

土壤水盐空间变异尺度效应的研究

徐英¹, 陈亚新², 史海滨², 魏占民²

(1. 扬州大学水利科学与工程技术学院, 扬州 225009; 2. 内蒙古农业大学水资源与水土工程研究所, 呼和浩特 010018)

摘要: 水文学和土壤学中的尺度问题是目前水土科学研究的前沿课题之一。该文利用空间信息科学——地质统计学, 根据设计的各种田间网格, 在一维和二维(平面)空间中初步研究了黄河河套平原长胜试验区中小尺度的土壤水分和盐分随采样尺度所表现出的空间变异(结构性)的某些规律, 表明采样尺度的划分和选取与水分和盐分的空间变异性大小有密切关系, 尺度效应的研究对于指导农业技术研究中野外采样系统设计、节省外业调查的工作量及科学地进行内业计算、评估和揭示农业工程中具有地学特征的区域性自然规律有重要作用。

关键词: 尺度效应; 土壤特性; 空间变异性; 地质统计学; 变异函数

中图分类号: S153.6; S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)02-0001-05

0 引言

水文学和土壤学的尺度问题(包括时间和空间尺度)是“国际地圈生物圈计划”(IGBP)核心项目之一——水文循环的生物圈(BAHC)中的重要探讨内容,也是当今国际上水土科学的前沿性课题。传统科学中尺度概念十分淡薄,一般没有有意识地主动考虑尺度的作用及不同尺度间的联系和转换,但尺度问题始终客观存在。随着研究目标的扩大和深入,从微观尺度向宏观尺度及更高时空分辨率方向扩展,原来的传统理论、模型需要均化和再参数化,产生新的理论和模型,以便适应现代生产需要,包括聚集(up scaling)和解集(down scaling),进行尺度转换和方向协调。

怎样认识不同尺度水文学和土壤学的规律,除了要坚持原水土科学的实践外,更需要补充新的理论和方法以拓宽研究思路,揭示和认识水文学和土壤学中变量时空变化过程的特征、类型划分及变化规律的量化方法,这种过程的不均一性,也称时空变异性,是尺度研究的基础。由于尺度问题至今仍远未解决,已成为区域性水土资源规划、开采利用和监测管理的严重障碍。

本文重点讨论空间尺度问题。地球科学的分支,包括水文学、土壤学和其他自然科学资源中,许多变量是区域化的,即具有随机性和结构性双重特征,研究这些空间信息的统计特征时,最有用的工具之一是地质统计学(Geostatistics, 简写 GS),它通过变异函数定量描述其空间变异规律。一般空间尺度效应泛指变量的变异特征对研究区域或单元的面积、采样网格距离或仪器测量面积的大小的依赖性,而 GS 研究的尺度效应主要指变异函数的“块金效应”和“变程”对空间采样网格尺度大小(采样位置决定的)的依赖现象,更确切的说,尺度效应是指土壤特征(水分和盐分)的变化对采样网格尺度大小的依赖,某一种采样尺度只能揭示相应的变化规

律,某一种空间结构特征只能在一定采样尺度下才能表现出来。所以空间采样尺度的确定与研究问题的性质(如空间变异性的揭示)及要求密切相关,决定着采样点、网的设计密度和工作量的大小以及资金的投入,因而要尽可能在研究尺度效应的基础上,采取适宜的采样设计防止盲目实施,加强理性设计。

20 世纪 80 年代的理论成果和野外试验结果都表明,由于空间变异性的存在,在土壤水-地下水动力学室内(微观尺度)测得的弥散系数比同类介质在野外(宏观尺度)条件下求得的结果相差几个数量级。孔隙介质的水力传导系数在粘土和砂砾交互沉积的含水层中变化幅度可达 13 个数量级,孔隙率变化可达 2 个数量级。Dagan (1986)对天然含水层空间变异性提出了 3 种基本尺度和主要特征。M. A. Oliver (1986)在利用套合取样确定土壤空间变异性的尺度研究中发现,小尺度上大量重复取样是没有必要的,完全可用较大尺度进行精确的估计,并求得所研究区域土壤特性变化的平均范围。M. M. Moustafa (1995)在埃及利用地质统计学估计了大尺度下暗管排水设计的导水系数代表值。M. Sylla, A. Stein 等 (1995)在西非红树林农业生态系统中,对不同尺度下的土壤盐分空间变异进行了研究,用地质统计学建立微观空间变异模型,以此定义在宏观尺度下的主要环境因子和中尺度下的次要环境因子及微观尺度下的盐分分类,发现嵌套回归和地质统计学在解决影响盐分空间变异性问题中具有互补性。G. R. Sposito (1998), T. C. J. Yeh (1998)对非饱和土壤水分运动尺度问题进行了基本理论和方法的探讨,对水分运动 Richards 基本方程采用随机手段进行了相似性研究,试图把微单元(尺度)建立的微分方程应用于不同尺度的尺度转换。总之,到 20 世纪 90 年代末期,利用地质统计学的理论和方法在探讨和揭示土壤和水文地质的尺度效应、尺度转换、采样系统设计和参数推求等方面已经开展了大量的起步研究,得到了广泛重视。

