

# 江汉平原耕地土壤氮素空间尺度套合与变异规律研究

于婧<sup>1</sup>, 周勇<sup>1,2</sup>, 聂艳<sup>2</sup>, 刘凡<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; <sup>2</sup>华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079)

**摘要:** 【目的】为克服尺度效应对氮素空间变异规律认识的影响, 更加充分的利用多尺度空间信息。【方法】利用地统计学方法, 以江汉平原后湖农场流塘分场为样区进行多尺度嵌套取样, 探讨了全氮在不同采样尺度上的结构差异, 提出了多尺度套合模型, 研究了区域氮素的空间分布现状。【结果】各尺度上样点数据均符合正态分布, 且以球状模型拟合效果最佳; 全氮在不同尺度上都存在空间变异性, 但其特征参数不同, 尺度差异明显; 采用多尺度套合模型进行 kriging 估值, 可以有效提高拟合精度, 且不局限于套合尺度的距离范围(本研究为 100 m 和 50 m), 部分区域内估计误差仅为普通克里格方法误差的 1/2, 精度提高的程度与套合尺度的设置有关。【结论】应用多尺度套合法研究土壤养分的空间变异, 可有效提高拟合结果的可靠性和变量描述的准确性, 可为精准农业方案的制定与实施提供科学依据。

**关键词:** 空间变异; 尺度效应; 嵌套模型

## Spatial Variability of Soil Nitrogen in Different Scales and Nested Simulation

YU Jing<sup>1</sup>, ZHOU Yong<sup>1,2</sup>, NIE Yan<sup>2</sup>, LIU Fan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070; <sup>2</sup>College of Urban and Environment Sciences, Centre China Normal University, Wuhan 430079)

**Abstract:** 【Objective】The purpose of this paper is to minimize the influence of the scale effect on understanding nitrogen spatial variation, and to use multi-scale spatial information adequately. 【Method】Nested scenario's were tested in a Houhu farm in the Jianghan Plain; the variation of soil total nitrogen (TN) was simulated by using geostatistics in scale of 400, 100 and 50 meters separately; effect of scale on TN variation was analyzed; the simulating method under multi-scale data was put forward; and the spatial distribution of TN was described in this region. 【Result】Data in three scales all agreed with normal distribution; spherical models fit best for semi-variogram; in different scale, TN varied under different driving factors, which led to the appearance of the scale effect. The estimation, through multi-scale simulation, was more accurate than the traditional method, which wasn't limited by nested distance(100 m, 50 m in this research). Furthermore, the standard error was only 1/2 of the original method in local area; the degree that the precision improved relates to of scale distance.【Conclusion】The simulation of soil nutrition by nested kriging method, is more reliable and concrete, which can offer a scientific basis for formulation and implementation of the precision agricultural scheme in Jianghan Plain in China.

**Key words:** Spatial variation; Scale effect; Nested simulating method

## 0 引言

【研究意义】土壤养分元素的空间分布是精准施肥、土壤演变等农业精准研究的基础<sup>[1~3]</sup>, 而土壤养

分空间变异的尺度效应正逐渐引起土壤学家们的关注。土壤学家发现, 在研究同一养分属性的空间结构时, 由于采用的空间尺度的大小不一, 其变异特征往往相差很大<sup>[4]</sup>, 给研究结果的相互参照以及农业生产

收稿日期: 2006-09-18; 接受日期: 2006-12-21

基金项目: 国家自然科学基金(40671078)和中德农业科技合作 2004/2005 项目计划(No.48)项目

作者简介: 于婧(1982-), 女, 内蒙古乌兰浩特人, 博士研究生, 研究方向为土地评价与土壤养分精准管理。Tel: 027-62027096; E-mail: qing@webmail.hzau.edu.cn。通讯作者周勇(1964-), 男, 湖南沅江人, 教授, 博士生导师, 研究方向为 3S 应用与土地资源管理。Tel: 027-67867020; E-mail: yzhou@mail.ccnu.edu.cn

