

# 缓坡水平梯田土壤水分空间变异性

徐 英, 王俊生, 蔡守华, 周明耀

(扬州大学水利科学与工程学院, 扬州 225009)

**摘 要:** 以江苏省扬州市区北部某梯田为例, 分析了小于  $2^\circ$  的缓坡水平梯田土壤含水率的空间变异特征, 并针对缓坡水平梯田土壤含水率由较高田块到较低田块逐渐增加、同一级梯田内由内侧到外侧含水率逐渐减小的分布特征, 提出了适合研究该种地形土壤含水率空间分布的有效方法, 即趋势辅助克里格法 (简记为 KTAI)。该方法同时考虑了不同级梯田高程和同级田块内不同部位对土壤含水率的影响, 用它对梯田土壤含水率进行插值, 估计方差比传统的普通克里格法 (简记为 OK) 大幅度降低, 大大提高了估值精度, 减轻了野外采样工作量, 对于研究梯田土壤水分空间变异性具有重要意义, 同时拓展了地质统计学理论在土壤水分空间变异性研究中的应用范围。

**关键词:** 水平梯田, 土壤水分, 空间变异性, 地质统计学, 趋势辅助克里格

**中图分类号:** S152.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2008)-12-0016-04

徐 英, 王俊生, 蔡守华, 等. 缓坡水平梯田土壤水分空间变异性[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 16—19.

Xu Ying, Wang Junsheng, Cai Shouhua, et al. Spatial variability of soil moisture in horizontal terrace on slightly sloping land[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 16—19. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

尽管南方地区旱作物大部分无需灌溉, 甚至受渍害的威胁, 节水对南方地区的旱作物似乎没有多大意义, 然而在精确农业已成为一种产业的今天, 以水调肥、以水促肥——水肥耦合已经成为提高作物产量及品质的关键技术所在, 精确的评估土壤水分空间变异性对精确施肥有相当重要的意义。目前, 对地形平坦地区土壤水分空间变异研究已较为成熟<sup>[1-6]</sup>, 但用地质统计学理论插值及评估梯田土壤水分空间变异特性的成果却尚未见报道。低山丘陵区修建梯田是保持水土的有效措施, 但也增加了土壤特性的空间变异性<sup>[7-9]</sup>, 改变了原有的空间连续性, 这给用传统的各种统计方法进行空间变异分析与估值带来困难, 进而增加了农田精准养分管理的难度。因而, 适合分析和评估梯田土壤特性空间变异性的一套方法有待开发, 为此, 本文初次对这一问题进行了探讨。

## 1 研究区概况及试验方案

### 1.1 研究区概况

试验区位于江苏省扬州市区北部, 该地区处于长江中下游口段, 属亚热带湿润气候区。年太阳辐射量为  $464\sim 489\text{ J/cm}^2$ , 年日照时数为  $2176.7\text{ h}$ , 年平均气温为  $15^\circ\text{C}$ , 无霜期达  $222\text{ d}$ , 年平均降水量为  $1030\text{ mm}$ , 主要集中在  $5\sim 9$  月份, 约占全年总雨量的  $60\%\sim 66\%$ 。研究区土质为黏壤土, 保水保肥性能较好, 地形呈较缓的坡度 (小于  $2^\circ$ ), 已修成宽式梯田 (建成时间均在  $20\text{ a}$  以上,

宽度  $20\text{ m}$  以上), 多年以来稻麦轮作, 近年实行免耕种植。

### 1.2 试验方案

试验区从上到下共  $5$  个田块, 采样区面积为  $(115\text{ m}\times 40\text{ m})=4600\text{ m}^2$ , 在其内按  $5\text{ m}\times 5\text{ m}$  (指水平距离) 规则布置采样网格 (见图 1, Y 方向垂直于等高线), 于  $2006$  年  $12$  月上旬冬小麦苗期在结点处采集耕作层  $20\text{ cm}$  范围内的土样, 样品分析成果包括土壤含水率 (烘干法测质量含水率)、有机质含量、全氮量、有效氮含量、有效钾含量、有效磷含量。本文以试验区内各点土壤含水率为例, 讨论建在  $2^\circ$  以下坡地上水平梯田土壤水分空间变异特征及其估计方法。