1 采样网格设计

试验区设在黄河河套平原长胜乡,为规则的长方

收稿日期: 2003-04-10 修订日期: 2004-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(51079013)

作者简介: 徐英(1972-),女,工学博士,主要从事水土资源时空变异的研究。扬州 扬州大学水利科学与工程技术学院,225009

形,面积(500 m × 1100 m =)55 hm²。1998 年秋浇前(9 月中旬)和 1999 年夏灌前(4 月下旬)在试验区用剖面法采集土壤样本。方案如下:沿试验区东西、南北方向每隔 100 m 用剖面法采集表层 1 m 深度(分 5 层:0~ 20 cm, 20~ 40 cm, 40~ 60 cm, 60~ 80 cm, 80~ 100 cm)内的土样,构成 100 m × 100 m 中尺度网格,样品分析成果包括土壤全盐量、土壤水分含量、EC 值、pH 值以及土壤 8 个主要离子含量。此外,在采样区东西、南北方向的中线上分别布设有加密采样的基线(南北基线和东西基线),基线上每隔 25 m 取样,样品分析成果与大网格点相同。本文以秋浇前表层 1 m 内土壤全盐量及土壤水分含量的平均值为例,研究土壤水盐特性空间变异的尺度效应。采样点布置如图 1,全部试区包含中小尺度组成的嵌套结构形式。

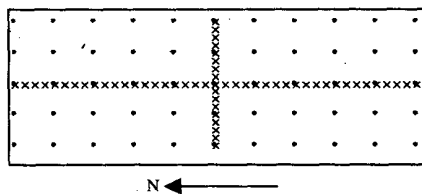


图 1 采样点布置

Fig 1 Layout of sampling points

2 地质统计学分析方法

地质统计学是研究区域化变量空间分布结构特征规律的有效手段,它的基本工具——变异函数可由下式估计(Journel 和 Huijbregts, 1978)

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

式中 $\hat{\gamma}(h)$ —— 实验变异函数; $\gamma(h)$ —— 理论变异函数; x —— 采样位置; $Z(x_i)$ —— 采样点 x_i 处区域化变量的实测值; $N(h)$ —— 间隔为 h 的点对数目; h —— 信息点之间的间隔(或距离),称为滞后距, h 的最小值为最小滞后距,用 hr 表示,它是第一个实验变异函数点到纵轴的距离(图 2)。变异函数可以反映和刻画区域化变量的许多性质,是分析其空间变异的重要工具。本文使用的理论变异函数模型——球状模型有 3 个重要参数,即变程 a 、基台值 $C + C_0$ 和块金常数 C_0 。变程反映变量的影响范围;基台值反映变量在该方向上的变异程度;块金常数能反映当采样间距远大于小(或微观)结构的变程时不能区分出来的那些变化性的总和(包括变量随机性大小)(见图 2)。

理论变异函数模型是用加权多项式回归法拟合的,其最优性一般用以下 3 个指标检验:(1)刀切法,即计算 $(z^* - z)^2$ 的值(z^* 是某实测点上的 Kriging 估计值, z 其是实测值),该值越小表明理论模型确定的越好;(2)离散方差检验法即计算 $[(z^* - z)/s^*]^2$ 的值(z^* , z 的意义同上, s^* 是相应的 Kriging 估计标准差),该值绕 1 波动表明理论变异函数确定的好;(3) I 值检验法,它是上述两种检验指标综合成的一个检验理论变异函数最优性的指标

