

松嫩平原西部农田土壤有机质和全氮的空间分布影响因素分析

白一君¹,任春颖²,王宗明²,全斌¹

(1. 湖南科技大学 地理空间信息技术国家地方联合工程实验室, 湖南 湘潭 411201;
2. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012)

摘要:运用地统计学、GIS 和传统统计方法,分析松嫩平原西部吉林省通榆县农田表层土壤有机质和全氮的空间分布,并探讨高程、坡度、土壤类型和人工施肥量等因素对土壤有机质和全氮空间分布的影响. 研究表明:1) 吉林省通榆县农田表层土壤有机质含量西部高,东北和西北部低,而全氮含量为北部高,西南部低;2) 不同海拔高度上的土壤有机质和全氮含量变化差异并不显著;3) 土壤有机质和全氮含量随着坡度的增大,急剧减少;4) 淡黑钙土、栗钙土和草甸土的有机质和全氮含量明显高于风沙土和沼泽土;5) 通榆县各乡镇人工施肥量与土壤有机质和全氮空间变异的相关性并不强,说明影响本县土壤有机质和全氮含量的因素以自然环境因素为主.

关键词:影响因素;空间变异;土壤有机质;全氮;通榆县

中图分类号:S158.2 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2015)01-0121-08

Spatial variability and influencing factors analysis of farmland soil organic matter and total nitrogen in the west songnen plain

Bai Yijun¹, Ren Chunying², Wang Zongming², Quan Bin¹

(1. National - Local Joint Engineering Laboratory of Geospatial Information Technology,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS, Changchun 130012, China)

Abstract: The geo - statistics, geographic information system (GIS) and traditional descriptive statistics was combined to analyze spatial variability characteristics of the topsoil organic matter (SOM) and total nitrogen (TN) in Tongyu County, Jilin province in the West Songnen Plain, and the influence was discussed, such as different altitudes, slopes, soil types and artificial fertilizer on spatial variability characteristics of SOM and TN. The results show that: 1) The content of farmland soil organic matter is higher in the Midwest and lower in the Northeast and Northwest. Then the content of total nitrogen is high in the North and low in the West south in Tongyu County, Jilin province; 2) The spatial variability characteristics of SOM and TN with different altitudes is not significant in change; 3) The content of SOM and TN drastically reduces as the slope increases; 4) The content of SOM and TN on light chernozem, chestnut soil and meadow is higher than the sand soil and swamp soil, etc.; 5) There is low correlation between artificial fertilizer and the spatial variability of SOM and TN in Tongyu county. This result illustrate that the natural environment factors are the main control forces of the spatial pattern of SOM and TN in this county.

Keywords: affected factor; spatial variability; soil organic matter; total nitrogen; Tongyu County

收稿日期:2012-12-21

基金项目:中国科学院重点部署项目课题(KZZD-EW-08-02);国家自然科学基金资助项目(40901096);湖南省自然科学基金项目(14JJ2098)

通信作者:任春颖(1982-),女,辽宁沈阳人,副研究员,硕士生导师,主要从事遥感与GIS应用方面的研究. E-mail:renchy@neigae.ac.cn

土壤有机质(soil organic matter)和全氮(total nitrogen)是评价土壤肥力和土壤质量的重要指标因子,也是全球碳循环中重要的“源”和“汇”^[1-3].近年来,国内外学者对土壤有机质和全氮含量的空间分布进行了广泛的研究^[4-6],研究区主要集中于华北平原、黄土高原以及我国南方丘陵地区^[7-12].吉林省通榆县位于东北松嫩平原西部,地处半干旱、半湿润地带,为典型的农牧交错区,也是吉林省重要的农牧业基地.然而,由于该县疏松贫瘠的土壤母质,以及长期以来人类不合理的开发利用,县内生态环境日趋恶化,土壤沙化、盐碱化等退化现象普遍,严重制约了该区域农业的可持续发展.近年来,部分学者已就生态脆弱性、土地利用变化以及土壤养分的时空分布等方面展开了研究工作^[13-15].但是,迄今为止,结合多源数据资料进行区域土壤养分空间分布影响因素分析的研究较少报道.因此,本研究利用野外采集的土壤样点数据,结合地统计学、GIS空间分析以及传统统计分析方法,探讨了吉林省通榆县农田表层土壤有机质和全氮含量的空间分布规律,并分析土壤有机质和全氮含量与地形、土壤和施肥量等因子之间的相关关系,阐明影响该区域农田表层土壤有机质和全氮空间分布的主导因子.本研究一方面可以为实现该区域农业土壤可持续利用提供决策依据,也可以为合理施肥、实行养分的分区管理,提供重要的数据支持.

