

## 喀斯特地区烟田土壤养分的空间变异特征

腊贵晓<sup>1,2</sup>, 顾怀胜<sup>3</sup>, 刘国顺<sup>1</sup>, 李祖良<sup>1</sup>, 翟欣<sup>3</sup>

(1. 河南农业大学 烟草学院 国家烟草栽培生理生化研究基地, 郑州 450002;

2. 河南省农业科学院 经济作物研究所, 郑州 450002; 3. 贵州省烟草公司毕节地区公司, 贵州 毕节 551700)

**摘要:**以我国典型的喀斯特地区—贵州省毕节地区为研究区域,利用地统计学和地理信息系统(GIS)相结合的方法对烟田土壤养分的空间变异特征进行研究,旨在为喀斯特地区烟草种植的平衡施肥及生态环境保护提供依据。描述性统计结果表明,研究区烟田土壤各养分指标均属中等程度变异。半方差函数分析表明,研究区烟田土壤全氮、全钾、速效磷变异函数的最适模型是球状模型,全磷和速效钾的最适模型是线性模型,碱解氮、pH和有机质的最适模型为指数模型;速效磷表现为强烈的空间自相关性,主要受结构性因素影响,而全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效钾、pH和有机质表现为中等空间相关性,受结构性因素和随机性因素共同影响。普通克里格插值的土壤养分空间分布图表明,研究区域内烟田土壤全氮、全钾、速效磷和速效钾含量分布呈现空间连续分布的特点,而全磷、碱解氮和pH、有机质含量没有明显的分布规律,这主要与喀斯特地区复杂的立地因子和人为影响有关。

**关键词:**喀斯特; 毕节地区; 烟田; 土壤养分; 空间变异; 地统计学; 地理信息系统

中图分类号:S153.6; S158.9

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)03-0048-06

## Spatial Heterogeneity of Soil Nutrients in Karst Tobacco-growing Areas

LA Gui-xiao<sup>1,2</sup>, GU Huai-sheng<sup>3</sup>, LIU Guo-shun<sup>1</sup>, LI Zu-liang<sup>1</sup>, ZHAI Xin<sup>3</sup>

(1. National Tobacco Cultivation, Physiology and Bio-chemistry Research Center,

College of Tobacco Science, He'nan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2. Economic Crop Research Institute, He'nan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 3. Bijie Branch of Guizhou Tobacco Company, Bijie, Guizhou 551700, China)

**Abstract:** In order to provide basis for tobacco balanced fertilization and ecological environment protection in karst areas, the spatial heterogeneity of soil nutrients in karst tobacco-growing areas of Bijie, Guizhou province, was studied by the methods of geostatistics and GIS. Statistic analysis showed each soil nutrient had moderate variation. Spherical model fitted best for total N, total K and available P, linear model fitted best for soil total P and available K, and exponential model fitted best for other variables. By analysis of ratios of nugget to sill, soil available P showed strong spatial autocorrelation fundamentally controlled by structural factors, while other variables showed moderate spatial autocorrelation affected by both structural and random factors. According to the spatial distribution maps of soil nutrients, the distribution of total N, total K, available P and available K was continuous, other than total P, alkaline N, pH and organic matter, which should be due to the complicated site factors in karst areas and human impact.

**Key words:** karst; Bijie region; tobacco-growing areas; soil nutrient; spatial variability; geostatistics; GIS

土壤是一个不均一和变化的连续体<sup>[1]</sup>,受气候、母质、植被覆盖、地形等自然因素、人为作用和过程控制,具有高度的复杂性和空间变异性<sup>[2-3]</sup>。土壤肥力是土壤最重要的生态功能之一,对土壤肥力尤其是土壤养分空间变异的充分了解,是土壤精准施肥和养分