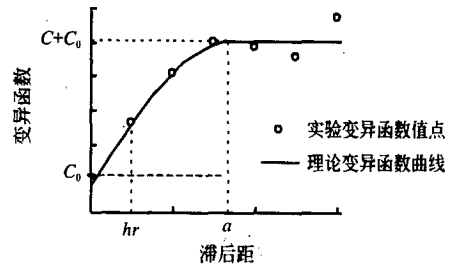


图 2 变异函数图的各参数

Fig 2 Parameters of semivariogram

$$I = \frac{1}{(z^* - z)^2} \cdot \left[P \cdot \left| 1 - \frac{1}{[(z^* - z)/s^*]^2} \right| + (1 - P) \right] \quad (2)$$

式中 $P = \begin{cases} 0, 1, & \text{当 } 0 < (z^* - z)^2 < 100 \text{ 时,} \\ 0, 2, & \text{当 } 100 < (z^* - z)^2 \text{ 时} \end{cases}$, P 为经验性参数。 I 值越小表明变异函数确定的越好。这种方法的好处是可以同时检验变异函数计算的好坏与变异函数图拟合的好坏。本文主要采用 I 值检验法进行理论变异函数的最优性检验,同时,以 $(z^* - z)^2$ 为参考,因为 I 值越小表明理论变异函数模型对变量结构的代表性越好, $(z^* - z)^2$ 越小表明用该模型所做的估计或模拟效果越好。

3 土壤水盐的尺度效应研究

本文以试验区南北基线的水分和盐分含量为例,根据一维条件下不同采样尺度的土壤水分和盐分的变异函数,讨论它们的变异性;并以整个试验区平面上采样点的各向同性(或全方位)变异函数,分析不同采样尺度下二维平面上土壤水盐的空间变异性,探讨该研究区土壤水盐变异性对采样尺度的依赖性。要说明的是:由于试验区采样尺度是固定的,所以文中采用不同的最小滞后距 hr 反映不同的采样尺度,即分别以不同的 hr 为基本步长,在一维的南北基线上或二维平面上选取等间距的采样点构成不同密度的信息组来获得不同采样尺度下的变异函数。

文中数据处理均使用作者在 VB 6.0 环境下编制的软件包(实用性、正确性已经多组实例验证),并用 Excel2000 绘图。

3.1 一维条件下不同尺度的土壤水分和盐分变异性

按最小滞后距 $hr = 25, 50, 75, 100$ m 4 个尺度分别计算秋浇前(1998 年)试验区平面样地南北基线上水盐的变异函数,理论变异模型及检验参数如表 1、表 2。从变异函数图 3 及表 1 可以看出,水分的变程在 4 个最小滞后距,即 4 个采样尺度下并没有明显变化,都在 450 m 左右,这表明该区域的土壤水分在南北方向上的结构性较好,其影响范围大于二维平面中尺度采样间距 100 m,可见,25、50、75 m 采样间距上的变化性在 100 m 尺度上仍然保持着,可以在 100 m 的采样尺度下表现出来。实际上,采样间距在 25~ 100 m 之间变化时,秋浇前水分变异函数的变程及变化幅度都没有太大变化,这种较稳定的变异性对采样是非常有利的,因为稳定的变程和变幅表明采样尺度在 25~ 100 m 之间,土

壤水分表现出几乎相同的结构, 在变程内具有很好的连续性, 完全可以用 100 m 的采样尺度反映 25 m 尺度上的结构, 从而节省采样工作量。

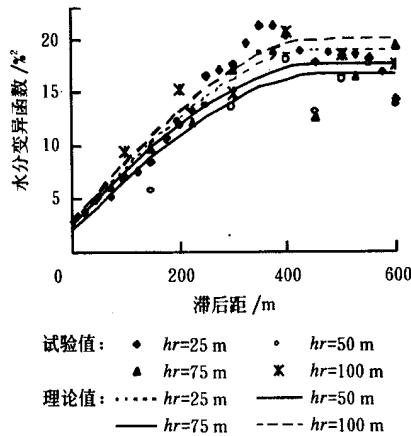


图 3 试验区南北基线上不同采样尺度的水分变异函数图

Fig 3 Semivariogram at different sampling scales for water content on the S-N baseline of the study area

