

农田土壤养分的空间变异性特征*

胡克林 李保国 林启美 李贵桐

(中国农业大学)

陈德立

(澳大利亚墨尔本大学土地和食品学院)

摘要: 对一块面积为 1 hm^2 麦田内的 98 个观测点取样分析, 测定了代表不同土壤含水率水平下的两个时期土壤表层和底层的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 Olsen-P 、表层有机质和全氮等养分。应用地统计学的方法对所取的数据进行了分析, 结果表明底层土壤的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、表层土壤的有机质服从正态分布; 其余养分基本上服从对数正态分布; 按一定的精度和置信水平确定了合理的取样数目。通过半方差函数分析, 发现这些养分在一定范围内存在空间相关性; 采用 Kriging 方法对未测点进行了估值, 绘制了等值线图, 并对两个时期的养分动态的空间变异进行了初步分析。该成果可用于提高氮肥利用率和精确农业(施肥)的研究和实践。

关键词: 土壤养分; 空间变异; 地统计学; 半方差函数

自 70 年代以来, 土壤特性的空间变异或其它农田特征变异定量化研究一直是关注的一个热点^[1,2], 但多数研究着重讨论了土壤物理性质, 土壤盐分的变化问题^[3,4]。而对于土壤养分空间变异性的研究则相对较少。国外报道了表土有效 P 和棉花地硝酸盐含量的空间变异性^[5,6]。

近年来精确农业的研究更是以空间变异做为其理论基础^[7]。有人研究了土壤中 P、K、Zn 的空间变异性, 指出了建立在传统的平均土壤测试基础上的施肥方法, 不再是经济的或有利于保护环境的方法^[8]。也有人研究了土壤中 P、K、Ca、Mg 的空间变异性, 将其与作物产量的空间变异性联系起来, 并分析对比了精确管理与传统的管理所获得的经济报酬^[9]。

本文应用了地统计学的原理研究了两个时期, 不同土壤含水率情况下, 麦田土壤养分的空间变异特征, 应用 Kriging 技术绘制了等值线图, 并对田间氮的收支平衡的空间变异也作了描述。这对于我们合理选择实验观测点及进一步研究农田氮的周转、氮的气态损失和硝酸盐对地下水的污染状况提供了科学依据。同时此项研究对制定合理的施肥灌水措施, 防止环境的污染具有直接的现实意义, 为精确农业的研究和实施也提供了一定的参考。

1 材料和方法

1.1 研究方法

试验地点设在河北省曲周县中国农业大学曲周实验站东, 面积约 1 hm^2 、土壤为粉砂质潮土的田块上, 该地小麦-玉米一年两作, 当季种植小麦。将其划分成若干个 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的网格。共设置了 98 个取样点, 分别于 0~ 20 cm 和 80~ 100 cm 两个层次上取样。采样时间分别是 1998 年 3 月 18 日(田间较干, 平均质量含水率为 17.9%) 和 1998 年 5 月 12 日(田间较湿, 平

收稿日期: 1999-03-01

* 中澳合作 ACIAR 项目(LWR1/96/164)和农业部“九五”科技攻关课题。

胡林克, 博士生, 北京市圆明园西路 2 号 中国农业大学(西校区)土壤和水科学系, 100094

均质量含水率为 21.0%)。

1.2 测定项目及测定方法

测定项目 质量含水率、速效磷(Olsen-P)、硝态氮、氨态氮等; 表层加测: 有机质和全氮。

测定方法及仪器 质量含水率: 烘干法, 在 105~110℃ 下烘 6~8 h。速效磷(Olsen-P): 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提, 水土比 20:1, 分光光度计比色法。硝态氮、氨态氮: 1 mol/L KCl 浸提, 水土比 10:1, 自动流动分析仪测定。

