

## 浙江宁海农用地土壤有机质和土壤养分空间变异分析

郑红波<sup>1,2</sup>, 吴健平<sup>1</sup>, 张 珊<sup>1</sup>

(1. 华东师范大学 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062; 2. 浙江工业大学 计算机科学学院, 浙江杭州 310032)

**摘要:** 研究农用地土壤有机质和养分的空间变异, 为农田管理和测土施肥提供依据, 减少农民不必要的成本投入, 有利于生态环境保护。以浙江省宁海县为例, 采用地理信息系统(GIS)空间分析、地统计学和 Kriging 插值方法对耕层土壤的有机质、全氮、速效磷和速效钾等 4 种养分要素的空间变异特征及其影响因素进行了分析。结果表明: 土壤有机质、全氮和速效钾变异函数曲线的理论模型符合指数模型, 速效磷经对数转换后符合球状模型。土壤有机质、全氮、速效磷的块金值/基台值分别为 50.5%, 59.7%, 50.5%, 都具有中等的空间相关性, 速效钾的块金值/基台值为 77.3%, 空间相关性较弱。利用 Kriging 插值方法, 考虑趋势性各向异性, 获得了各土壤养分质量分数的空间分布图, 分析了空间分布规律, 并对高程和土地利用类型对土壤养分空间分布影响进行了分析。研究区土壤养分的空间分布是自然和人为利用因素共同作用的结果。图 4 表 4 参 7

**关键词:** 土壤学; 半变异函数; 土壤有机质; 土壤养分; 空间变异; 地统计学

**中图分类号:** S714      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5692(2010)03-0379-06

## Spatial variability of farmland soil organic matter and soil nutrients in Ninghai County, Zhejiang Province

ZHENG Hong-bo<sup>1,2</sup>, WU Jian-ping<sup>1</sup>, ZHANG Shan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Geographic Information Science of Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. College of Computer Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, Zhejiang, China)

**Abstract:** Employing GIS (geographic information system) techniques and geostatistical analysis on farmland soils from Ninghai County, Zhejiang Province, China, spatial variability of soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), available phosphorus (AP), and available potassium (AK) was determined with SOM, TN, AP, and AK contour maps obtained using ordinary Kriging interpolation. Results showed that an exponential model well fitted semivariograms for SOM, TN, and AK, whereas after a logarithmic conversion, a spherical model best fitted semivariograms of AP. The ratio of the nugget to the sill [ $C_0 / (C_0 + C_1)$ ] for SOM(50.5%), TN(59.7%), and AP(50.5%) showed moderate spatial autocorrelation, whereas AK (77.3%) showed a slight degree of spatial autocorrelation. From the Kriging interpolation, elevation and land use type both strongly affected distribution of SOM, TN, AK, and AP. Thus, structural factors of parent material and elevation along with random factors, such as fertilization, soil management, and land use, jointly controlled spatial variability of soil nutrients in the study area. [Ch, 4 fig. 4 tab. 7 ref.]

**Key words:** soil science; semi-variogram; soil organic matter; soil nutrient; spatial variability; geostatistics

收稿日期: 2009-06-07; 修回日期: 2009-10-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60673063); 上海市科学技术委员会重大科研项目(07DZ12037); 浙江省自然科学基金资助项目(Y1080436)

作者简介: 郑红波, 讲师, 博士研究生, 从事土地利用和地理信息系统等研究。E-mail: zhb@zjut.edu.cn。通信作者: 吴健平, 教授, 博士生导师, 从事遥感与地理信息系统等研究。E-mail: jpwu@geo.ecnu.edu.cn