方案的选择带来了很大的困扰。为了更加充分的挖掘和应用土壤空间信息,提高空间估值精度,促进学科交流,优化采样布置方案,多尺度信息的套合方法研究具有重要的意义。【前人研究进展】土壤养分空间变异研究中的尺度效应主要指土壤特征的变化对采样网格尺度大小的依赖,即某种空间结构特征只能在一定的采样尺度下表现出来<sup>[5]</sup>。为了提高研究结果的适用性和可参照性,目前多数研究都明确指出其选择的尺度<sup>[6-8]</sup>,以解决对应尺度的实际问题。也有少量报道专门论述了不同空间尺度上的土壤特征变异规律,证实了空间尺度效应的存在<sup>[9,10]</sup>。【本研究的切入点】本文基于对不同尺度上土壤变量空间结构特征的认识,拟以全氮为例,探讨多尺度信息的套合方法,揭示土壤养分在综合空间上的变异规律,提高空间估值精度,为优化采样方案提供新思路,为提高土壤养分的空间管理水平和精准农业研究提供参考和依据。【拟解决的关键问题】分析土壤氮素在不同空间尺度上的结构特征,探讨多尺度套合方法及其估值精度。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

样区设在江汉平原腹地的潜江市后湖农场流塘农场 (112°40'8"E ~ 112°41'41"E, 30°20'35"N ~ 30°22'8"N),总面积为 1 035.12 ha,其中耕地 535.95 ha。样区受亚热带季风气候影响,光照充足,四季分明,雨水充沛;地形平坦,成土母质为第四纪河湖相沉积物与河流冲积物;地面高程在 26.8~28.1 m 之间(1956 年黄海高程系),排灌条件良好;耕作制度为水旱轮作,当季作物为水稻和棉花。

### 1.2 土壤样品采集与处理

2004 年 9 月 24 日,对样区实行格网嵌套布点,共设置了 145 个样点(图 1)。采样的最大间距为 400 m,有样点 37 个;均衡选取有代表性的 3 个格网为一级加密区,以 100 m 为样本间距加密采样,有样点 75 个(其中有 12 个点与 400 m 采样点重合);同法以 50 m 为间距生成二级加密区,有样点 81 个(其中有 36 个点与一级加密点重合)。以上采样层次共同构成相互联系的嵌套体系。取表层 0~20 cm 土样,利用差分 GPS (ST-2020 型)定位,并换算成高斯-克吕格投影下的坐标系统。土壤全氮(TN)采用浓硫酸消煮,半微量开氏法测定。

### 1.3 数据分析方法

本研究主要采用 Fisher 统计学和地统计学相结合的方法,前者主要用于数据的前期检验和概率统计,后者用于对变量空间结构的分析和插值估计。

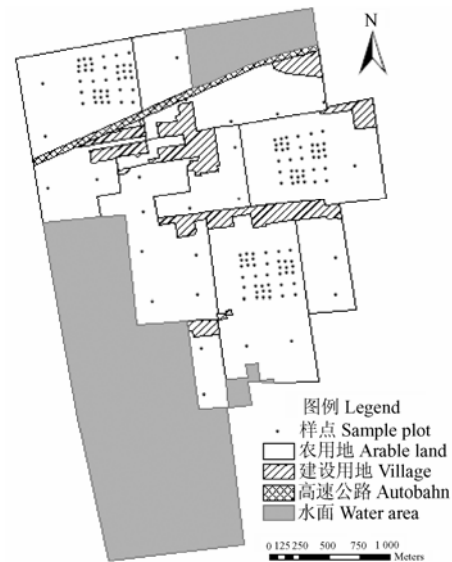


图 1 样点分布图

Fig. 1 Distribution of sample sites

1.3.1 空间变异的尺度套合模型及模型检验 半变异函数是空间结构分析和最优模拟的主要工具,其功能在于反映区域化变量的空间相关性。具有复杂变化的区域化变量的空间变异性不能用一个简单的理论模型描述,需要用两个或两个以上的理论模型描述,其结构是多个结构的相互叠加,称为套合结构<sup>[11,12]</sup>,可以用反映不同尺度变化的多个拟合函数之和表示:

$$\gamma^*(h) = \gamma_0^*(h) + \gamma_1^*(h) + \gamma_2^*(h) + \Lambda\Lambda + \gamma_n^*(h) = \sum_{i=0}^n \gamma_i^*(h)$$

