

太湖地区表层土壤养分空间变异的影响因素研究^①

赵莉敏^{1,2}, 史学正^{2*}, 黄耀^{1*}, 徐茂³, 于东升², 王洪杰², 张黎明^{1,2}, 张勇²

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2 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; 3 江苏省农林厅, 南京 210036)

摘要: 采用单因素方差分析和逐步回归分析, 分析了太湖地区表层 (0~15 cm) 土壤养分空间分异的影响因素。结果表明, 太湖平原地区全 N、全 P、全 K 和速效 P 含量均较高; 而低山丘陵地区全 P、速效 P 及速效 K 含量均较低, 属于缺 P、缺 K 水平。土壤类型对太湖地区土壤全 N、速效 K 空间变异的影响要大于母质和地形; 地形影响全 P 和速效 P 空间变异较母质和土壤类型更为明显; 而母质是影响全 K 的主导因素, 对其空间变异的影响比土壤类型和地形大。三者引起土壤养分的空间分异均达到极显著水平, 从而证实了土壤调查采样时按成土母质、土壤类型或地形布设样点是合理的。

关键词: 太湖地区; 土壤养分; 空间变异; 影响因素

中图分类号: S159.2

Influential Factors of Spatial Heterogeneity of Soil Nutritions in Taihu Lake Region

ZHAO Li-min^{1,2}, SHI Xue-zheng², HUANG Yao¹, XU Mao³, YU Dong-sheng², WANG Hong-jie², ZHANG Li-ming^{1,2}, ZHANG Yong²

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

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

3 Jiangsu Agricultural & Forestry Department, Nanjing 210036, China)

土壤养分的空间变异是土壤的重要属性之一, 是由土壤类型、地形、母质以及土地利用方式、人为耕作管理措施等各种因素在不同方向和尺度上共同作用的结果, 也因土壤养分的种类、取样方法和取样区域大小而异。太湖地区是我国主要的水稻产区之一, 粮食产量的高低与土壤养分息息相关, 了解太湖地区土壤养分变异的影响因素对提高该区域农田水肥利用效率, 改善田间管理措施皆具有重要的意义^[1-2]。

国内学者对太湖地区不同县市的土壤属性空间变异的影响因素进行了大量研究。杨茹玮等^[4]指出无锡和常州成土母质对土壤 pH、体积质量 (容重)、全 P、有机质和速效 K 的空间分异起主导作用。王彩绒等^[5]得出太湖流域典型蔬菜地耕层土壤全 P、速效 P 和速效 K 受施肥、作物、管理水平等因素影响较大, 土壤 pH 和全 N 主要受母质、地形、土壤类型等因素影响。张庆利等^[6]研究发现, 引起江苏省金坛市土壤全 N、全 P 空间变异的主要因素是施肥。但目前研究大多集

中在太湖地区部分县市或实验点, 而对整个流域土壤养分空间分异影响因素的研究还未见报道。因此, 本文从整个太湖地区分析土壤养分空间分异的影响因素, 以便为该地区农业土壤的合理利用和施肥管理决策提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

太湖流域位于东经 118°50'~121°54', 北纬 29°56'~32°16', 面积约 36500 km², 包括江苏省镇江、无锡、常州和苏州, 浙江省嘉兴、湖州和杭州市的一部分, 以及整个上海市, 共 37 个县 (市)。该流域北临长江, 西部有茅山山脉和天目山山脉。地形特点为周边高、中间低。平原区的成土母质以湖 (河、海) 相沉积物为主, 沿江主要是长江冲积物, 而丘陵地区则为各种岩石的残坡积物及下蜀黄土。

1.2 土壤数据来源

①基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿项目 (ISSASIP0715)、国家自然科学基金创新群体项目 (404621001) 和国家重点基础研究发展计划项目 (2007CB407206) 资助。

* 通讯作者 (xzshi@issas.ac.cn; huangy@mail.iap.ac.cn)

