制的 1:75 万《哈尔滨市成土母质图》与《哈尔滨市土壤分布图》查得并进行数字化;利用地理空间数据云获得 30 m 数字高程模型数据(DEM),并通过 ArcGIS10.5 软件获得海拔、坡度等地形因素信息。

1.3 研究方法

1) 半变异方差函数分析

半变异方差函数是常用的地统计学分析的研究方法,适用于对结构性因素以及随机性因素对某变量的影响机制进行探究,该函数能够获得特定地区内空间分布特征对变量的影响。本文通过 GS+9.0 软件对宾县主要的土壤养分的空间异质性进行分析。

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

式中: h 是步长; $\gamma(h)$ 为半变异函数; $N(h)$ 代表间隔 h 的样点数; $z(x_i)$ 代表在 x_i 位置的实际测量数据; $z(x_i + h)$ 代表在 $x_i + h$ 位置的实际测量数据。

一般情况下能够采用 Gauss 模型、指数模型等来拟合处理,在选择模型时考虑到块金值和决定系数相关参数,决定系数越大,则可判断出拟合精度高,效果好,相应的测量结果和拟合结果越接近,拟合效果越满足要求^[13]。

2) 地理加权回归

通过地理加权回归方法确定出空间尺度上土壤养分含量与侵蚀的相关性。此方法是 Brunsdon 等^[14]进行相关局部空间回归研究时建立的,通过此种模型进行计算时引入了位置信息变量,两个参数的空间相关性可通过附近数据的观测结果来确定出,其对应的表达式如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \beta_1(u_i, v_i)x_{1i} + \dots + \beta_p(u_i, v_i)x_{pi} + \epsilon_i \quad (2)$$

式中: y_i 是样本 i 的被解释变量; x_{pi} 是样本 i 的第 p 个解释变量; (u_i, v_i) 是样本 i 的坐标; β_p 是样本 i 的第 p 个解释变量系数; ϵ_i 是随机误差项。

3) 空间自相关性

本文应用全局空间自相关检验土壤中有机质、全氮、有效磷和速效钾四种元素是否具有空间自相关性,在进行分析时应用了 I 指数进行表示,其公式为:

$$I = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})} \quad (3)$$

式中: n 是地区内单元数量; x_i 是现象属性值处于 i 单元处的观测数据, $i=1, 2, 3, \dots, n$; w_{ij} 是空间权重系数矩阵,代表单元在空间内的邻近关系。

4) Pearson 相关性

Pearson 相关系数是度量两个随机变量间线性关系的统计学方法,公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中: r 表示相关系数,其范围为 $[-1, 1]$, r 的绝对值越大,代表相关性越强; x_i 和 y_i 分别代表因变量和自变量。

2 结果与分析

2.1 土壤养分描述统计

对宾县土壤养分数据进行统计分析可知(见表 1),宾县耕作土层中有机质的均值为 36.00 g/kg,含量在 10.00~105.10 g/kg;全氮的均值为 2.05 g/kg,

含量在 0.83~5.48 g/kg;有效磷的均值为 35.98 mg/kg,含量在 3.90~108.70 mg/kg;速效钾的均值为 212.79 mg/kg,含量在 34.00~712.80 mg/kg。根据黑龙江省土壤养分含量平均标准^[15],研究区有机质、全氮和速效钾含量丰富,有效磷含量

中等。四种土壤养分的变异系数 37.56%~61.78%,均为中等程度变异,其中变异最大的是有效磷,最小的为全氮。经过显著性水平 0.05 的单样本 K-S 检验下,全氮符合正态分布,有机质、有效磷和速效钾在对数转换处理后,符合正态分布要求。

表 1 土壤养分描述统计

Tab. 1 Descriptive statistics characteristics of soil nutrients

土壤养分	样本数	养分含量/(g·kg ⁻¹)			标准差	变异系数 CV/%	峰度	分布类型
		最大值	最小值	平均值				
OM	244	105.10	10.00	36.00	13.60	37.78	2.46	正态分布
TN	244	5.48	0.83	2.05	0.77	37.56	2.15	正态分布
AP	244	108.70E-3	3.90E-3	35.98E-3	22.23	61.78	1.05	正态分布
AK	244	712.80E-3	34.00E-3	212.79E-3	100.40	47.18	3.28	正态分布