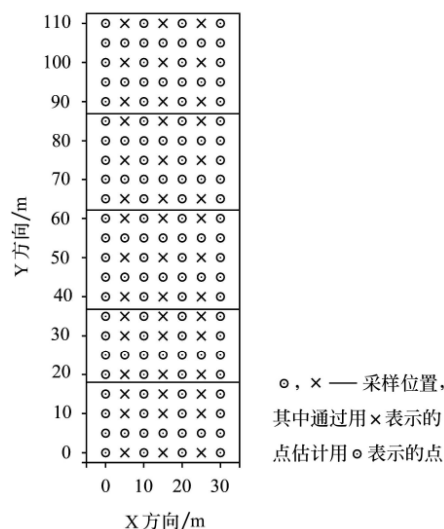


图 1 采样点布置

Fig.1 Layout of sampling locations

## 2 结果与分析

### 2.1 梯田土壤水分统计特征

收稿日期: 2007-05-23 修订日期: 2008-10-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50609023); 扬州大学“新世纪人才工程”优秀青年骨干教师科研经费; 国家自然科学基金资助项目 (50679028)  
作者简介: 徐 英 (1972—), 女, 内蒙古人, 副教授, 博士, 主要从事水土资源的空间变异性及非工程性节水灌溉措施研究。扬州 扬州大学水利科学与工程学院, 225009。Email: xuying@yzu.edu.cn

表 1 为各级梯田土壤水分统计特征值。该区域土壤水分变异系数较小,若按一般对变异系数  $C_v$  值的评估,当  $C_v \leq 0.1$  时,称弱变异性,  $0.1 \leq C_v \leq 0.2$  为中等变异性(土壤水动力学,雷志栋),则各级梯田田块内部土壤水分均属弱变异性。各田块的偏态系数和峰态系数表明各田块都有一定峰态左偏(即负偏),说明大于中值的点在各田块中均居少数,而采样点在各田块中分布基本均匀,这表明梯田内侧(靠近较高梯田一侧)由于接受上一级梯田外沿的径流雨水而使土壤含水率偏高的影响范围较小,不会超过田块宽度的一半。

表 1 梯田土壤水分的统计特征值

Table 1 Statistical characteristics of soil moisture in terraces

田块	采样数	均值 /%	标准差 /%	变异 系数	峰态 系数	偏态 系数
第一块(最高)	35	32.41	1.24	0.037	3.09	-0.84
第二块	35	33.49	1.41	0.043	2.90	-0.90
第三块	35	35.91	1.82	0.051	3.08	-0.40
第四块	28	36.53	1.75	0.048	3.09	-0.85
第五块(最低)	28	37.44	1.34	0.036	3.13	-0.83
试验田	161	35.16	2.38	0.078	2.93	-0.74

由于各级梯田存在高差,从较高田块到较低田块土壤平均含水率逐渐增加,整个试验田的变异系数要比单块大得多。表 2 的方差分析结果进一步说明各田块的土壤含水率差异显著。此外,田块内不同部位土壤含水率均表现为:内侧>中部>外侧(靠近较低梯田一侧),这是由于梯田内侧除接受自然降水外,还可接受上一级梯田外沿的径流雨水,而梯田外侧则由于侧面蒸发,使土壤含水率相对较小。表 2 可看出,除最低一块外各级梯田内部土壤含水率由内侧到外侧均显著甚至极显著增加。

表 2 各级田块土壤含水率的方差分析表

Table 2 Variance analysis of soil moisture for each terrace

田块	变异来源	平方和	自由度	均方	F 值
试验田	田块间	579.9	4	144.98	68.71**
	田块内部	329.2	156	2.11	
	总变异	909.1	160		
第一块 (最高)	不同部位间	10.59	4	2.65	2.81*
	田块内残差	28.28	30	0.94	
	总变异	38.87	34		
第二块	不同部位间	27.01	4	6.75	5.49**
	田块内残差	36.92	30	1.23	
	总变异	63.93	34		
第三块	不同部位间	35.29	4	8.82	4.04**
	田块内残差	65.53	30	2.18	
	总变异	100.8	34		
第四块	不同部位间	43.25	3	14.42	8.74**
	田块内残差	39.60	24	1.65	
	总变异	82.85	27		
第五块 (最低)	不同部位间	4.33	3	1.44	0.79
	田块内残差	43.9	24	1.83	
	总变异	48.2	27		