1 研究区概况

吉林省通榆县位于松嫩平原西部,地理位置介于东经 122°02'13"~123°30'57",北纬 44°13'57"~45°16'27"之间,共包括 21 个乡镇以及 6 个国营农牧林场,总面积为 8 496 km²,东、南、西三面高,北部和中部较低,地形似簸箕状.属北温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温 6.6 °C,干燥度 1.1~1.5,降水量 370~500 mm,且年内分配不均,春、秋两季较少,夏季较多;年陆面蒸发量 900~1 000 mm.地貌类型为湖积-冲积平原,主要发育有淡黑钙土、风沙土、草甸土、碱土、沼泽土、盐土等土类.植被为地带性草甸草原.该区属于东北农牧交错地区,风沙大、气候干旱,地表水贫乏,农业生产以旱作为主,一年一熟.

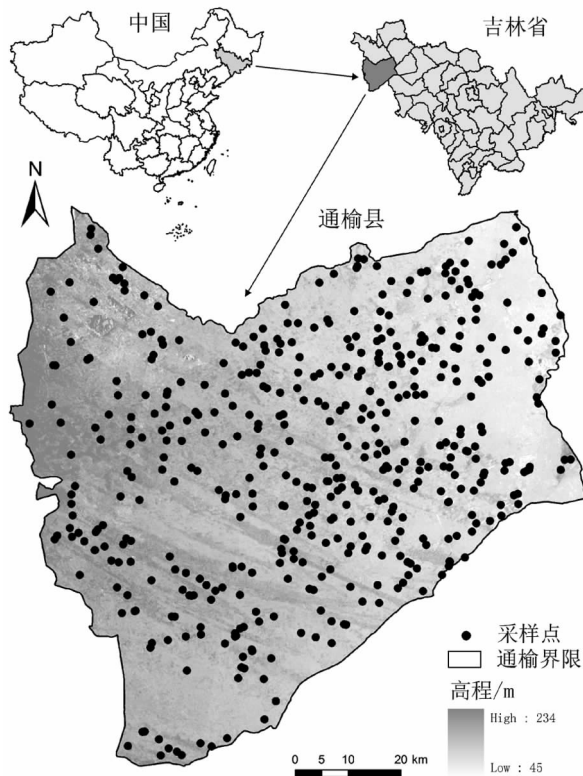


图1 研究区地理位置及土壤样点分布图

2 数据来源与方法

2.1 土壤样品采集与处理

于 2009 年 9 月进行了土壤样点的采集工作.选取面积较大、具有代表性的耕地样地,避免在马路边人

为干预严重的区域,样点尽量均匀地布设于整个研究区,共计采集样品 477 个.每个取样点设 4 个重复,用 S 形路线法选取 4 个点采集表层土(0~20 cm)的混合样品,剔除土壤样品中的植物根系及残体、石块、昆虫尸体等杂物,充分混匀后用四分法留取 1.5kg 土样,放入自制的约 20 cm × 15 cm 的土袋中.土袋附带标签,在标签上填写样品类型、野外 GPS、采样地点、深度、时间、采样人等.回到室内风干样品后,粉碎、研磨过 100 目尼龙网筛,装入样品纸袋用于分析.采用重铬酸钾外加热法^[16]测定土壤有机质含量,半微量凯氏法测定土壤全氮含量^[17].采样的同时利用 GPS 获取土壤样点的地理坐标.