空间变异性是土壤的一种自然属性。掌握土壤养分空间分布规律及其影响因素,为农田管理和测土施肥提供依据,实现土壤养分平衡,提高作物产量,是实现农田土壤可持续利用的前提,是农业可持续发展的基础。随着地统计学的引入和精确农业的快速发展,土壤养分的空间变异研究已逐渐成为一个热点<sup>[1-5]</sup>。但已有研究大都侧重于地统计学方法相关参数的获取与分析,在土壤养分空间变异特征及其影响因素分析上较弱。浙江宁海县土地利用类型多样,地形变化明显,土壤养分空间分布受地形和土地利用等因素影响,有其自身的规律。笔者在样点土壤养分测定的基础上,借助传统统计学、地统计学和地理信息系统(GIS),对土壤有机质、全氮、速效磷、速效钾等土壤养分空间变异规律及高程、土地利用类型等影响因素进行综合分析,并绘制了土壤养分空间分布图,为实现区域农田的可持续发展奠定基础。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于浙江省宁波市宁海县的东南部,其南部临接三门湾岛屿。29°15'~29°41'N,121°37'~121°78'E。地势北高南低(图1),海拔9~850 m。该区土壤类型主要有:以酸性火山岩碎屑发育的破积城北山地红壤、黄壤,以内陆第四纪红土、山前冲积和城南浅海平原沉积发育的水稻土,南部浅海沉积的钙质潮土和盐土。共有红壤、黄壤、岩性土、潮土、盐土和水稻土等6个土类,13个亚类,水稻土和红壤占的比例较大。该区属亚热带季风气候区,雨水充沛,年平均气温为17.6℃,年平均降水量为1685 mm,年平均日照时间为1530 h。为配合宁波市的发展,同时发挥该区自然条件优势,该区形成以水稻 *Oryza sativa* 等粮食作物为主,同时以蔬菜、水果等多种经济作物并重的农业种植模式(图2)。

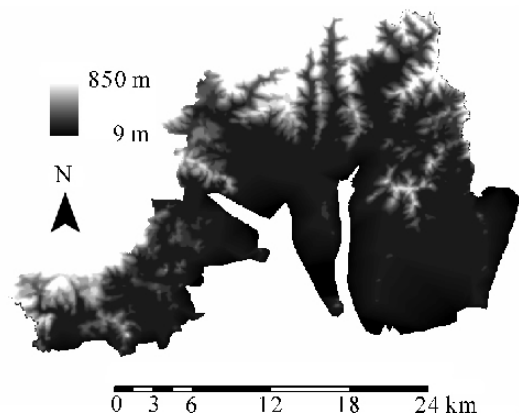


图1 研究区数字高程图

Figure 1 DEM of research area

### 1.2 资料收集、样品采集与化学分析

结合浙江省宁波市新农村建设的科研项目,收集了研究区2005年的1:1万土地利用现状图和行政区划图,1:5万数字高程模型(DEM)等资料。2005年7月在宁海县采集了115个水稻耕层0~20 cm表层土样,每个样点在直径10 m范围内取5点混合作为待测样品带回室内分析。经过对数据的检查,离群点去除,选择了103个样点进行分析,样点分布见图3。

### 1.3 Kriging 插值方法

常规的统计方法只能概括土壤特性的全貌,而不能刻画土壤特性的随机性、相关性和结构性,而地统计学方法能对土壤特性空间变异结构进行分析和探讨。在地统计分析中,使用半变异函数找出理论模型。变异函数的理论模型有很多,常用的有球面模型、指数模型和高斯模型。如何比较出各种模型的优劣,需要定量的评定指标,可以采用统计指标平均误差和标准化均方根误差进行交叉检验<sup>[6]</sup>。理想的模型是:平均误差的绝对值等于0;标准化均方根误差等于1。找出模型后使用Kriging插值估计出其他点的区域化变量。

## 2 结果与分析

### 2.1 统计描述与分布

为了了解土壤实测样本的描述统计特征,计算了样本的基本统计参数(表1)。土壤有机质、全氮和土壤速效钾等的变异系数分别为37.92%,32.55%和52.34%,位于10%~100%,具有中等变异性,说明这些数据波动变化程度中等。土壤速效磷的变异系数为94.51%,已接近强变异性,数据波