作者简介: 赵莉敏 (1982—), 女, 山西长治人, 硕士研究生, 主要从事资源环境信息系统研究。E-mail: zhaolm1982@163.com

数据来源于全国第二次土壤普查（1979—1994年），包括江苏省镇江、无锡、常州和苏州，浙江省嘉兴、湖州和杭州市的一部分，以及整个上海市37个县（市）编著的土壤志，共收集了1670个土壤剖面数据，主要分为剖面描述和理化性质两部分，前者包括典型剖面的归属与分布、地理位置及主要性状；后者包括土壤体积质量、质地、pH值、有机质及全N、全P、全K、速效P和速效K含量等。利用GIS结合太湖地区1:10万地形图、1:5万土壤图上剖面点位置将其空间化，见图1。计算剖面表层（0~15 cm）全N、全P、全K、速效P和速效K深度加权平均值，即如果土壤剖面最上层深度大于或等于15 cm，取整个层的属性数值，如果剖面最上层深度不足15 cm，取0~15 cm的所有层的加权属性数值。

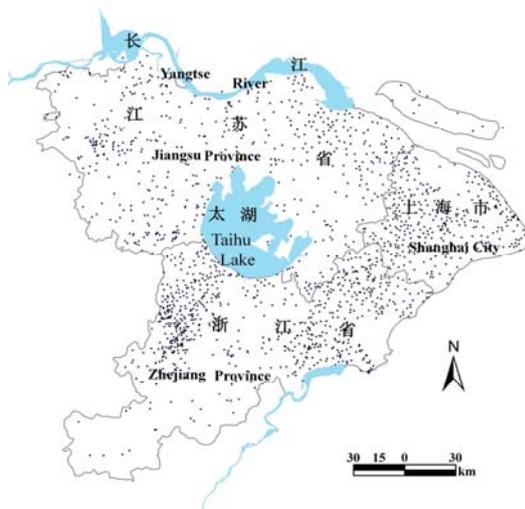


图1 太湖地区剖面点分布

1.3 统计分析方法

应用统计分析软件SPSS13.0，采用方差分析和回归分析研究母质、土壤类型和地形与表层土壤养分之间的关系。因成土母质、土壤类型和地形均为分类变量，进行回归分析时需采用哑变量（dummy variable）赋值。如本研究区共有15种成土母质（ x ），为避免共线性，定义14个哑变量 y_1, y_2, \dots, y_{14} ，采用矩阵（1）赋值，详见文献[7]。

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \dots \\ x_{14} \\ x_{15} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

以上分析要求因变量呈正态分布，太湖地区土壤全K近似为正态分布，全N、全P、速效P和速效K

为偏态分布，经对数转换后近似为正态分布。

2 结果与讨论

2.1 太湖地区土壤养分的空间分异特征

太湖地区N、P、K全量含量较高。>1.00 g/kg全N含量分布面积占总土壤面积75%。全K含量在15~30 g/kg的土壤约占总面积的80%。全P的趋势不尽相同，>1.50 g/kg的土壤主要分布在沿江一带及太湖平原区；<0.75 g/kg的土壤主要分布在杭嘉湖圩区、南部海积平原区和低山丘陵区一带。速效P整体趋势为由西南到东北逐步增高，含量较高的地区在阳澄湖区和冲积平原区，而低值区（<5.0 mg/kg）分布在低山丘陵地区。速效K含量较高的地区主要分布在冲积平原区、阳澄湖圩区、杭嘉湖圩区东部、丘陵区临安境内；低值区（<80 mg/kg）主要分布在低山丘陵区、平原区东部张家港、江阴、锡山境内。从表1可以看出，速效P变异系数最大，达125.65%，而全K变异系数最小，为24.51%，全N、全P和速效K的变异系数介于40%~100%之间，属中等分异。造成速效P变异性很大的原因主要有两方面，①与P在土壤中的化学行为及施P状况有关，因施入土壤中的P移动性小、当季利用率不同等，使土壤中P残留不同；②地形、土壤类型及土壤质地等土壤特征的空间差异性造成P素空间变异性较大。