2.2 辅助数据来源与处理

数字高程模型(DEM)为 ASTER GDEM 数据,来源于“国际科学数据服务平台”,分辨率为 30 m;高程数据是利用 GPS 野外定位时获得的实测样点数据;利用 ArcGIS 空间分析模块中的表面分析工具提取得到研究区坡度图;土壤类型数据来源于第二次全国土壤普查数据资料,扫描 1:10 万土壤图,并运用 ArcGIS 软件矢量化获得;施肥量数据来源于吉林省统计年鉴、通榆县统计年鉴和通榆县农业统计年鉴等.

本文采用 Excel2010 和 SPSS17.0 软件进行描述性统计数据处理;GS + 7.0 进行地统计学分析、半方差函数的计算及拟合模型的选择;运用 Origin8.0 进行图表的制作;利用 ArcGIS9.3 软件进行数值模拟、插值分析与叠置分析.

2.3 研究方法

1) 传统统计方法

运用传统统计方法中的正态分布检验,方差分析以及单变量方差分析(One - Way ANOVA)等方法对数据进行检验与描述性统计.

2) 地统计学方法

本文选取地统计学方法中半方差函数和 Kriging 插值方法进行数据处理与插值分析,可以对既具有随机性又具有结构性的各种变量在空间上的分布进行研究.假设区域化变量满足二阶平稳和本征假设,半方差函数可用公式(1)表示:

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

式中: $N(h)$ 表示距离等于 h 时的点对数; $Z(x)$ 是样点 Z 在位置 x 的实测值; $Z(x+h)$ 是与 x 距离为 h 处样点的值.

土壤性质的半方差图通常可以被某些曲线方程所拟合,这些曲线方程称为半方差函数的理论模型,常见的拟合模型包括线性模型、球状模型、指数模型等.

Kriging 插值法即空间局部估计或空间局部插值.该方法由建立在估值 $\hat{z}(x_0)$ 对真值 $z(x_0)$ 的无偏估计以及估值与真值两者之差的方差最小基础假设上,由于半方差函数给出相邻成对采样点之间的参数相关关系,故任一未知内插点 x_0 处的参数估值 $\hat{Z}(x_0)$ 可通过环绕其四周且处于空间分布相关距离范围内的 n 个已知点 $z(x_i)$,估算如下:

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(x_i). \quad (2)$$

式中: λ_i 为待定的权重因子,由式(1)给出的半方差函数计算得到.

3 结果与分析

3.1 土壤有机质和全氮的空间分布格局

应用传统统计学与地统计学中相关经典模型和判定标准^[18-23],得到有机质和全氮的描述性统计表(表1)和半方差函数模型(表2).分析可知,土壤有机质和全氮含量均属中等偏低水平,且两者范围变化幅度较大,并存在明显差异.按照地统计学中区域化变量空间相关性程度的分级标准^[21-23],当块金效应 < 0.25 时,变量具有强烈的空间自相关性;在 $0.25 \sim 0.75$ 之间,变量具有中等的空间自相关性;而在 > 0.75 时,变量空间相关性很弱,变异主要由随机变异组成,不适合采用空间插值的方法进行空间预测.土壤有机质含量和全氮含量均具有中等的自相关性,说明两者的空间变异均由土壤母质、地形、气候、土壤类型等

非人为的结构性和一些随机性因素如施肥量、种植作物种类、耕种年限等共同影响。

表1 土壤有机质和全氮含量的描述性统计特征值

	样本数	最大值 /(g/kg)	最小值 /(g/kg)	平均值 /(g/kg)	标准差	变异系数 CV	偏度 SK	峰度 CK	合理样 本数
有机质	477	30.80	0.34	4.30	5.46	0.81	1.29	1.44	244
经对数转换后	477	3.43	-1.08	1.58	0.84	0.53	-0.11	-0.57	-
全氮	477	2.25	0.35	0.87	0.28	0.31	0.87	2.08	37
经对数转换后	477	0.81	-1.05	-0.17	0.31	-1.83	-0.12	0.11	-

表2 通榆县土壤有机质和全氮的半方差函数模型及参数

土壤养分	模型	块金值 C_0	基台值 $C_0 + C$	变程 A_0/km	块金效应 $C_0 / C_0 + C$	R^2
有机质	球状模型	15.060	30.510	117	0.494	0.954
全氮	指数模型	0.056	0.091	221	0.615	0.938

