

不同尺度下中低山区植烟土壤氯素空间变异性研究

王 勇^{1,2}, 李廷轩^{1*}, 邢小军², 张锡洲¹, 王永东¹

(1.四川农业大学资源与环境学院, 四川 雅安 625014; 2.四川省烟草公司凉山州公司, 四川 西昌 615000)

摘 要: 研究植烟土壤氯素的空间变异特征, 可以为山区烟田土壤养分的精确管理提供理论依据。以四川会理县烤烟生产示范基地为研究对象, 采用地统计学方法结合 GIS 技术, 对两个尺度下土壤氯素含量的空间变异性进行了研究。结果表明: (1) 小尺度下, 土壤氯素含量具有中等空间相关性, 空间相关距离为 828.5 m, 随机性和结构性因子对土壤氯素空间变异性影响各占一半; 土壤氯素在 NE45°方向上变异性较强; 普通 Kriging 插值表明土壤氯素含量从东北至西南呈片状分布, 与研究区域坡度、海拔呈显著负相关。(2) 微尺度下, 土壤氯素空间相关性弱, 表现出纯块金效应, 随机性因子是影响其空间变异的主要因素。

关键词: 空间变异; 地统计学; 土壤氯素; 植烟土壤

中图分类号: S572; S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1007-5119 (2008) 04-0018-06

Spatial Variability of Chlorine in Hilly Tobacco Plantation Soils with Different Sampling Scales

WANG Yong^{1,2}, LI Tingxuan¹, XING Xiaojun², ZHANG Xizhou¹, WANG Yongdong¹

(1. Collage of Enviromental and Resource Science, Sichuan Agricultural University, Yaan, Sichuan 625014, China; 2. Liangshan Branch, Sichuan Tobacco Corporation, Xichang, Sichuan 615000, China)

Abstract: Spatial variability of chlorine in tobacco planting soils was investigated to provide theoretical basis for precision management of soil nutrients in hilly areas in Huili, Sichuan Province using geostatistical methods and GIS technique with two sampling scales. In the tobacco plantation at the small scale, the results analyzed by semivariograms indicated that chlorine content was moderately spatially dependent, the range of spatially dependent was 828.5 m, and both structural factors and the random factors equally affected the spatial variability of chlorine content. The results analyzed by anisotropic semivariogram indicated that chlorine content had a stronger anisotropic structure in the aspect of NE45°. According to the Ordinary Kriging Method, the equivalence of chlorine content was distributed from northeast to southwest, and the chlorine content was negatively related to slope and elevation of the tobacco plantation. At the micro scale, the results analyzed by semivariograms indicated that the chlorine content showed the pure nugget effect, the spatial variability of chlorine content was fundamentally influenced by the random factors.

Keywords: spatial variability; geostatistics; soil chlorine; tobacco planting soil

氯是影响烤烟品质和产量的重要营养元素之一, 烟叶含氯量过高或过低对烟叶质量都有不良影响^[1]。长期以来普遍认为烟草是忌氯作物, 只注重氯素对烤烟的毒害研究, 而忽视了其作为必需元素的作用, 导致当前烟叶含氯量低的现象日益突出^[2]。烤烟氯素营

养主要来源于植烟土壤和灌溉水。我国主要烟区中绝大多数土壤氯含量偏低, 尤其是西南烟区, 受降水量大、长期未施用含氯肥料等因素的影响, 土壤和烟叶含氯量普遍偏低, 这在一定程度上制约了烟叶质量的提高^[3-5]。因此, 了解植烟土壤氯素空间分布状况,

基金项目: 四川省青年基金 (06ZQ26-020); 四川省教育厅重点项目 (2006A008, 2004003); 四川省教育厅青年基金项目 (2006B009); 四川农业大学科技创新基金 (2005)

作者简介: 王 勇 (1982-), 男, 在读硕士, 研究方向为植烟土壤质量空间变异。E-mail:wy269405@sohu.com。* 通讯作者, E-mail:litinx@263.net