2.2 成土母质对土壤养分空间分异的影响

成土母质是土壤形成的物质基础，它能直接影响土壤矿物和颗粒组成，并在很大程度上支配着其物理和化学过程，从而对土壤的生产力和养分高低产生重要影响。太湖地区可归纳为15种母质，主要以湖（河、海）相沉积物、下蜀黄土及黄土性沉积物、砂页岩类坡积或残积物、浅海及滨海沉积物、除长江以外河流冲积物、长江冲积物和第四纪红土为主。从各养分来看，全N以紫色、红色岩类最高，为1.85 g/kg，其次是泥质岩类、石灰岩类、湖（河、海）相沉积物和洪冲积物，一般在1.50~1.80 g/kg之间，而全P、全K大多分别在0.24~1.39 g/kg和12.00~18.00 g/kg之间。速效P以长江冲积物最高，为20.86 mg/kg，花岗、片麻岩类及部分中性岩类最小，仅1.81 mg/kg，速效K基本在91.55~118.77 g/kg之间（表2）。

为进一步了解母质对土壤养分分异的影响程度，笔者对不同母质的土壤养分进行单因素方差分析和回归分析。从表2可以看出，各养分均有极显著差异，表明母质对土壤养分空间分异均有很大影响，而判定系数 R^2 可将这种影响定量化。为此本研究设定 $R^2 > 70%$ 为强度影响，30%~70%为中度影响，<30%为

表 1 土壤养分的描述性统计值

统计值	全 N (g/kg)	全 P (g/kg)	全 K (g/kg)	速效 P (mg/kg)	速效 K (mg/kg)
均值	1.51	0.82	18.18	10.99	91.36
最小值	0.10	0.05	0.4	0	1.08
最大值	8.09	16.57	51.24	167	412
标准差	0.64	0.76	4.46	13.81	46.29
CV (%)	42.58	92.75	24.51	125.65	50.67