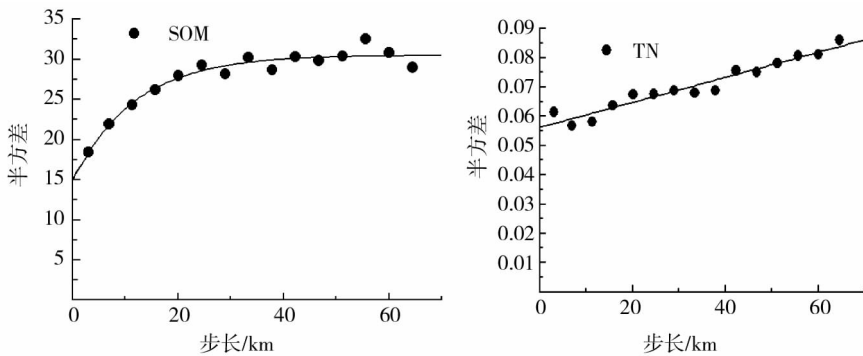


图2 通榆县土壤有机质和全氮的半方差函数理论模型

依据表2所拟合的最佳半方差函数模型,利用GS+7.0和ArcGIS9.3软件,选用Kriging插值方法分别对2个时期土壤有机质和全氮进行空间插值,得到2009年通榆县土壤有机质和全氮的30 m × 30 m空间插值图(图3)。从插值图中可以看出,有机质含量中西部偏高,依次往北部和偏西北方向递减,至东北偏北方向有回升趋势,最低值出现在北部偏中部地区。而全氮的含量为北部高,西南部含量偏低,且递减趋势明显。全氮含量匮乏的地区位于研究区的中部偏西部。

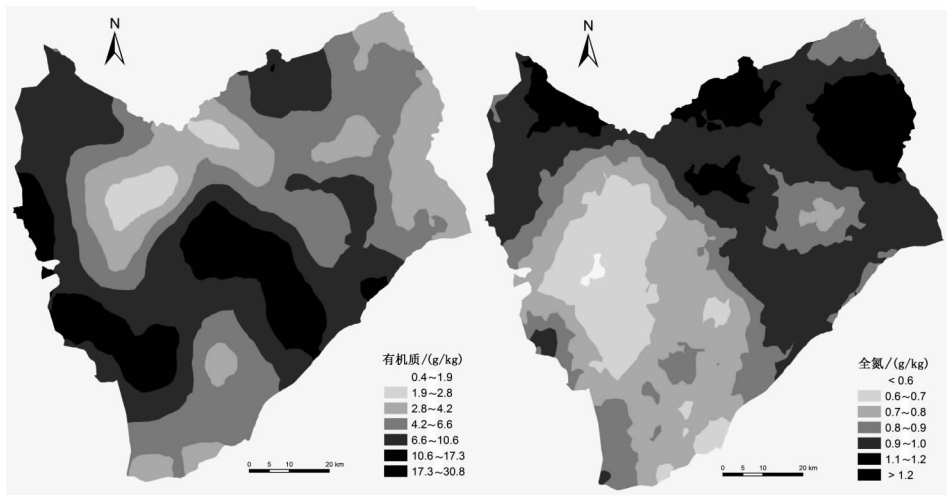


图3 通榆县土壤有机质和全氮含量的空间变异图

3.2 土壤有机质与全氮含量的空间分布影响因素分析

影响土壤全氮和有机质空间分布的因素较多,根据其他学者的研究成果^[24-30]以及上述分析判断,在

同一气候条件下,通榆县土壤有机质和全氮含量的空间变异主要受地形地貌、土壤质地及人为管理措施等多种因素的影响.因此,本文选取高程、坡度、土壤类型以及人工施肥4个方面来探讨影响该县土壤有机质和全氮含量的空间分布的因素.

运用 ArcGIS9.3 的 overlay 工具将有机质、全氮的插值图分别与高程、坡度、土壤类型等空间数据叠加,进行影响因素分析.