注:\*\*表示 1%显著水平,\*表示 5%显著水平。

## 2.2 梯田土壤水分空间变异性

图 2a 所示为整个试验田块(161 个采样点)垂直等高线方向和平行于等高线方向的半变异函数图,可看出垂直等高线方向的半方差远大于平行等高线方向的半方差,且垂直等高线方向的实验变异函数图明显上翘,并表现出一定的周期性。这是由于土壤含水率存在着地块间自高而低、地块内部自外侧到内侧递增的趋势。若用  $z(x_{ijk})$  表示采样点  $x_{ijk}$  的土壤含水率,  $z_0(x_i)$  表示第  $i$  块田的平均土壤含水率(代表田块高程效应),  $\Delta(x_{ijk})$  表示残差(称为一次残差),则某采样点土壤含水率可以表示为:

$$z(x_{ijk}) = z_0(x_i) + \Delta(x_{ijk}) \quad (1)$$

$\Delta(x_{ijk})$  和  $z_0(x_i)$  是彼此独立的,则  $z(x_{ijk})$  的方差  $\sigma_z$  可用下式表示:

$$\sigma_z = \sigma_{z_0} + \sigma_{\Delta} \quad (2)$$

其中,  $\sigma_{z_0}$  表示各级梯田之间的方差,是由于各级田块间的高度不同而使其平均土壤含水率存在差异造成的;  $\sigma_{\Delta}$  表示田块内部的方差,是由于田块内部各点土壤含水率变异引起的,表 2 已表明不同级梯田间土壤水分变异显著大于田块内部变异。若将一次残差  $\Delta(x_{ijk})$  作为区域化变量计算其半方差函数,则其变差函数图无翘尾现象(图 2b),但仍存在周期性。若用  $\beta(x_{ij})$  表示第  $i$  块田的第  $j$  排点(由梯田内侧到外侧)的平均含水率,  $\delta(x_{ijk})$  表示二次残差,则:

$$z(x_{ijk}) = z_0(x_i) + \beta(x_{ij}) + \delta(x_{ijk}) \quad (3)$$

故  $\sigma_z$  又可表示为:

$$\sigma_z = \sigma_{z_0} + \sigma_{\beta} + \sigma_{\delta} \quad (4)$$

$\sigma_{\beta}$  表示同一级梯田内不同部位之间的差异,  $\sigma_{\delta}$  表示消除趋势后田块内部的土壤水分差异。若假设二次残差  $\delta(x_{ijk})$  满足二阶平稳条件,其变差函数图(图 2c)不仅无周期性和翘尾现象,而且垂直等高线和平行等高线两方向的半方差接近相等,可视为各向同性。显然,可以用式(3)对土壤含水率进行估值。

## 2.3 梯田土壤水分的估值

### 2.3.1 基本原理

基于以上的分析,某点  $x_{ijk}$  的土壤含水率估计值  $z^*(x_{ijk})$  可被表示为二次残差的普通克立格估值  $\delta^*(x_{ijk})$  与第  $i$  块梯田的平均土壤含水率  $z_0^*(x_i)$  及第  $i$  块田的第  $j$  排点(由梯田内侧到外侧)的平均含水率  $\beta^*(x_{ij})$  之和,即:

$$z^*(x_{ijk}) = z_0^*(x_i) + \beta^*(x_{ij}) + \delta^*(x_{ijk}) \quad (5)$$

本文称这种辅助克立格方法<sup>[10-13]</sup>为趋势辅助克立格(Kriging using trends as auxiliary information,简记为 KTAI),它类似于回归克立格法<sup>[14,15]</sup>,只是不用回归,而是直接用各级梯田的高程效应及梯田内部位效应作为辅助变量,以提高空间插值精度。各级梯田高程效应及梯田内部位效应可以用实测的土壤含水率估计,即:

$$z_0^*(x_i) = \frac{1}{n(i)} \sum_{p_1=1}^{n(i)} \frac{1}{l(p_1)_i} \sum_{p_2=1}^{l(p_1)_i} z_{ip_1 p_2} \quad (6)$$

$$\beta^*(x_{ij}) = \frac{1}{l(j)_i} \sum_{p=1}^{l(j)_i} z(x_{ijp}) \quad (7)$$

这里的  $n(i)$  是第  $i$  块田从内侧到外侧采样排数,  $l(p_1)_i$  指第  $i$  块田第  $p_1$  排点的数目。注意只有当  $p_1$  排点达到一定数量 (如大于 3) 时才可采用式 (7) 估计, 否则采用相邻排的直线内插值。残差由下式估计<sup>[16]</sup>:

$$\delta^*(x_{ijk}) = \sum_{p_1=1}^m \sum_{p_2=1}^{n(p_1)} \sum_{p_3=1}^{l(p_2)_{p_1}} \lambda_{p_1 p_2 p_3} \delta(x_{p_1 p_2 p_3}) \quad (8)$$

$\lambda_{p_1 p_2 p_3}$  是由普通克立格法获得的权重,  $m$  是田块数目 ( $m=5$ ), 其它符号意义同前。克立格估计要求的残差的半变异函数可用下式估计<sup>[16]</sup>:

$$\gamma_\delta(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{p=1}^{N(h)} [\delta(x) - \delta(x+h)]^2 \quad (9)$$

式中  $N(h)$ ——间隔距离为  $h$  的点对数。

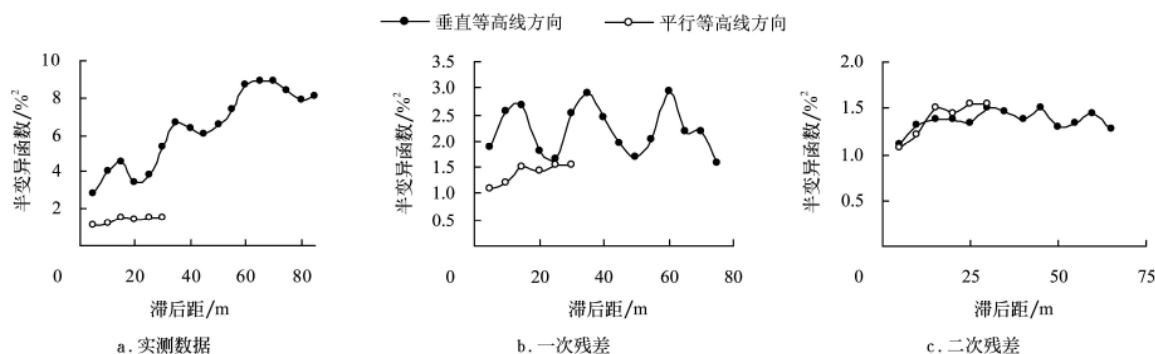


图2 试验田土壤水分实测值及残差的试验半变异函数

Fig.2 Experimental semivariograms of measured values and residuals of soil moisture in the whole experimental field

### 2.3.2 估值结果与讨论

为了说明 KTAI 方法对梯田土壤水分估值的实用性, 从所采的 161 个土样中每块田抽取 9 个点 (抽取样本的原则是内侧 3 个, 外侧 3 个, 中间 3 个) 作为已知信息数据 (即图 1 中标记为×的点, 共 45 个), 建立模型 (包括二次残差的半变异函数和各级梯田的高程效应及梯田内部位效应估计), 并用该方法对原 161 个点进行了估值 (见图 3)。图 3 中左图为直接应用普通克立格法 (简记为 OK 法) 所得估值结果, 中间为实测值, 右图为 KTAI 法估计的结果。比较各图发现: 左图对梯田高程变化引起土壤含水率相对大幅度变化这一现象反映不明显, 而右图则反映较为明显; 同样左图对同一级梯田内不同部位土壤含水率的变化规律反应也不明显, 而右图与实测情况较为相符。进一步进行统计特征值分析 (表 3), 也表明: KTAI 法估