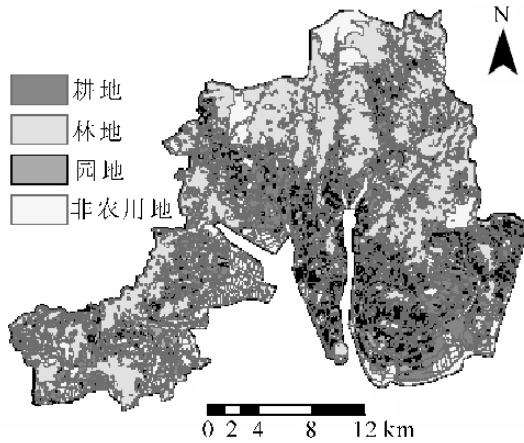


图 2 研究区土地利用图

Figure 2 Utility of paddy soil in research area

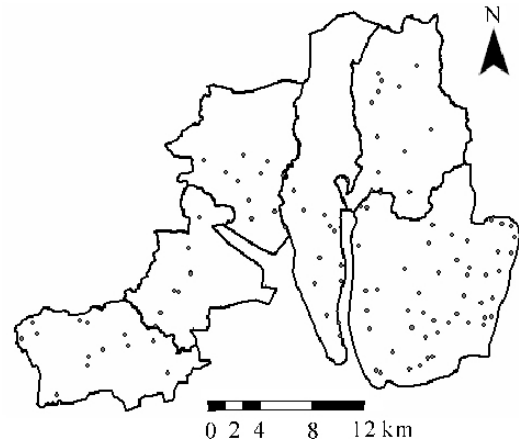


图 3 样本点分布图

Figure 3 Distributions of sampling points

动变化较大,这与人为施肥有关。使用偏度、峰度检验法对数据进行正态分布检验。当随机变量服从正态分布时,其偏度为 0,峰度为 3。土壤养分的偏度、峰度值见表 1。从表 1 可看出土壤有机质、全氮、速效钾的偏度在 0 附近,峰度处于 3 附近,说明它们处于正态分布。速效磷偏度、峰度偏离正态分布较远,但经过自然对数转换后,偏度为 $-0.0837$ ,峰度为 $2.8382$ ,说明速效磷经对数转换也服从正态分布。

表 1 土壤养分特性的统计特征值及偏度、峰度检验

Table 1 Statistical feature values of some soil properties and validation of Skewness and Kurtosis

土壤特性	最小值	中值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%	偏度	峰度
土壤有机质/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	9.34	24.10	55.40	26.00	9.81	37.92	0.396 0	2.517 3
全氮/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	0.66	1.68	3.86	1.81	0.58	32.55	0.781 6	3.602 6
速效钾/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	35.00	205.00	420.00	195.22	101.67	52.34	0.259 3	2.118 5
速效磷/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	3.00	24.50	175.00	37.67	35.42	94.51	2.008 7	7.118 3
对数变换后的速效磷	1.09	3.19	5.16	3.26	0.87	26.93	$-0.083 7$	2.838 2

## 2.2 地统计分析

2.2.1 土壤特性空间变异特征参数分析 通过研究该区各土壤特性的趋势分析图,得出速效磷、速效钾呈二阶趋势。利用地统计的 Kriging 方法,考虑趋势性和各向异性,选取各种半方差模型进行拟合,并对预测误差进行了比较,比较标准是:平均误差的绝对值最接近于 0;标准化均方根误差最接近于 1。最终选择模型如表 2,有机质、全氮、速效钾选择指数模型,对速效磷进行半方差函数模型时,先要进行对数变换,经过比较选择球状模型。