全氮: 凯式定氮法, 加浓硫酸和加速剂消煮, 滴定。有机质: 外热源法, 加浓硫酸和重铬酸钾 170℃ 消煮, 滴定。

数据处理采用美国盐渍土实验室开发的 GEO PACK 1.0 软件^[10]。

2 实验结果及分析

2.1 土壤属性参数的统计特征值及对比分析

2.1.1 土壤属性参数的统计特征值

从表 1 可以看出: 土壤较干(平均质量含水率为 17.9%) 时, 土壤底层的 NH₄-N、表层有机

表 1 土壤属性参数的统计特征值

Tab 1 The statistical feature values of some soil properties

土壤平均含水率/%	土壤属性	分布类型	均值	标准差	最小值	最大值	变异系数	取样数目 ($P_L = 95\%$)
17.9	表层 NH ₄ -N	lgN	10.58	2.89	3.52	256.63	0.27	29
	底层 NH ₄ -N	N	9.79	2.76	3.09	21.24	0.28	31
	表层 NO ₃ -N	lgN	37.45	6.30	7.07	347.57	0.17	11
	底层 NO ₃ -N	lgN	12.82	2.28	4.91	45.91	0.18	12
	表层 Olsen-P	lgN	13.60	1.99	5.38	35.37	0.15	8
	底层 Olsen-P	lgN	5.10	1.00	2.82	12.56	0.20	15
	表层有机质	N	9.70	0.99	7.71	12.18	0.10	4
	表层全氮	Non-lgN	0.67	0.12	0.42	1.00	0.18	13
21.0	表层 NH ₄ -N	N	13.56	2.60	8.00	21.28	0.19	14
	底层 NH ₄ -N	N	7.99	3.53	1.78	16.83	0.44	77
	表层 NO ₃ -N	lgN	4.32	2.12	1.69	55.59	0.49	94
	底层 NO ₃ -N	lgN	9.03	3.27	2.39	32.46	0.36	51
	表层 Olsen-P	lgN	11.47	2.35	3.09	59.74	0.20	16
	底层 Olsen-P	lgN	3.67	0.85	1.86	18.73	0.23	21

注: 表中有有机质、全氮含量的单位为 g/kg, 其余养分含量的单位均为 mg/kg。

质服从正态分布(经偏峰态检验和 χ^2 检验)。表层全氮既不服从正态分布, 也不服从对数正态分布。其余土壤养分均服从对数正态分布。所有养分的变异系数变化范围为 0.1~0.28, 属于中等变异强度^[10]。表层和底层的 NH₄-N 的变异程度略大, 这与影响 NH₄-N 变异的因子较多及 NH₄-N 在土壤中容易转化有关; 表层有机质的变异强度最小, 这与有机质在土壤中比较稳定有关。

土壤较湿(平均质量含水率为 21.0%) 时, 各养分的变异系数明显要大于土壤较干时各养分的变异系数, 说明了水分对各种有效态养分的转化和移动有着密切的关系。

2.1.2 统计特征的对比分析

从分布类型来看: 土壤表层和底层的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 Olsen-P 均服从对数正态分布, 表层的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的分布两次分别服从正态分布和对数正态分布; 而底层的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 均服从正态分布, 说明了表层 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的变化要比底层的复杂。

从变异系数来看: 含水率 21.0% 的土壤除表层的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 外, 其余养分的变异系数均比较干土壤(含水率 17.9%)的大, 其中变幅最大的是表层的 $\text{NO}_3\text{-N}$, 增大了 0.32, 而 Olsen-P 的变异系数变幅不大, 约在 0.3~0.5 之间。

从均值来看: 除较湿土壤(含水率 21.0%)表层的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的均值略有增大外, 其余养分的均值均比干土壤的低, 其下降的主要原因有, 作物生长对养分的吸收及各种养分在土壤中进行转化, 有一部分容易移动的养分在降雨或灌水后造成了淋失。

通过对比表 1 中各种养分的均值的变幅可以看出, 在所研究的时段内, 空间变异的程度要比时间动态变化的幅度大。

2.1.3 合理取样数目的确定

在置信水平 $P_L = 95\%$, 且精度为均值的 10% 的情况下, 得到了各观测项目的合理取样数目分别见表 1^[10]。从总体上看: 在土壤较湿时, 各种养分的合理取样数目明显要多于土壤较干时的合理取样数目, 其最大的取样数目是 94 个(土壤表层的 $\text{NO}_3\text{-N}$)。表 1 同时说明了, 在含水率不同的情况下各养分的合理取样数目也是不同的。

2.2 半方差函数的结构分析

几个半方差函数模型的简单介绍

球状模型

$$\begin{cases} Y(h) = C_0 + C_1 [1.5h/a - 0.5(h/a)^3] & 0 < h < a \\ Y(h) = C_0 + C_1 & h > a \\ Y(0) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