收稿日期: 2008-01-07

采取科学合理的补氮措施成为解决问题的关键之一。

对土壤特性,尤其是土壤养分空间变异的充分了解,是管理好土壤养分和合理施肥的基础。随着 3S 技术的广泛应用,利用地统计学和 GIS 技术研究土壤性质空间变异性已成为目前土壤学研究的热点之一^[6-7]。长期以来,利用地统计学研究农田土壤养分空间变异受到广泛关注^[8-10],但对多尺度下山地土壤养分空间变异性研究较少。单一尺度下土壤特性空间变异研究,不利于深入分析土壤特性的空间变异结构特征,而多尺度下分析,则可以较好地解决此问题^[11]。冯娜娜等曾对单一坡面不同尺度下低山茶园土壤肥力的空间变异性进行了研究,为低山茶园土壤的精确施肥提供了一定的理论依据^[12]。

攀西地区位于四川省西南部,是全国烤烟的重要产区之一,年产烤烟量占四川省全年产量的 80% 以上。境内地貌以山地为主,约占全区总面积的 80% 以上,且日照充足、干湿季节分明,因纬度和海拔高度的差异,气候分带明显,因而具备种植优质烤烟的自然条件。主产烟区多分布于海拔 1 000~2 000 m 的沟谷和二半山区,属典型的中低山地区;但由于地域辽阔,地形和生态类型的差异较大,不同区域植烟土壤的肥力状况有较大差别,许多烟区的养分管理仍然比较粗放。为此,笔者以四川省凉山州会理县金攀西“清甜香型”优质山地烟叶生产示范基地为研究对象,利用地统计学方法和 GIS 技术,对不同尺度下植烟土壤氮素含量的空间变异性进行了研究,以期对植烟土壤养分管理和精确施肥提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

会理县金攀西“清甜香型”优质山地烟叶生产示范基地位于凉山州会理县海潮乡,属中亚热带西部半湿润气候区,有丰富的光热资源和适宜的气候条件,年均温 15.1 °C,相对湿度 69%,年降水量 1 150 mm,昼夜温差大,干湿季节明显;土壤类型为石灰性紫色土 (pH>7.5)。该示范基地依坡而建,烟田分布于山体四周,东、西、南、北 4 个坡面温湿度差异明显,

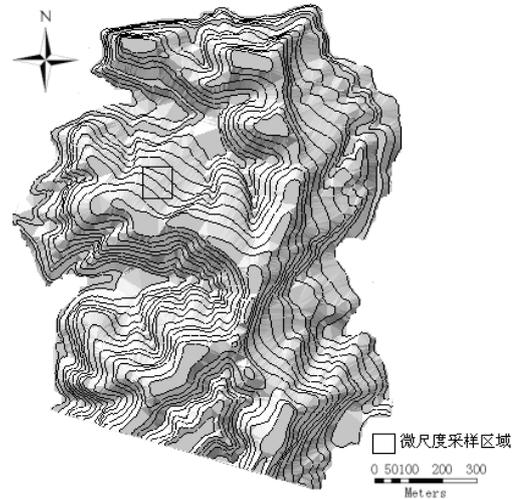


图 1 研究区域数字化高程模型
Fig. 1 Digital elevation model (DEM) of sampled region

坡度 $0^{\circ} \sim 58^{\circ}$, 海拔 1 700~1 900 m, 是典型的中低山植烟区 (图 1)。规划种植面积为 200 hm²。

1.2 土壤样品采集

1.2.1 小尺度下土壤样品的采集 根据烟垄走向,在坡面的水平和垂直方向分别作网格横线和竖线,在 80 m×80 m 网格内随机采样,并在地形相对复杂处加大采样密度 (如图 2),共采集耕层 (0~20 cm) 土壤样品 86 个。每个土样以网格节点为中心,在 10 m 半径内取 5 点混合而成,同时用 GPS 记录网格节点的位置。

1.2.2 微尺度下土壤样品的采集 在整个研究区域内,选取一具有代表性地块为微尺度下的研究对象。该地块形状规则,长 100 m,宽 100 m,海拔 1 740~1 770 m,位于示范基地北坡面的中部。以坡面的水平和垂直方向分别作网格横线和竖线,用 20 m×20 m 网格规则取样 (图 3)。每个土样以网格节点为中心,在 2 m 半径内取 3 点混合而成,并用 GPS 确定网格节点的地理位置,并用皮尺确定网格内每个取土点的相对位置。共采集土壤样品 36 个。具体取样深度与小尺度下相同。