与水分不同, 随最小滞后距的增加, 盐分变异函数图(图 4)的基台值变化较大, 且变程也随 hr 增大, 表明在 25~ 100 m 的各个尺度上, 土壤盐分的空间变异性都存在, 并表现出不同的结构性。但各尺度下变程都大于 100 m, 表明 25~ 100 m 采样尺度上的变化性都可以在 100 m 采样间距的变异函数中表现出来, 即较大尺度的变异性包含着较小尺度的变异性, 25~ 100 m 属于同一级的结构, 所以可以用中尺度 100 m 的信息点估计或模拟间距为 25 m 的各点处土壤盐分含量。

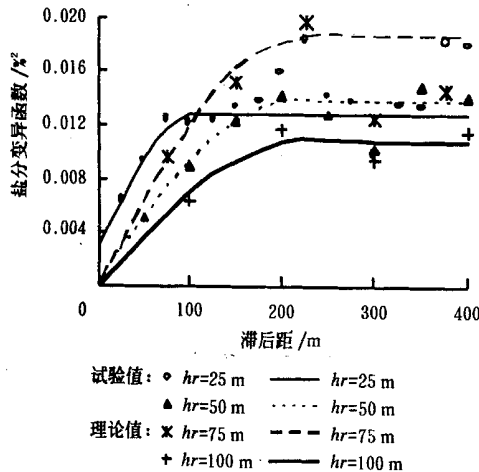


图 4 试验区南北基线不同采样尺度的盐分变异函数图

Fig 4 Semivariogram at different sampling scales for salt content on the S-N baseline of the study area

从秋浇前土壤水盐的理论变异函数及其检验参数(表 1 及表 2)可以看出, 尽管水分在 25~ 100 m 尺度上表现出近似相同的结构性, 盐分表现为同一级的结构, 但理论变异函数的最优性检验指标 I 值随最小滞后距(或采样尺度)增大相应增大了, 此外, 利用理论变异函数模型反过来对各实测点进行 kriging 估值时, 其误差平方的平均值 $(z^* - z)^2$ 也随最小滞后距的增加而增加了, 说明采样的尺度也不能过大, 采样尺度增加, 采样工作量虽可减小, 但变异函数对结构的代表性及估计、

模拟精度都会相应降低。因为采样网格越大, 就会有更多的小结构被掩盖, 以块金常数的形式表现出来。

表 1 不同采样尺度(最小滞后距)条件下, 试验区南北基线水分的球状理论模型及有关检验参数

Table 1 Model parameters and statistics of validation for semivariograms at different sampling scales for water content on the S-N baseline of the study area

最小滞后距/m	块金方差/% ²	基台值/% ²	变程/m	$(z^* - z)^2$ / % ²	I
25	2.52	18.81	459.72	4.67	4.21
50	2.29	16.31	462.94	5.90	5.34
75	2.64	17.54	453.89	7.11	6.44
100	3.20	20.50	466.66	11.35	10.30

表 2 不同采样尺度(最小滞后距)下, 试验区南北基线盐分的球状理论模型及有关检验参数

Table 2 Model parameters and statistics of validation for semivariograms at different sampling scales for salt content on the S-N baseline of the study area

最小滞后距/m	块金方差/% ²	基台值/% ²	变程/m	$(z^* - z)^2$ / % ²	I
25	0.003	0.0098	104.9	0.0081	0.0073
50	0.0004	0.0134	213.4	0.0081	0.0074
75	0	0.0185	215.8	0.0115	0.0104
100	0	0.0107	210.3	0.0111	0.0102

3.2 二维平面不同尺度下土壤水分和盐分的变异性

实际研究中, 研究目标往往不是一条线状的空间, 而是一个区域, 区域上的水分和盐分的变异性及其估计或模拟更为人们所关注, 而区域(二维)上水盐的变化性往往与一条线(一维)上的变化性不完全相同, 下面就试验区土壤水盐数据, 分析二维平面上不同尺度的土壤水盐变异性。表 3 为该试验区 1 m 内土壤水盐含量的统计特征值, 可以看出, 盐分的变异系数大于水分, 即盐分的变异程度大于水分的变异程度。若按一般对 C_v 值的评估, 当 $C_v < 0.1$ 时, 称弱变异性, $0.1 < C_v < 1.0$ 为中等变异性(土壤水动力学, 雷志栋), 则秋浇前土壤水分属中等(偏弱)变异性, 土壤盐分属中等变异性。