2.2 土壤养分空间分布特征

在地统计学中,半方差函数主要用于分析分隔距离上区域化变量的变异水平。本文通过 GS+9.0 软件对该地区的土壤养分这一变量构建半变异方差函数^[16],展开了系统的分析,分析结果见表 2。分别针对不同的土壤养分制定差异化的模型,利用球面模型进行有机质分析,利用线状模型对全氮分析,利用指数模型对速效钾与有效磷分析。有机质、速效钾和有效磷 R^2 均大于 0.5,拟合效果较好,全氮的拟合效果较差。块金效应的大小表示土壤养分 4 种元素空间相关的强弱,块金效应越大,表示相应的物理

量越分散,空间相关性越弱。有机质的块金效应最大为 48%,说明有机质的空间相关性弱,随机分布性强,易受随机变异因素(人为因素)影响。而全氮、有效磷和速效钾块金效应为 15.09%、25.77%、21.27%,具有中等的空间相关性,变异类型主要受气候、成土母质、颗粒大小等因素影响。基台值的含义是结构性因素与随机因素导致变异的总和,通过对基台值数据的观察可以得出有效钾数据最大,而全氮数据最小。变程的意义是土壤养分的含量在某范围空间具有自相关性,其中有效磷变程最大,而有机质变程最小。

表 2 土壤养分半变异函数参数

Tab. 2 Semi-variogram parameters for soil nutrients

土壤养分	样本数	模型	块金值(C_0)	基台值(C_0+C)	块金效应	变程/m	决定系数 R^2
					$\frac{100C_0}{(C_0+C)}/\%$		
OM	244	球面模型	84.10	175.20	48.00	3	0.787
TN	244	线性模型	0.08	0.53	15.09	225	0.310
AP	244	指数模型	260.30	1 010.00	25.77	900	0.951
AK	244	指数模型	117.00	550.00	21.27	444	0.583

普通 Kriging 空间插值的方法对土壤中有机质、全氮、有效磷和速效钾的含量进行空间插值,来分析土壤养分含量的空间分布特征(见图 3),结果表明:糖坊镇和满井镇有机质含量较高,平坊镇有机质含量较低;平坊镇和三宝乡全氮含量较高,而研究区北部全氮含量整体偏低;有效磷的含量整体偏低,其中宾安镇和新甸镇有效磷含量较高;速效钾含量最多的镇为宾州镇,而西部区域速效钾含量显著低于其他区域。为进一步探究研究区土壤养分空间分布特征,本文在 Genda 软件中输入各个养分的信息,并构建空间权重矩阵,基于 ArcGIS10.5 软件处理各养分因子的空间聚类分布情况,得到 LISA 聚

类分布图(见图 4),从而对其空间聚类情况进行直观描述^[17],相应的聚类情况包括高值-高值(HH)、高值-低值(HL)、低值-高值(LH)、低值-低值(LL)和无明显(NN)聚类。为了更好地分析土壤养分因子的聚类关系,聚类分布图中无明显聚类不进行显示。土壤养分的空间自相关结果表明,有机质、全氮、速效钾和有效磷四种土壤养分因子的 Moran's I 分别为 0.46、0.67、0.29 和 0.30, P 值均为 0.00,四种养分因子的 Z 值分别为 11.57、16.84、7.56 和 7.68,均大于 1.96。通过上述信息可以得知,该地区内的养分存在空间自相关,这一结果也验证了此前半变异函数分析得出的研究结论。

