

# 苏北海涂围垦区土壤水分空间变异性及其协同克里格估值<sup>①</sup>

姚荣江<sup>1</sup>, 杨劲松<sup>1</sup>, 邹平<sup>1</sup>, 陈小兵<sup>2</sup>, 余世鹏<sup>1</sup>, 李晓明<sup>1</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国科学院烟台海岸带可持续发展研究所, 山东烟台 264003)

**摘要:** 以苏北滨海滩涂围垦区为研究区域, 应用地统计学方法研究了剖面不同深度土壤含水量的空间变异特征, 以 0~20 cm 表土层含水量作为协同变量, 分析了不同深度土壤含水量的交互半方差特征, 探讨了土壤含水量的普通克里格和协同克里格估值方法。结果表明: 各层土壤含水量都表现为弱变异强度; 受结构性因素和随机性因素的共同作用, 各土层含水量均呈中等空间自相关性; 协同区域化变量间均表现为正相关, 且协同区域化变量的空间结构性要优于单一变量; 协同克里格对土壤水分局部变异的描述较普通克里格更为详细; 与普通克里格法相比, 协同克里格法估值产生的均方误差减小 10.1%~21.3%, 平均标准误差减小 11.3%~17.7%, 预测值和实测值间的相关系数提高 15.9%~26.4%。该研究为滨海滩涂地区土壤水分分区管理和水盐优化调控提供了一定的理论参考。

**关键词:** 海涂; 含水量; 空间变异性; 协同克里格; 交互半方差

**中图分类号:** S152.7

水分是农田土壤中蒸发、蒸腾、渗透和径流等过程的重要参与者, 其变化及区域差异对于区域水文、水土保持、生态与环境都有着重大的影响。在大范围土壤水的研究中, 通常需要布设监测站点或进行高密度田间采样。由于监测站点的维护和管理需要耗费大量的人力和物力, 且土壤特性田间变异程度大, 传统的田间采样方法比较费时、费力, 常无法采集足够数量的样品。所以, 如何利用较少的资料来获取比较多的信息, 或者采用较易获取的资料来估算难以获取的水分信息成为研究的热门问题。

研究表明, 地统计学是研究土壤属性或其他农田特征变异定量化的有效方法, 已有的研究涉及到土壤水分特征及状态参数、物理性质、化学性质、重金属及其他元素<sup>[1-5]</sup>。自 20 世纪 80 年代以来, Burgess 及 Webster 等<sup>[6]</sup>将区域化变量理论和普通克里格和协同克里格估值方法引入土壤性质空间变异性的研究中, 推动了研究向前发展。随后一些研究者结合地统计学探讨了土壤水分的空间格局与土壤水文过程的联系以及土壤水分的时空变异与环境因素的关系。国内潘成忠等<sup>[7]</sup>探讨了黄土半干旱丘陵区陡坡坡地土壤水分的空间变异特征, 刘贤超等<sup>[8]</sup>研究了渭北旱塬不同土地利用条件下土壤水分的时空变异特征, 赵学勇等<sup>[9]</sup>揭示

了科尔沁不同类型沙地土壤水分在降水后的空间变异性, 张伟等<sup>[10]</sup>分析了喀斯特地区典型峰丛洼地旱季表层土壤水分的空间变异性。至今, 国内对海涂区土壤水分空间变异性的研究较少。本文以江苏北部滨海滩涂围垦区为例, 研究了土壤含水量的空间变异性, 探讨了田间土壤水分的普通克里格和协同克里格估值方法, 旨在为该地区土壤水分分区管理提供科学依据, 并为滨海滩涂地区土壤水盐优化调控提供一定的理论参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 样品采集与处理

研究区域为江苏省大丰市金海农场, 地理位置介于 32°59'30"~33°0'31"N、120°49'40"~120°51'4"E, 总面积约 180 hm<sup>2</sup>, 东距黄海约 4 km, 西临大丰麋鹿国家级自然保护区。该区地处北亚热带季风气候区, 具有明显的过渡性、海洋性和季风性, 四季分明, 年均降水量 1058.4 mm, 主要集中在 6—8 月份的雨季。由于当地缺乏蓄水工程, 雨季水量丰富但不能调蓄, 非雨季淡水资源紧缺, 农田灌溉一般采用当地微咸水。在研究区域东部的种植制度主要为“水稻-油菜”的一年两熟制, 西部则是“棉花-大麦”的一年两熟制。从

