

# 江苏省金坛市土壤肥力的时空变化特征\*

张庆利 史学正 潘贤章 于东升 刘付程

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

## CHARACTERISTICS OF SPATIO-TEMPORAL CHANGES OF SOIL FERTILITY IN JINTAN COUNTY, JIANGSU PROVINCE

Zhang Qingli Shi Xuezheng Pan Xianzhang Yu Dongsheng Liu Fucheng

(State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China)

关键词 土壤质量; 土壤属性; 时空变化; GIS; 地统计学

中图分类号 S159.2

文献标识码 A

土壤质量是土壤特性的综合反映,也是揭示土壤条件动态的最敏感的指标<sup>[1]</sup>,因而能体现自然因素及人类活动对土壤的影响。研究人类活动影响下的土壤质量变化,不仅可以为探讨土壤环境的变化趋势提供一种理论方法,而且可以阐明人类活动对土壤环境的影响方向。因而,土壤质量一直是土壤学领域中的研究热点。地统计学能够对研究对象的空间格局进行检验、模拟和估计。空间局部内插法提供了最小方差的无偏估计,在生态学中得到了广泛的应用<sup>[2]</sup>。考虑到土壤属性空间上的渐变性与一定范围内属性信息的空间相关性,因而地统计学的方法用于研究土壤的时空变异特征,是最为有效的方法之一<sup>[3,4]</sup>。目前,GIS与地统计学方法在研究土壤养分的空间变异特征上取得了很好的成果,而研究土壤质量变化的空间特征报道并不多。本文尝试将GIS与地统计学的方法相结合,在空间层面上研究了金坛市土壤pH、有机质(OM)、全氮(TN)和全磷(TP)等短期内相对稳定且能反映土壤质量状况的土壤属性近20年(1984~2000年)的变化特点,以揭示土壤肥力属性在空间层面上的演变规律,为土壤资源的管理和持续利用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地区基本概况

江苏金坛市总面积 967.2 km<sup>2</sup>。境内地势西北

高,东南低,渐渐倾向洮湖。西部为低山丘陵,茅山绵亘南北,掌状丘陵岗地起伏东西。中部为低洼圩区,地势低而平坦,河流纵横,湖荡水面广阔。主要河道为丹金溧漕河,从中部纵贯全市南北。东部为高亢平原,大部分为实心田,内塘河沟星罗棋布。按照农业生产地域分异规律,全市划分为3个农业区,由东向西依次为洮湖平田、洮湖圩田和茅山丘陵。成土母质类型由西向东依次为:西部低山丘陵以低山石英砂岩等风化物残积坡积母质为主,低丘岗地以丘陵岗地下蜀黄土母质为主,中部低洼圩区以圩田湖积黄土母质为主,东部高亢平原区以高平田冲积黄土母质为主,分别形成以黄棕壤、黄土和渗育型水稻土,潜育型水稻土,典型水稻土和漂白型水稻土为主的土壤。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 资料和土样的采集处理** 收集金坛市 1:5 万地形图和第二次全国土壤普查的详细资料。将地形图扫描后屏幕跟踪数字化,得到研究区边界。结合地势、地貌、土地利用、成土母质和历史资料等,布置 40 个野外采样点,采取表层(0~20cm)土样。GPS 记录采样点的经纬度坐标及高程,并详细记录采样点周围的景观信息。采样时采用取样点附近小范围内多点取样混合的方法,样品分析采用中国生态系统研究网络观测与分析标准方法<sup>[5]</sup>。

**1.2.2 数据处理** (1) 土壤属性数据半方差函数

\* 国家重点基础研究发展规划项目(批准号:G1999011810)和国家自然科学基金项目(批准号:49971039)资助

作者简介:张庆利(1974~),男,中国科学院南京土壤研究所土壤学专业在读博士。E-mail: qinglizhang2001@sina.com

收稿日期:2002-10-04;收到修改稿日期:2002-12-19

的拟合。以采样点经纬度坐标的 .DBF 文件为事件,加入到 ARCVIEW 中,产生采样点位置分布图,在 ARC/INFO 中进行投影转换后,转回 ARCVIEW,