表 3 试验区 1 m 土壤水盐统计特征表

Table 3 Statistical parameters of soil water content and salt content in 1 m soil layer in the study area

	均值/%	方差/% ²	变异系数
含水率	20.63	19.87	0.213
含盐率	0.29	0.01	0.34

为了更深入了解二维区域上土壤水分和盐分的空间变异情况及其尺度效应, 文中分别计算了采样间距为 100 m × 100 m 和 200 m × 200 m 网格点上的变异函数, 也即最小滞后距为 100 m 和 200 m 的变异函数, 变异函数图如图 5、图 6 所示。它们的理论变异函数模型检验结果见表 4。很显然, 二维平面上土壤水分和盐分的变程都较大, 采样间距为 100 m × 100 m 的结构性可以在 200 m × 200 m 间距的网格上体现出来, 或者说可以用间距为 200 m × 200 m 的采样点模拟或估计 100 m × 100 m 采样间距的网格上未采样点值。但 $(z^* - z)^2$ 及

I 值随采样间距而增加又表明采样尺度增加虽可减轻采样工作量, 却增大了估计和模拟的误差, 采样尺度越大对于本级结构的代表性就越差。

表 4 平面样地土壤水盐在各向同性条件下的球状理论模型及有关检验参数

Table 4 Model parameters and statistics of validation of semivariograms for salt content and water content under isotropic condition

土壤特性	采样尺度 /m × m	块金方差 /% ²	基台值 /% ²	变程 /m	$(z^* - z_0)^2$ /% ²	I
水分	100 × 100	1.78	17.8	436	8.4	7.72
	200 × 200	2.1	24.1	539	11.76	10.98
盐分	100 × 100	0.0011	0.006	280	0.0050	0.0046
	200 × 200	0.004	0.006	565	0.0114	0.0106

由图 5 可以看出, 对于土壤水分, 采样尺度为 100 m × 100 m 和 200 m × 200 m 两种情况下, 试验变异函数值点波动都不大, 都较接近各自的理论变异函数值, 说明土壤水分在 200 m 范围内连续性(或结构性)是较好的。对于盐分(图 6)而言, 随采样尺度的增加变异函数值点的波动变大, 而且变程及块金常数也突然增加, 这实际上表明间隔 200 m 以后土壤盐分的连续性下降很快, 也许再增加采样间距得到的变异函数已不能反映该区域土壤盐分的结构。盐分变异函数的这种表现说明

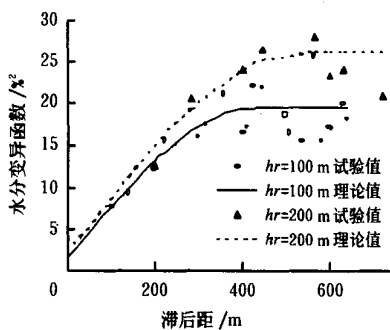


图 5 各向同性条件下二维平面上土壤水分变异函数图

Fig 5 Isotropic semivariograms for soil water content

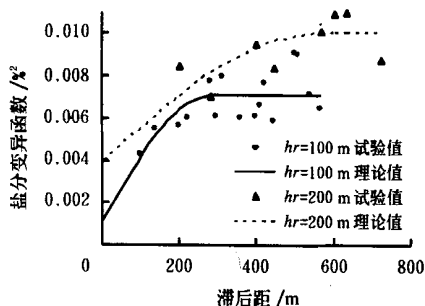


图 6 各向同性条件下二维平面上的土壤盐分变异函数图

Fig 6 Isotropic semivariograms for soil salt content

也不能完全通过变异函数的变程决定采样尺度, 还应该考虑变异函数本身的结构性或对变量结构性的代表性如何。

要说明的一点是, 试验区二维平面上土壤水分近似于正态分布, 盐分分布近似于三参数对数正态分布, 所以在计算变异函数之前对盐分数据进行了三参数对数变换, 且以上计算都经过特异值剔除和变异函数的稳健