高斯模型

$$\begin{cases} Y(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-h^2/a^2)] & h > 0 \\ Y(0) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中 h ——分隔两点的矢量; $Y(h)$ ——半方差函数; C_0 表示块金效应(Nugget), C_1 表示基台值减去 C_0 的值; a ——影响范围, 对于球状模型则表示观测点之间的独立间距, 而高斯模型的独立间距为 $\sqrt{3}a$ 。

在半方差函数模型的确定过程中, 首先计算出 $Y(h) \sim h$ 的散点图, 然后分别用不同类型的模型来进行拟合, 得到模型的参数值及离差平方和, 选取离差平方和最小的模型类型, 最后用交叉验证法来修正模型的参数, 结果见表 2。

独立间距表示某养分观测值之间的距离大于该值时, 则说明它们之间是相互独立的。若小于该值时, 则说明它们之间存在着一定的相关关系。

从表 2 可以看出: 土壤较干时, 表层和底层 $\text{NH}_4\text{-N}$, 底层 $\text{NO}_3\text{-N}$, 表层和底层 Olsen-P 含量的独立间距分别为 38.9 m, 22.4 m, 58.5 m, 22.4 m, 39.9 m。而表层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、有机质、全氮的模型属于纯块金效应, 说明了在所布置的 10 m 间距以外, 它们的观测值之间已是完全独立的。

在土壤较干和土壤较湿时, 土壤表层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的独立间距均小于 10 m, 说明了影响其空间变异的因子很复杂。从表 2 结果可知大部分观测养分的独立间距变化范围为 22.4~58.5 m。

表 2 不同土壤属性半方差函数模型的类型及其参数值

Tab 2 The semi-variogram type of different soil properties and their parameter values

土壤平均 含水率/%	土壤属性	表层	底层	表层	底层	表层	底层	表层	表层
		NH ₄ -N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	NO ₃ -N	Olsen-P	Olsen-P	有机质	全氮
17.9	模型类型	球状	球状	纯Nugget	球状	球状	高斯型	纯Nugget	纯Nugget
	C ₀	0.30	6.87	0.275	0.157	10.19	3.20	0.994	0.014
	C ₁	0.11	0.88		0.054	23.59	1.02		
	独立间距/m	38.88	22.36	无	58.49	22.43	39.91	无	无
21.0	模型类型	球状	高斯型	球状	球状	球状	纯Nugget		
	C ₀	0.72	3.74	16.8	0.32	0.16	0.1		
	C ₁	5.54	15.67			0.0848			
	独立间距/m	22.92	38.5	无	无	25.16	无		

2.3 土壤养分的空间分布

为了更加准确地和直观地描述土壤中各种养分在空间上的分布状况, 根据所得到的半方差函数模型, 利用 Kriging 最优内插法, 最后绘制了各种养分含量的等值线图, 如下: (对于没有半方差函数模型的养分, 则直接采用线性插值法。)图 1、2 表示较干土壤(含水率 17.9%) 养分含量的等值线图。图 3 表示较湿土壤(含水率 21.0%) 减去较干土壤的 NO₃-N 含量变化等值线图。