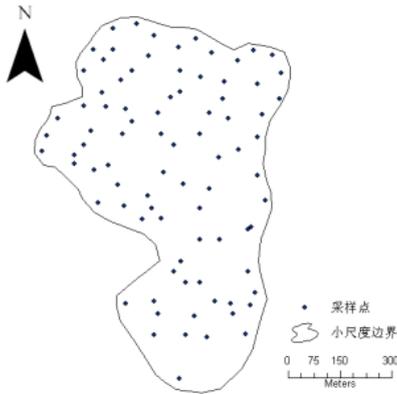


图2 小尺度下土壤样品的采集

Fig. 2 The distribution of soil sample sites at small scale

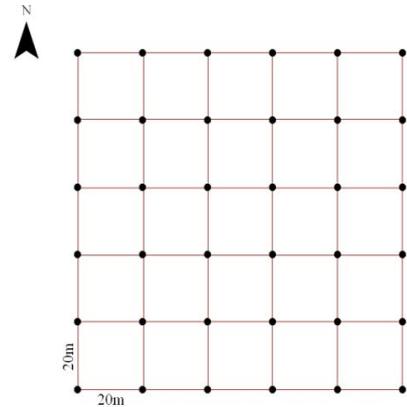


图3 微尺度下土壤样品的采集

Fig. 3 Sketch of distribution of soil sample sites at micro scale

1.3 水溶性氯离子的测定

硝酸银滴定法^[13]。

1.4 数据处理

1.4.1 地统计学方法 地统计学是以区域化理论为基础,以半方差函数为基本工具的一种数学方法。半方差函数是用来描述区域化变量结构性和随机性并存这一空间特征而提出的,其中块金系数、基台值、变程作为半方差函数的重要参数,用来表示区域化变量在一定尺度上的空间变异和相关程度。它是研究土壤特性空间变异性的关键,同时也是进行Kriging插值的基础^[11],其表达式如下:

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

式中: $\gamma(h)$ 为半方差函数, h 为步长, $N(h)$ 为观测样点对数, $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别是区域化变量

$Z(x)$ 在空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 的实测值。

1.4.2 软件平台 利用SPSS13.0对两种尺度下土壤氯含量进行经典统计学分析;各向同性和向异性半方差函数分析在GS+5.3中完成;数字化地形图和Kriging插值采用ArcGIS9.0软件。

2 结果

2.1 土壤氯素含量统计特征

由表1可知,小尺度下土壤氯素含量6.55~30.66 mg/kg,平均值为17.84 mg/kg;微尺度下土壤氯素含量9.87~33.30 mg/kg,平均值18.45 mg/kg,高于小尺度下土壤氯素含量。根据全国烟叶种植区域规划对土壤氯素含量的规定:土壤含氯量 ≤ 30 mg/kg,最适宜植烟^[14],本研究区域最适宜烤烟种植土壤占96.6%,但有88.9%的土壤氯素含量低于25 mg/kg,需增施氯肥^[5],其施用量需根据土壤含氯量和氯肥种类来确定。根据变异系数的划分等级标准,小尺度和

表1 不同尺度下土壤氯素的描述性统计特征值
Table 1 Descriptive statistics of soil chlorine at different scales

尺度	样本数	平均值	中值	最大值	最小值	标准差	变异系数/%	偏度检验	峰度检验
小尺度	86	17.84	17.27	30.66	6.55	4.85	27.19	0.28	-0.04
微尺度	36	18.45	17.91	33.30	9.87	5.94	32.20	1.19	1.09

微尺度下土壤氯素的变异系数均大于15%，属于中等变异^[15]。

数据的正态分布是使用地统计学方法进行土壤特性空间变异性分析的前提，只有数据符合正态分布时，才满足地统计学分析的假设条件。经偏度和峰度检验表明，小尺度和微尺度下土壤氯素含量的测定值均符合正态分布的要求。因此，所测土壤氯素含量数据满足地统计学分析要求。

2.2 土壤氯素含量半方差函数分析

2.2.1 各向同性下半方差函数特征

(1) 小尺度下各向同性半方差函数特征 由于经典统计分析只能在一定程度上反映样本总体，不能准确反映土壤氯素的随机性和结构性、独立性与相关性。因此，需进一步采用地统计学方法进行土壤氯素空间变异结构的分析和探讨，即根据土壤氯素的具体情况，确定其步长变化域，并拟合各向同性半方差函数模型。土壤氯素在1 000 m步长变化域可以拟合出适宜的半方差函数模型。由表2可知，土壤氯素以线性模型为最佳，决定系数和残差分析表明，所选模型均能较好地体现各自的空间变异性。由图4也可以看出，小尺度下土壤氯素各向同性实验半方差函数变化特征与理论曲线相似，显示了较好的空间结构。