<sup>①</sup>基金项目: 国家 863 计划重点课题项目 (2007AA091702, 2006AA10A301)、国家科技支撑计划 (2006BAD05B02)、中科院南京土壤研究所创新领域前沿项目 (200752010022)、中国科学院知识创新工程重大项目 (KSCX1-YW-09) 和中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-406-3) 资助。

\* 通讯作者 (jsyang@issas.ac.cn)

作者简介: 姚荣江 (1980—), 男, 江苏靖江人, 博士, 助理研究员, 主要从事水土资源空间变异与溶质运移研究。E-mail: rijiao@issas.ac.cn

图 1 显示的研究区域来看，受种植模式的影响，研究区东部和西部的排渠密度存在一定差异，表现为东部水稻种植区域的排渠密度（平均间距约 50 m）明显大于棉花种植区域（平均间距约 100 m）。

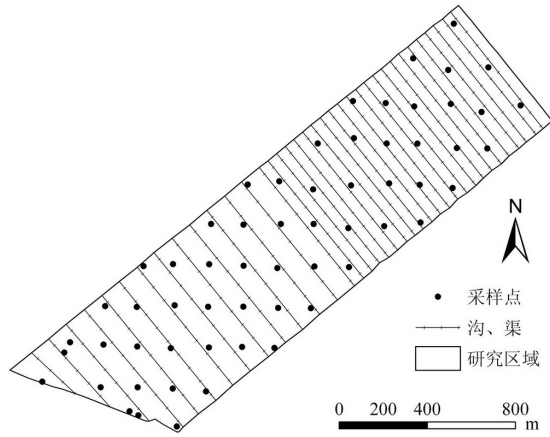


图 1 研究区域采样点位置的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of sampling sites in the study area

在研究区范围内进行网格布点采样，采样点平均间距大约 200 m。布设的步骤是：首先从该研究区最南端的边界作一东西向的平行线，再以此线为起点线由西向东作平行线（至最北端边界），各平行线之间的间隔大约 200 m；再由南向北作间隔 200 m 垂直于东西线的垂直线，最后以平行线与垂直线相交的“点”为采样点。规则网格数据的特点是样点间距离相等或成倍数，这种结构可以在研究区域上进行全部取样，也可以在网格上随机取样以减少工作量。在研究区内共挖取 60 个采样点剖面，其中水稻田 25 个，棉花地 29 个，盐蒿杂草地 6 个，实际田间采样点分布如图 1 所示。每个采样点剖面均对 0~20、20~40、40~60 和 60~80 cm 进行分层采样。各采样点的相对坐标采用差分 GPS 定位技术确定，样品采集于 2007 年 10 月下旬，正处于棉铃吐絮期的晚期（拔秆期）。土壤含水量的测定采用烘干法，将装有土壤样品的铝盒于 105℃

下烘至恒重，称重并计算出各相应采样土层的土壤质量含水量。

### 1.2 误差分析

交叉验证用来评价普通克里格法和协同克里格法的预测精度。其基本思路是依次假设每一个实测数据点未测定，由所选定的变异模型，根据其他测定数据用特定的克里格法估算这个点的值。均方根误差 (RMSE)、平均标准误差 (ASE) 和预测值与实测值的相关系数  $r$  用来表征预测精度。RMSE 和 ASE 越小且越接近、 $r$  越大，则预测的精度越高。本研究采用协同克里格预测的 RMSE、ASE 与普通克里格预测的 RMSE、ASE 减少的百分数（分别为  $RMSE_a$ 、 $ASE_a$ ）来表示预测精度的提高程度，并利用  $r_a$  来表示协同克里格法对普通克里格法的相关系数的提高程度。