分区管理的基础<sup>[4-5]</sup>。喀斯特地貌是地球上最脆弱的生态系统之一,广泛分布于我国西南部,该地区人地矛盾突出、生存环境恶劣,尤其是不合理的农业活动造成该地区水土流失严重,石漠化程度加剧<sup>[6-7]</sup>。对于喀斯特脆弱生态地区,土壤养分含量的高低和时空

收稿日期:2011-10-20

修回日期:2011-11-09

资助项目:国家烟草专卖局重大科技项目“品牌导向的原料体系研究”(30800076)

作者简介:腊贵晓(1981—),男,河南淅川县人,博士,主要从事经济作物栽培及生理生化研究。E-mail:zju-l@163.com

通信作者:刘国顺(1954—),男,河南叶县人,教授,博士生导师,主要从事烟草栽培及生理生化研究。E-mail:liugsh1851@163.com

变分布状态直接关系到该地区的农业生产和生态环境重建的途径和方向。同时,因经济社会发展条件限制,喀斯特地区也是我国重要的烤烟种植区,烤烟种植是当地农民重要的经济收入来源<sup>[8]</sup>。因此,揭示喀斯特地区烟田土壤养分空间变异特征,成为影响喀斯特地区农业发展、农业面源污染控制、生态环境保护及恢复的关键<sup>[9]</sup>。

地统计学是定量分析土壤性质的空间分布、空间变异尺度等空间变异特性的有效方法;而地理信息系统(GIS)可以有效的解决土壤性质的空间数据与属性数据关联的问题,因此,两者结合弥补了以概率论为基础的经典统计分析方法在结构和过程分析方面的不足,能够有效地解释养分的空间分布格局对生态过程和功能的影响<sup>[10]</sup>。利用地统计学与GIS相结合的方法是当前揭示土壤属性变量在空间的分布、变异的最有效的方法之一。近几年,国内外学者采用这种方法对喀斯特地区的石漠化分布、土地利用方式、土壤矿物质、土壤水分等空间变异特征进行了大量的研究<sup>[11-14]</sup>,但是利用这种方法对喀斯特地区烟田土壤养分空间变异的研究还未见报道。为此,本文以我国典型的喀斯特地区—贵州省毕节地区为例,利用地统计学和GIS相结合的方法分析了烟田土壤养分的空间分布特征,揭示该地区土壤养分的空间变异规律,旨在帮助人们了解烟田土壤养分的含量状况及人为活动对其空间变异的影响,为喀斯特地区烟田的科学施肥及生态环境保护提供科学依据,还可为其它类似地区提供一定的借鉴作用。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

毕节地区位于贵州省西北部,地处东经 103°36′—106°43′、北纬 26°21′—27°46′,属低纬高海拔山区,是我国典型的喀斯特地区。境内土壤类型主要为黄壤、黄棕壤、石灰土和紫色土,分别占耕地面积的 36.42%, 26.78%, 13.88% 和 12.39%。其它有棕壤、沼泽土、潮土、粗骨土等。境内海拔落差较大(457~2 500 m),地势西高东低;大部分地区属亚热带湿润气候,立体气候明显。夏无酷暑,冬无严寒,各地多年平均日照时数 1 101.8~1 780.2 h,年平均气温 10.5~15.0℃,有效积温 2 544.6~4 617.1℃;雨量充沛,年平均降水量 848.6~1 394.4 mm,月变率大,70%左右的降水量集中在 5—9 月;无霜期 205~297 d。烤烟种植面积每年保持在 30 000 hm<sup>2</sup>,生产、加工烟叶 9 000~10 000 万 kg。所产烟叶颜色以正黄、金黄为主,光泽较强,叶片结构多稍疏,油分较多。烟