由表2知，土壤氯素130 m步长间距下线性模型的块金值(C₀)为0.0387，说明小尺度下最小取样间距内土壤氯素仍存在空间变异，因而在微尺度下分析土壤氯素的空间变异性十分必要。小尺度下土壤氯

素的C₀/(C₀+C)比值为58.5%，具有中等空间相关性，空间相关距为828.5 m，其空间变异性受结构性和随机性因子的影响，但主要受随机性因子影响。一方面，研究区域地形复杂，降雨量较大且集中，水力对土壤颗粒的搬运作用不容忽视；土壤中氯素溶解性大，移动性强，极易随水流失；地形、气候等结构性因子导致土壤养分强的空间相关性。另一方面，烤烟生产提倡施用有机肥，而有机肥诸如人粪尿、厩肥和堆肥等均含有一定的氯素；其次，由于近年来整个攀西烟区

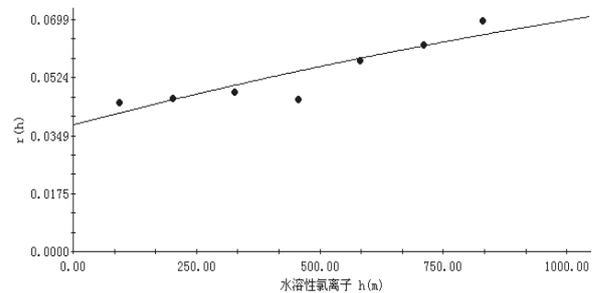


图4 小尺度下土壤氯素各向同性实验与理论半方差
Fig. 4 Global experimental and model-fitted semivariograms of soil chlorine at small scale

的植烟土壤都不同程度表现出缺氯症状，所以在烟草专用肥配方中都加入了一定比例的含氯肥料。因此，施肥、耕作措施等人为活动使得土壤养分的空间相关性减弱^[16-17]。

(2) 微尺度下各向同性半方差函数特征 如表2所示，在全步长变化域内，土壤氯素以线性模型最

表2 不同尺度下土壤氯素各向同性半方差函数理论模型及有关参数

Table 2 Theoretical semivariogram model and corresponding parameters of soil chlorine at different scales

尺度	步长变化域/m	步长间距/m	模型	块金值	基台值	变程/m	块金值/基台值	决定系数	残差
小尺度	1000	130	球形模型	0.0057	0.0552	149.00	10.3	0.148	4.785×10 ⁻⁴
			指数模型	0.0381	0.1218	6330.00	31.3	0.815	1.041×10 ⁻⁴
			线性模型	0.0387	0.0662	828.50	58.5	0.847	2.153×10 ⁻³
			线性有基台模型	0.0071	0.0552	114.00	12.9	0.148	4.786×10 ⁻⁴
			高斯模型	0.0109	0.0553	129.90	19.7	0.149	4.700×10 ⁻⁴
微尺度	100	20	球形模型	0.0027	0.0891	23.70	3.0	0.000	2.387×10 ⁻⁴
			指数模型	0.0074	0.0891	1.50	8.3	0.000	2.387×10 ⁻⁴
			线性模型	0.0855	0.0891	—	100.0	0.943	2.386×10 ⁻⁴
			线性有基台模型	0.0037	0.0891	23.70	4.2	0.000	2.387×10 ⁻⁴
			高斯模型	0.0098	0.0891	6.58	11.0	0.000	2.387×10 ⁻⁴

注：块金值/基台值为百分数(%)

优,但表现出纯块金效应,说明其在微尺度下具有弱的空间相关性,空间相关距不存在,其空间变异不受结构性因子的影响,人为活动等随机性因子为主导原因,这与小尺度下的研究结果不同。究其原因,一是微尺度下采样区域的地形、气候、土壤母质等结构性因子一致,地势较为平整,土壤颗粒在短距离内随水移动性不强,土壤氯素的淋溶性减弱,而耕作、施肥等随机性因子在小范围内起相对较大的作用,使土壤氯素的空间相关性减弱,朝均一化方向发展;二是微尺度下的采样间距可能过大,较大的取样间距掩盖了较小尺度上的空间变异,从而在该尺度上没有反映出较好的空间相关性。

