

太湖流域丘陵地区土壤养分的空间变异

曹 慧 杨 浩 孙 波 赵其国

（中国科学院南京土壤研究所 南京 210008）

臧 波

（湖北省江汉石油管理局农林处）

摘 要 土壤养分的空间变异的分析是土壤养分管理和合理施肥的基础，本文采用半方差和克里格插值法，研究了太湖丘陵地区高强度开发背景条件下土壤肥力质量的空间变异特点。从变异系数看，土壤速效 P 最大，达 120.76%，而 pH 最小，仅为 14.85%。土壤养分在空间上有一定的自相关性，PH、有机质、水解 N、速效 P 和速效 K 的相关距离分别为 958.45、1295.18、449.37、299.53 和 295.37m。土壤养分的空间变异受土地利用方式的影响，其中菜地、水田土壤养分含量总体较高，而自然林下的土壤养分含量相对较低。同时，随着农业结构的调整，短期种植的经济林地土壤养分含量有明显的降低，这是农业结构调整过程中出现的新问题，应该加以重视。

关键词 太湖地区；土壤肥力；空间变异

土壤是在各种自然和人为作用影响下形成和发展起来的，具有明显的时间和空间变化特征。研究土壤肥力的空间分异，可以更好地了解各种管理措施对土壤肥力的影响，准确预测土壤肥力的变化规律，从而为合理取样、平衡施肥和防治土壤退化提供理论依据。

空间变异方面的研究最早始于地质方面的研究，地质矿产部门采用的一种时空变异分析技术对矿物进行探测和开采，20 世纪 60 年代，国外土壤学家将其列入土壤时空变异分析研究，并取得了很好的结果。此后，地统计学家开始用半方差描述土壤各种属性的空间分布格局，并以克里格(Kriging)插值的方法预测未采样点的土壤性质^[1-3]。最初的工作主要是应用地统计学方法研究和预测土壤性质的空间分布及其与作物产量之间的关系，近十年来对大尺度的研究开始增加。但对于村级尺度的研究较少，尤其是很少考虑地形起伏和土地利用对土壤肥力质量的空间变异的影响。本项研究的目的是为了揭示太湖流域丘陵地区的土壤肥力的空间变异特征，为高强度开发背景下的农业结构调整提供某些科学依据。

1 材料与方法

1.1 典型区基本情况

选择江苏苏州市吴中区（原吴县市）旺山村作为研究的典型区，该村位于尧峰山下，南临东太湖，离吴中区 10km。全村土地总面积 641.04 hm²，其中南部为水田，中部为旱地和各类园地，北部和东西边缘是林地，包括混交林地、马尾松林地和竹林地等，不同土地利用类型、面积及其所占百分比见表 1。

该村经济实力较为雄厚，1998 年村集体经济收入达 300 万元，是吴中区现代化试点村。近年来，由于传统种植业效益低，该村积极发

表 1 吴中区旺山村土地利用类型

土地利 用类型	面积 (hm ²)	占总面积 (%)	土地利 用类型	面积 (hm ²)	占总面积 (%)
特殊用地	11.34	1.77	荒草地	6.06	0.95
交通用地	2.67	0.42	裸岩地	1.31	0.2
居民用地	40.79	6.36	滩涂	0.25	0.04
工矿用地	12.32	1.92	水田	69.43	10.83
园地	64.96	10.13	旱地	75.04	11.71
林地	339.11	52.9	水域	17.76	2.77

展高效种植业, 1997 年以来, 对 130 多 hm^2 的平岗旱地实施综合开发, 由集体规划经营。至 1999 年已经平整土地近 100 hm^2 , 建成 20 hm^2 苗木生产基地, 4 hm^2 珍稀园林花木科研示范基地, 33.33 hm^2 银杏花、果、叶多用林生产基地等。多种地形条件, 加上较大的土地利用结构调整力度, 为研究太湖流域丘陵区土壤肥力质量演变提供了良好的条件。

1.2 土壤样品的采集与样品测定

土壤样品的采集时间为 2000 年 8 月, 土壤样品为 8~10 点的混合样, 采样点共 59 个, 采样点的位置见图 1。

样品的分析测定如下: 土壤 pH 采用电位法(水提), 土壤有机质采用高温外热重铬酸钾氧化—外加热法, 土壤水解 N 采用碱解扩散法, 土壤有效 P 采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法, 土壤速效 K 采用乙酸铵提取法。具体方法参考土壤农业化学分析方法^[4]。

1.3 数据处理与分析

地统计学参数采用软件 S-PLUS2000 进行计算(Mathsoft, 1996)。利用经验半方差的球状模型(Spherical)、高斯模型(Gaussian)、指数模型(Exponential)和线性模型(linear)进行拟合, 并对上述 4 种模型进行优选, 计算步骤如下。