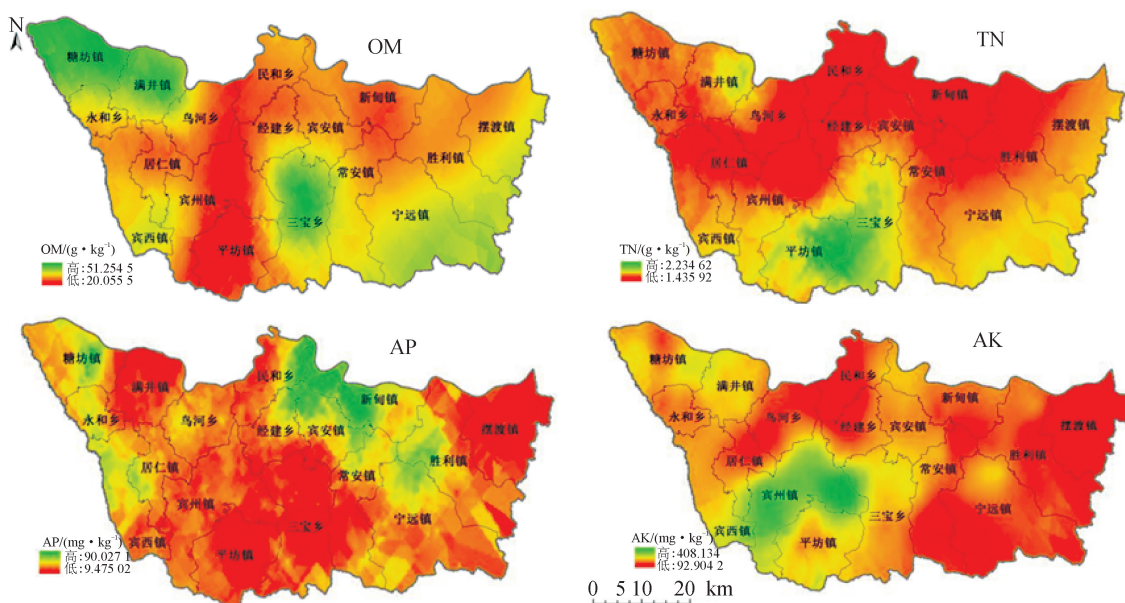


图 3 宾县土壤养分分布特征
Fig. 3 Distribution of soil nutrients of cultivated land in Binxian County

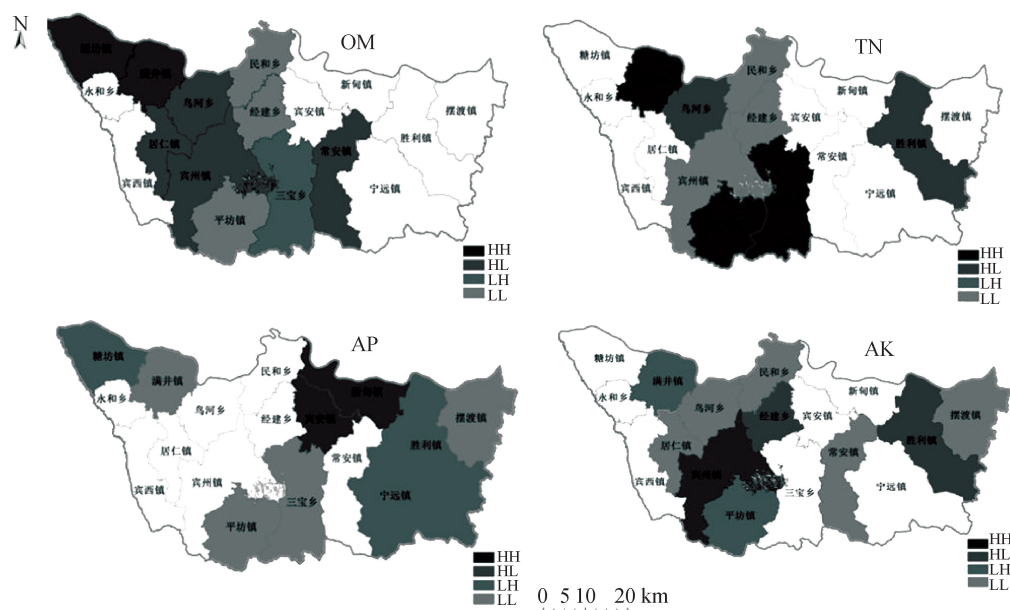


图 4 宾县土壤养分 LISA 图
Fig. 4 LISA map of soil nutrients in Binxian County

由图 4 可知,有机质 HH 聚类分布在糖坊镇和满井镇,HL 聚类分布在宾州镇、乌河乡、居仁镇和常安镇,LH 聚集分布在三宝乡,LL 聚类分布在民和乡、经建乡和平坊镇;全氮 HH 聚类分布在平坊镇、三宝乡、满井镇,HL 聚类分布在乌河乡、胜利镇,LL 聚类分布在宾州镇、经建乡和民和乡;有效磷 HH 聚类分布在宾安镇和经建乡,LH 聚类分布在糖坊镇、胜利镇和宁远镇,LL 聚类分布在平坊镇、三宝镇、满井镇和摆渡镇;速效钾 HH 聚类分布在宾州镇,HL 聚类分布在经建乡和胜利镇,LH 聚

