

# 墒情监测取样方法的研究

孙 凯, 王一鸣, 杨绍辉

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 该文对北京通州区辖 800 多  $\text{km}^2$  范围内 3 022 点的土壤墒情测量数据进行了统计分析, 验证了土壤墒情符合对数正态分布, 给出了计算类似区域合理取样数目时的估值方法, 目的是以合理的取样数目和适合的取样方法指导区域性墒情(旱情)监测站点的建设。同样, 以北京昌平一个农场的墒情分布, 给出了计算类似地块合理取样数目时的估值方法, 以此来指导节水灌溉。

**关键词:** 旱情; 墒情; 区域土壤水分测量; 地统计分析

**中图分类号:** TP391.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2004)04-0074-05

## 0 引 言

旱灾是北方地区发生最频繁、涉及面最广、持续时间最长、影响最深远的自然灾害, 会给人民造成生命财产的重大损失, 对社会经济发展产生不良的影响。建设墒情(旱情)监测系统, 合理布设监测站点, 及时、准确、系统地监测旱情变化, 科学合理的分析和预测, 对指导抗旱有着重大的现实意义。目前, 我们国家的水利部门正在开展墒情(旱情)的监测工作。

在墒情监测站点的建设中, 通过区域范围的墒情取样, 分析和了解区域内墒情的总体分布情况, 根据空间聚类分析等理论来确定监测站点的位置, 是一项重要的基础工作。同样的, 在节水灌溉中, 也存在类似问题。通过对一块田地的土壤墒情的科学合理取样, 分析土壤水分的分布状况, 指导喷灌设备进行作业, 才能达到节约用水的目的。国内外的专家学者在墒情测量方面做过一些研究<sup>[1-12]</sup>。但是, 限于当时的测量手段和工具不能实现带有地理位置的数据采集, 从而不能从整体的角度研究土壤水分的分布特性。采集数据的数量和密度也受到限制, 影响了墒情(旱情)监测的研究。中国农业大学信息与电气工程学院传感器与检测技术研究所近些年一直从事着土壤水分传感器和土壤水分测试系列仪器的研究和开发, 土壤水分空间分布的研究, 墒情和旱情监测站点布设, 墒情预报等工作。本文是使用本研究所自主开发的测试仪器, 测量区域(县)和田地(农场)的土壤墒情, 通过统计分析, 计算未来工作中测量类似区域的合适的取样点数和方式, 以此来指导墒情(旱情)监测与节水灌溉。

## 1 实验材料和方法

在前期无明显降水, 试验期间气候条件相对稳定的

前提下, 采用自行设计开发、带有 GPS 的 TSCIV 型智能化土壤水分空间分布快速测试仪<sup>[13-15]</sup>, 2003 年 8 月 17 日到 8 月 28 日在通州区域完成了土壤墒情测量实验。

通州位于北京东南, 地处永定河、潮白河冲积平原, 北纬  $39^{\circ}36' \sim 40^{\circ}02'$ , 东经  $116^{\circ}32' \sim 116^{\circ}56'$ 。东西最宽  $36.5 \text{ km}$ , 南北最长  $48 \text{ km}$ , 总面积  $907 \text{ km}^2$ 。地势平坦, 以黄土、两合土、沙性土为主。属暖温带大陆性半湿润、半干旱季风气候。有北运河和潮白河两个水系, 有大小河流 13 条总长  $245.3 \text{ km}$ , 河网密度为  $0.29 \text{ km}/\text{km}^2$ 。年平均降水量为  $617.4 \text{ mm}$ , 径流总量  $1.18 \text{ 亿 m}^3$ 。

墒情取样试验由行走方式完成, 分  $6, 10, 15, 20 \text{ cm}$  4 个深度采集 3 022 个点的土壤体积含水率数据, 见图 1, 基本覆盖了区辖范围。图中的细点为采样点。

图 1 北京通州土壤墒情数据采样点

Fig 1 Sampling spots of soil moisture content survey at Tongzhou district of Beijing

## 2 结果与分析

### 2.1 20 cm 深度土壤含水率的基本统计数据

统计分析得出, 4 个不同深度取样数据的相关性非常高<sup>[16]</sup>。

由于 20 cm 位于更深层, 在测量的短时期内受地表温度、气候变化等因素影响相对稳定、滞后, 所以, 数据分析主要以 20 cm 范围内的土壤体积含水率为对象。