式中,  $\gamma_0^*(h)$  表示微观上的变化,为最小采样尺度上仍不能表示的空间结构性,即套合结构的块金方差,  $\gamma_i^*(h)$  为可相同也可不同的理论模型,是不同尺度上表现出的空间结构性。

本研究采用 I 值作为综合指标进行理论模型的最优性检验<sup>[13]</sup>。

$$I = \overline{(z - z^*)^2} \times \left[ P \times \left| 1 - \frac{1}{\left| \frac{z - z^*}{S^*} \right|^2} \right| + (1 - P) \right]$$

$$P = \begin{cases} 0.1, & 0 \leq (z - z^*)^2 \leq 100 \\ 0.2, & 100 \leq (z - z^*)^2 \end{cases}$$

式中,  $z^*$  是某实测点上的克里格估计值,  $z$  为

实测值,  $S^*$ 是相应的克里格估计标准差。I 值越小表明变异函数模型对变量结构的代表性越好<sup>[14]</sup>。

1.3.2 Kriging 插值及其精度估计 应用套合模型, 借助 ArcGIS8.3 的 Geostatistics 模块, 获取研究区域内土壤全氮的空间分布图和估值方差图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤全氮的概率统计特征

样区土壤全氮在各采样尺度上的均值与中值接的

近, 说明样区整体氮素分布较为均匀, 未受到特异值影响; 随着采样间距的减小, 均值与中值间差异略有增大, 而标准差减小, 表明在 M、S 样区中, 数据的集中性较 L 区明显提高, 但在各小区合并过程中, 样区全氮的局部均值对该尺度整体分布有一定的影响; 应用 Kolmogorov-Smirnov 方法进行正态检验, 在 3 个尺度上检验概率均远大于 0.05, 故而各尺度上样点数据均满足正态分布, 样点合并未改变其整体分布特征可作为同一整体进行研究。3 个尺度上土壤全氮属于中等变异。

表 1 土壤全氮统计特征值

Table 1 Descriptive statistics for TN ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

研究尺度 Scale	L (间距 Space: 400 m)	M (间距 Space: 100 m)	S (间距 Space: 50 m)
样本数 Sample number	37	75	81
值域区间 Min~Max	0.738~2.812	0.738~2.302	0.983~2.720
均值 Mean	1.768	1.605	1.657
中值 Median	1.764	1.590	1.619
标准差 Standard deviation	0.497	0.314	0.313
P (K-Stest)	0.999	0.985	0.945
变异系数 CV (%)	28.11	19.56	18.89

### 2.2 各尺度下土壤氮素的空间变异特征

应用简单克里格法对样区各采样尺度下全氮的结构进行拟合, 理论变异函数及检验参数如表 2。各尺度上土壤全氮的空间变异结构均以球状模型拟合效果最佳。随着采样间距的增大, 变程、块金方差、基台值增大, 表明在各研究尺度上全氮的空间变异性都存在, 并表现出不同的空间结构性。S、M 尺度上, 变程值均大于 300 m, 且结构方差变化不大, 说明两者的空间结构性都能在 M 尺度上表现出来, 如考虑工作量等其它因素, 可以通过 M 尺度上的样点来近似研究 S 尺度上的变异; 但随着采样间距的增大, 块金方差明显增大, 空间结构系数  $C/(C_0+C)$  减小, 表明采样间距内的不可估计误差逐渐增大, 空间结构的表现能力在逐渐减弱。M、L 两个研究尺度, 各主要参数均有较大变化, 尤其结构方差明显增大, 表明随着研究