$$RMSE_a = \frac{RMSE_{OK} - RMSE_{CK}}{RMSE_{OK}} \times 100\% \quad (1)$$

$$ASE_a = \frac{ASE_{OK} - ASE_{CK}}{ASE_{OK}} \times 100\% \quad (2)$$

$$r_a = \frac{r_{CK} - r_{OK}}{r_{CK}} \times 100\% \quad (3)$$

式中  $RMSE_{OK}$ 、 $ASE_{OK}$  分别表示普通克里格法预测的均方根误差、平均标准误差； $RMSE_{CK}$ 、 $ASE_{CK}$  分别表示协同克里格法预测的均方根误差、平均标准误差； $r_{CK}$  和  $r_{OK}$  分别表示协同克里格法和普通克里格法的预测值和实测值之间的相关系数。

## 2 结果与分析

### 2.1 描述性统计分析

表 1 列出了各深度土壤含水量的统计特征值。从平均值来看，含水量变化范围在 277.9~324.3 g/kg 之间，虽然采样期正值旱季，但土壤含水量普遍较高，滨海滩涂区低地势及浅地下水埋深条件是造成这种现象最直接的原因。从变异系数来看，各土层含水量变异系数的变化范围在 5.06%~9.05% 之间，差异较小，均表现为弱变异强度，这是与研究区地下水埋深较浅而导致的土壤含水量均一化作用密切相关的。从表 1

表 1 各层土壤含水量的经典统计特征值 (g/kg)

Table 1 Statistical feature values of soil moisture at different layers

| 土壤深度 (cm) | 分布类型 | 最小值   | 最大值   | 平均值   | 中值    | 标准差  | 变异系数 (%) | 偏度    | 峰度   | 合理采样数 |
|-----------|------|-------|-------|-------|-------|------|----------|-------|------|-------|
| 0~20      | N    | 266.8 | 396.9 | 324.3 | 324.0 | 28.2 | 8.70     | 0.23  | 2.84 | 15    |
| 20~40     | P    | 249.5 | 377.0 | 277.9 | 270.8 | 25.2 | 9.05     | 1.95  | 7.21 | 16    |
| 40~60     | N    | 250.9 | 316.8 | 278.0 | 277.7 | 14.1 | 5.06     | 0.47  | 2.83 | 8     |
| 60~80     | N    | 255.7 | 315.5 | 288.1 | 287.2 | 14.8 | 5.15     | -0.11 | 2.51 | 8     |

注：N 表示正态分布；P 表示偏态分布；合理采样数  $N = \lambda_{\alpha, f}^2 (CV/k)^2$ ，其中  $\lambda_{\alpha, f}$  为  $t$  分布特征值， $CV$  为变异系数， $P_L = 95\%$ ， $k = 0.05$ ，即 95% 置信水平 5% 相对误差。

亦可明显看出,各土层含水量的极差都较小,且含水量的变幅随深度增加而减小。Shapiro-Wilk 正态检验结果 ( $p < 0.05$ , 2-tailed) 表明, 0~20、40~60 和 60~80 cm 土壤含水量均服从正态分布, 20~40 cm 含水量的分布则呈偏态, 表 1 中的偏、峰度值也表明了这一点。进一步采用 Cochran 纯随机采样理论公式<sup>[11]</sup>计算得出不同土层含水量的合理采样数, 在 95% 置信水平 5% 相对误差条件下, 其合理采样数目分别为 15、16、8 和 8。可见, 当前各层次土壤含水量的样点密度均已满足合理采样数量的要求。

各层土壤含水量间的 Pearson 相关系数如表 2 所示。可以看出, 表层 0~20 cm 土壤含水量与其余各土层含水量均具有明显的相关性, 且达到  $p < 0.01$  的极显著水平 ( $R_{0.01} = 0.325$ ,  $n = 60$ ), 因此, 在该地区利用表土层含水量估算其余各层土壤含水量具有一定的准确性和可信度; 此外, 不同土层含水量间亦表现出极显著相关性, 该结果表明研究区不同土层水分含量及其分布在空间上并不是完全独立的, 而是存在一定的关联性, 其原因是与滨海滩涂地区独特的气候、地形地