1.3.1 半方差函数与模型 半方差是用来描述土壤空间变异的一类函数, 可反映不同距离的观测值之间的变化。所谓半方差就是任意两点观测值的方差的一半, 用公式表示:

$$r(h) = \text{Var}[Z(x+h) - Z(x)]/2$$

式中, $Z(x+h)$ 和 $Z(x)$ 为土壤肥力指标的观测值; $r(h)$ 为间距为 h 的半方差, 它在一定范围内随着 h 的增加而增大, 当间距大于最大相关距离时, 该值趋于稳定。

1.3.2 克立格(Kriging)插值 克立格(Kriging)插值是目前地统计学中应用最广泛的最优内插法, 它是利用已知点的数据去估计未知点(x_0)的数值, 其实质是一个实行局部估计的

$$\text{加权平均值: } Z(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i)$$

式中 $Z(X_0)$ 是在未经观测的点 X_0 上的内插估计值, $Z(X_i)$ 是在点 X_0 附近的若干观测点上获得的实测值。 λ_i 是考虑了半方差图中表示空间的权重, 所以, Z 值的估计应该是

$$\text{无偏的, 因为: } \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

估计偏差是最小的, 并可以由下列方程求出:

$$d^2 \min = b^T \begin{vmatrix} I \\ m \end{vmatrix}$$

式中 b 是被估计点与其它点之间的半方差距阵, b^T 为矩阵 b 的转置矩阵, μ 为拉格朗日参数。

2 结果与讨论

2.1 土壤肥力质量的描述性统计

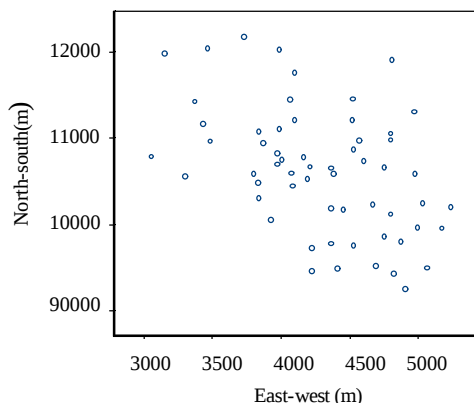


图 1 土壤采样点的位置图

对土壤肥力质量的属性进行了一般描述性统计，结果见表 2。5 种土壤肥力性质中，土壤速效 P 的变异系数最大，达 120.76%，其次为速效 K，为 77.62%，土壤 pH 的变异系数最小，为 14.85%。这种结果与其它研究所得出的结论是一致的，即土壤性质中 pH 的变异性相对较低，而土壤速效 P 的变异系数很高^[5-6]。Chien 等的研究发现，在 2.5km × 4.0km 区域内，土壤速效 P 的变异系数高达 199%^[7]。

2.2 土壤肥力质量的空间变异结构

应用地统计学方法，对 59 个采样点的土壤肥力性质进行了空间变异分析。不同土壤养分拟合的半方差函数及其参数见表 3。

研究表明，吴县市旺山村土壤肥力质量各指标所拟合的函数类型、最大相关距离、基底方差和基台值存在着较大的差别，表明土壤肥力质量的各项指标在空间变

异性方面有很大的不同。从相关距离来看,土壤有机质最大,达 1295.18m,表明土壤有机质是以大块状变异为主；最小的是土壤速效 K，仅有 295.37m，表明它是一种以小范围变异为主的土壤性质。同时，在相关距离之内,采样点越接近，两点之间的土壤性质的数值也就越接近；如果某两点的距离大于相关距离，则这两点之间的土壤性质就不能用插值法来外推。

表 3 表明，5 种土壤肥力性质中，土壤水解 N、速效 P 和速效 K 的基底方差较大，其余 2 种肥力性质的基底方差都较小但都为正值。基底方差都为正值，说明存在着由采样和测量引起的误差。基底方差越大，各种原因所引起的误差也就越大。

相关距离和基台值的关系可以表示土壤质量各指标在一定的距离范围内的变化强度。基台值小,相关距离大,则土壤质量的空间变异连续而缓和；反之则变异大。5 项土壤肥力指标中,水解 N、速效 P 和速效 K 的空间变异强度较大,而土壤有机质和 pH 空间变异强度较小。