表 2 不同成土母质间土壤养分分层数据差异性比较

母质	样本数	全 N (g/kg)	全 P (g/kg)	全 K (g/kg)	速效 P (mg/kg)	速效 K (mg/kg)
第四纪红土	95	0.88 ± 0.45 F	0.46 ± 1.70 F	13.83 ± 2.28 GH	4.94 ± 4.44 EF	74.56 ± 34.36 BCDE
玄武岩类	23	1.38 ± 0.70 BC	0.92 ± 1.11 CD	17.76 ± 8.26 BCD	7.13 ± 6.59 DEF	91.55 ± 53.33 ABCDE
花岗、片麻岩类及部分 中性岩类	46	1.41 ± 1.03 BC	0.24 ± 0.16 F	15.71 ± 1.83 DEFG	1.81 ± 2.66 G	66.68 ± 18.99 CDEF
砂页岩类	57	1.38 ± 1.03 DE	0.56 ± 0.44 E	12.78 ± 2.82 H	6.99 ± 10.55 DEF	89.31 ± 50.51 ABCDE
泥质岩类	6	1.81 ± 0.46 A	0.32 ± 0.19 F	13.01 ± 6.26 H	11.86 ± 12.79 BCDE	59.37 ± 40.20 F
石英质岩类	7	1.32 ± 0.54 BC	1.50 ± 1.46 BC	14.97 ± 2.74 EFGH	5.70 ± 4.37 DEF	114.10 ± 92.91 A
石灰岩类	30	1.78 ± 0.67 AB	1.00 ± 0.67 BCD	14.27 ± 4.33 FGH	9.14 ± 5.58 BCD	118.77 ± 66.67 A
紫色、红色岩类	8	1.85 ± 1.46 ABC	1.39 ± 1.09 AB	15.78 ± 3.12 DEFG	3.60 ± 1.46 F	70.38 ± 33.98 CDEF
长江冲积物	118	1.32 ± 0.35 BCD	1.36 ± 0.52 A	20.53 ± 4.19 A	20.86 ± 25.55 A	88.37 ± 32.69 ABCD
除长江以外其他各河 流冲积物	170	1.41 ± 0.53 BCD	0.76 ± 0.46 CD	16.45 ± 4.67 CDE	10.55 ± 14.37 BCDE	69.67 ± 53.61 DEF
湖(河、海)相沉积物	722	1.73 ± 0.56 AB	0.78 ± 0.54 CD	19.89 ± 3.70 AB	11.22 ± 12.69 ABC	101.03 ± 45.67 AB
下蜀黄土及黄土性沉 积物	127	1.39 ± 0.64 BCD	1.02 ± 0.83 BC	17.02 ± 4.09 CDE	8.52 ± 8.61 CDE	85.50 ± 30.32 ABCD
浅海及滨海沉积物	164	1.32 ± 0.54 BC	0.91 ± 0.72 BCD	18.70 ± 3.79 ABC	11.08 ± 10.87 ABC	98.53 ± 45.25 ABC
洪冲积物	37	1.55 ± 0.55 ABCD	0.90 ± 1.49 D	15.13 ± 4.42 EFGH	12.93 ± 10.06 ABC	64.76 ± 37.70 DE
人为堆叠物	33	1.00 ± 0.38 EF	0.77 ± 0.35 BCD	17.83 ± 1.55 BCD	17.79 ± 21.83 AB	87.50 ± 53.85 ABCDE
均值		1.51	0.82	18.18	10.99	91.36
<i>F</i>		29.61	58.59	39.78	27.41	12.10
<i>Sig.</i>		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
<i>R</i> ²		0.203	0.335	0.255	0.195	0.094

注：同一列中有相同字母表示均值差异性不显著 ($p > 0.01$)，下同。

弱度影响，分析结果表明，土壤全 P 空间分异受成土母质的影响为 33.5%，属中度影响；成土母质对其它土壤养分影响程度 $< 30\%$ ，为弱度影响，其中对速效 K 的影响最小，仅 9.4%，说明不同土壤养分全量的变化与母质有很大关系，这主要是由于母质矿物中不同元素的含量及其风化强弱在很大程度上影响着各全量养分在土壤中的含量，而速效态养分一般受人为影响较大，母质影响相对较小的缘故。

2.3 土壤类型与土壤养分空间分异的影响

不同类型土壤因其成土条件和主导因素不同，也会造成土壤养分的很大差异。太湖地区土类以水稻土、

潮土、红壤为主，约占总面积 90%，其中水稻土面积近 66%（讨论到亚类）。从表 3 可以得出，不同土壤类型间各土壤养分均有极显著差异，说明土壤类型能反映土壤养分的分异特征。石灰岩土、沼潜型水稻土和潴育型水稻土全 N 含量较高，在 1.60~1.85 g/kg 之间，其它土壤类型含量低于均值；而全 P 以渗育型水稻土最高，达 1.27 g/kg，红壤含量最低，只有 0.39 g/kg；全 K 含量变化不大，大多在 14.08~24.97 g/kg 之间；速效 P 范围在 2.71~20.63 mg/kg；速效 K 含量最高的是滨海盐土，达 198.73 mg/kg，最低的是侧渗型水稻土，值为 61.44 mg/kg。