2.2.2 各向异性下半方差函数特征 各向异性半方差函数是空间变异程度的重要组成部分。对于区域化变量,各向同性是相对的,而各向异性是绝对的,半方差函数不仅与步长有关,而且与空间方向有关。因

此,为了更好地了解自然过程对土壤钾素空间变异的影响,需进一步研究其不同方位的空间结构特征。通过半变异/协方差函数云 (Semivariogram/Covariance Cloud) 分析其空间效应,并结合地形特点,以正北方为 0° ,拟以 $NE0^\circ$ 、 $NE45^\circ$ 、 $NE90^\circ$ 和 $NE135^\circ$ 等4个方向计算其半方差函数和各向异性比 $[K(h)]$ 。

(1) 小尺度下各向异性半方差函数特征 由图5可知,在 $NE0^\circ$ 和 $NE90^\circ$ 方向上,土壤氯素的各向异性比 $K(h)$ 在空间自相关距离内均在1.0附近,但波动性较大,说明土壤氯素具有向各向同性发展的趋势,耕作、施肥等人为因素是其主因;在 $NE45^\circ$ 和 $NE135^\circ$ 方向上,土壤氯素的各向异性比 $K(h) > 1.0$,而且随着距离的增加,各向异性增强,表明土壤氯素在 $NE45^\circ$ 方向上的变异大于在 $NE135^\circ$ 方向。可见,土壤氯素在 $NE45^\circ$ 方向上变异明显,这一方向与研究区域的坡向大致垂直,说明土壤氯素空间结构变异

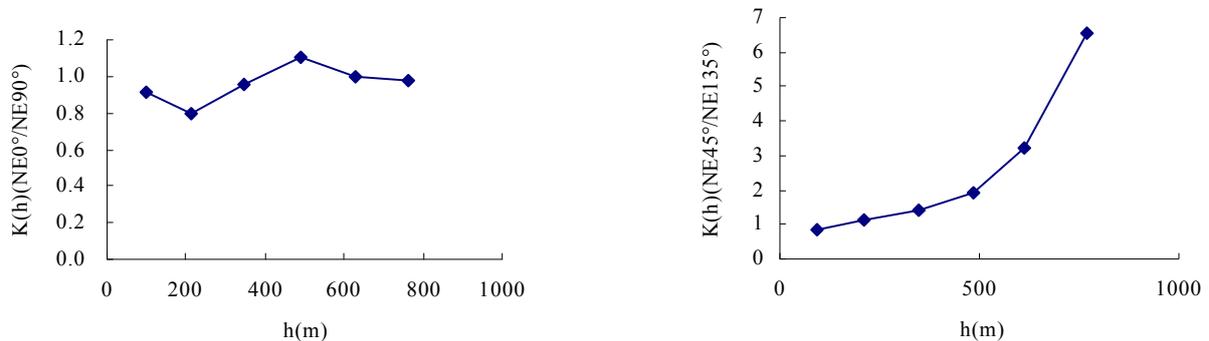


图5 小尺度下土壤氯素各向异性比
Fig. 5 Anisotropic ratio of soil chlorine at small scale

受坡度、坡向、海拔等地形因子的影响,这与各向同性下小尺度的土壤氯素半方差函数结构性分析结果相同。

(2) 微尺度下各向异性半方差函数特征 分析图6可知,微尺度下土壤氯素在 $NE0^\circ$ 、 $NE90^\circ$ 、 $NE45^\circ$ 和 $NE135^\circ$ 方向上自相关距离内的各向异性比均在1.0附近,表明土壤氯素近似各向同性,耕作、施肥等随机因子导致其空间变异性减弱。与微尺度下

土壤氯素各向同性结构分析时所表现出的纯块金效应一致。

2.3 土壤氯素含量空间变化特征分析

由图7可看出,小尺度下土壤氯素含量在 $21.67 \sim 5.49 \text{ mg/kg}$ 的植烟区面积最大,占总面积的43.04%;土壤氯素含量最大区域 $25.49 \sim 30.66 \text{ mg/kg}$ 出现在东北部,占总面积的16.30%,该区域是植烟土壤氯素含量最适宜区;最小区域在西南部。整个区域土壤氯