尺度的增大, 在 M、S 尺度上不能表现出差异的背景因素在 L 尺度上发挥了较大的作用; 虽然两者尚属于同一级空间结构, 但若采用 L 尺度采样方案研究 M 尺度的变异特征, 将明显降低结果的准确性。从 I 值检验的结果来看, I 值随着采样间距的增大而增大, 说明变异函数对结构的代表性随着更多小结构被掩盖而逐渐降低。综上所述, 研究区域土壤全氮的空间结构对采样尺度的依赖性明显, 不能用某一尺度上的变异函数来表示, 而需研究不同尺度的套合模型来拟合全氮的变异特征。

### 2.3 多尺度模型拟合

根据尺度套合理论, 新模型的块金方差为最小尺度 (S) 上不能表征的空间变异, 即 0.022, 且各尺度均满足球状模型, 可得套合结构模型:

由于研究中采用嵌套采样, 样点局部加密, 总体

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0.022 & h=0 \\ 0.022 + \frac{3}{2} \left( \frac{0.066}{348.2} + \frac{0.066}{696.4} + \frac{0.187}{3162.3} \right) h - \frac{1}{2} \left( \frac{0.066}{(348.2)^3} + \frac{0.066}{(696.4)^3} + \frac{0.187}{(3162.3)^3} \right) h^3 & 0 < h \leq 348.2 \\ 0.088 + \frac{3}{2} \left( \frac{0.066}{696.4} + \frac{0.187}{3162.3} \right) h - \frac{1}{2} \left( \frac{0.066}{(696.4)^3} + \frac{0.187}{(3162.3)^3} \right) h^3 & 348.2 < h \leq 696.4 \\ 0.154 + 0.187 \left( \frac{3}{2} \times \frac{h}{3162.3} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{(3162.3)^3} \right) & 696.4 < h \leq 3162.3 \\ 0.341 & h \geq 3162.3 \end{cases}$$

表 2 各尺度半方差拟合函数特征参数

Table 2 Parameters of semivariogram in different scale

研究尺度 Scale	模型 Model	变程 Range (m)	块金方差 $C_0$ Nugget	结构方差 $C$ Partial sill	$C+C_0$	$C/(C_0+C)$ (%)	$I$
S	球状模型 Spherical model	348.2	0.022	0.066	0.088	75.0	0.042
M	球状模型 Spherical model	696.4	0.062	0.066	0.128	51.6	0.079
L	球状模型 Spherical model	3162.3	0.107	0.187	0.294	63.6	0.151

空间分布上不均衡,不宜对总样点直接使用普通克里格法进行半方差的估计<sup>[12,15]</sup>,故而本文选用套合模型和普通克里格方法分别对样区 400 m 样点进行估值,并绘制克里格估计方差图(图 2、图 3),以比较两种方法的估值精度,并为土壤养分空间变异研究的样点方案设计提供参考和依据。套合模型的估值精度有较大的变幅,且对距离的变化更为敏感。在距离各样点 100 m 以内,估值精度较普通克里格法有大幅度提高,部分区域估值误差仅为普通克里格法拟合误差的 1/2。但随着与样点距离的增大,精度也呈逐渐降低趋势,当距离达到 200 m 以上时,套合模型提高精度的作用开始明显减弱,至 250 m 时精度值与普通克里格法没有明显差异,甚至局部区域精度低于普通克里格法。可见,使用模型套合的方法可在大尺度样点信息的基础上获得比普通克里格法更高精度的估值结果,且不局限于加密尺度的距离范围(本研究中为 100 m 和 50 m)。

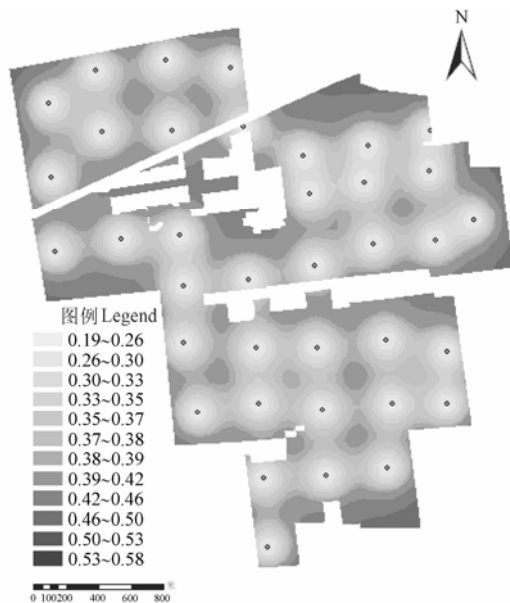
图 2 全氮套合模型法插值克里格标准差图 ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Fig. 2 Prediction standard error map by nested model