表3 不同土壤类型间土壤养分表层数据的差异性分析

土壤类型	样本数	全 N (g/kg)	全 P (g/kg)	全 K (g/kg)	速效 P (mg/kg)	速效 K (mg/kg)
滨海盐土	28	0.72 ± 0.45 H	0.66 ± 0.16 C	22.28 ± 2.05 AB	11.94 ± 9.96 AB	198.73 ± 124.58 A
潮土	192	1.09 ± 0.36 EFG	1.00 ± 0.63 ABC	18.48 ± 4.67 CDE	20.63 ± 24.30 A	93.40 ± 56.48 CDE
粗骨土	6	1.49 ± 0.81 CDEF	0.71 ± 0.75 D	14.65 ± 1.75 F	2.71 ± 3.06 E	70.47 ± 37.62 DE
红壤	169	1.04 ± 0.71 G	0.39 ± 1.29 E	14.08 ± 2.39 F	3.93 ± 4.36 DE	73.56 ± 31.47 DE
黄棕壤	72	1.46 ± 1.06 DEFG	0.97 ± 0.89 BC	14.21 ± 6.59 F	6.30 ± 8.30 CD	93.16 ± 54.27 CDE
石灰(岩)土	26	1.83 ± 0.67 ABC	0.88 ± 0.43 ABC	15.52 ± 2.57 EF	9.43 ± 5.89 ABC	132.34 ± 62.13 ABC
沼泽土	9	1.66 ± 0.56 ABCD	1.23 ± 0.37 A	24.97 ± 5.56 A	11.21 ± 10.40 AB	139.46 ± 36.84 AB
紫色土	5	1.35 ± 0.62 DEF	1.26 ± 1.14 ABC	15.70 ± 3.94 DEF	3.16 ± 1.66 DE	62.94 ± 23.08 E
侧渗型水稻土	9	1.00 ± 0.15 FG	0.88 ± 0.49 ABC	19.26 ± 3.44 BC	7.54 ± 6.59 BC	61.44 ± 22.87 E
漂洗型水稻土	31	1.24 ± 0.31 DEFG	1.22 ± 1.51 ABC	15.95 ± 3.08 DEF	6.88 ± 3.75 BC	72.84 ± 20.83 DE
潜育型水稻土	52	1.48 ± 0.60 BCDE	0.86 ± 0.43 ABC	17.91 ± 4.76 CDE	11.90 ± 10.13 AB	93.61 ± 39.92 CDE
渗育型水稻土	133	1.41 ± 0.41 BCDE	1.27 ± 0.84 AB	18.89 ± 5.13 CD	9.33 ± 7.64 ABC	84.93 ± 38.24 DE
脱潜型水稻土	279	1.99 ± 0.56 A	0.75 ± 0.61 C	20.21 ± 3.96 BC	8.84 ± 7.85 ABC	100.26 ± 33.44 BCD
淹育型水稻土	5	1.09 ± 0.42 EFG	1.16 ± 0.38 AB	16.99 ± 3.89 CDEF	6.57 ± 4.02 BC	87.47 ± 20.59 CDE
沼潜型水稻土	11	1.83 ± 0.64 AB	0.67 ± 0.16 C	20.11 ± 2.95 BC	17.99 ± 17.42 A	98.99 ± 38.95 BCD
潜育型水稻土	616	1.61 ± 0.50 ABCD	0.78 ± 0.54 C	18.57 ± 3.51 CDE	11.72 ± 13.90 AB	86.94 ± 37.65 CDE
均值		1.51	0.82	18.18	10.99	91.36
F		54.05	53.16	28.08	26.03	9.89
Sig.		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
R ²		0.333	0.329	0.206	0.197	0.084

同样,依据 R^2 可以判断,土壤类型对全N和全P的影响程度均 $>30\%$,属中度影响,其中对全N分异的影响最强,达33.3%;对全K、速效P和速效K的影响程度分别为20.6%、19.7%和8.4%,为弱度影响。