表 2 各层土壤含水量的相关系数矩阵

Table 2 Correlation matrix of soil moisture at different layers

|          | 0~20 cm | 20~40 cm | 40~60 cm | 60~80 cm |
|----------|---------|----------|----------|----------|
| 0~20 cm  | 1       |          |          |          |
| 20~40 cm | 0.341** | 1        |          |          |
| 40~60 cm | 0.337** | 0.412**  | 1        |          |
| 60~80 cm | 0.457** | 0.316*   | 0.499**  | 1        |

注: \*和\*\*分别表示  $p < 0.05$  和  $p < 0.01$  水平显著性 (双尾检验)。

表 3 各层土壤含水量的半方差与交互半方差理论模型及参数

Table 3 Theory models and parameters of semivariogram and cross-semivariogram for soil moisture at different layers

| 方法     | 土壤深度 (cm) | 理论模型 | $C_0$ | $C_0 + C$ | $C_0/(C_0 + C)$ | 变程 (m) | RSS   |
|--------|-----------|------|-------|-----------|-----------------|--------|-------|
| 普通克里格法 | 20~40     | S    | 5.004 | 6.525     | 0.767           | 637    | 10.57 |
|        | 40~60     | S    | 1.331 | 2.795     | 0.476           | 2468   | 2.35  |
|        | 60~80     | S    | 1.228 | 2.307     | 0.532           | 566    | 1.41  |
| 协同克里格法 | 20~40     | S    | 0.296 | 1.916     | 0.154           | 354    | 4.14  |
|        | 40~60     | G    | 0.448 | 1.573     | 0.285           | 2257   | 1.26  |
|        | 60~80     | S    | 0.081 | 1.395     | 0.058           | 193    | 0.72  |

注: S 表示球状模型; G 表示高斯模型; RSS 表示离差平方和。

由表 2 分析可知, 表土层含水量与深层土壤水分间有很强相关性。利用同一变量在不同空间位置的协同区域化性质, 协同克里格法可以用较易测量的变量对难以测量的变量进行估值。本研究选取表层 (0~20

cm) 含水量作为协变量, 分别对 20~40、40~60 和 60~80 cm 土壤水分进行协同克里格估值。表 3 列出了各协同区域化变量的交互半方差函数的拟合模型及其参数。协同区域化变量可以是正相关, 也可以是负

## 2.2 半方差函数结构分析

半方差函数的理论模型及参数的确定可参考有关文献<sup>[12-13]</sup>, 得到的各土层含水量半方差模型参数列于表 3, 其中  $C_0$  为块金值, 表示由采样误差、短距离的变异、随机和固有变异引起的基底效应;  $C_0 + C$  为基台值;  $C_0/(C_0 + C)$  可以表明土壤性质空间相关性的程度<sup>[14]</sup>。总体来说, 各土层土壤含水量的块金效应都比较大, 表明在小于当前研究尺度下, 影响其空间变异的过程作用还比较强。 $C_0/(C_0 + C)$  值范围在 0.476~0.767 之间, 均表现为中等的空间自相关性。这说明研究区土壤水分的空间分布是由结构性因素 (如气候、母质、地形、土壤类型等) 和随机性因素 (如施肥、耕作措施、种植制度等各种人为活动) 共同作用的结果, 且除 40~60 cm 外, 其余土层随机性因素引起的空间异质性要大于结构性因素。结构性因素导致土壤水分的空间相关性增强, 而随机性因素使得其空间相关性减弱, 朝均一化方向发展。各土层含水量的变程分别为 637、2468 和 566 m, 其中 40~60 cm 土层水分的空间自相关距最大, 这是由于成陆过程中受沉积物多次交叠的影响, 在研究区 40~60 cm 深度普遍分布着厚度不一的单层或多层含黏层, 土壤剖面呈砂黏相隔分布, 使得局部范围的土壤导水性能存在较大差异, 增强了含水量的变异性, 这可能是导致该土层含水量自相关距显著增大的最主要因素<sup>[15]</sup>。