2.3 土地利用方式对土壤养分空间变异的影响

土壤养分的空间变异受多种自然和人为因素的影响，对未采样点的土壤肥力性质采用克立格法进行插值分析，可以直观地反映了土壤养分的空间分布格局和变异大小（图略）。

土壤有机质的在空间上的分布格局表明为南北高、中间低的马鞍型。中部土壤有机质低、变化幅度较大，这是因为近年来由于农业产业结构的调整，对该地块水田和旱地进行了大面积的土地平整，表层土壤有机质含量有明显的降低。从有关的实测资料可以看出，水田改为菜地和林地后，土壤有机质由 30.33g/kg 分别下降为 17.50 g/kg 和 17.80 g/kg。

土壤 pH 克立格插值后有一条低值线，这一低值线大约从中西部向东北方向延伸，它

表 2 土壤肥力质量的描述性统计值

变 量	统计项目				
	平均值	方差	极小值	极大值	变异系数(%)
pH	5.63	0.84	3.51	7.47	14.85
有机质(g/kg)	22.8	8.11	6.7	44.80	35.57
水解 N(mg/kg)	159.65	71.17	35.70	475.01	44.58
速效 P(mg/kg)	53.84	65.02	1.65	246.89	120.76
速效 K(mg/kg)	138.86	107.78	25.01	609.00	77.62

表 3 不同半方差函数与其拟合参数

土壤性质	相关距离 (m)	基底 方差	基台值	基底方差/ 基台值(%)	模型
PH	958.45	0.10	0.45	22.22	Spherical
有机质(g/kg)	1295.18	35.65	90.32	39.47	Gaussian
水解 N(mg/kg)	449.37	902.12	2709.42	33.30	Spherical
速效 P(mg/kg)	299.53	153.24	4665.23	3.28	Spherical
速效 K(mg/kg)	295.37	0.00	6343.42	0.00	Spherical

穿过的土地类型主要是马尾松林地和茶园。低值线向南北方向, 土壤 pH 有明显升高, 但最南部的水田土壤 pH 又有所降低。显然, 植被类型、土地利用方式对土壤 pH 具有较大影响。

土壤速效养分, 包括水解 N、速效 P 和速效 K 空间变异与上述性质不同, 这是土壤肥力性质空间变异最大、等值线图最为破碎、分布格局最为复杂的一种类型, 显示出土壤速效养分对自然条件和人为因素的敏感性。

土壤速效养分在空间分异方面有一些共同点, 南部的菜地和水田、东部的长期菜地均为速效养分较高的地区。但土壤水解 N 和速效 P 比土壤速效 K 的空间变异性更大, 除上述 2 个高值区外, 其它地区也有峰值区。

土壤水解 N 是 5 项土壤肥力指标中空间变异最大的一项土壤指标, 它的最大相关距离为 449.37m, 而基台值为 33.30。它在东北方向马尾松林地有一明显的峰值区, 克立格插值后的预测值高达 336.40 mg/kg, 2 个马尾松林地土壤水解 N 的实地观测分别为 308.11 mg/kg 和 475.01 mg/kg。根据对中国亚热带马尾松林地养分循环的研究, 30 年生马尾松针叶的凋落高峰一般出现在夏季, 且马尾松凋落物的 N 素含量较高^[8], 显然, 马尾松林地土壤水解 N 含量较高与马尾松林地凋落物的归还有关。

土壤速效 P 在中部和西部有 2 个高区, 分别为 162.0 mg/kg 和 214.4 mg/kg, 它们明显与相同样地的土壤水解 N 不同。显然, 施用 N、P 肥对土壤养分的影响是有差别的, 英国的洛桑试验站做了世界上最长的 N 肥试验, 通过 130 年的试验表明, 单独施用无机 N 肥土壤 N 素的增加很小^[9]。而 P 肥的施用结果完全不同, P 一旦进入土壤就被固定, 损失很小, 因而过量施用 P 肥可大大增加土壤中 P 的含量, 增加了土壤中速效 P 的空间变异性^[10-11]。上述 2 个高区均为长期利用茶园地, 虽然土壤 pH 较低, 但由于人为的施肥, 尤其是大量施用以 P 肥为主的化学肥料, 土壤的速效 P 较高。

土壤速效 K 在南部和东部的长期菜地有 2 个高值区, 而东西部的林地速效 K 含量相对较低。显然, 高值区的形成与菜地的施肥类型有关, 尤其是长期施用草木灰、垃圾等有机肥料, 可大大增加土壤速效 K 的含量。

3 结 论

基于模型的地统计学方法, 是研究土壤肥力质量空间变异的有力工具, 它通过半方差描述土壤属性的空间分布格局, 通过克立格插值法预测未采样点的土壤肥力性质。本文借助上述方法, 对太湖丘陵区土壤肥力质量的空间分布进行了研究, 获得了以下几点结论:

(1) 在本文所研究的 5 种土壤肥力性质中, 速效养分的变异系数较大, 而有机质和 pH 的变异系数较小, 土壤肥力质量指标的变异系数是土壤性质的内存反映, 能够区别不同土壤指标对外界条件敏感性, 但它不能描述土壤性质的空间变异格局。

(2) 地统计学的半方差方法可以揭示土壤性质的空间变异性大小和变异性的强度。土壤有机质的相关距离最大, 表明它以大块状变异为主, 而土壤速效 K 是一种以小范围变异为主的土壤性质。在土壤质量的空间变异强度方面, 水解 N、速效 P 和速效 K 的空间变异强度较大, 基余指标空间变异强度较小。

(3) 土壤肥力质量各指标的克立格插值能够较好地预测未采样点的土壤性质。通过克立格插值所形成的不同土壤肥力质量指标的等值线图, 能够较为准确地反映出太湖丘陵区

区典型样地的土壤性质的空间分布格局；通过对等值线图的实地分析，可以从宏观上把握影响太湖流域丘陵区土壤肥力质量演变的主要因素，这对于认识太湖丘陵区土壤质量的演化规律，防止土壤肥力退化和养分流失具有重要的现实意义。

参 考 文 献

- 1 Vieira SR, Hatfield JL, Nielson DR and Biggar JW. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, 1983, 51, 1~75
- 2 Trangmar BB, Yost RS and Wade MK. Spatial variation of soil properties and rice yield in recently cleared land. *Soil Soc. Am. J.*, 1987, 51: 668~674
- 3 Warrick AW and Nielson DR. Spatial Variability of soil physical properties in the field. In: *Applications of soil physics*, Hillel D(ed.). Academic Press, London, 1980, 319~344
- 4 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999
- 5 Tsegaye T and Hill RL. Intensive tillage effects on spatial variability of soil test, plant growth, and nutrient uptake measurement. *Soil Sci.*, 1998, 163: 155~165
- 6 Yost RS, Uehara G and Fox R L. Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas. I. Semivariograms. *Soil Soc. Am. J.*, 1982, 46: 1028~1032
- 7 Chien YJ, Lee DY and Guo HY. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west taiwan soils. *Soil Sci.*, 1997, 162: 291~298
- 8 陈灵芝, 黄建辉, 严昌荣. 中国森林生态系统养分循环. 北京: 气象出版社, 1997
- 9 Glendinning MJ. 130 years of inorganic nitrogen fertilizer applications to broadbalk wheat experiment: The effect on soil organic nitrogen. *Trans., 14th ICSS*, 1990, 4, 4~8
- 10 鲁如坤. 土壤磷素在利用过程中的消耗和积累. *土壤通报*, 1980, (5): 6~8
- 11 赖庆旺. 红壤性水稻土连续施肥的生物效应和肥力特征. 见: 林葆等主编: 长期施肥的作物产量和土壤肥力的变化. 北京: 中国农业科技出版社, 1996, 60~68

(上接第 196 页)

- 18 Boers P C M. Nutrient emission from agriculture in the Netherlands: causes and remedies. *Water Sci Technol*, 1996, 33: 183~190
- 19 Tim U S., R Jolly. Evaluation agricultural nonpoint—source pollution using integrated geographic information systems and hydrologic/water quality model. *Environ Qual*, 1994, 23(1): 25~35
- 20 杨桂山. 长江三角洲近 50 年耕地变化及其驱动机制研究. *自然资源学报*, 2001, 16(2): 111~117
- 21 郑丙辉, 鄧永宽, 郑凡东, 李子成. 滇池流域生态环境动态变化研究. *环境科学研究*, 2002, 15(2): 16~17
- 22 谢红彬, 陈雯. 太湖流域制造业结构变化对水环境演变的影响分析——以苏锡常地区为例. *湖泊科学*, 2002, 14(1): 53~58
- 23 Coulthard T J, Macklin M G. How sensitive are river systems to climate and land-use changes? A model-based evaluation. *Journal of Quaternary Science*, 2001, 16 (4): 347~351
- 24 严登华, 何岩, 邓伟, 王春梅. 东辽河流域地表水水质空间格局演化. *中国环境科学*, 2001, 21(6): 564~568
- 25 方子云. 阿斯旺高坝兴建后尼罗河的水质变化及其管理. *人民长江*, 1995, 26(4): 60
- 26 De Roo A P J., Wesseling, Ritseman C J. LISEM: A Single-Event Physically Based Hydrological and Soil Erosion Model for Drainage Basins I: Theory, Input and Output. *Hydrological Processes*, 1996, (10): 1107~1118