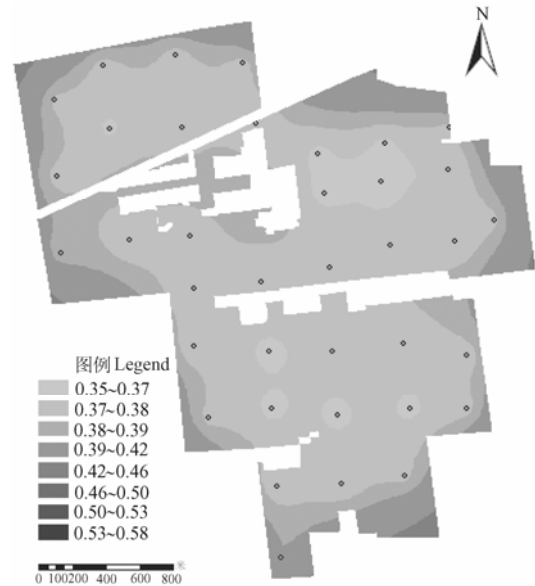
图 3 全氮普通克里格方法插值标准差图 ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Fig. 3 Prediction standard error map by ordinary Kriging method

另外,空间估值的精度存在边际效应,即误差的高值区域集中在样区的边界,样区边界精度衰减较内部更为迅速。其原因在于边界区域参与空间插值的样点个数减少,且对待估点存在一定的方位影响,所以两种方法中边界区域的估值精度都有较大的降低;模型套合后对距离的变化更为敏感,在样区边界不能获得相邻样点的信息补充,其精度随距离的增大降低更快。

## 2.4 土壤全氮的空间分布

经套合模型拟合后,应用 Kriging 法对样区全氮进行插值,得到其空间分布图(图 4)。氮素在土壤中以有机态为主,小范围内其量的消长主要与耕作措施、水热条件和生物累积分解作用有关<sup>[16]</sup>。鱼塘四周土壤水热条件好,有利于土壤全氮的累积,同时鱼塘的定期清淤使周围局部区域形成高氮块状区;样区中部建设用地为该分场农业技术推广管理站所在地,对其周围的农业指导和管理较多,在施肥供水控制等方面有

较好的技术优势; 样区的东部、北部区域以种植棉花为主, 一方面旱地土壤湿度较低, 热容量小, 氮的矿化较强, 损失相对较大<sup>[17]</sup>, 另一方面, 棉花对养分的需求量较大, 而本次采样恰好为棉花收获季节, 土壤尚未休耕及施肥, 导致土壤氮素含量较低。

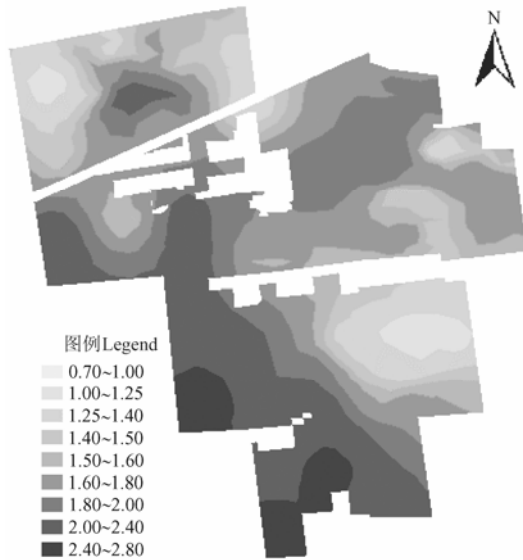


图 4 样区耕地土壤全氮分布图 ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Fig. 4 Spatial distribution map of TN