由表 2 可知,有机质、全氮和速效磷的块金值/基台值分别为 50.5%, 59.7%和 50.5%,说明它们具有中等空间相关性。虽然有机质、全氮、速效钾这些物质是作物生长最需要的,土壤内在因子如气候、地形、土壤类型等应起主要作用,但此地区是经济相对发达的地区,外在因子,如施肥、耕作、种植制度等影响作用与内在因子作用相当,因此呈现中等的空间相关性。速效钾的块金值/基台值为 77.3%,大于 75.0%,变量空间相关性较弱,说明外在因子如施肥、耕作、种植制度等影响作用占主导作用。长轴、短轴变程分别表示半方差在该轴方向上达到基台值的样本间距。由表 2 可知,研究区土壤特性空间变异具有各向异性特征,土壤样点间的距离和方向都对半方差模型产生影响。

2.2.2 土壤特性空间质量分数分布 在半方差结构分析及各种模型拟合的基础上,结合普通 Kriging 插值方法,考虑趋势性和各向异性,获得了研究区各土壤特性质量分数的空间分布图(图 4),从中可

表2 土壤养分的半方差函数模型及其相关参数

Table 2 Semi-variogram models and parameters of soil properties

土壤养分	趋势	模型	预测误差		块金值	偏基台值	基台值	块金值/基台值/%	变程/m	
			平均误差	标准化均方根误差					长轴	短轴
土壤有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	无	指数模型	-3.608E-2	0.968 6	53.16	52.05	105.21	50.5	6 947	4 244
全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	无	指数模型	6.750E-4	1	0.234	0.158	0.392	59.7	17 541	12 296
速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )	二阶	指数模型	-0.188	1.012 0	5 844	1 713	7 557	77.3	11 689	7 086
对数变换后的速效磷	二阶	球状模型	-8.637E-3	0.969 9	0.391	0.383	0.774	50.5	15 326	7 785

以直观地看出研究区各土壤特性的空间分布状况。图4-a中可以看出有机质质量分数呈明显的接近于自东至西的带状分布,且又接近于自北至南方向减少的趋势。这是由于主要受该区气候、地形和土壤特性的影响。从该区数字高程图(图1)可以看出,东北部地形高,高程高的地带温度低而湿度大,有机质易积累,有机质质量分数高。中部内陆主要为第四纪红土发育的老黄筋泥田水稻土,有机质中等。东南部沿海平原处于较好的氧化状态,有机质易于矿化,有机质较低。研究区土壤有机质质量分数和全氮质量分数的空间分布有一定的相似性,因为土壤全氮中有95%为有机态的,土壤氮与有机质有很好的相关性。图4-b中可以看出东北部全氮质量分数质量分数高,中部内陆全氮质量分数中等,东南部沿海平原全氮质量分数较低。图中小块区域全氮偏大有可能与当地农户耕作施有机肥有关。土壤中的速效钾质量分数主要与土壤的母质类型有关。从图4-c可以看出以滨海沉积物发育的南部滨海平原土壤有效钾质量分数最高,以第四纪红土发育的内陆老黄筋泥田的水稻土有效钾质量分数为中