相关，这与协同区域化现象发生的具体过程有关，本研究的结果都是正相关的。从表 3 中普通克里格和协同克里格的块金值与基台值的比较可知，同一土层上协同区域化变量的块金方差和基台方差均要小于单一变量，且同一土层上协同区域化变量的空间相关性亦要强于单一变量，这一点可由表 3 中  $C_0/(C_0 + C)$  值比较得出。从拟合参数来看，40 ~ 60 cm 交互半方差函数利用高斯模型拟合效果最好，其余各土层仍符合球状模型，且各土层离差平方和 RSS 均不同程度降低，说明交互半方差函数的拟合效果要好于半方差函数，这也表明协同区域化变量的空间结构性要优于单一变量。

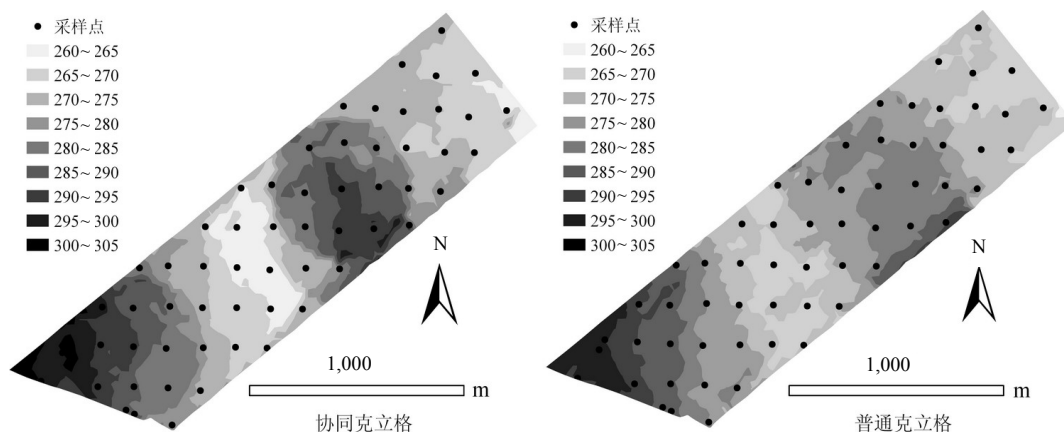
### 2.3 空间分布特征分析

图 2 显示的是普通克里格法和协同克里格法分别对 20 ~ 40、40 ~ 60 和 60 ~ 80 cm 土层含水量进行局部内插形成的空间分布图。可以看出，各土层含水量的空间分布均呈条带状和斑块状格局，无论是普通克里格法还是协同克里格法，土壤含水量总体上均表现出了东低西高、北低南高的空间分异规律，尤其是深层土壤。比较图 2a、2b 和 2c 可知，研究区各土层含水量的分布在空间上存在着较强的相似性。对于同一土层，普通克里格法和协同克里格法插值形成的土壤水分空间分布具有较强的相似性，假定图 3 中普通克里格法的空间分布图分别是 20 ~ 40、40 ~ 60 和 60 ~ 80 cm 土层水分分布的真实反映，则协同克里格法对局部变异细节的描述更为详细，得到的信息更为丰富，更能接近土壤水分的真实分布状况。由于交互半方差函数的变程要短于半方差函数变程，使得协同

克里格法插值结果图对局部描述较为细致，分布呈现局部多中心聚集的现象，这也是导致该现象较为重要的因素。对于同一插值方法，插值形成的不同土层含水量的空间分布间亦具有一定的相似性，如协同克里格法插值形成的 40 ~ 60 和 60 ~ 80 cm 土层水分在总体分布规律与局部变异细节上均较为相似，导致这种空间相似性的原因可能是多方面的，一方面在于滨海滩涂区土壤水分运动较为活跃，使得研究区不同土层土壤水分具有关联性；另一方面在于深层土壤含水量的协同克里格估值均以表土层含水量为协变量，协变量的“同源性”可能也是导致空间相似性的较为重要的因素。从空间尺度来看，尽管研究区东北部的前茬作物为水稻，但含水量的最高值在研究区西南部的棉花地，其原因在于采样期水稻已经收割完毕，且表土层已进行耕翻，旱季条件下该部位土壤蒸散作用较强；再加上研究区东北部水稻种植区域的排渠密度（平均间距约 50 m）大于棉花种植区域的排渠密度（平均间距约 100 m），使得水稻种植区域的排水能力强于棉花种植区域，深层土壤滞水作用较弱；此外，研究区西南部位的低地势条件可能也是导致该现象不容忽视的因素。