叶香型较齐全,以中间香型为代表,有一定比例的中偏清、中偏浓、清香型和浓香型,香气质好、量足,余味舒适干净,劲头适中,燃烧性良好。

### 1.2 土壤样品采集

采样在毕节地区的织金、黔西、纳雍、金沙、赫章、大方、毕节市和威宁县等 8 个烤烟种植县(市)进行。为尽量避免施肥对土样的影响,统一在烤烟收获后进行取样。原则上,每 5 km<sup>2</sup> 采集 1 个混合土样,根据采样地块的地势、形状与大小确定采样路线,一般采用对角线与棋盘法,样品采集深度为 0—20 cm,每个采样地块取 8~10 个样点土壤混合为一个土样,根据差分 GPS 定位后,采用人工土钻钻取,共采集 298 个土壤样品。土壤样品经风干、磨碎、过筛后待测定。

### 1.3 测定项目及方法<sup>[15]</sup>

土壤 pH 值采用 pH 计法测定(水土质量比为 2.5:1);有机质含量采用重铬酸钾—外加热法测定;全氮含量采用凯氏定氮法测定;全磷采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法测定;全钾含量采用 NaOH 熔融—火焰光度法测定;碱解氮含量采用碱解—扩散法测定;速效磷含量采用 NaHCO<sub>3</sub> 浸提—钼锑抗比色法测定;速效钾含量采用 NH<sub>4</sub>AC 浸提—火焰光度法测定。

### 1.4 研究方法

半方差函数,也称半变异函数,能够同时描述区域化变量的随机性和结构性,是地统计学解释土壤空间变异结构的基础,它的精确估计是空间内插成功与否的关键,其公式为<sup>[10,16-17]</sup>:

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

式中:  $\gamma(h)$ ——半方差函数值;  $h$ ——样本间距;  $N(h)$ ——以  $h$  为间距的点对总数;  $Z(x_i)$ ——变量  $Z$  在  $x_i$  处的实测值;  $Z(x_i+h)$ ——与  $x_i$  间距为  $h$  处样点的值。本研究中半方差函数的拟合主要采用球状模型、指数模型和线性模型,其公式如下:

#### (1) 球状模型 (Spherical model)

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C_0 + C \left[ \frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right] & 0 < h \leq a \\ \gamma(h) &= C_0 + C & h > a \\ \gamma(h) &= 0 & h = 0 \end{aligned}$$

#### (2) 指数模型 (Exponential model)

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C_0 + C [1 - \exp(-h/a)] & h > 0 \\ \gamma(h) &= 0 & h = 0 \end{aligned}$$

#### (3) 线性模型 (Liner model)

$$\gamma(h) = C_0 \quad h = 0$$

$$\gamma(h) = Ah$$

$$h > 0$$

上述模型公式中,参数  $C_0$  为块金值(nugget),是由实验误差、施肥习惯、施肥种类、管理水平等随机因素引起的变异; $C$  为结构方差,是由土壤母质、地形地貌、气候等非人为的区域因素(空间自相关部分)引起的变异; $C_0 + C$  为基台值(still),是半方差函数达到的极限值,表示系统内总的变异;块金值/基台值表示随机部分引起的空间变异占系统总变异的比,该比值  $< 25\%$ ,表明结构性因素引起的空间变异起主要作用;该比值在  $25\% \sim 75\%$  范围内,表明结构性因素和随机性因素共同起主要作用;该比值  $> 75\%$ ,则说明随机部分在引起空间异质性中起主要作用。 $a$  为变程(range),表示采样数据在空间上存在相关性的尺度;间距小于变程的样点之间是存在空间相关性,而间距大于变程的样点间则是相互独立的。

### 1.5 数据处理

采用 Excel 2003 进行数据的异常值检验,采用样本平均值加减 3 倍标准差来识别异常值,分别以样品正常值的最大值、最小值对数据的异常值进行替换处理。采用统计软件 SPSS 16.0 中  $K-S$  方法对土壤养分因子含量进行描述性统计分析及正态分布检验,得出平均值、标准差、变异系数、偏度、峰度等统计信息。利用 GS+5.1 进行半方差函数最佳模型拟