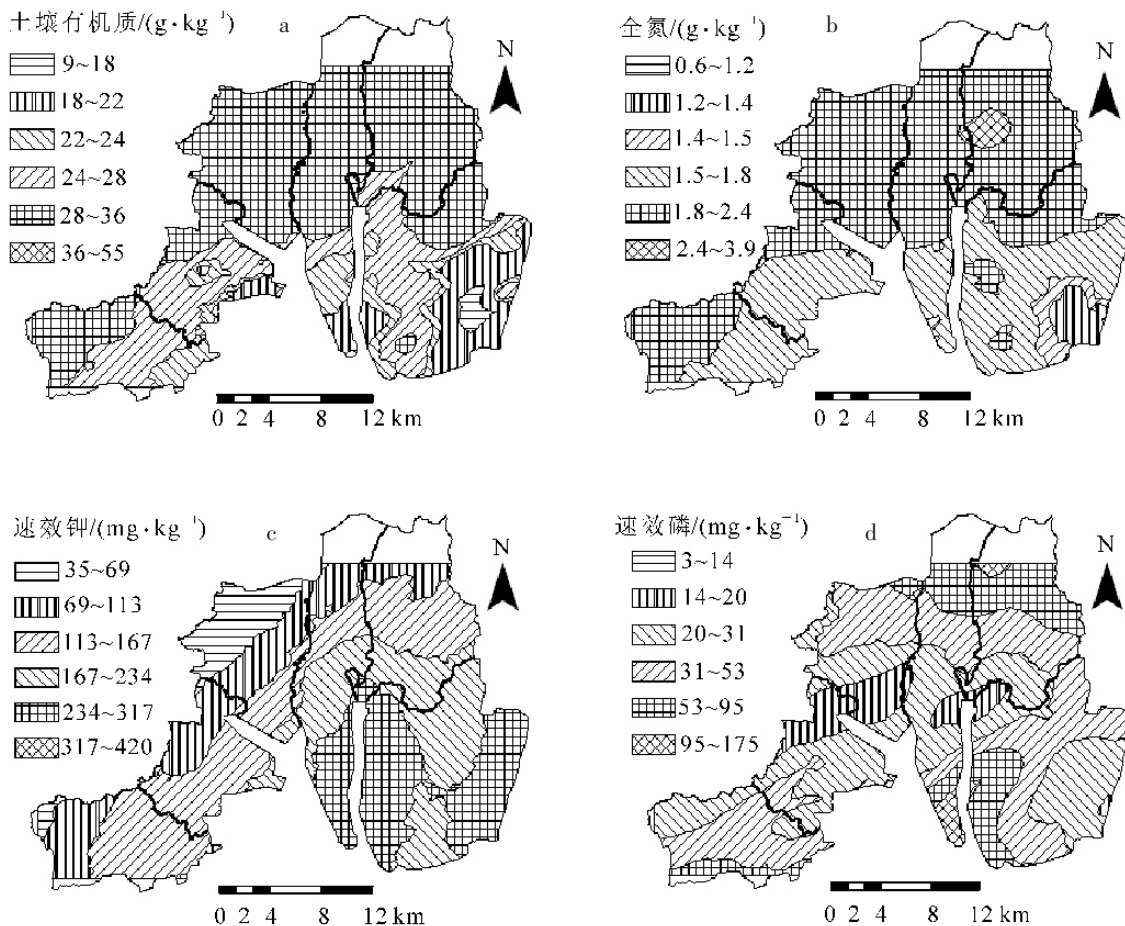


图4 土壤有机质、全氮、速效钾和速效磷质量分数空间分布图

Figure 4 Spatial distribution maps of soil organic matter, total nitrogen, available potassium and available phosphorus

等,以酸性火山岩碎屑发育的破积北部山地红黄壤土壤中的有效钾质量分数最低。此外,土壤速效钾质量分数与耕作时间也有关系。随着耕作年代的增长,土壤表土流失的进行,速效钾质量分数逐渐降低<sup>[7]</sup>。中北部地区成土时间较长,耕作时间悠久,有效钾质量分数低;南部滨海平原成土时间短,耕作时间短,有效钾质量分数高。除极少部分外,该区农用地大部分土壤速效钾质量分数高,均值达  $195.22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 1),速效钾的块金值/基台值为 77.3%(表 2),变量空间相关性较弱,这都说明当地农民大量施钾肥导致土壤有效钾质量分数高。土壤速效磷的空间分布没有明显的地理规律性(图 4-d)。因为与土壤速效磷质量分数有关的因素很多,各因素同时交错影响,均值代表性差,变异系数大(94.51%)。土壤速效磷可以在相对小的范围内(几十米),在相对短的时间内(几年)有很大变化,这主要是受人为施肥的影响。