类分布在平坊镇和满井镇,LL 聚类分布在民和乡、乌河乡、居仁镇、常安镇和摆渡镇。

2.3 土壤养分分布的影响因素

2.3.1 地形因子

地形作为非常关键的影响要素,其对降水和光能的空间分配可起到调节作用,并据此改变土壤养分的空间分布^[18]。通过 ArcGIS10.5 对宾县 DEM 数据的坡度、坡向、起伏度等相关因子进行提取处理,在此基础上运用 SPSS 25 对土壤有机质、全氮、速效钾、有效磷四种养分因子和提取后的地形因子

进行 Pearson 相关性分析,结果见表 3。其中坡向运用向阳值赋值,以便于计算。高程与有机质呈显著负相关($P<0.05$),与全氮和速效钾均无明显相关性,说明高程越高,有机质含量越低,海拔越高越不利于有机质的积累。坡度与有效磷含量之间存在负相关关系($P<0.01$),与有机质之间存在显著负相关关系($P<0.05$),与其他养分之间没有显现出明显的相关性。坡向与有效磷之间存在正相关关系

($P<0.01$),与有机质和全氮呈显著正相关($P<0.05$),与速效钾无明显相关性,说明坡向越好,光照和气温条件好,植被生长的茂盛,土壤的养分涵养能力越强。坡度变率只与有效磷呈显著负相关($P<0.05$),表示随坡度变化越大土壤中有效磷的含量流失越严重,坡度越平缓的地方,土壤养分越容易保留;土壤中的养分因子与曲率和地形因子均未通过显著性检验,它们之间无明显相关性。

表 3 土壤养分与地形因子的相关系数

Tab. 3 Correlation analysis of soil nutrients and topographic factors

土壤养分	相关系数					
	高程	坡度	坡向	曲率	坡度变率	地形起伏度
OM	-0.135 *	-0.106 *	0.099 *	0.081	0.036	-0.069
TN	0.001	0.045	0.036 *	0.079	0.049	-0.036
AP	-0.080 *	-0.176 **	0.186 **	-0.085	-0.031 *	-0.101
AK	0.011	0.028	0.030	0.048	0.045	0.081

注: * 和 ** 分别表示 $P<0.05$ 与 $P<0.01$ 。

2.3.2 土壤侵蚀

土壤侵蚀通过风力、水力、重力多种外力作用会造成土壤及母质剥离、土壤沉积等结果,进而对土壤内养分含量与分布情况产生影响^[19]。根据宾县 Landsat8 影像对宾县土壤侵蚀沟进行目视解译,共解译出侵蚀沟近 4 000 条(见图 5)。其中宾县的糖坊镇、满井镇、永和乡侵蚀沟数量较多,分布密集。土壤侵蚀程度是影响土壤养分因子的重要指标,为了进一步分析二者的空间相关性,采用地理加权回归模型,利用宾县侵蚀沟的密度与土壤有机质、全氮、速效磷和有效钾进行回归分析。

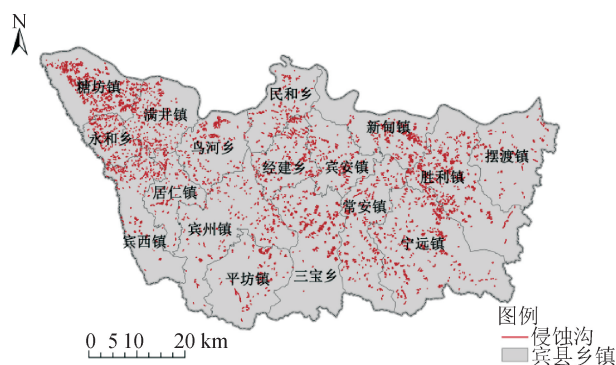


图 5 宾县侵蚀沟分布

Fig. 5 Distribution of erosion gullies in Binxian County

由图 6 可以得出,侵蚀沟密度对土壤养分的影响程度可通过对应的回归系数来解释,回归系数的绝对值大小反映该因子对土壤养分影响的强度。根据所得计算结果可知,土壤有机质、全氮、速效钾和