计结果的标准差较 OK 法更接近实测结果, 取值范围 (即最大、最小值构成的区间) 也更贴近实测结果, 这种方法削弱了克立格方法的平滑效应, 估计方差比 OK 法减小 2.63 倍, 估计精度大大提高。可见, 对于田块间土壤水分变化显著的梯田, 用 KTAI 法插值有利于提高调查质量, 减小土壤水分描述的不确定性。

表3 土壤水分实测值和估计值统计特征值比较

Table 3 Comparison of statistical characteristics of 161-sample values and estimated values of soil moisture

信息来源	信息数	均值 /%	标准差 /%	最大值 /%	最小值 /%	估计方差
实测	161	35.04	2.38	40.41	29.51	—
KTAI 法估计	45	35.02	2.16	39.32	30.54	4.3
OK 法估计	45	35.03	1.73	38.74	31.92	15.6

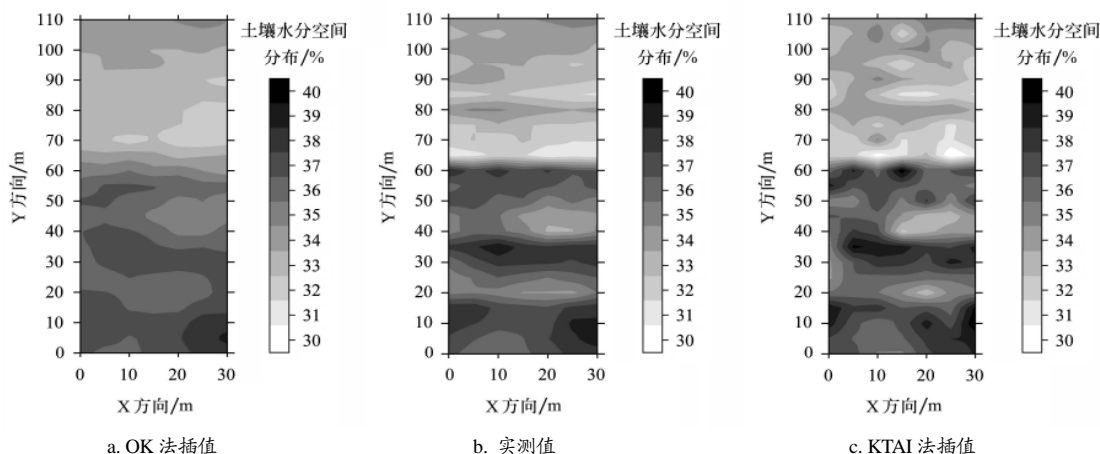


图3 实测和估计的试验田土壤水分空间分布

Fig.3 Spatial distributions of measured and interpolated soil moisture in the whole experimental field

### 3 结 论

南方稻麦两熟地区, 冬小麦生长季节基本不灌水, 土壤含水率主要受制于降雨量及其分布。对于土地利用类型相同、同一坡向上小于  $2^\circ$  的缓坡水平梯田土壤含水率由较高田块到较低田块逐渐增加, 同一级梯田内由内侧到外侧含水率逐渐减小。以上这种趋势使缓坡梯田的水土资源的空间变异性与平坦地区有所不同, 难以用在分析空间信息中应用最广泛的地质统计学理论直接分析。本文提出的 KTAI 法不仅考虑了不同级梯田高程对土壤含水率分布的影响, 而且考虑了同级田块内不同部位的影响, 这对小于  $2^\circ$  的缓坡水平梯田土壤含水率分布的插值估计具有重要意义。该方法大大缩小了估计方差, 提高了估值精度, 减轻了野外采样工作量 (本例由原来的 161 缩减为 45 个), 为在这样的田块中实施考虑土壤湿度情况下的变量施肥管理提供了获取依据 (比如土壤水分的分区地图) 的有效方法, 拓展了地质统计学理论在土壤水分空间变异性研究中的应用范围。