3.2.1 高程对土壤有机质、全氮含量的影响

由于研究区的海拔多为 120 ~ 180 m,并结合采样点所在的土壤图斑的海拔,将高程分为 7 个等级,分别为 < 120 m, 120 ~ 130 m, 130 ~ 140 m, 140 ~ 150 m, 150 ~ 160 m, 160 ~ 170 m 和 > 170 m. 根据叠加统计分析,有机质含量在 2.8 ~ 10.6 g/kg 的面积最大,并主要分布在 130 ~ 170 m 的范围内,面积为 6 019.7 km²,占研究区的 70.77%;全氮含量在 0.7 ~ 1.0 g/kg 范围内的分布最广,在 130 ~ 160 m 范围内,分布面积为 5 072.35 km²,约占研究区面积的 59.69%. 大体上符合正态分布的概率特征,并未发现两者含量因高程变化而产生较大改变.

为了进一步探讨高程对土壤有机质和全氮的影响,采用单变量方差分析(One - Way ANOVA)的方法分析不同高程对土壤养分的影响.结果表明,对于有机质和全氮,不同高程组的含量均不存在显著差异(如表 3),这表明,对于整体地形较为平坦的研究区而言,海拔高度并不是影响土壤有机质和全氮空间分布差异的主要因素.

3.2.2 坡度对土壤有机质、全氮含量的影响

由于研究区地形平坦,坡度起伏不大,参考《第二次全国土地调查技术规程》中的耕地坡度分级法,将研究区坡度分为 5 个等级,分别为: < 1°, 1° ~ 3°, 3° ~ 5°, 5 ~ 7°, > 7°.

研究区的土壤有机质主要分布在 < 3° 的坡度上,分布面积为 6 096.22 km²,占研究区面积的 71.74%,其次为 3° ~ 5° 的坡度上,面积为 1 533.20 km²,占总面积的 18.04%,而坡度 > 5° 的有机质含量分布面积仅 560.36 km²,不足总面积的 7%. 对于土壤全氮含量,情况类似,坡度 < 3° 的全氮分布面积为 6 409.44 km²,占总面积的 75.43%,而坡度 > 5° 的全氮含量分布面积仅 480.75 km²,不足总面积的 6%.

由图 4 也可看出,土壤有机质和全氮含量随着坡度的增大,呈现骤然减少的趋势,主要是由于在坡度较缓的区域,土壤表层易聚积大量枯枝落叶,腐殖化作用较强,富集了大量的腐殖质,使得有机质和全氮含量较高;随着坡度增大,地表径流冲刷严重,导致表层土壤侵蚀加剧、养分流失较多,不利于有机质和氮素的积累,土壤中的有机质和全氮含量会相对来说比较匮乏.

3.2.3 土壤类型与土壤有机质、全氮含量的关系

将土壤样点数据与研究区 1: 10 万土壤类型图叠加,获得样点所在位置的土壤类型属性,并采用单因素方差分析,检验得到不同土壤类型之间的有机质和全氮含量差异显著性结果,见表 4.

由表 4 可知,草甸土、淡黑钙土和栗钙土中的有机质含量的平均值明显高于风沙土、碱土和沼泽土. 由于淡黑钙土和栗钙土具有较深厚的松软的腐殖质表层,而草甸土发育于地势低平、受地下水或潜水的直接浸润,草甸植被生长茂密,土壤团粒结构较好,因此这几种土壤类型所含有有机质含量较高. 对于不同土壤类型下的全氮含量,除了沼泽土和风沙土含量偏低外,其他土壤类型不存在显著性差异. 风沙土有机质含量和全氮含量均处于较低水平,原因是风沙土质地较粗,砂粒含量高. 保水保肥能力较差,有机质积累少,土壤养分匮乏.