有效磷的地理加权回归系数均为负数,所以二者呈负相关。有机质的回归系数的绝对值较大,全氮的回归系数绝对值较小,所以侵蚀沟密度对有机质影响最强烈,反之侵蚀沟密度对全氮的影响最弱。侵蚀沟密度对有机质、速效钾和有效磷的影响均在宾县西北方向的几个镇表现最为强烈,尤其是糖坊镇。侵蚀沟密度对有机质、全氮、有效磷的影响在宾县东部最弱。

2.3.3 成土母质

对于土壤而言,成土母质会直接影响其化学成分以及矿物组成。土壤会通过一定的物理作用、化学作用、风化作用和淋溶作用产生相应的养分变化。针对不同的成土母质类型进行分析,得出其营养成分含量的结果(见表 4),不同成土母质的养分含量之间有着十分明显的变化。

有机质在河水冲击物中含量较高,在黄土母质中较低;全氮在河水冲击物中含量较高,在结晶盐类风化中较低;有效磷在河水冲击物中含量较高,在黄土母质中含量较低;速效钾在河水冲击物中含量较高,在黄土母质含量中较低。土壤养分含量在河水冲击物较高,说明河水冲击物便于土壤养分的积累,宜种植,耕作性广。有机质变异系数在 3 类成土母质普遍偏低,有效磷和速效钾变异系数在 3 类成土母质中偏高。表明速效钾和有效磷有较强的空间异质性。有效磷在结晶盐类风化中的变异系数最高,有机质变异系数最低。

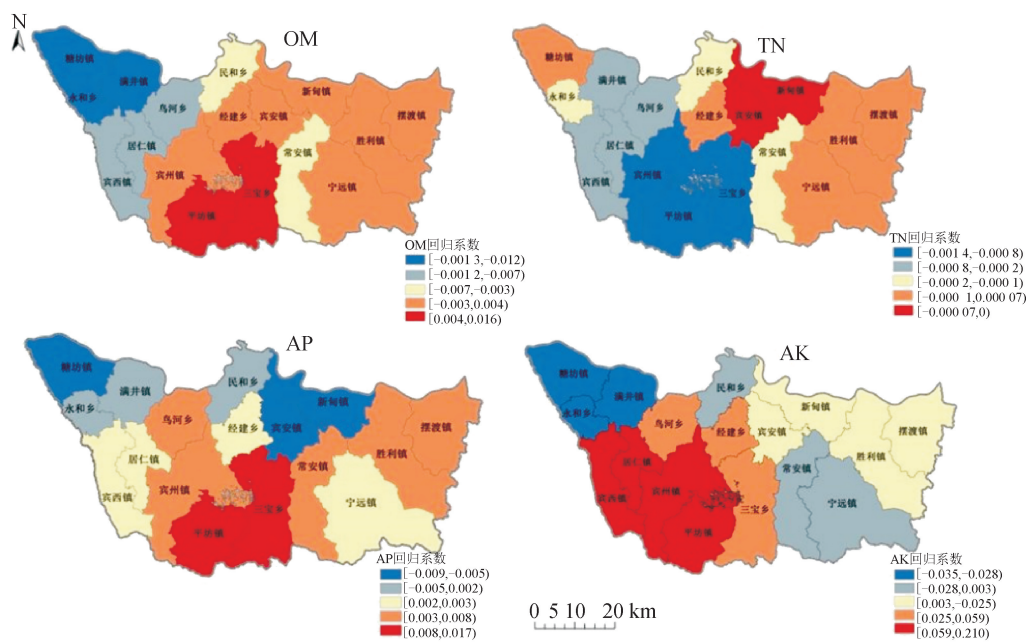


图 6 侵蚀沟密度与土壤养分的回归系数
Fig. 6 Regression coefficient between gully density and soil nutrients