### 2.4 预测精度检验

从表 4 列出的普通克里格法和协同克里格法对各层土壤含水量的预测精度检验结果来看，对于所有土层，采用协同克里格法预测所产生的均方根误差和平均标准误差相对于普通克里格法来说都有所减小，这说明利用协同克里格法进行插值预测的精度要高于普通克里格法。与普通克里格法相比，20 ~ 40、40 ~ 60 和



a. 20 ~ 40 cm

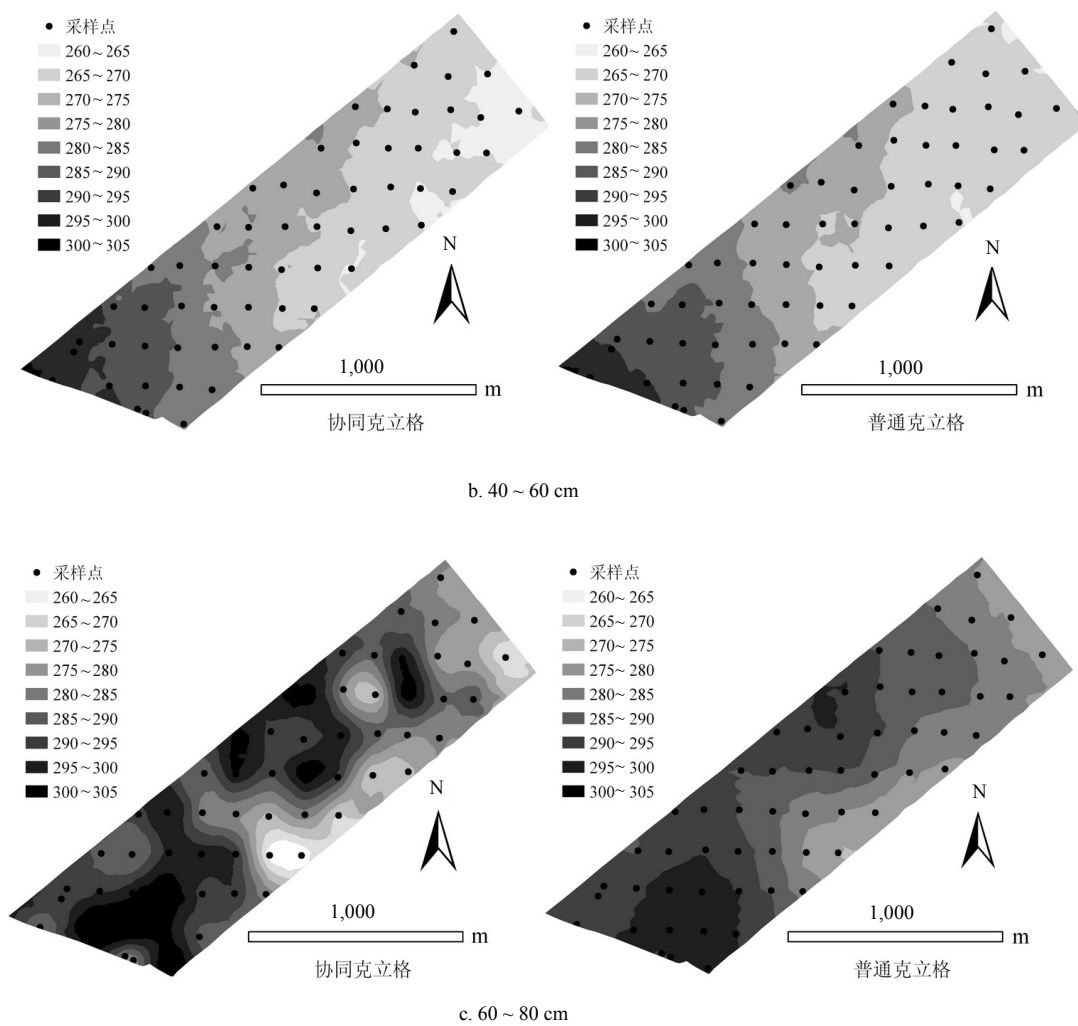


图 2 普通克里格和协同克里格对土壤含水量 (g/kg) 插值的空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution patterns of soil moisture interpolated by ordinary Kriging and CoKriging