### 2.3 高程和土地利用类型对土壤养分的影响

**2.3.1 高程影响** 为了更准确地揭示高程对土壤养分的影响,将研究区土壤样点数据与高程进行空间分析,得到采样点的准确高程数据,并按高程把采样点分为 3 组:  $<50 \text{ m}$ ,  $50 \sim 200 \text{ m}$ ,  $>200 \text{ m}$ ,对每组高程统计其样本数、均值,并使用一维方差分析中的 Games-Howell 方法对 3 组不同高程数据之间差异显著性进行比较,结果见表 3。从表 3 可以看出不同高程对有机质、全氮、速效钾有极显著影响,其影响程度为:速效钾  $>$  有机质  $>$  全氮。在 0.05 显著水平上,高程对速效磷分布没有明显影响。从 3 组高程的土壤有机质和全氮质量分数均值可以看出,高程越高,土壤有机质和全氮质量分数越大,这与前面土壤有机质和全氮的空间分布一致。其原因是由于高程越高的区域,气温低而湿度大,有机物分解缓慢,有利于土壤有机质和全氮的积累。从 3 组高程的速效钾质量分数均值来看,高程高的山地红黄壤速效钾质量分数低,高程低的滨海土壤速效钾质量分数最高,内陆地区土壤速效钾质量分数中等,3 组不同数据之间差异显著。从表面看来高程决定土壤速效钾质量分数,但实际是土壤速效钾质量分数主要与土壤的母质类型、耕作时间和人为施肥有直接关系,而与高程是间接关系。北部高程高的山地红黄壤是从酸性火山岩碎屑破积发育的,耕作时间长,土壤速效钾质量分数低;以第四纪红土发育的内陆老黄筋泥田水稻土的速效钾质量分数中等;南部高程低的土壤是以滨海沉积物发育的,成土时间短,再加上当地种植大量喜钾作物如蔬菜而施加大量钾肥,从而导致土壤速效钾质量分数最高。

表 3 不同高程组土壤养分均值、差异性的比较

Table 3 Compare of mean and different degrees at SOM and soil nutrient properties in each elevation group

高程/m	样本数	平均值			
		土壤有机质/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	全氮/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	速效钾/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	速效磷/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
$<50$	47	23.47 c	1.708 b	244.81 a	43.91
50~200	56	28.35 b	1.942 a	161.80 b	48.50
$>200$	5	35.98 a	2.180 a	79.40 c	30.78
F 值		5.739	2.730	15.251	0.294
Sig 值		0.004**	0.070*	0.000**	0.746

说明: a, b, c 字母不同表示差异水平( $P<0.05$ ), \*\* 为极显著, \* 为显著。

**2.3.2 土地利用类型影响** 在不同利用类型土地上,耕作、施肥以及管理等人为利用措施存在较大差异,这对土壤养分有重要影响。为分析该研究区土地利用类型对当地土壤养分是否有影响,将研究区土壤样点数据与土地利用类型数据进行叠加分析,得到采样点的土地利用类型。研究区主要农用地利用类型是耕地、园地、林地,针对这几种土地利用类型统计其样本数和不同土壤养分均值,并使用一维方差分析中的 Games-Howell 方法对不同土地利用类型数据之间差异显著性进行比较,结果见表 4。表 4 的土壤有机质和全氮的差异显著性值都大于 0.05 显著性水平,说明不同土地利用类型土壤有机质、全氮差异显著性不明显,而有效磷和有效钾的差异显著性值小于 0.05 显著性水平,说明不同土

地利用类型速效磷、速效钾差异显著,这主要跟耕作时间、人为施肥有关。当地是以粮食作物为主,和蔬菜水果等多种经济作物并重的农业种植模式,耕地与园地开发程度都较大,耕作时间较长,但人为施有机肥和氮肥较多,因而土壤有机质、全氮质量分数反而比林地高。表4中园地土壤有机质和全氮均值高于耕地和林地,原因是果农增加有机肥和氮肥的使用以提高水果产量所致。表1和表4显示速效磷、速效钾质量分数均值较大,表示当地大部分土壤速效磷、速效钾质量分数较高,而耕地的速效磷、速效钾质量分数比园地、林地低,其主要原因是耕地较园地、林地耕作时间长。耕作时间越长,土壤消耗的有效磷、有效钾越多。所有耕地有效磷、有效钾质量分数较园地、林地低,而且差异显著。