在空间结构性方面, M、S 尺度上水热条件变化较舒缓, 整体管理水平、耕作制度等方面差异不大, 故而其向各方向上扩散较均匀, 等值线平滑, 空间分布有团块状趋势; 而在 L 尺度上土壤水热条件、耕作方式、管理水平等要素均对土壤全氮的分布产生影响, 从而在整体上表现出了条带状分布特征。

### 3 讨论

研究区土壤全氮在不同的尺度上因受不同因素的影响形成相对应的结构性特征, 从而形成其空间分布对空间尺度的依赖, 产生尺度效应。采用多尺度模型套合的方法可以使估计误差明显降低, 有效提高区域空间变异的拟合精度。尤其对于不具备全研究区域高密度采样条件, 对估值精度又有较高要求的研究, 可考虑通过此种局部加密套合的方法来提高估值精度。

空间估值精度提高的程度与尺度的设置有密切的关系, 通过选择最佳尺度, 可以获取高精度估值的同时尽可能的减小采样分析工作量<sup>[18]</sup>。本研究中, 依据形成空间变异尺度效应的因素差异性, 综合考虑地统计学的基本原则和研究区的实际情况, 确定采样尺度

为 400、100 和 50 m。土壤类型、地形地貌、耕作制度等区域性因素一般在 400 m 及以上的大尺度范围内才能表现出明显的差异性, 而施肥类型、水肥管理、生物作用等具有农户个人特征的因素差异性在 100 m 及以下的较小尺度更加突出; 200 m 介于 100 m 与 400 m 之间, 其反映空间变异尺度差异性的因素与 100、400 m 两个尺度具有很强的相关性, 尺度代表性差, 因而在本次研究中没有考虑。通过本研究的多尺度套合模型及其空间变异特征分析, 笔者发现模型套合后对于距离的变化更为敏感, 虽然模型套合法提高估值精度的作用不局限于加密尺度 (本研究为 100 和 50 m), 但在距离样点 200 m 后, 提高估值精度的作用明显下降, 如若增设 200 m 加密尺度, 或在典型区域集中设置加密区, 通过提高一定范围内 100 m 样点的数量, 间隔取样来获取 200 m 尺度上的空间结构, 可能对于整体提高插值精度有重要的意义, 进而可探讨形成该种现象的具体原因。

土壤类型、地形地貌、局部水热条件、水肥管理措施和水平等因素是土壤氮素空间变异产生的根源, 如能深入开展不同尺度上土壤氮素空间变异的驱动力研究, 对于理解氮素的时空演变、获取最佳采样和制图尺度、优化样点布局等方面具有尤其重要的作用。

### 4 结论

4.1 土壤全氮在不同尺度上都存在空间变异性, 但由于影响因素的差异, 其特征函数不同, 尺度效应明显; S、M 尺度的空间结构性都能在 M 尺度上表现出来, 如考虑工作量等其它因素, 可以通过 M 尺度上的样点来近似研究 S 尺度上的变异; M、L 两个研究尺度, 各主要参数均有较大变化, 简化采样方案将对估值精度有较大影响。

4.2 多尺度嵌套方法可以有效提高空间插值的精度, 且不局限于加密尺度的距离范围, 部分区域内估计误差仅为普通克立格方法误差的 1/2, 精度提高的程度与尺度设置有关。同时, Kriging 插值精度存在边际效应, 模型套合后对距离的变化更为敏感。

4.3 研究区西部及中部北部的部分地区全氮含量基本符合中国中高产粮田的要求, 但应进一步提高土壤的保肥供肥能力。东部及北部低氮区域应适当增加施肥量, 注意有机、无机肥料的配施, 加强水肥管理, 采用适时休耕或与豆类作物轮作等方式, 以保证土壤肥力的恢复。