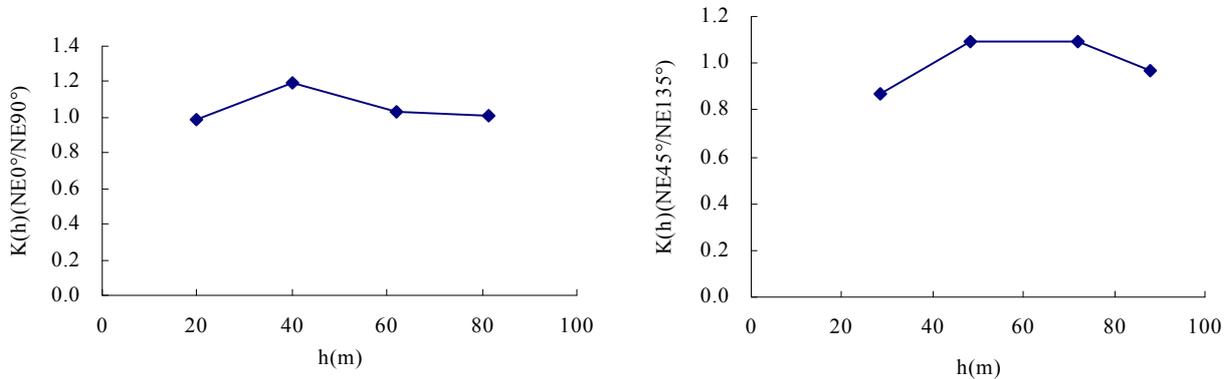


图 6 微尺度下土壤氯素各向异性比
Fig. 6 Anisotropic ratio of soil chlorine at micro scale

素含量变化由东北至西南呈片状分布，与小尺度下土壤氯素各向异性分析结果较一致。影响土壤氯素含量空间分布特征主要原因是：(1) 小尺度下土壤氯素的空间变异性主要受随机性因子影响。有机肥和含氯烟草专用肥的施用，使得土壤氯素的空间相关性减弱，朝均一化方向发展；其次，不同有机肥中氯素含量必然存在差异，从而造成有机肥带入土壤中氯素的不均一性，导致土壤氯素含量呈明显的片状分布。(2) 坡度影响土壤侵蚀和土壤养分的流失。前人研究^[18]表明，坡度和土壤养分含量呈负相关。本研究区域的降水充沛，雨水对土壤的侵蚀较严重。土壤氯素含量最

大值和最小值区域分别出现在坡度较为平缓 and 陡峭的区域，对这两个最值区域土壤氯素含量与坡度、海拔的相关性分析表明，土壤氯素与坡度呈显著负相关 ($R = -0.447^*$)，与海拔呈显著负相关 ($R = -0.355^*$)。研究区东北部坡度小于西南部，故其土壤氯素含量东北部高于西南部。由于微尺度下土壤氯素空间变异表现为纯块金效应，没有空间相关性，在该尺度下具有独立变量的特征，不适宜空间局部插值^[19]，因此未对微尺度下土壤氯素含量进行普通 Kriging 插值。

3 结 论

两个采样尺度下的土壤氯素含量均属于中等变异；研究区域 96.6% 的土壤氯素含量 $\leq 30 \text{ mg/kg}$ ，最适宜烤烟种植，但有 88.9% 的土壤氯素含量低于 25 mg/kg ，需增施含氯化肥，其施用量需根据土壤含氯量和含氯化肥种类来确定。

小尺度下土壤氯素含量具有中等的空间相关性，空间相关距为 828.5 m ，在 $NE45^\circ$ 方向上具有明显的变异；微尺度下土壤氯素含量表现为纯块金效应，不存在空间相关性；小尺度下土壤氯素的空间变异性是结构性和随机性因子的共同作用，但主要受随机性因子影响；微尺度下土壤氯素的空间变异性主要由随机性因子引起。

小尺度下土壤氯素含量在 $21.67 \sim 25.49 \text{ mg/kg}$ 的植烟土壤面积最大，其含量变化总体上呈东北至西南方向的片状分布，东北部为土壤氯素含量最大区域，