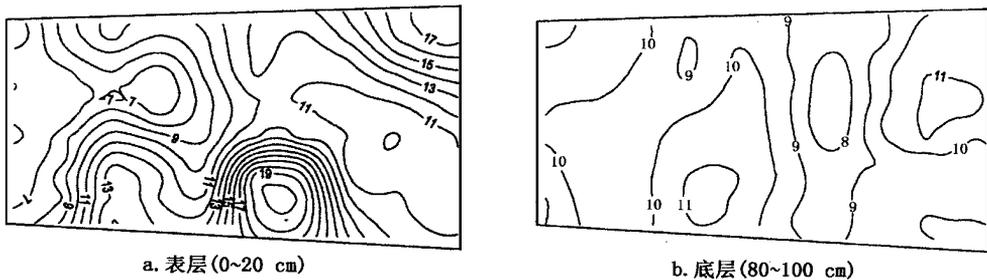


图 1 NH₄-N (mg·kg⁻¹) 含量分布等值线图

Fig 1 The contour map of NH₄-N (mg·kg⁻¹) content distribution

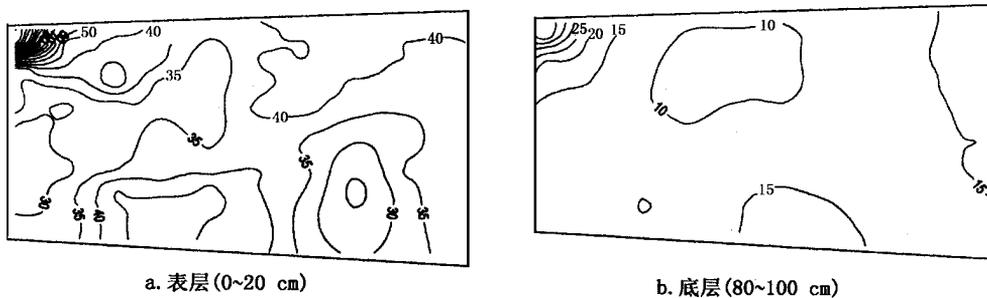


图 2 NO₃-N (mg·kg⁻¹) 含量分布等值线图

Fig 2 The contour map of NO₃-N (mg·kg⁻¹) content distribution

1) 从图 1a 可以看出, 在地块东北角和中部偏南的地方表层 NH₄-N 含量明显高于其它部

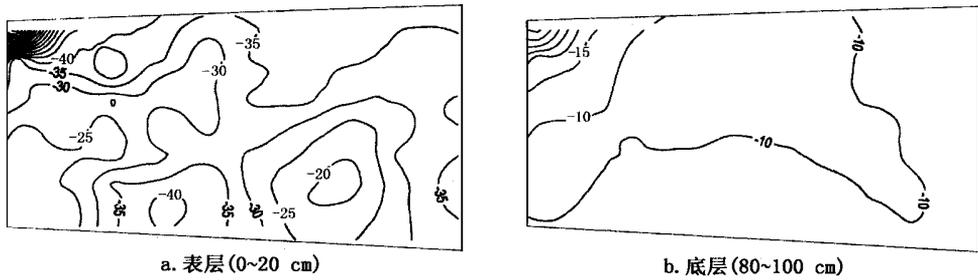


图 3 $\text{NO}_3\text{-N}$ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 含量变化等值线图

Fig. 3 The contour map of $\text{NO}_3\text{-N}$ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) content variability

位, 其最高值达 256.63 mg/kg , 而在地块的西边 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量较低, 一般在 $30\sim 40 \text{ mg/kg}$ 之间; 从图 1b 可知, 整个地块底层 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量分布较均匀, 大部分范围的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量在 $9\sim 11 \text{ mg/kg}$ 之间。

2) 从图 2a 可以看出, 表层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量西北角含量要远高于其它部位, 其最高值达 347.57 mg/kg , 可能是由于西北角施肥太多或以前堆过有机肥所造成的(西北角为施肥灌水入口), 而其它地方的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量变化则不明显, 幅度在 $10\sim 15 \text{ mg/kg}$ 之间; 从图 2b 可以看出, 底层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量分布, 出现与表层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量类似的分布情况, 西北角含量要远高于其它部位, 而其它地方的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量变化则不明显。

3) 从图 3a, b 可以看出, 整个地块表层和底层的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 在两次取样之间, 收支均为负平衡。在地块西北角的表层和底层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的减少量都比其它地方的要大, 这主要由于作物吸收。西北角原来的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的含量高, 这时下降的幅度也最大, 作物吸收量也最高, 虽未实测作物的吸收量, 但实际调查中发现此处小麦长势明显比其它地方旺盛, 除此之外, 当降雨或灌水后, 其向下的淋洗量远比其它地方大, 对地下水的污染能力也远比其它地方强。这说明了, 由于施肥不均或其它原因所造成的田间 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量的空间变异, 并不能象传统的方法所研究的那样, 用整个田间的平均值来描述其吸收或利用率以及对地下水的污染状况, 而应该考虑到某些特殊的点或区域对地下水和作物所造成的影响。为了进一步监测硝酸盐对地下水及作物方面的影响, 则应在这些局部区域布设监测点。

3 结 论

1) 从不同时期土壤养分的特征统计值来看, 土壤底层的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、表层有机质服从正态分布。其余养分基本上服从对数正态分布。这些养分的变异系数变化范围为 $0.1\sim 0.49$, 属于中等变异强度。在田间较湿时, 其变异系数要大于田间较干时的变异系数。表层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的均值变化最大, 而 Olsen-P 的均值变幅不大。在所研究的时段内(近 2 个月), 空间变异的程度要比时间动态变化的幅度大。