表 4 不同成土母质类型下土壤养分描述性统计特征

Tab. 4 Features of soil nutrients under different parent material types

成土母质	样点数	养分	养分含量/(g·kg ⁻¹)			标准差	变异系数 CV/%	分布类型
			最小值	最大值	平均值			
河水冲积物	103	OM	16.50	61.90	33.63	8.95	26.61	正态
		TN	0.91	3.46	1.86	0.49	26.34	正态
		AP	3.90E-3	144.50E-3	46.74E-3	27.56	58.96	正态
		AK	49.00E-3	444.00E-3	173.88E-3	82.46	47.42	正态
黄土母质	101	OM	15.20	42.90	28.15	5.96	21.17	正态
		TN	0.83	2.36	1.55	0.33	21.29	正态
		AP	11.10E-3	105.20E-3	38.67E-3	19.79	51.76	正态
		AK	34.00E-3	300.00E-3	152.86E-3	54.59	35.71	正态
结晶盐类风化	40	OM	25.80	28.40	26.96	1.32	4.56	正态
		TN	1.42	1.58	1.49	0.08	5.37	正态
		AP	13.00E-3	59.60E-3	31.40E-3	24.80	78.98	正态
		AK	77.00E-3	114.00E-3	100.67E-3	20.55	20.41	正态

2.3.4 土壤类型

研究区土壤类型主要有四种分别是:黑土、草甸土、暗棕壤和白浆土。不同土壤类型中土壤养分含量有较大的差异。针对不同土壤类型的养分含量进行统计分析,其结果见表 5。有机质在暗棕壤中含量较高,在黑土中含量较低;全氮在暗棕壤中含量较高,在黑土中含量较低;有效磷在草甸土中含量较高,在白浆土中含量较低;速效钾在草甸土中含量较

高,在暗棕壤中含量较低;土壤养分的含量在暗棕壤中含量较高,在黑土中含量较低。表明暗棕壤土壤条件好,有利于土壤养分的积累,黑土区土壤侵蚀现象严重,土壤养分流失严重。不同土壤类型有机质和全氮的变异系数偏低,有效磷和速效钾变异系数偏高,说明速效钾和有效磷有较强的空间异质性。有效磷的变异系数在白浆土最高,全氮的变异系数最低。

表 5 各土壤类型下养分统计特征
Tab. 5 Feature of soil nutrients under different soil types

土壤类型	样点数	养分	养分含量/(g·kg ⁻¹)			标准差	变异系数 CV/%	分布类型
			最小值	最大值	平均值			
暗棕壤	39	OM	21.90	53.20	35.78	9.66	27.00	正态
		TN	1.20	2.93	1.98	0.54	27.28	正态
		AP	13.00E-3	94.30E-3	40.69E-3	22.49	55.27	正态
		AK	49.00E-3	362.00E-3	149.71E-3	73.78	49.28	正态
草甸土	86	OM	17.10	61.90	32.90	8.92	27.11	正态
		TN	0.94	3.46	1.82	0.49	26.92	正态
		AP	3.90E-3	144.50E-3	47.52E-3	29.48	62.03	正态
		AK	83.00E-3	444.00E-3	180.13E-3	85.23	47.31	正态
黑土	93	OM	15.20	50.40	28.45	6.20	21.79	正态
		TN	0.83	2.77	1.56	0.34	21.79	正态
		AP	11.10E-3	105.20E-3	40.76E-3	21.01	49.09	正态
		AK	34.00E-3	415.00E-3	155.25E-3	61.48	39.60	正态
白浆土	26	OM	20.30	39.70	34.93	7.46	21.35	正态
		TN	1.24	2.18	1.94	0.36	18.55	正态
		AP	12.95E-3	77.20E-3	35.85E-3	23.03	64.24	正态
		AK	92.00E-3	226.00E-3	173.00E-3	61.67	35.65	正态

2.3.5 施肥条件

人们的生产作业以及相关行为会直接导致土壤养分的变化,随着时间的积累变化,强度会越来越高。化肥用量对土壤中养分水平会产生强烈影响,且使其空间变异性大幅度改变^[20]。本文选取宾县普遍使用的 3 种肥料:氮肥(N)、磷肥(P₂O₅)、钾肥(K₂O),对 3 种肥料的施肥用量与土壤养分含量进行相关性分析,结果见表 6。施用肥料的剂量会直接对土壤养分产生相应的影响,磷肥的施用量与土壤中有机质含量呈现极其显著的负相关($P<0.01$),与全氮含量呈现显著负相关($P<0.05$),与有效磷含量呈现显著正相关($P<0.05$)。氮肥施用量与