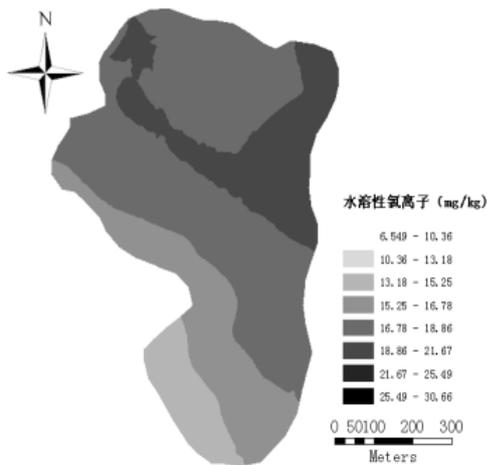


图 7 小尺度下土壤氯素含量克里格插值
Fig. 7 Kriging estimates for soil chlorine at small scale

由此向西南部呈递减趋势;相关分析显示,小尺度下土壤氯素含量与研究区域坡度、海拔呈显著负相关。

参考文献

- [1] 张翔,范艺宽,黄元炯,等. 烤烟吸收氯的主要来源及其在体内分布的研究[J]. 土壤肥料, 2006 (2): 62-64.
- [2] 徐安传,李佛琳,王超. 氯素对烤烟生长发育和品质的影响研究进展[J]. 中国烟草科学, 2007, 28 (2): 6-9.
- [3] 李永忠,罗鹏涛. 氯在烟草体内的生理代谢功能及其应用[J]. 云南农业大学学报, 1995 (10): 57-61.
- [4] 秦松. 贵州植烟土壤氯素特征与含氯钾肥施用探讨[J]. 西南农业学报, 2001 (5): 471-473.
- [5] 关博谦,石孝均,霍沁建,等. 重庆市烟区土壤一烤烟氯素含量及其变化研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19 (1): 90-92.
- [6] 冯娜娜,李廷轩,张锡洲,等. 不同尺度下低山茶园土壤有机质含量的空间变异[J]. 生态学报, 2006, 26 (2): 349-355.
- [7] 陈彦,吕新. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特性研究—以新疆农七师 125 团为例[J]. 中国农学通报, 2005, 21 (7): 389-405.
- [8] 高峻,黄元仿,李保国,等. 农田土壤颗粒组成及其剖面分层的空间变异分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9 (2): 151-157.
- [9] 赵军,刘焕军,隋跃宇. 农田黑土有机质和速效氮磷不同尺度空间异质性分析[J]. 水土保持学报, 2006, 20 (1): 41-45.
- [10] 刘阳,盛建东,蒋平安. 区域土壤养分空间变异研究—以新疆生产建设兵团农一师 16 团为例[J]. 新疆农业大学学报, 2006, 29 (2): 65-67.
- [11] 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.
- [12] 冯娜娜. 不同尺度下低山茶园土壤主要肥力因子空间变异性特征研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2006.
- [13] 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, 1999.
- [14] 烟草种植区划协作组. 全国烟草种植区划报告[M]. 北京: 轻工业出版社, 1985.
- [15] 王军,傅伯杰,邱扬,等. 黄土高原小流域土壤养分的空间异质性[J]. 生态学报, 2002, 22 (8): 1173-1177.
- [16] Chien Y J, Lee D Y, Guo H Y, *et al.* Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils[J]. Soil Science, 1997, 62: 291-298.
- [17] 孟凯,王德录. 黑土有机质分解、积累及其变化规律[J]. 土壤与环境, 2002, 11 (1): 42-46.
- [18] Famiglietti J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas[J]. Journal of Hydrology, 1998, 210: 259-281.
- [19] 王波,毛任钊,曹健,等. 海河低平原农田重金属含量的空间变异性—以河北省肥乡县为例[J]. 生态学报, 2006, 26 (12): 4082-4090

(责任编辑 王 颖)

(上接第 17 页)

- [6] LIU Weidong, Baret F, ZHANG Bing. Using Hyperspectral Data to Estimate Soil Surface Moisture under Experimental Conditions [J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(5): 434-442.
- [7] 李伟,张书慧,张倩,等. 近红外光谱法快速测定土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量[J]. 农业工程学报, 2007, 23 (1): 55-59.
- [8] 于飞健,闵顺耕,巨晓棠,等. 近红外光谱法分析土壤中的有机质和氮素[J]. 分析实验室, 2002, 21 (3): 49-51.
- [9] 赵锁劳,彭玉魁. 我国黄土区土壤水分、有机质和总氮的近红外光谱分析[J]. 分析化学, 2002, 30 (8): 978-980.
- [10] 于彬,郭彦青,杨乐苏. 化学氧化法测定土壤有机质的研究进展[J]. 广东林业科技, 2007 (1): 100-103.

(责任编辑 王 颖)