分析(详见另文分析)。

4 结论

土壤的水分和盐分随着采样尺度的变化表现出不同的结构性, 采样尺度的划分和选取与水分和盐分的空间变异性大小有密切关系, 根据小尺度下的结构性能否在较大尺度下表现出来, 可以判定它们是否属于同一级的结构, 从而指导采样设计。本文用地质统计学理论对研究区土壤水分和盐分的尺度效应进行了研究, 得出以下结论:

一维条件下, 土壤水分和盐分的变化性在 $hr = 25 \sim 100$ m 采样尺度下, 都表现出同一级结构, 可以用 100 m 的观测网格估计或模拟 25 m 网格上的土壤水分和盐分含量; 100 m × 100 m 采样网格的水分和盐分变异函数可以表征该区域二维平面上的土壤水分和盐分的结构, 并可用于对未采样点进行插值和模拟; 即使是同一级的结构, 随着采样尺度的增加, 插值的精度也会明显降低, 因此, 虽在小尺度上大量重复采样没有必要, 但当精度要求较高时, 仍需加密采样, 方可揭示土壤的微观变化特征; 采样尺度的增加不仅影响估计和模拟精度, 而且有时会导致变异函数对土壤水分或盐分结构性的描述失真(如, 文中二维平面上 200 m × 200 m 的采样尺度对本级土壤盐分结构的反应就不够准确), 这一点在研究中应给予重视; 此外, 土壤水分和盐分在空间上也可能存在多级结构, 只有在同一级结构中较大尺度的变化性才包含较小尺度的变化性, 因此, 采样尺度的增加是与所研究问题的性质密切相关的, 不能盲目增加。

目前, “精确农业”已成为农业可持续发展研究的热点领域, 而采集随空间或时间变化的信息是研究精确农业技术的基本要求, 因此了解诸如土壤水分和盐分这些信息(或变量)在空间或时间上的变异性, 研究它们的尺度效应以确定采样密度具有重要的实践意义。

[参考文献]

- [1] 陈喜, 陈文勤. 水文过程中的尺度问题[A]. 21世纪中国水文科学研究的新问题、新技术和新方法[C]. 北京: 科学出版社, 2001, 28-36
- [2] Klemes V. Conceptualization and Scale in Hydrology [J]. Journal of Hydrology, 1983, (65): 1-23
- [3] Dagan G. Statistical theory of groundwater flow: Pore to laboratory, laboratory to formation, formation to regional scale [J]. Water Resource Research, 1986, 22(9): 120-134
- [4] Oliver M A. Geostatistical methods: Recent development and applications in surface hydrology: Some novel geostatistical applications in soil science [C]. UNESCO. Paris 1992
- [5] 夏军. 水文尺度问题[J]. 水利学报, 1993, (5): 32-37
- [6] Stein A, Sylla M. Spatial variability of soil salinity at different scales in the mangrove rice agro-ecosystem in West Africa [J]. Agric-ecosyst-environ, 1995, 54(1-2): 1-15
- [7] Dooge J C I. Scale problems in hydrology, in: Reflections

- on hydrology[R]. American Geophysical Union, 1997.
- [8] Sposito G R. Scale scaling invariance and the Richards equation, In: Dependence and scale invariance in hydrology [M]. Cambridge University Press, 1998
- [9] Jim Yeh T C. Scale issues of heterogeneity in Vadose-Zone hydrology[M]. Cambridge University Press, 1998
- [10] 陈亚新, 徐 英, 史海滨, 等. 条件模拟原理和技术进展及在水资源系统中的应用[J]. 水科学进展, 2002, 13(2): 246- 252

Scale effect of spatial variability of soil water-salt

Xu Ying¹, Chen Yaxin², Shi Haibin², Wei Zhanmin²

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. Institute of Water Resource and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: Scale problems in hydrology and soil science have become one of focuses in the field of water and soil science at present. Using spatial information science — geostatistics, the article preliminarily studied some laws of spatial variability of one-and two-dimensional soil water and salt on moderate-or small-measuring-scale grid at Chang Sheng experimental demonstration in He Tao Plain of Yellow River. The results showed selection and classification of measuring scale were related closely to spatial variability of soil water and salt. Studies on scale effect could guide design of field sampling systems and reduce field workload and was significant in calculating and evaluating results of prediction or simulation in agricultural research, and disclosing regionalized natural laws in the field of agricultural engineering.

Key words: scale effect; soil properties; spatial variability; geostatistics; semivariogram