表 3 不同高程的土壤有机质和全氮含量的单因素方差值

高程/m	有机质 Sig. 值	全氮 Sig. 值
< 120	0.246	0.280
120 ~ 130	0.321	0.361
130 ~ 140	0.237	0.290
140 ~ 150	0.251	0.286
150 ~ 160	0.210	0.241
160 ~ 170	0.228	0.295
> 170	0.322	0.356

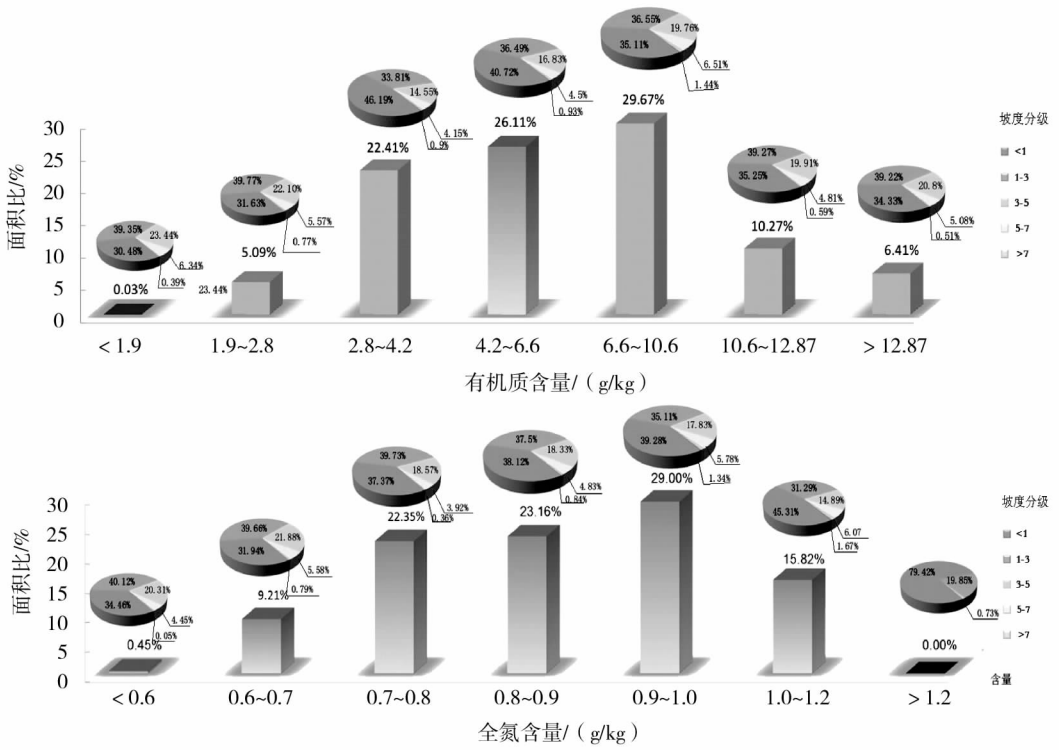


图4 不同坡度下土壤有机质和全氮含量的统计图

表4 不同土壤类型有机质和全氮含量统计值及单因素方差分析结果

土壤类型	样本数		平均值/(g/kg)		标准差	
	有机质	全氮	有机质	全氮	有机质	全氮
草甸土	19	19	6.00	0.90	5.04	0.27
淡黑钙土	164	147	6.70	0.91	5.69	0.25
风砂土	41	61	5.52	0.79	4.90	0.25
碱土	3	3	3.45	0.93	0.35	0.24
栗钙土	36	33	7.02	0.94	4.93	0.28
沼泽土	4	3	4.83	0.75	4.78	0.31

3.2.4 施肥量与土壤有机质、全氮含量的关系

对于耕种土壤来说,除继承自然土壤原有的有机质外,施用的各种有机肥是土壤有机质的重要来源.在各种营养元素中,氮是植物需要量和收获时带走量较多的营养元素,而它们通过残茬和根的形式归还给土壤的数量却不多,因此,往往需要以施用肥料的方式补充这种养分^[21].本研究通过搜集研究区各乡施肥量统计资料,分析1996年至2006年来通榆县各乡施肥量的变化以及空间分布上的差异,以期发现施肥量对土壤有机质空间分布的影响.