2.4 地形对土壤养分空间分异的影响

由于地形因子与土壤中水分的运输及物质的运移有着紧密的联系,从而会影响土壤中养分的分布情况^[8]。本文在地形地貌的基础上,根据土壤组合与农业利用上的特点,把太湖地区划分为低山丘陵区、太湖平原区、冲积平原区和低洼圩区^[9]。从表4可以看出,低山丘陵区、太湖平原区和冲积平原区全N含量的差异性不显著,但均与低洼圩区有极显著差异。低洼圩区全N含量最高,值为1.80 g/kg,其它地区含量在1.31~1.37 g/kg之间;这是因为低洼圩区常年积水,N素易于积累,地势较高处N素易于流失和挥发。全P、全K和速效P含量在不同地形下差异均为极显著。全P含量最高的是太湖平原区,达1.16 g/kg;全K、速效P和速效K含量最高的是冲积平原区,分别为20.19 g/kg、15.98 mg/kg、109.00 mg/kg,而全P、全K、速效P和速效K含量最低的均为低山丘陵区,其平均值分别为0.60 g/kg、15.23 g/kg、6.62 mg/kg和73.34 mg/kg。造成以上分布主要是由于低山丘陵区存在一定的土壤侵蚀,造成土壤养分流失^[10]。

总体来看,地形对土壤养分的影响程度为:全P $>$ 全K $>$ 速效P $>$ 全N $>$ 速效K, R^2 均 $<30\%$,属弱度影响。

2.5 成土母质、土壤类型和地形对土壤养分影响的主导因素分析

不同母质、土壤类型和地形间土壤养分有极显著差异,故母质、土壤类型和地形对养分均有很大影响。但哪个起主导作用,却无法判断,且土壤类型成土条件中包含母质和地形因素,通过回归系数无法直接比较三者与养分之间的关系大小,于是引入逐步回归分析定量地判断养分与哪种因素更为密切。

表5为成土母质、土壤类型和地形对土壤养分逐步回归分析结果。回归指标 ΔR^2 为在其它变量的基础上增加该变量时,回归方程判定系数的增量, ΔR^2 越大,说明该变量越重要; $R^2_{\text{偏}}$ 是指新加入回归方程的变量所解释部分占缺少该变量的回归方程未能解释部分的比例大小,也是判断自变量重要性的指标之一。对于全N(表5),母质 $\Delta R^2 = 4.5\%$, $R^2_{\text{偏}} = 7.0\%$,土壤类型 $\Delta R^2 = 13.4\%$, $R^2_{\text{偏}} = 24.8\%$,地形 $\Delta R^2 = 2.4\%$, $R^2_{\text{偏}} = 3.9\%$,土壤类型的 ΔR^2 和 $R^2_{\text{偏}}$ 均大于母质和地形,说明土壤类型对土壤全N分异的影响程度要大于母质和地形,施肥处理时应考虑到不同类型的土壤N含量的差异性。同样,从表5也可以看出,对

表 4 不同地形间土壤养分表层数据的差异性分析

地形	样本数	全 N (g/kg)	全 P (g/kg)	全 K (g/kg)	速效 P (mg/kg)	速效 K (mg/kg)
低山丘陵区	451	1.37 ± 0.85 B	0.60 ± 0.99 D	15.23 ± 3.73 D	6.62 ± 9.33 D	73.34 ± 41.84 C
太湖平原区	144	1.35 ± 0.42 B	1.16 ± 0.76 A	17.83 ± 3.80 C	8.84 ± 9.32 C	87.15 ± 39.51 B
冲积平原区	457	1.31 ± 0.44 B	1.00 ± 0.59 B	20.19 ± 4.53 A	15.98 ± 18.21 A	109.00 ± 56.91 A
低洼圩区	591	1.80 ± 0.51 A	0.78 ± 0.61 C	18.95 ± 3.86 B	10.24 ± 12.11 B	92.50 ± 35.41 B
均值		1.51	0.82	18.18	10.72	91.36
F		90.12	170.06	65.12	91.05	51.93
Sig.		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
R ²		0.142	0.237	0.189	0.143	0.087