提取采样点的公里网坐标。利用 GS+ 拟合土壤各属性数据的半方差函数模型,选择出最佳的半方差函数模型及其参数,结果见表 1。

表 1 土壤属性数据最佳半方差函数及其参数

项目	年代	模型	块金值	基台值	变程(km)	(基台-块金)/基台	决定系数	残差	F 检验
pH	1984	球状	0.00037	0.01064	11.62	0.965	0.687	2.367E-5	**
	2000	球状	0.00010	0.00982	5.68	0.999	0.420	5.770E-5	*
OM	1984	指数	0.04580	0.09200	33.23	0.502	0.585	4.839E-5	**
	2000	球状	0.01629	0.03558	18.69	0.542	0.586	2.027E-4	**
TN	1984	指数	0.01213	0.03146	12.24	0.614	0.757	7.081E-5	**
	2000	带基台线性	0.00544	0.01258	17.32	0.568	0.703	1.995E-5	**
TP	1984	指数	0.00252	0.02074	11.43	0.878	0.577	7.631E-5	**
	2000	球状	0.00128	0.00658	8.25	0.805	0.427	1.403E-5	*

\* :  $p < 0.05$ ; \*\* :  $p < 0.01$

(2) 土壤专题属性分级图及变化图的产生。利用表 1 中的模型,通过 ARCVIEW 的 Interpolate via Kriging 模块产生 1984 年和 2000 年的土壤 pH、有机质、全氮和全磷含量的插值图。为便于分析变化,对属性值的分级统一标准,将插值图中属性值进行重新分级。具体方法如下:把不同年代同一属性插值结果的总范围值平均分为若干级,各级的范围用一个具体的数值一

级值来表示。表 2 为金坛市土壤各属性分级标准,各年代的插值结果图以表 2 中的范围进行重新分级,分级后的图斑用其级别值表示,得到系列土壤专题属性分级图。土壤专题属性分级图在 ARCVIEW 下矢量化后,在 ARC/INFO 下拓扑及编辑处理,然后将 1984 年与 2000 年的同种专题属性分级图叠加,得到的金坛市土壤 pH、有机质、全氮和全磷变化图(图 1)。

表 2 土壤属性插值结果图属性分级标准

pH		有机质		全氮		全磷	
范围	级别值	含量范围( $g\ kg^{-1}$ )	级别值	含量范围( $g\ kg^{-1}$ )	级别值	含量范围( $g\ kg^{-1}$ )	级别值
5.07~ 5.87	1	15.88~ 18.47	1	26.27~ 28.85	5	0.74~ 1.15	1
5.87~ 6.67	2	18.47~ 21.07	2	28.85~ 31.44	6	1.15~ 1.55	2
6.67~ 7.47	3	21.07~ 23.66	3	31.44~ 34.04	7	1.55~ 1.96	3
7.47~ 8.27	4	23.66~ 26.27	4	34.04~ 36.63	8	1.96~ 2.36	4

表 3 金坛市土壤属性的描述性统计

项目	年代	样点数目	平均值 <sup>1)</sup>	标准差	变异系数(%)
pH	1984	40	6.66	0.77	11.56
	2000	40	6.38	0.78	12.23
OM	1984	40	18.33	4.12	22.48
	2000	40	27.39	5.37	19.61
TN	1984	40	1.19	0.39	32.77
	2000	40	1.52	0.27	17.76
TP	1984	40	0.67	0.23	34.33
	2000	40	0.51	0.12	23.53

1) OM、TN 和 TP 单位为  $g\ kg^{-1}$

## 2 结果与讨论

### 2.1 样品数据的描述性统计分析

表 3 为金坛市土壤属性的描述性统计,表中的平均值表明,金坛市土壤的 pH 值总体上呈下降趋势,说明近 20 年内,该地区的土壤呈变酸的趋势。全磷的变化趋势和 pH 的变化趋势相同。而土壤全氮和有机质都有大幅度的升高,平均增幅分别为 49.33%、27.73%。2000 年样点数据的变异系数与 1984 年相比,除土壤 pH 值的略有增大外,土壤有机质、全氮和全磷含量的变异系数都大大减小,说明 2000 年的土壤属性比 1984 年均匀,这表明人为因素

对该地区的土壤属性的空间分布影响明显。土壤 pH

值和有机质含量数据变异系数的变化比较小,而土壤全氮和全磷含量数据变异系数的变化幅度较大,说明人为因素对土壤全氮和全磷空间分布的影响较大,而对土壤 pH 值和有机质空间分布的影响较小。