60 ~ 80 cm 土层含水量协同克里格法预测的均方根误差分别降低了 17.7%、10.1% 和 21.3%，平均标准误差分别减少了 16.0%、11.3% 和 17.7%，预测值与实测值之间的相关系数分别提高了 20.1%、15.9% 和 26.4%。由以上的分析可知，用较易测定的表土层含水量作为辅助变量，对测定较为复杂的深层土壤含水量

进行协同克里格法估值，不仅能获得较好的预测效果，而且可以提高预测精度。其不足之处在于研究所需数据量大，协同克里格法方程维数太高，使协方差的推断和估值变得较为困难。另外，具有较好空间相关的样本数据对具有弱空间相关的样本数据会产生一定的“屏蔽”作用<sup>[16-17]</sup>。

表 4 各土层含水量的协同克里格法和普通克里格法估值精度的比较

Table 4 Comparison of prediction accuracy of soil moisture interpolated by ordinary Kriging and CoKriging at different layers

| 土壤深度<br>(cm) | 协同克里格法 |       |       | 普通克里格法 |       |       | RMSE <sub>a</sub><br>(%) | ASE <sub>a</sub><br>(%) | r <sub>a</sub><br>(%) |
|--------------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|
|              | RMSE   | ASE   | r     | RMSE   | ASE   | r     |                          |                         |                       |
| 20 ~ 40      | 1.973  | 2.182 | 0.394 | 2.398  | 2.599 | 0.315 | 17.7                     | 16.0                    | 20.1                  |
| 40 ~ 60      | 1.188  | 1.180 | 0.350 | 1.322  | 1.330 | 0.294 | 10.1                     | 11.3                    | 15.9                  |
| 60 ~ 80      | 1.073  | 1.188 | 0.522 | 1.364  | 1.444 | 0.384 | 21.3                     | 17.7                    | 26.4                  |

注：RMSE：均方根误差；ASE：平均标准误差；r：相关系数；RMSE<sub>a</sub>：均方根误差的相对提高；ASE<sub>a</sub>：平均标准误差的相对提高；r<sub>a</sub>：相关系数的相对提高。

### 3 结论

(1) 受海涂区低地势及浅地下水埋深影响, 研究区各土层含水量均值较高, 在水平方向上均呈弱变异强度; 各土层含水量的样点密度均满足 95% 置信水平 5% 相对误差条件下的合理采样数要求, 且不同土层含水量均表现出极显著的相关性。

(2) 各层土壤含水量的半方差函数均符合球状模型, 受结构性因素和随机性因素的共同作用, 各土层含水量的空间自相关程度均属于中等; 对交互半方差函数分析可知, 协同区域化变量均表现为正相关, 且交互半方差函数的块金值和基台值都有所降低, 协同区域化变量的空间结构性要优于单一变量。

(3) 协同克里格法对土壤含水量局部变异细节的描述更为详细, 更接近土壤水分的真实分布状况; 不同插值方法形成的含水量空间分布, 以及同一插值方法形成的不同土层含水量空间分布亦具有相似性; 与普通克里格法相比, 协同克里格法的均方根误差降低 10.1% ~ 21.3%, 平均标准误差减小 11.3% ~ 17.7%, 相关系数提高 15.9% ~ 26.4%, 表明利用表土层含水量采用协同克里格法可以提高深层土壤水分的预测精度。