#### [参 考 文 献]

- [1] 徐 英, 陈亚新, 王俊生, 等. 农田土壤水分和盐分空间分布的指示克立格分析评价[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 477—482.
- [2] Qiu Yang, Fu Bojie, Wang Jun, et al. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2001, 240(3/4): 243—246.
- [3] 胡克林, 李保国, 陈德立, 等. 农田土壤水分和盐分的空间变异性及其协同克立格估值[J]. 水科学进展, 2001, 12(4): 460—465.
- [4] Famiglietti J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas[J]. Journal of Hydrology, 1998, 210: 259—281.
- [5] Boyer D G, Wright R J, Feldhake C M, et al. Soil spatial variability relationships in a steeply sloping arid soil environment[J]. Soil Sci, 1996, 161(5): 278—287.
- [6] 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[J]. 水利学报, 1994, (7): 70—76.
- [7] 卫三平, 吴发启, 张治国. 黄土丘陵沟壑区不同耕作措施下梯田土壤水分时空变化[J]. 中国水土保持, 2005, (6): 25—27.
- [8] 蔡进军, 张源润, 火 勇, 等. 宁南山区梯田土壤水分及养分特征时空变异性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(5): 83—87.
- [9] 徐学选, 刘文兆, 高 鹏, 等. 黄土丘陵区土壤水分空间分布差异性探讨[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 52—55.
- [10] Liu Ten-Lin, Juang Kai-Wei, Lee Dar-Yuan. Interpolating soil properties using kriging combined with categorical information of soil maps[J]. Soil Sci Soc Am J, 2006, 70: 1200—1209.
- [11] LeSch S M, Strauss D J, Rhoades T D. Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques 1. Statistical prediction models: A comparison of multiple linear regression and cokriging[J]. Water Resour Res, 1995a, 31: 373—386.
- [12] LeSch S M, Strauss D J, Rhoades T D. Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques 2. An efficient spatial sampling algorithm suitable for multiple linear regression model identification and estimation[J]. Water Resour Res, 1995b, 31: 387—398.
- [13] Vaughan P J, Lesch S M, Corwin D L, et al. Water content effect on soil salinity prediction: A geostatistical study using cokriging[J]. Soil Sci Soc Am J, 1995, 59: 1146—1156.
- [14] Triantafyllis J, Huckel A I, Odeh I O A. a. Comparison of statistical prediction methods for estimating field-scale clay content using different combinations of ancillary variables[J]. Soil Sci, 2001, 166: 415—427.
- [15] Triantafyllis J, Odeh I O A, McBratney A B. b. Five geostatistical models to predict soil salinity from electromagnetic induction data across irrigated cotton[J]. Soil Sci Soc Am J, 2001, 65: 869—878.
- [16] 侯景儒, 尹镇南, 李维明, 等. 实用地质统计学[M]. 北京: 地质出版社, 1998.

## Spatial variability of soil moisture in horizontal terrace on slightly sloping land

Xu Ying, Wang Junsheng, Cai Shouhua, Zhou Mingyao

(College of conservancy and hydraulic engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** Taking a horizontal terrace on a slightly sloping land with a gradient less than  $2^\circ$  in northern Yangzhou, Jiangsu Province for example, spatial variability of soil moisture in the terrace was analyzed. Soil moisture of a terrace on the upper level is higher than that of the lower one, and soil moisture of the inner side is higher than that of the outside in the same terrace. Based on the distribution of soil moisture, an effective method named Kriging using trends as auxiliary information (KTAI) was proposed. The method taking into account the effects of both elevation of different terrace levels and different locations of the same level terrace on soil moisture, was used to interpolate the soil moisture in terraces. KTAI is useful for studying spatial variability of soil moisture in terraces and extending the application of geostatistics in spatial variability of soil moisture.

**Key words:** horizontal terrace, soil moisture, spatial variability, geostatistics, kriging using trends as auxiliary information