全氮含量具有极其显著的正相关($P<0.01$)。钾肥施用量与有机质含量具有显著负相关($P<0.05$),与有效钾和速效磷的含量具有显著正相关($P<0.05$)。不同肥料会对这片土地有不同的影响,如果能够合理的、科学的施加肥料,那么就会增加土地的养分,使得农作物的产量增加;相反过量的施肥则可能会阻碍土壤中其他养分因子的保持肥料的构成、配比和种类等因素也可能会影响施肥的效果,就会降低土地的肥力,从而影响土壤养分的含量,加速土壤含量的流失,土壤质量差导致农作物减产,这与许敏^[21]的研究结果一致。应根据作物对肥料的需求差异和吸收能力,进行合理施肥。

表 6 土壤养分与施肥条件的关联
Tab. 6 Relationship of soil nutrients and fertilization conditions

土壤养分	相关系数		
	磷肥施用量	氮肥施用量	钾肥施用量
OM	-0.018**	0.021	-0.002*
TN	-0.048*	0.011**	-0.029
AP	0.039*	0.063	0.037*
AK	0.079	0.081	0.095*

注:* 和** 分别表示 $P<0.05$ 与 $P<0.01$ 。

3 结 论

1) 按照黑龙江省耕地土壤养分含量标准,宾县耕地土壤有机质、速效钾和有机质含量较高,有效磷含量适中。四种土壤养分因子的变异程度大小依次为 $TN > OM > AP > AK$,其中 OM、AP 和 AK 属于中等强度变异,变异程度主要受结构性因素影响,TN 的空间变异性较弱,变异程度受随机因素主导。

2) 土壤有机质和全氮均在糖坊镇出现了 HH 高值聚类,在民和乡和经建乡出现 LL 低值聚类。土壤有效磷和速效钾的聚类分布有一定的相似性,均在摆渡镇出现 LL 低值聚类。

3) 地形、土壤侵蚀等影响因素一定程度上与土壤养分含量呈现负相关关系。海拔、坡度和坡度变率、侵蚀程度高的地区,土壤养分含量越低。磷肥和钾肥是施用量对土壤养分含量影响较大。成土母质中,河水冲击物土壤养分含量较高。土壤类型中,暗棕壤土壤养分含量丰富。

参考文献:

- [1] 董敏. 基于 GARBF 神经网络的土壤属性信息空间插值方法研究[D]. 成都:四川农业大学,2009.
DONG Min. GARBF neural network based spatial interpolation method for soil attribute information[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2009.
- [2] 王辛芝,张甘霖,余元春,等. 南京城市土壤 pH 和养分的空间分布[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2006,30(4):69-72.
WANG Xinzhi, ZHANG Ganlin, YU Yuanchun, et al. Spatial distribution of soil pH and nutrients in Urban Nanjing[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2006, 30(4): 69-72.
- [3] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社,1999.
- [4] 张淑娟,何勇,方慧. 基于 GPS 和 GIS 的田间土壤特性的空间变异性的研究[J]. 农业工程学报,2003,19(2): 39-44.
ZHANG Shujuan, HE Yong, FANG Hui. Spatial variability of soil properties in the field based on GPS and GIS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(2): 39-44.
- [5] 杨玉玲,文启凯,田长彦,等. 土壤空间变异研究现状及展望[J]. 干旱区研究,2001,18(2):50-55.
YANG Yuling, WEN Qikai, TIAN Changyan, et al. The status quo and prospect of spatial variability of soil[J]. Arid Zone Research, 2001, 18(2): 50-55.
- [6] 赵海燕,徐福利,王渭玲,等. 秦岭地区华北落叶松人工林地土壤养分和酶活性变化[J]. 生态学报,2015,35(4):1086-1094.
ZHAO Haiyan, XU Fuli, WANG Weiling, et al. Soil nutrients and enzyme activities in *Larix principis-ruprechtii* plantations in the Qinling Mountains, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(4): 1086-1094.
- [7] 张久明,迟凤琴,杨思平,等. 哈尔滨市黑土养分空间异质性分析——以方正县德善村为例[J]. 土壤通报,2009, 40(3):533-537.
ZHANG Jiuming, CHI Fengqin, YANG Siping, et al. The spatial variability of nutrient contents in black soil region of Harbin-in Deshan Village of Fangzheng County[J]. China Journal of Soil Science, 2009, 40(3): 533-537.
- [8] 王婕,牛文全,张文倩,等. 农田表层土壤养分空间异特性研究[J]. 农业工程学报,2020,36(15):37-46.
WANG Jie, NIU Wenquan, ZHANG Wenqian, et al. Spatial variability of soil nutrients in topsoil of cultivated land[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(15): 37-46.
- [9] 王宗明,张柏,宋开山,等. 东北平原典型农业县农田土壤养分空间分布影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2007,21(2):73-77.
WANG Zongming, ZHANG Bai, SONG Kaishan, et al. Analysis of related factors for soil nutrients in croplands of typical agricultural county, northeast plain, China[J]. Journal of soil and Water Conservation, 2007, 21(2): 73-77.
- [10] 陈兴,吴开彬,王军,等. 贵州省仁怀市耕地土壤养分地球化学特征及其影响因素研究[J/OL]. 中国地质, (2020-07-14)[2021-03-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20200714.0956.002.html>.
CHEN Xing, WU Kaibin, WANG Jun, et al. Characteristics of soil nutrient geochemistry and its influencing factors in cultivated land of Renhuai city, Guizhou Province[J/OL]. Geology in China, (2020-07-14) [2021-03-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20200714.0956.002.html>.
- [11] 赵越,罗志军,廖牧鑫,等. 泰和县耕地土壤养分空间分布及影响因素[J]. 水土保持学报,2018,32(5): 296-303.
ZHAO Yue, LUO Zhijun, LIAO Muxin, et al. Study on the spatial distribution of soil nutrients and its influencing factors in the cultivated land of Taihe County[J]. Journal of soil and Water Conservation, 2018, 32(5): 296-303.
- [12] VÅGEN T G, WINOWIECKI L, WALSH M G, et al. Land degradation surveillance framework (LDSF): field guide[M]. World Agroforestry Centre IC, 2010.
- [13] SEPEHR E, COOKE G M, ROBERTSON P, et al.