## 2.2 半方差函数的地统计学分析

*F* 检验表明表 1 中土壤属性数据符合相对应的模型,用表 1 中的模型进行插值能满足精度要求。块金方差主要来源于远小于抽样间距的空间尺度上存在的差异,其大小直接限制了空间内插的精度<sup>[2]</sup>,2000 年土壤属性数据的半方差函数的块金值均比 1984 年的小,说明在小于抽样间距的空间尺度上土壤属性的空间分异程度小,所以用 2000 年的数据所得插值图的精度比 1984 年的精度高。

基台值与块金方差之差代表由于调查数据中存在的空间自相关性引起的方差变化范围。(基台块金)/基台表示结构性因素引起的土壤属性的空间变异部分占系统总变异的比列。与 1984 年相比,2000 年 pH 值和有机质的(基台块金)/基台比率值增大,说明 pH 值和有机质的空间分异特征受气候、母质、地形、土壤类型等结构性因素作用的强度有所增加,pH 值和有机质的结构性分异进一步增强。这表明土壤 pH 值的降低可能是自然因素作用下的必然趋势,而有机质空间分布特征的变化,是人们长期耕作过程对土壤有机物质输出与输入平衡影响程度减轻的结果。前面的统计结果表明土壤有机质含量大幅度提高,说明土壤有机物质输入大于输出,原因可能是长期作物根茬残留,或枯枝落叶残留量增加,从而导致全市土壤有机质含量普遍升高。全氮和全磷的(基台块金)/基台比值有所降低,说明母质、地形、土壤类型等结构性因素对全氮和全磷的空间分布的作用力度下降,而随机性因素如施肥、耕作措施、种植制度等各种人为活动使得土壤的空间相关性减弱,其中起主要作用的可能是施肥,因为这些年来该地区化肥施用量不断增加<sup>[6]</sup>。施肥使得土壤中的氮素呈盈余状态,而土壤中磷的输入小于作物收获及流失等造成的输出,因而,人为活动影响了该地区土壤氮磷养分的输入与输出平衡。

变程给出了随机变量在空间上自相关性的尺度,同时表示了空间内插的极限距离,在此范围内的内插是有意义的<sup>[7]</sup>。由表 1 中的变程值可以看出,所测土壤各属性的变程值都大于取样的平均距离,说明取样密度能够满足地统计需要,此插值具有实际意义。与 1984 年相比,2000 年该市土壤各属性半方差函数的变程除全氮外都呈下降趋势,进一步说