在ArcGIS的空间分析模块中,利用区域统计分析方法由插值之后的有机质和全氮含量的栅格表面得到各乡镇的有机质和全氮含量的均值,并对比通榆县各乡镇从1996年至2006年近10年间的平均施肥量和2006年的施肥量.可以看出:施肥量较高的乡镇,其有机质含量均值并不高,而全氮含量均值也不随施肥量高低的变化出现明显的不同.分析其原因,这与本县土壤的自然发育条件密切相关.通榆县土壤含沙量较高,因而土壤保水保肥的性能很差,即使是施用了肥料也很难保持涵养,再加上该县土壤pH值较高,土壤偏碱性,不利于土壤中氮、磷等元素有效性的发挥.综上可知,施肥量的多少与各乡土壤有机质和全氮平均含量的增减变化相关性并不强,这从一定程度上反映出本县母质、地形、气候等因素对土壤有机质和全氮含量整体上的控制作用.

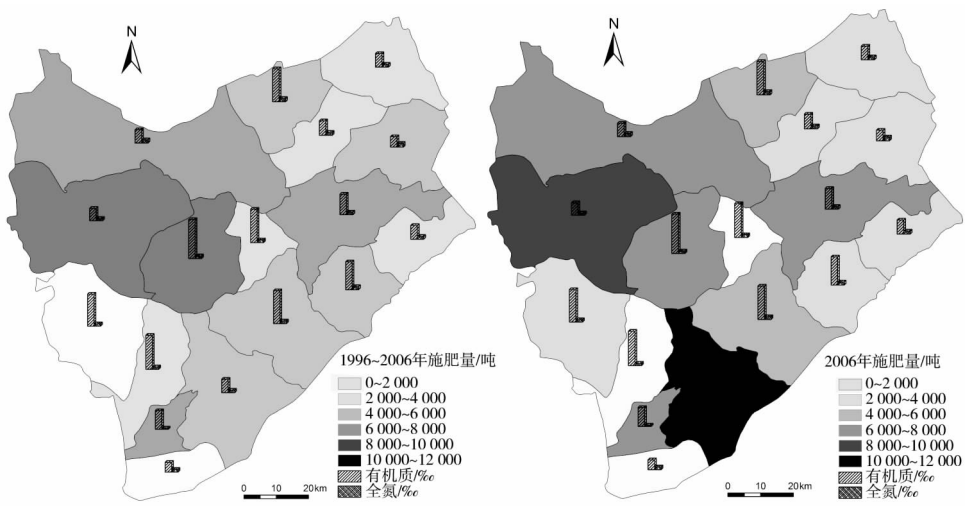


图5 1996~2006年和2006年通榆县各乡镇的平均施肥量以及有机质和全氮含量均值示意图

4 结果与讨论

1) 通过传统统计和地统计分析结合, 可得通榆县土壤有机质和全氮含量均属中等偏低水平, 范围变化幅度均较大. 研究区土壤有机质含量和全氮含量均具有中等的自相关性, 表明两者的空间变异均由自然的结构因素和人为的随机性因素共同影响.

2) 运用普通克里金空间插值法得到通榆县土壤有机质和全氮含量的空间分布预测图. 从空间分布预测图中可以看出有机质含量具有中西部高, 东北和西北方向低的特点; 全氮含量为北部高, 西南部偏低.

3) 通过对研究区有机质和全氮含量空间变异规律的影响因素分析发现, 海拔高度对两种养分的影响不明显; 土壤有机质和全氮含量随着坡度的增大, 均呈现骤然减少的趋势. 针对不同土壤类型下的有机质含量的不同发现, 草甸土、淡黑钙土和栗钙土中的明显风沙土、碱土和沼泽土. 而对于全氮来说, 除了沼泽土和风沙土含量偏低外, 其他土壤类型不存在显著性差异. 结合统计资料发现, 施肥量的多少对有机质和全氮含量的空间变异相关关系不明显.