### 3 结论与讨论

主要结论如下:①浙江宁海农用地土壤有机质、全氮、速效钾的变异函数理论模型均符合指数模型,速效磷经对数转换后符合球状模型。其中有机质、全氮、速效磷具有中等的空间相关性,速效钾空间相关性较弱。②获得了研究区土壤特性的等值线图,并分析了其空间分布规律。有机质和全氮的质量分数在东北部最高,中部其次,东南部最低;速效钾质量分数北低南高,呈现条状分布;速效磷的空间分布没有明显的地理规律性。③高程和土地利用类型对土壤养分有重要影响。高程越高,土壤有机质和全氮质量分数越高。土地利用类型中各类型的土壤有机质和全氮质量分数是园地>耕地>林地。④在进一步研究中,根据土壤养分数据研究变量推荐施肥,实现土壤养分平衡,避免肥料浪费,保护土壤资源环境。

#### 参考文献:

- [1] LIU Xingmei, ZHAO Keli, XU Jianming, *et al.* Spatial variability of soil organic matter and nutrients in paddy fields at various scales in southeast China [J]. *Environ Geol*, 2008, **53**: 1139 – 1147.
- [2] 朱红春, 张蕾, 刘海英, 等. 基于 GIS 的猕猴桃土壤养分评价与施肥建议模型研究[J]. 农业工程学报, 2007, **23** (6): 194 – 198.  
ZHU Hongchun, ZHANG Lei, LIU Haiying, *et al.* Soil nutrient evaluation and recommended model for Chinese gooseberry fertilization based on GIS [J]. *Trans CSAE*, 2007, **23** (6): 194 – 198.
- [3] 陈伟强, 刘国顺, 华一新, 等. 平顶山市土壤速效养分空间变异分析[J]. 河南农业大学学报, 2007, **41** (5): 559 – 564.  
CHEN Weiqiang, LIU Guoshun, HUA Yixin, *et al.* Spatial variability of soil quick-acting nutrients in Pingdingshan City [J]. *J Henan Agric Univ*, 2007, **41** (5): 559 – 564.
- [4] ZHANG Xingyi, SUI Yueyu, ZHANG Xudong, *et al.* Spatial variability of nutrient properties in black soil of northeast China [J]. *Pedosphere*, 2007, **17** (1): 19 – 29.
- [5] 苑小勇, 黄元仿, 高如泰, 等. 北京市平谷区农用地土壤有机质空间变异特征[J]. 农业工程学报, 2008, **24** (2): 70 – 76.  
YUAN Xiaoyong, HUANG Yuanfang, GAO Rutai, *et al.* Spatial variability characteristics of farmland soil organic matter in Pinggu District, Beijing, China [J]. *Trans CSAE*, 2008, **24** (2): 70 – 76.
- [6] ROBINSON T P, METTERNICHT G. Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties [J]. *Comp Electron Agric*, 2006, **50**: 97 – 108.
- [7] 叶天峰. 宁海县农田土壤有效钾状况及对策[J]. 上海农业科技, 1999 (6): 61.  
YE Tianfeng. Status and policy of soil available potassium in farmland in Ninghai [J]. *Agric Technol Shanghai*, 1999 (6): 61.

表4 不同土地利用类型土壤养分均值和差异性的比较

Table 4 Comparison of mean and different degrees at SOM and soil nutrient properties in each land use type

土壤类型	样本数	均值			
		土壤有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
耕地	62	26.34	1.84	175.36	28.23
园地	19	27.08	1.85	200.68	49.31
林地	8	24.91	1.68	270.94	61.62
F 值		0.293	0.186	2.515	3.852
Sig 值		0.882	0.945	0.046*	0.006**