明土壤属性的空间自相关性的范围变小。因而,总体来说,结构性因素对土壤属性空间分布的作用力度下降,而随机性因素的作用力度不断提高。

## 2.3 土壤属性时空变化特征

变化图同一图斑对应的属性表中 2000 年的属性级别值与 1984 年的属性级别值相减即得到变化图每一图斑的土壤属性级别值的变化。

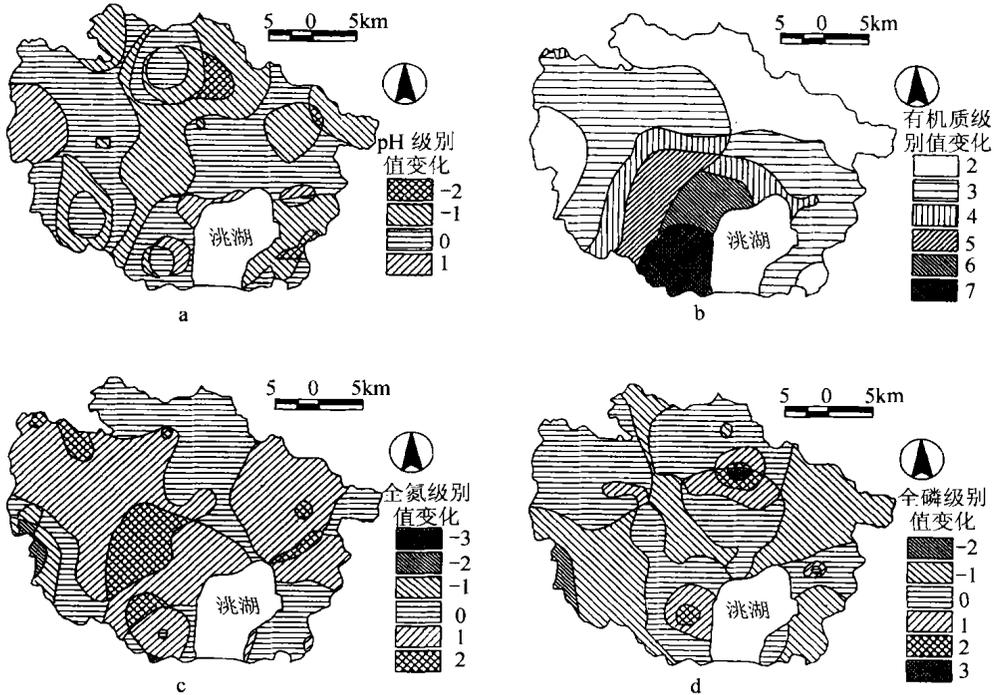
近 20 年间,金坛市土壤 pH 稳中有降。pH 没发生变化面积的占 45.5%,35.8% 的面积平均降低 0.8 个单位,有 2.3% 的面积平均降低了 1.6 个单位,仅有 7.9% 的面积提高了 0.8 个单位。这说明金坛市土壤 pH 的变化趋势以基本不变和略有下降为主。由土壤 pH 变化图(图 1a)可以看出,土壤 pH 随时间的变化具有明显的空间特征。pH 基本没变化的土壤主要分布于传统耕作区的高亢平原区,pH 降低的土壤主要分布在中部的低洼圩区,pH 升高的土壤则分布于地势最高的茅山山区和地势最低的洮湖周围。

从土壤有机质含量变化图(图 1b)可以看出,全市土壤有机质含量普遍有大幅度的提高。有机质变化面积最大的土壤有机质含量平均升高  $7.8 \text{ g kg}^{-1}$ ,占全市面积的 37%。有机质含量升高最大平均值为  $18.2 \text{ g kg}^{-1}$ ,但这部分面积仅占全市面积的 0.2%,大部分土壤(全市面积的 63.8%)有机质含量平均升高  $5.2 \sim 7.8 \text{ g kg}^{-1}$ 。土壤有机质含量变化在空间上具有明显的规律性,变化最大的土壤主要集中在比较低洼的地方,例如,洮湖附近土壤有机质含量提高幅度最大,其次为中部的低洼圩地,东部的高亢平原和西部的山区土壤有机质含量提高幅度最小。这种分布与该市地形地势关系密切。地势的高低直接影响水分的流向和分布,低洼的地方土壤水分多,易于有机质的积累,同时部分土壤有机质会以溶解有机碳的形式随水从高处向低处迁移。另一方面,人类活动影响下有机物消耗与有机物质归还平衡状况的地区差别,也会造成土壤有机质含量变化的地区差别。

土壤全氮含量变化主要表现为上升趋势(图 1c)。全氮含量提高的土壤面积占全市面积的 59.3%,其中有 49.4% 的面积平均提高了  $0.4 \text{ g kg}^{-1}$ 。有 29.1% 的面积含量保持不变,全氮含量降低的面积仅占全市面积的 0.9%。由全氮变化图可以看出,全氮含量提高的土壤主要分布在掌状丘陵和低洼圩区,部分分布在高亢平原。高亢平原土壤全氮含量基本呈不变和略有上升趋势。全氮含量下降的土壤则主要分布于西部地势较高的地区。西部地势高,主要为旱

地,氮素易于挥发和流失,而中、东部地区地势低洼,主要用作水田,氮素易于积累,因而,地形及由此造

成的土地利用方式的差别,是造土壤氮素变化的区域差异的主要原因。



图例中级别变化值为正值表示升高,负值表示降低,零表示不变,级别变化值的大小表示变化的程度

图1 金坛市土壤属性变化图(1984~2000年)