2) 在所研究的田间土壤养分中, 在一定的范围内观测值之间存在着空间相关关系。土壤表层和底层 $\text{NH}_4\text{-N}$, 底层 $\text{NO}_3\text{-N}$, 表层和底层 Olsen-P 含量的空间相关的极限距离范围为 $22.4\sim 58.5 \text{ m}$ 。而表层 $\text{NO}_3\text{-N}$, 有机质和全氮均为纯块金效应构型, 说明它们之间空间相关的极限距离小于 10 m 。在含水量不同的情况下各养分的空间结构也是变化的。

3) 利用 Kriging 最优内插法绘制了各种养分的等值线图, 可更加准确和直观地了解整个地块中各种养分及不同时期养分收支的空间分布状况, 对于及时调整施肥和灌水等农业管理

措施具有一定的指导作用, 是进行精确施肥研究的基础工作。

4) 通过对比不同时期表层和底层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量差值的等值线图, 可发现在田间某些特殊点, 如西北角的含量要远高于其它部位。说明由于施肥不均或其它原因所造成的田间 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量的空间变异, 并不能象传统的方法所研究的那样, 用整个田间的平均值来描述氮的转化及其对地下水的污染状况, 而应该考虑到某些特殊点或区域对地下水和作物品质所造成的影响。

[参 考 文 献]

- [1] Hillel D. Research in soil physics: a review. *Soil Sci*, 1991, 151: 30~ 34
- [2] Warrick A W And D R Nielsen. Spatial variability of Soil Physics. *Application of soil physics*, Hillel D Academic Press, New York. 1980. 319~ 344
- [3] 史海滨, 陈亚新. 土壤水分空间变异的套合结构模型及区域信息估值. *水利学报*, 1994(7): 70~ 77
- [4] Russo D. A geostatistical approach to solute transport in heterogeneous fields and its applications to salinity management. *Water Resour Res*, 1984, 20(9): 1260~ 1270
- [5] Webster R. *Advance in Soil Science*. Springer-Verlag New York Inc. 1985, 3: 2~ 70
- [6] Tabor J A, et al. Spatial variability of Nitrate in irrigated cotton. II. Soil nitrate and correlated variables. *Soil Sci Soc Am J*, 1985, 49: 390~ 394
- [7] Nielsen D R, et al. Opportunities for examining on-farm soil variability. *Site-Specific Management for Agricultural Systems*. ASA-CSSA-SSSA. 1995. 95~ 132
- [8] Tom Mcgraw, et al. Fertility variability in the Minnesota river valley watershed in 1993, as determined from grid testing result on 52,000 acres in commercial fields. *Site-Specific Management for Agricultural Systems*. ASA-CSSA-SSSA. 1995. 167~ 174
- [9] Pierce F J, et al. Yield and nutrient variability in glacial soils of Michigan. *Site-Specific Management for Agricultural Systems*. ASA-CSSA-SSSA. 1995. 133~ 152
- [10] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. *土壤水动力学*. 北京: 清华大学出版社, 1988

Spatial Variability of Soil Nutrient in Wheat Field

HU Ke-lin LIBao-guo LN Qimeimei LIGui-tong

(China Agricultural University, Beijing 100094)

CHEN De-li

(Melburne University, Parkville Victoria 3052 Australia)

Abstract Ninety-eight observing points by a square of $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ were made in a wheat field approximate 1 hm^2 . Soil samplers were obtained from each point under two layers of 0~ 20 cm and 80~ 100 cm with different soil moisture and different time. Ammonia, $\text{NO}_3\text{-N}$, Olsen-P in the soils of 0~ 20 cm and 80~ 100 cm, organic matter and total N in surface soil (0~ 20 cm) were measured. The geostatistics theory was applied to analyze the data, the results indicated that both $\text{NH}_4\text{-N}$ in bottom soil and organic matter in surface soil showed a normal distribution, others with a lognormal distribution. The rational sample number was determined within a given precision at a known confidence level. Semivariance analysis gave that those nutrients were correlated in a given spatial range. The Kriging method was applied to calculate the unobserved points and generate the contour map. Preliminary analysis was made for the spatial dynamic variability of those nutrients in different time. These results show some merit in increasing nitrogen use efficient and precision agriculture.

Key words soil nutrient; spatial variability; geostatistics; semivariance