表 5 成土母质、土壤类型和地形对养分空间变异主导因素分析

养分	母质			土壤类型			地形		
	ΔR^2	$R^2_{偏}$	R^2_{adj}	ΔR^2	$R^2_{偏}$	R^2_{adj}	ΔR^2	$R^2_{偏}$	R^2_{adj}
全 N	0.045	0.070	0.196	0.134	0.248	0.183	0.024	0.039	0.140
全 P	0.043	0.073	0.329	0.051	0.085	0.323	0.055	0.092	0.236
全 K	0.055	0.076	0.249	0.047	0.066	0.198	0.033	0.0468	0.187
速效 P	0.037	0.051	0.188	0.046	0.063	0.19	0.056	0.075	0.141
速效 K	0.039	0.046	0.086	0.062	0.071	0.075	0.034	0.040	0.085

全 P 和速效 P 的影响是地形 > 土壤类型 > 母质；对于全 K 来说，母质 > 土壤类型 > 地形；而对速效 K 而言，土壤类型 > 母质 > 地形。可见，不同养分变异的主导因素是有差异的。土壤调查时，应根据实际情况出发，综合考虑地形、母质和土壤类型等因素的差异性。

3 结论

从太湖地区土壤养分空间分异来看，平原地区全 N、全 P、全 K 和速效 P 含量均丰富；而低山丘陵地区全 P、速效 P 及速效 K 含量均在低值范围，属于缺 P、缺 K 水平。土壤类型对土壤全 N 和速效 K 空间分异的影响程度要大于母质和地形，施肥时应针对不同土壤类型进行不同处理，避免平均施肥引起局部地区肥料过剩或不足；地形影响全 P 和速效 P 空间变异较母质和土壤类型更为明显；而母质是影响全 K 的主导因素，对其空间变异的影响比土壤类型和地形大。同时，成土母质、土壤类型和地形对土壤养分均有极显著影响，这也证实了土壤调查采样时按母质、土壤类型或地形布设采样点是合理的。

参考文献：

- [1] 路鹏, 黄道友, 宋变兰, 黄敏, 刘守龙, 苏以容, 肖和艾, 吴金水. 亚热带红壤丘陵区典型景观单元土壤养分的空间变异. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6):717-723
- [2] Tiftonell P, Vanlauwe B, Leffelaar PA, Rowe EC, Giller KE. Exploring diversity in soil fertility management of smallholder farms in western Kenya I. Heterogeneity at region and farm scale. Agriculture, Ecosystems & Environment. 2005, 110(3/4):149-165
- [3] Stein A, Ettema C. An overview of spatial sampling procedures and experimental design of spatial studies for ecosystem comparisons. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2003, 94 (1): 31-47
- [4] 杨茹玮, 史学正, 于东升, 黄耀, 徐茂, 潘贤章, 金洋, 刘林旺. 基于 1:5 万数据库研究土壤空间分异及其影响因素一以江苏省无锡和常州市为例. 土壤学报, 2006, 43(3):369-375
- [5] 王彩绒, 吕家珑, 胡正义, 高义明. 太湖流域典型蔬菜地土壤氮磷钾养分空间变异性及分布规律. 中国农学通报, 2005, 21(8): 238-242
- [6] 张庆利, 史学正, 潘贤章, 于东升, 刘付程. 江苏省金坛市土壤肥力的时空变化特征. 土壤学报, 2004, 41(2): 315-319
- [7] 李丽霞, 郜艳晖, 张璞. 哑变量在统计分析中的应用. 数理医药学杂志, 2006, 19(1): 51-53
- [8] Florinsky IV, McMahon S, Burton DL. Topographic control of soil microbial activity: A case study of denitrifiers. Geoderma, 2004, 119 (1): 33-53
- [9] 中国科学院南京土壤研究所. 中国太湖地区水稻土. 上海: 科学技术出版社, 1980
- [10] 曹慧, 杨浩, 赵其国. 太湖丘陵地区典型剖面土壤侵蚀与养分流失. 湖泊科学, 2002, 14(3): 242-246