合。利用 ArcGIS 9.1 软件的普通克里格法(Kriging)对土壤养分各指标进行最优、无偏 Kriging 插值,得到土壤养分各指标的空间变异图。

## 2 结果与分析

### 2.1 毕节地区烟田土壤养分各指标描述性统计

由表 1 可以看出,研究区内烟田土壤养分各指标变异系数分布在  $11.55\% \sim 62.81\%$ ,其中土壤 pH 值的变异程度很小,变异系数仅为  $11.55\%$ ,全氮、全磷、全钾、速效钾和有机质的变异系数较接近,均为  $24\% \sim 45\%$ ,而碱解氮、速效磷的变异程度较大,变异系数分别为  $62.55\%$  和  $62.81\%$ 。根据变异系数( $C_v$ )大小分级<sup>[18]</sup>,即  $C_v < 10\%$  时为弱变异性, $10\% < C_v < 100\%$  时为中等变异性, $C_v > 100\%$  时为强变异性,研究区烟田土壤养分各指标均属于中等变异性程度。峰度和偏度是描述数据正态分布程度的参数,两者越接近 0,表示数据越服从正态分布。由表 1 可知,除 pH 偏度和峰度值为负数外,其它养分指标的偏度和峰度都大于 0,其中碱解氮的偏度和峰度值都大于 1,速效磷的偏度值大于 1,峰度接近 1。根据 SPSS 16.0 的  $K-S$  检验可知,烟田土壤全氮、速效钾和 pH 数据分布符合正态分布,其它养分指标数据分布符合对数分布。

表 1 毕节地区烟田土壤养分的描述统计分析

指标	最大值	最小值	平均值	标准差	指标	变异系数/%	偏度	峰度	分布类型
全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	3.81	0.99	2.21	0.53	全氮	24.02	0.288	0.011	正态分布
全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )	1.86	0.29	0.85	0.32	全磷	37.58	0.928	0.956	对数分布
全钾/(g·kg <sup>-1</sup> )	39.89	3.85	16.31	7.23	全钾	44.34	0.654	0.383	对数分布
碱解氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	102.16	7.18	31.73	19.85	碱解氮	62.55	1.367	1.658	对数分布
速效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	64.30	1.54	21.46	13.48	速效磷	62.81	1.166	0.911	对数分布
速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )	445.07	13.96	200.64	79.63	速效钾	39.69	0.521	0.096	正态分布
pH	8.25	4.46	6.56	0.76	pH	11.55	-0.042	-0.455	正态分布
有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	53.65	10.63	27.56	8.13	有机质	29.49	0.708	0.320	对数分布

### 2.2 毕节地区烟田土壤养分的空间结构特性

半方差图可以直观的反映所关注变量空间自相关的尺度范围。如果变量在采样尺度内具有空间自相关性,半方差函数值会随着滞后距的增加而增加,但当滞后距超过变程后,半方差函数值会逐渐趋近于基台值或者在基台值附近波动<sup>[19]</sup>。图 1 为研究区烟田土壤养分的半方差图。由图 1 和表 2 可知,烟田土壤全氮、全钾、速效磷的最适模型是球状模型,全磷和速效钾的最适模型是线性模型,碱解氮、pH 和有机质的最适模型为指数模型;其中全氮、全磷、全钾、速效钾和 pH 的拟合效果最理想,拟合系数分别为 0.954, 0.815, 0.842, 0.934 和 0.833,有机质的拟合效果次之,为 0.635,碱解氮和速效磷的拟合效果最差。研

究区内烟田各土壤养分指标的块金值( $C_0$ )均为正值,说明存在着一定的采样、试验误差;其中速效钾的块金值最大,其它养分指标的块金值都在一个数量级上。块金值/基台值,即  $C_0/(C_0 + C)$  表示随机部分引起的空间变异占系统总变异的比。由表 2 可知,烟田土壤速效磷的  $C_0/(C_0 + C)$  为  $23.733\%$ ,小于  $25\%$ ,表现为强烈的空间自相关性,表明随机因素对速效磷的空间分布的贡献率较小,其空间分布主要受结构性因素的影响,受人为活动等随机因素的影响比较小;而全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效钾、pH 和有机质的  $C_0/(C_0 + C)$  为  $25\% \sim 75\%$ ,表现为中等空间相关性,说明研究区烟田上述土壤养分指标的空间分布受随机性因素和结构性因素共同影响。结构性因素