参考文献:

- [1] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 32-49.
- [2] 王绍强, 朱松丽, 周成虎. 中国土壤土层厚度的空间变异特征[J]. 地理研究, 2001, 20(2): 161-169.
- [3] 李文芳, 杨世俊, 文池夫. 土壤有机质的环境效应[J]. 环境科学动态, 2004(4): 31-33.
- [4] 周慧珍, 龚子同. 土壤空间变异性研究[J]. 土壤学报, 1996, 33(3): 232-240.
- [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): 51-55.
- [6] 李亮亮, 依艳丽, 凌国鑫. 地统计学在土壤空间变异研究中的应用[J]. 土壤通报, 2005, 36(2): 263-266.
- [7] 路鹏, 黄道友, 宋变兰, 等. 亚热带红壤丘陵典型区土壤全氮的空间变异特征[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 181-183.
- [8] 盛建东, 杨玉玲, 陈冰, 等. 克拉玛依干旱生态农业区土壤有机质和全氮空间变异特征研究[J]. 新疆农业大学学报, 2003, 26(4): 32-36.
- [9] 程先富, 史学正, 于东升, 等. 江西省兴国县土壤全氮和有机质的空间变异及其分布格局[J]. 应用与环境生物学报, 2004, 10(1): 64-67.
- [10] 赵建华. 基于GIS的兰州市土壤全氮和有机质空间变异性研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2008.
- [11] 王淑英, 路苹, 王建立, 等. 北京市平谷区土壤有机质和全氮的空间变异分析[J]. 北京农学院学报, 2007, 22(4): 21-25.

- [12] 陈肖,张世熔,黄丽琴.等.成都平原土壤氮素的空间分布特征及其影响因素研究[J].植物营养与肥料报,2007,13(1):1-7.
- [13] 黄元仿,周志宇,苑小勇,等.干旱荒漠区土壤有机质空间变异特征[J].生态学报,2004,24(12):2776-2781.
- [14] 卢远,林年丰,汤洁,等.松嫩平原西部土地退化的遥感动态监测研究——以吉林省通榆县为例[J].地理与地理信息科学,2003,19(2):24-27.
- [15] 黄方,刘湘南,王平,等.松嫩平原西部地区土地利用覆被变化的驱动力分析[J].水土保持学,2003,17(6):14-17.
- [16] 刘光崧.土壤理化分析与剖面描述[S].北京:中国标准出版社,1996.
- [17] 中华人民共和国农牧渔业部. GB7173-87 土壤全氮测定法(半微量凯氏法)[S].北京:中国标准出版社,1990.
- [18] 陈彦.绿洲农田土壤养分时空变异及精确分区管理研究[D].石河子:石河子大学,2008.
- [19] 张春华,王宗明,任春颖,等.松嫩平原玉米带土壤有机质和全氮的时空变异特征[J].地理研究,2011,30(2):256-268.
- [20] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. Science, 2001, 292:2320-2322.
- [21] 周俊国,杨鹏鸣.不同肥料对菜地土壤有机质和全氮含量的影响[J].北方园艺,2012(8):152-154.
- [22] 王政权.地统计学及在生态学中的应用[M].北京:科学出版社,1999:66-127.
- [23] 张建杰,张强,杨治平,等.山西临汾盆地土壤有机质和全氮的空间变异特征及其影响因素[J].土壤通报,2010,41(4):839-844.
- [24] 任春颖.松嫩平原西部农牧交错区景观动态的土壤环境效应研究——以吉林省通榆县为例[D].北京:中国科学院,2008.
- [25] 宋开山,刘殿伟,王宗明,等.1954年以来三江平原土地利用变化及驱动力[J].地理学报,2008,63(1):93-104.
- [26] 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.
- [27] 解文艳,周怀平,关春林,等.山西省主要农田土壤有机质和全氮的空间变异分析[J].山西农业科学,2012,40(5):493-497.
- [28] 任春颖,张柏,王宗明,等.吉林省西部半干旱地区土地利用方式对土壤养分的影响——以吉林省通榆县为例[J].干旱地区农业研究,2010,28(4):206-212.
- [29] 任春颖,张柏,王宗明,等.松嫩平原西部土壤有机碳空间变异研究——以吉林省通榆县为例[J].干旱区研究,2008,25(5):631-636.
- [30] 汤洁,毛子龙,韩维崢,等.土地利用/覆被变化对土地生态系统有机碳库的影响——以吉林省通榆县为例[J].生态环境,2008,17(5):2008-2013.