## References

- [1] Cerri C E P, Bernoux M, Chaplot V, Volkoff B, Victoria R L, Melillo J M, Paustian K, Cerri C C. Assessment of soil property spatial variation in an Amazon pasture: basis for selecting an agronomic experimental area. *Geoderma*, 2004, 123 (1-2): 51-68.
- [2] 杨玉玲, 盛建东, 田长彦, 文启凯. 盐化灌淤土壤速效氮、磷、钾空间变异性与棉花生长关系初步研究. *中国农业科学*, 2003, 36: 542-547.
- Yang Y L, Sheng J D, Tian C Y, Wen Q K. A study on relationship between the spatial variability of saline anthropogenic alluvial soil available nitrogen, phosphorous, potassium and cotton growth. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36: 542-547. (in Chinese)
- [3] Welsh J P, Wood G A, Godwin R J, Taylor J C, Earl R, Blackmore S, Knight S M. Developing strategies for spatially variable nitrogen application in cereals, Part II: wheat. *Biosystems Engineering*, 2003, 84: 495-511.
- [4] Mallarina A. P. Spatial variability patterns of phosphorus and potassium in no-tilled soils for two sampling scales. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60: 1473-1481.
- [5] 徐 英, 陈亚新, 史海滨, 魏占民. 土壤水盐空间变异尺度效应的研究. *农业工程学报*, 2004, 20(2): 1-5.
- Xu Y, Chen Y X, Shi H B, Wei Z M. Scale effect of spatial variability of soil water-salt. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(2): 1-5. (in Chinese)
- [6] Herbst M, Diekkrüger B. Modeling the spatial variability of soil moisture in a micro-scale catchment and comparison with field data using geostatistics. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003, 28: 239-245.
- [7] Castrignanò A, Maiorana M, Fornaro F. Using regionalised variables to assess field-scale spatiotemporal variability of soil impedance for different tillage management. *Biosystems Engineering*, 2003, 85: 381-392.
- [8] Bocchi S, Castrignanò A, Fornaro F, Maggiore T. Application of factorial kriging for mapping soil variation at field scale. *European Journal of Agronomy*, 2000, 13(4): 295-308.
- [9] Stenger R, Priesack E, Beese F. Spatial variation of nitrate-N and related soil properties at the plot-scale. *Geoderma*, 2002, 105(3-4): 259-275.
- [10] Rastetter E B, King A W, Cosby B J. Aggregating fine-scale ecological knowledge to model coarser-scale attributes of ecosystems. *Ecological Applications*, 1992, 2: 55-70.
- [11] Journel A G, Huijbregts C J. *Mining Geostatistics*. London: Academic Press, 1978.
- [12] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999.
- Wang Z Q. *Geostatistics and Its Application in Ecology*. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese)
- [13] 陈亚新, 史海滨, 魏占民. 土壤水盐信息空间变异的预测理论与条件模拟. 北京: 科学出版社, 2005.
- Chen Y X, Shi H B, Wei Z M. *Conditional Simulation and Prediction Theory of Spatial Variability of Soil Water-Salt*. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [14] Giménez D, Allmaras R R, Naterc E A, Huggins D R. Fractal dimensions for volume and surface of interaggregate pores—scale effects. *Geoderma*, 1997, 77(1): 19-38.
- [15] 王仁铎, 胡光道. 线性地质统计学. 北京: 地质出版社, 1988.
- Wang R D, Hu G D. *Linear Geostatistics*. Beijing: Geological Press, 1988. (in Chinese)
- [16] Cain M L, Subler S, Evans J P, Marie-Josée F. Sampling spatial and temporal variation in soil nitrogen availability. *Oecologia*, 1999, 118(4): 397-404.
- [17] Baxter S J, Oliver M A, Gaunt J. A geostatistical analysis of the spatial variation of soil mineral nitrogen and potentially available nitrogen within an arable field. *Precision Agriculture*, 2003, 4(2): 213-226.
- [18] Yemefack M, Rossiter D G, Njomgang R. Multi-scale characterization of soil variability within an agricultural landscape mosaic system in southern Cameroon. *Geoderma*, 2005, 125(1-2): 117-143.

(责任编辑 李云霞)