主要包括土壤类型、气候、地形地貌、水文条件等可以导致土壤养分强的空间相关性的自然因素；随机性因素主要包括施肥、耕作措施、工业污染等使土壤养分向均一化方向发展的因素。变程反映空间相关性的最大距离，在变程范围内，变量之间具有空间相关性，

当距离超过变程时，认为变量是相互独立的。由表 2 可知，研究区烟田土壤全氮、全磷、全钾和速效钾的变程为 98~156 km，具有较好的空间相关连续性，而碱解氮、速效磷、pH 和有机质的变程为 11~60 km，在中等范围内具有空间相关性。

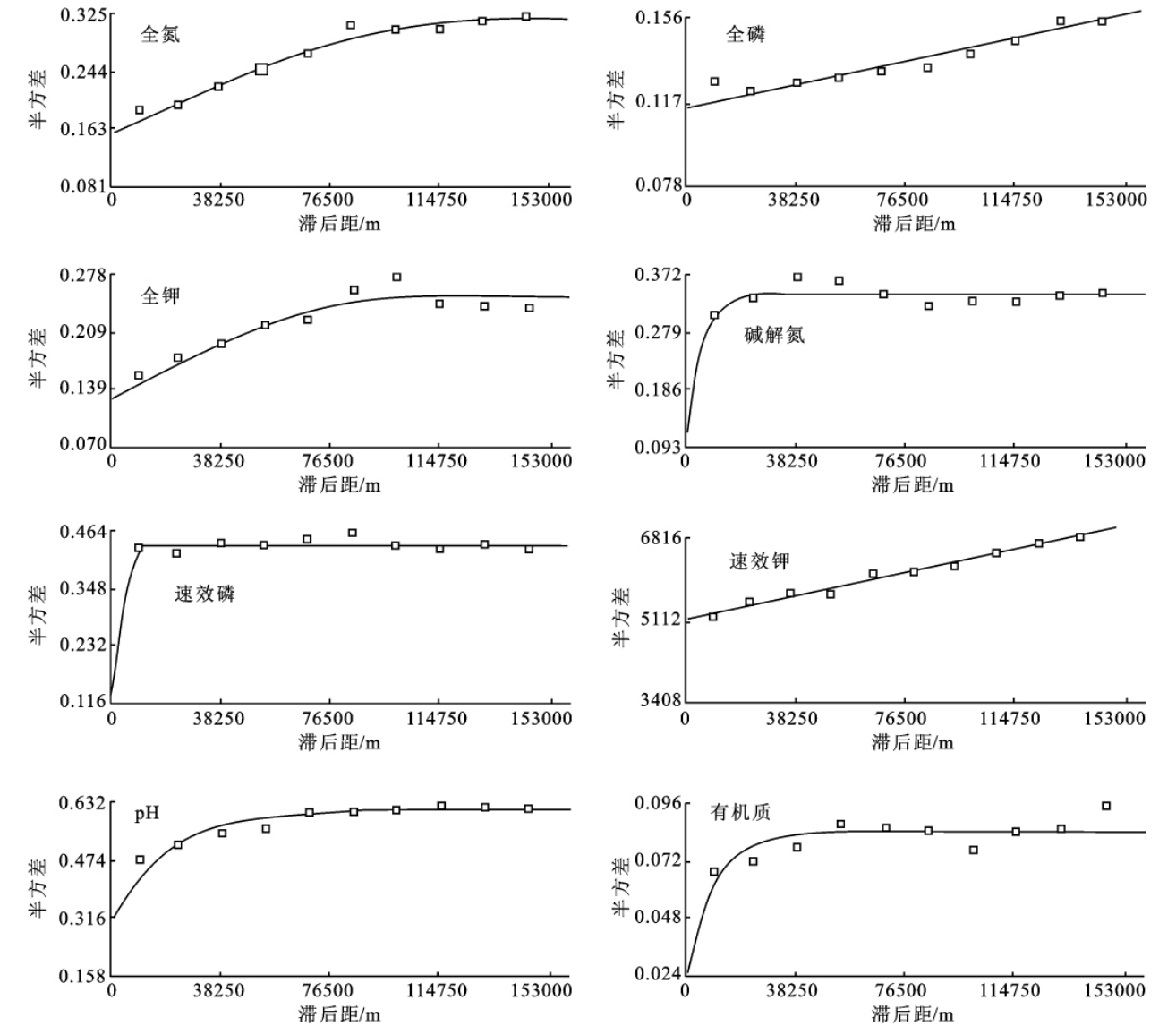


图 1 毕节地区烟田土壤养分的半方差

表 2 毕节地区烟田土壤养分半方差函数的理论模型及参数

指标	理论模型	块金值 $C_0$	基台值 $C_0 + C$	块金值/基台值 $C_0 / (C_0 + C)$	残差	$R^2$	变程/km
全氮	球状模型	0.156	0.316	49.367	1.170E-03	0.954	131.900
全磷	线性模型	0.114	0.155	73.548	2.720E-04	0.815	145.118
全钾	球状模型	0.125	0.251	49.801	2.183E-03	0.842	98.600
碱解氮	指数模型	0.091	0.339	26.844	2.834E-03	0.281	15.600
速效磷	球状模型	0.103	0.434	23.733	2.351E-03	0.006	11.100
速效钾	线性模型	5110.000	6914.628	73.901	193081	0.934	145.118
pH	指数模型	0.308	0.617	49.919	5.519E-03	0.833	59.400
有机质	指数模型	0.022	0.084	26.190	3.921E-04	0.445	29.100