- Effect of glycosidation of isoflavones on their bioavailability and pharmacokinetics in aged male rats[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2009, 53(S1): S16-S26.
- [14] BRUNSDON C, FOTHERINGHAM A S, CHARLTON M E. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity[J]. *Geographical Analysis*, 1996, 28(4): 281-298.
- [15] 康日峰,任意,吴会军,等. 26 年来东北黑土区土壤养分演变特征[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(11): 2113-2125.
- KANG Rifeng, REN Yi, WU Huijun, et al. Changes in the nutrients and fertility of black soil over 26 years in Northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(11): 2113-2125.
- [16] 张维,李启权,王昌全,等. 川中丘陵县域土壤 pH 空间变异及影响因素分析—以四川仁寿县为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(7): 1192-1199.
- ZHANG Wei, LI Qiquan, WANG Changquan, et al. Spatial variability of soil pH and its influence factors at a county scale in hilly area of Mid-Sichuan Basin—a case study from Renshou in Sichuan[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(7): 1192-1199.
- [17] 王小艳,冯跃华,李云,等. 黔中喀斯特山区村域稻田土壤理化特性的空间变异特征及空间自相关性[J]. *生态学报*, 2015, 35(9): 2926-2936.
- WANG Xiaoyan, FENG Yuehua, LI Yun, et al. Spatial variability of soil physiochemical properties and their autocorrelations at village-region in karst mountainous area, Guizhou Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(9): 2926-2936.
- [18] 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.
- WU Hao. The relationship between terrain factors and spatial variability of soil nutrients for pine-oak mixed forest in Qinling Mountains[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(5): 858-869.
- [19] 赵越,罗志军,赵杰,等. 南方丘陵区耕地土壤养分空间特征及其影响因素[J]. *浙江农业学报*, 2018, 30(6): 1035-1043.
- ZHAO Yue, LUO Zhijun, ZHAO Jie, et al. Spatial characteristics and influencing factors of soil nutrients in hilly region of South China[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2018, 30(6): 1035-1043.
- [20] 庞凤,李廷轩,王永东,等. 土壤速效氮、磷、钾含量空间变异特征及其影响因子[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(1): 114-120.
- PANG Su, LI Tingxuan, WANG Yongdong, et al. Spatial variability of soil available N, P, K and influencing factors[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(1): 114-120.
- [21] 许敏. 渭北高原红富士苹果园土壤养分特征及施肥管理研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2015.
- XU Min. Soil nutrient characteristics and fertilization management of Fuji Garden in Weibei Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.

(责任编辑 王绪迪)