#### 参考文献:

- [1] 区美美, 王建武. 土壤空间变异研究进展. 土壤, 2003, 35(1): 30-33
- [2] 李艳, 史舟, 徐建明, 黄明祥. 地统计学在土壤科学中的应用及展望. 水土保持学报, 2003, 17(1): 178-183
- [3] 姚丽贤, 周修冲, 蔡永发, 陈婉珍. 不同采样密度下土壤特性的空间变异特征及其推估精度研究. 土壤, 2004, 36(5): 538-542
- [4] 杨玉玲, 文启凯, 田长彦, 盛建东, 刘军, 郭文君, 袁永胜. 土壤空间变异研究现状及展望. 干旱区研究, 2001, 18(2): 50-55
- [5] 黄绍文, 金继运. 土壤特性空间变异研究进展. 土壤肥料, 2002, (1): 8-14
- [6] Burgess TM, Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties: The semi-variogram and punctual Kriging. J. Soil Sci., 1980, 31: 315-331
- [7] 潘成忠, 上官周平. 黄土半干旱丘陵区陡坡地土壤水分空间变异性研究. 农业工程学报, 2003, 19(6): 5-9
- [8] 刘贤赵, 衣华鹏. 渭北旱塬土壤水分空间变异性. 山地学报, 2004, 22(5): 521-527
- [9] 赵学勇, 左小安, 赵哈林, 张铜会, 李玉强, 移小勇. 科尔沁不同类型沙地土壤水分在降水后的空间变异特征. 干旱区地理, 2006, 29(2): 275-281
- [10] 张伟, 陈洪松, 王克林, 张继光. 喀斯特地区典型峰丛洼地旱季表层土壤水分空间变异性初探. 土壤学报, 2006, 43(4): 554-562
- [11] Cochran WG. Sampling Techniques. 3rd. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1977
- [12] 李艳, 史舟, 王人潮, 黄明祥. 海涂土壤剖面电导率的协同克里格法估值及不同取样数目的比较研究. 土壤学报, 2004, 41(3): 434-443
- [13] Shen ZQ, Shi JB, Wang K, Kong FS, Bailey JS. Neural network ensemble residual Kriging application for spatial variability of soil properties. Pedosphere, 2004, 14(3): 289-296
- [14] 姚荣江, 杨劲松, 姜龙. 黄河三角洲土壤盐分空间变异性与合理采样数研究. 水土保持学报, 2006, 20(6): 89-94
- [15] 袁宇明. 治理江苏沿海盐渍土的水利措施. 土壤, 1996, 28(3): 145-150
- [16] Asli M, Marcotte D. Comparison of approaches to spatial estimation in a bivariate context. Math. Geol., 1995, 27(5): 641-658
- [17] Goovaerts P. Ordinary cokriging revisited. Math. Geol., 1998, 30(1): 21-42

## Spatial Variability of Soil Moisture and Its Estimation by CoKriging Method in Coastal Region of North Jiangsu Province

YAO Rong-jiang<sup>1</sup>, YANG Jing-song<sup>1</sup>, ZOU Ping<sup>1</sup>, CHEN Xiao-bing<sup>2</sup>, YU Shi-peng<sup>1</sup>, LI Xiao-ming<sup>1</sup>

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;*

2 *Yantai Institute of Coastal Zone Research for Sustainable Development, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong 264003, China*)

**Abstract:** Spatial variability of soil moisture at different layers in the coastal region of north Jiangsu Province was studied by using geostatistics in this paper. Cross-semivariogram was then used to analyze the coregionalized relationship between surface soil moisture and moisture at deep soil layers, and estimation of soil moisture by Kriging and CoKriging was discussed. Results indicated that soil moisture exhibited weak variation and moderate spatial autocorrelation owing to compound impact of structural and stochastic factors. Coregionalized variables both showed positive correlation and the spatial structure of coregionalized variables was superior to that of univariable. Short-range variability of soil moisture was depicted more detailedly by CoKriging than ordinary Kriging. Compared with ordinary Kriging method, the root-mean-square error produced by CoKriging decreased by 10.1% to 21.3%, the average standard error decreased by 11.3% to 17.7%, and the determination coefficient between the observed values and the predicted values increased by 15.9% to 26.4%. The research results can serve as a theoretical reference to the regional management of soil moisture and optimal regulation of soil water and salt in coastal region.

**Key words:** Coastal region, Soil moisture, Spatial variability, CoKriging, Cross-semivariogram