### 2.3 毕节地区烟田土壤养分的空间分布特征

为更深刻、全面和直观地反映土壤养分在空间上的分布特征,在 GS+ 建立半方差函数的基础上,应用

ArcGIS 9.1 软件对土壤养分进行 Kriging 插值,绘制出毕节地区烟田土壤养分含量的空间分布图,详见图 2。

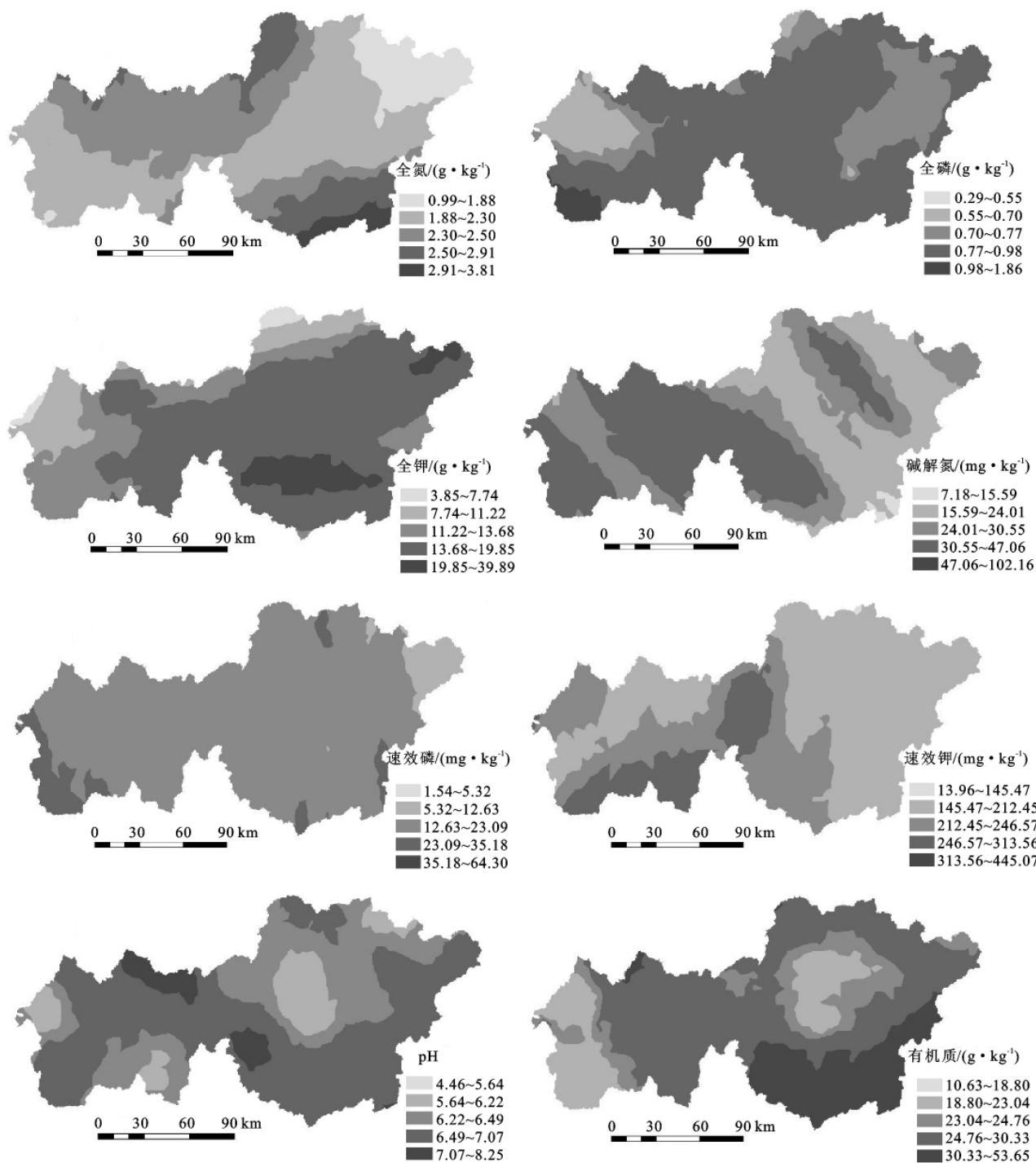


图 2 毕节地区烟田土壤养分的空间分布

由插值图可知,研究区域内烟田土壤全氮、全钾、速效磷和速效钾含量呈现出连续分布的特点,全氮总体上呈现从中部向两边增加的趋势,高值区分布在区域的东北角和东南角,最低值分布在东部;全钾总体呈现从北部向南部增加的趋势;速效磷总体呈现从东部向西部增加的趋势,高值出现在西部;速效钾总体

呈现出从中部向东部减少和从南向北减少的趋势;而土壤全磷、碱解氮、pH 和有机质存在着明显的方向不均匀性,有多个高值中心。喀斯特地区土壤造壤能力差,土层浅薄且不连续,岩石裸露率高,使区域内很小的范围内就有可能形成大量不同的微环境<sup>[9,10-12]</sup>。全氮、碱解氮和 pH 高值地区都是经济发展比较好的地

区,在这些地区采矿业较发达,全氮、碱解氮和 pH 高可能与当地对土地的利用有关;全磷、速效磷、速效钾的高值出现在立地因子(裸岩率、坡度和土层厚度)较高的位置,这和刘璐等<sup>[13]</sup>的研究结果一致;全钾、有机质的高值出现在低海拔的地方,这可能与低海拔地区淋溶比高海拔严重有关。喀斯特地区土壤养分变异影响因子比较复杂,除受土地利用方式、立地因子影响外,当地社会经济发展情况对土壤养分因子的影响也比较大,具体的影响机制需要进一步研究。