土壤全磷含量不变的面积为 44.8%,下降的面积为 37.2%,上升的面积为 10.4%,35.9%的面积土壤全磷含量值平均下降  $0.31 \text{ g kg}^{-1}$ ,因而金坛市土壤全磷含量总体上呈不变和略有下降趋势(图 1d)。土壤全磷变化图(图 1d)表明,全磷含量降低的土壤主要分布在河流的中上游,而全磷含量升高的土壤则主要分布在洮湖和天荒周围的河口地区,这说明径流是土壤磷素迁移变化的主要影响因子之一。随着时间的推移,土壤中的磷素顺着河流从上游迁移至下游或湖泊,磷素的流失趋势相当明显。近年来由于化学磷肥施用量的增加,许多地方磷素在土壤中大量积累<sup>[6]</sup>,在河流密集的地区,农田土壤中的磷的流失不容忽视,它可能是造成湖泊富营养化的磷的主要来源。

### 3 结论

1) 研究表明,金坛市土壤 pH 值和全磷含量呈下降趋势,土壤酸化与磷素流失现象明显。土壤全氮含

量呈上升趋势,土壤有机质含量有大幅度的提高。

2) 金坛市土壤 pH、有机质、全氮和全磷含量的时空变化具有明显的地域性特点。在传统耕作区的高亢平原区, pH 值基本没有变化, pH 值降低的地区主要分布在中部的低洼圩区,而 pH 升高的土壤面积较少,主要分布在地势最高的茅山山区和地势最低的洮湖周围。土壤有机质含量明显升高,且在地势越低的地区升高幅度越大。全氮含量提高的土壤主要分布在掌状丘陵和低洼圩区,部分分布在高亢平原,全氮含量降低的土壤面积较小,主要分布在山区。土壤全磷含量降低的土壤主要分布在河流的中上游,而全磷含量升高的土壤则主要分布在洮湖和天荒周围的河口地区。

3) 人为活动对土壤性质的决定作用力度不断提高,使得土壤的结构性空间变程度减弱。土壤 pH 值和有机质的结构性分异进一步增强,而土壤全氮和全磷的结构性分异逐渐减弱,人为活动对土壤全氮和全磷空间分布的影响程度比对土壤 pH 值和有机质空间分布的影响程度大。

## 参考文献

- [ 1 ] 赵其国, 孙波, 张桃林. 土壤质量与持续环境 I. 土壤质量的定义及评价方法. 土壤, 1997, 29(3): 113~ 120. Zhao Q G, Sun B, Zhang T L. Soil quality and sustainable environment I. The definition and appraisal methods of soil quality (In Chinese). Soils, 1997, 29(3): 113~ 120
- [ 2 ] 葛剑平, 郭海燕, 仲莉娜. 地统计学在生态学中的应用 (I) — 基本理论和方法. 东北林业大学学报, 1995, 23(2): 88~ 94. Ge J P, Guo H Y, Zhong L N. Application of geostatistics in ecology (I): Basic theory and methods (In Chinese). Journal of Northeast Forestry University, 1995, 23(2): 88~ 94
- [ 3 ] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 等. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究——以河北省遵化市为例. 应用生态学报, 2000, 11(4): 557~ 563. Guo X D, Fu B J, Ma K M, *et al.* Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics with GIS: A case study of Zunhua City of Hebei Province (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(4): 557~ 563
- [ 4 ] 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征—变异函数与 Kriging 插值分析. 地理学报, 2000, 9(5): 555~ 566. Guo X D, Fu B J, Chen L X, *et al.* The spatio-temporal variability of soil nutrients in Zunhua Plain of Hebei Province: Semivariogram and Kriging Analysis (In Chinese). Acta Geographica Sinica, 2000, 9(5): 555~ 566
- [ 5 ] 刘光菘. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996. Liu G S. Soil Physical and Chemical Analysis & Description of Soil Profiles (In Chinese). Beijing: Chinese Standard Press, 1996
- [ 6 ] 周健民, 陈小琴, 谢建昌, 等. 中国农田生态系统养分平衡状况及管理对策. 见: 周健民主编. 农田养分平衡与管理. 南京: 河海大学出版社, 2000. 42~ 52. Zhou J M, Chen X Q, Xie J C, *et al.* The balance of nutrients in Chinese farmland ecosystem and strategies for its management (In Chinese). In: Zhou J M. ed. Nutrient Cycling and Management in Agro-ecosystems. Nanjing: Hohai University Press, 2000. 42~ 52
- [ 7 ] Trangmar B B, Yost R S, Uehara G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. In: Brady N C. ed. Advances in Agronomy. New York: Academic Press, 1985. 45~ 94