### 3 结论

研究表明,地统计学和 GIS 相结合的方法较好的反映了我国典型喀斯特地区——毕节地区烟田土壤养分的空间变异规律。半方差函数分析表明,毕节地区烟田土壤全氮、全钾、速效磷的最适模型是球状模型,全磷和速效钾的最适模型是线性模型,碱解氮、pH 和有机质的最适模型为指数模型;土壤速效磷表现为强烈的空间自相关性,主要受结构性因素(土壤类型、气候、地形地貌、水文条件等)的影响,受人为活动等随机因素的影响比较小;而土壤全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效钾、pH 和有机质,表现为中等空间相关性,受结构性因素(土壤类型、气候、地形地貌、水文条件等)和随机性因素(施肥、耕作措施、工业污染等人为因素)共同影响。土壤养分空间分布图表明,毕节地区烟田土壤全氮、全钾、速效磷和速效钾含量分布呈现空间连续分布的特点,而全磷、碱解氮、pH 和有机质分布没有明显的空间分布规律。喀斯特地区生态系统脆弱,强烈的人为因素会导致土壤空间结构的显著变化,进而加剧该地区的水土流失、石漠化等生态系统的退化,因此,在喀斯特地区从事农业生产时,应大力推广保护性耕作和精准施肥等措施,建立农业生态补偿机制,促进生态系统的保护和恢复。

#### 参考文献:

- [1] Huggett R J. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review[J]. *Catena*, 1998, 32 (3): 155-172.
- [2] Western A W, Blöschl G, Grayson R B. Geostatistical characterization of soil moisture patterns in the Tarawarra catchment[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 205 (1/2): 20-37.
- [3] Li Y S, Wang G X, Ding Y J, et al. Spatial heterogeneity of soil moisture in alpine meadow area of the Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19 (1): 61-67.
- [4] Buchter B, Aina P O, Azari A S, et al. Soil spatial variability along transects[J]. *Soil Technology*, 1991, 4(3): 297-314.
- [5] Sliver W L, Scatena F N, Johnson A H, et al. Nutrient availability in a montane wet tropical forest: spatial patterns and methodological considerations[J]. *Plant and Soil*, 1994, 164(1): 129-145.
- [6] 王金乐, 林昌虎, 何腾兵. 贵州喀斯特山区石漠化生态环境背景与生态重建[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(5): 148-150, 153.
- [7] Lang Y C, Liu C Q, Zhao Z Q, et al. Geochemistry of surface and ground water in Guiyang, China: Water/rock interaction and pollution in a karst hydrological system[J]. *Applied Geochemistry*, 2006, 21 (6): 887-903.
- [8] 李洪勋, 唐远驹. 毕节地区烤烟化学成分分析[J]. *河南农业科学*, 2007(1): 52-54.
- [9] 张伟, 陈洪, 王克林. 等. 典型喀斯特峰丛洼地坡面土壤养分空间变异性研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(1): 68-73.
- [10] 史舟, 李艳. 地统计学在土壤学中的应用[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [11] 杜虎, 宋同清, 彭晚霞. 等. 木论喀斯特自然保护区表层土壤矿物质的空间异质性[J]. *农业工程学报*, 2011, 27 (6): 79-84.
- [12] 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 等. 喀斯特峰丛洼地旱季土壤水分的空间变化及主要影响因子[J]. *生态学报*, 2010, 30(24): 6787-6797.
- [13] 刘璐, 曾馥平, 宋同清, 等. 喀斯特木论自然保护区土壤养分的空间变异特征[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1667-1673.
- [14] 许联芳, 王克林, 朱捍华. 等. 桂西北喀斯特移民区土地利用方式对土壤养分的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 1013-1018.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [16] 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.
- [17] 李艳, 史舟, 徐建明, 等. 地统计学在土壤科学中的应用及展望[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(1): 178-182.
- [18] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [19] 于婧. 基于 GIS 和地统计学方法的土壤养分空间变异及应用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007.