收稿日期: 2003-11-11 修订日期: 2004-06-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)重大专项课题“作物水分信息采集与精量控制用水技术研究与开发”(2002AA 6Z3071)

作者简介: 孙 凯(1968-), 男, 博士生, 从事土壤墒情分布与预测预报研究。北京 中国农业大学信息与电气工程学院 63 信箱, 100083

通讯作者: 王一鸣(1940-), 男, 教授, 博士生导师。北京 中国农业大学信息与电气工程学院, 100083

把实际测量的 3 022 个土壤墒情数据带入统计软件 SPSS<sup>[17,18]</sup>, 做 Descriptive statistics (描述性统计分析) 中的 Explore (探索性分析) 过程。算得表 1 的 20 cm 深度土壤墒情数据的各个统计量, 图 2 的墒情数据直方图。

图 2 显示出区域内土壤墒情分布不符合标准的正

表 1 20 cm 深度土壤含水率统计数据  
Table 1 Statistical data of soil moisture at the depth of 20 cm

统计量	数值	误差
均值	0.10975	0.000839
均值 95% 可信区间下限	0.10811	
均值 95% 可信区间上限	0.11140	
去掉 5% 极端值后的均值	0.10581	
中位数	0.09900	
方差	0.002	
标准差	0.046131	
最小值	0.025	
最大值	0.356	
全距	0.331	
四分距	0.05400	
偏度	1.452	0.045
峰度	2.923	0.089

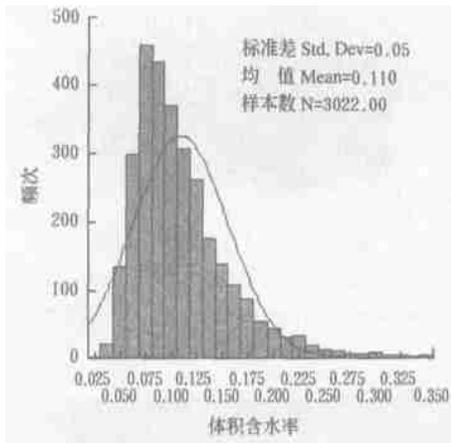


图 2 20 cm 深度土壤含水率数据的直方图

Fig 2 Histogram of data of soil moisture at the depth of 20 cm

态分布。为此, 考虑通过数值变换的方法, 把数据变换到正态。对于图 1 的正偏态分布形式, 一般是对数形式的变换。对取样的墒情数据取对数运算, 各个统计量的计算结果见表 2。图 3 是对应的直方图, 这个直方图显示出正态分布的特征。茎叶图(图 4) 也显示数据对称。

表 2 20 cm 深度土壤含水率数据对数变换后的统计数据  
Table 2 Logarithm transform of statistical data of soil moisture at the depth of 20 cm

统计量	数值	误差
均值	-0.993144	0.0030528
均值 95% 可信区间下限	-0.999129	
均值 95% 可信区间上限	-0.987158	
去掉 5% 极端值后的均值	-0.996239	
中位数	-1.004400	
方差	0.028	
标准差	0.1678221	
最小值	-1.6021	
最大值	-0.4486	
全距	1.1535	
四分距	0.230800	
偏度	0.27	0.045
峰度	-0.029	0.089

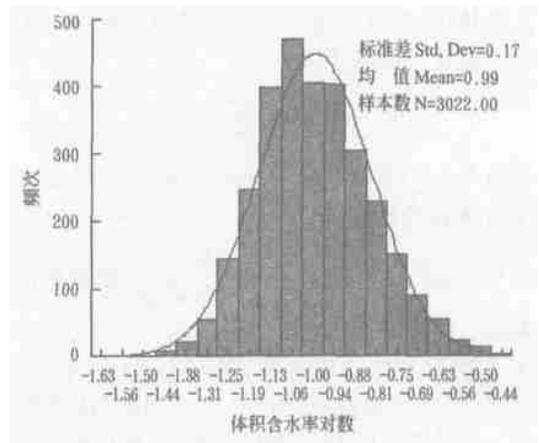


图 3 20 cm 深度土壤含水率数据对数变换后的直方图

Fig 3 Histogram of logarithm data of soil moisture at the depth of 20 cm

频数	茎	叶
3.00	Extremes	(=<-1.47)
1.00	-14.	8
6.00	-14.	8
18.00	-13.	58
33.00	-13.	00238
94.00	-12.	5556677789
155.00	-12.	00000011222223344
208.00	-11.	5555666666677788888999
320.00	-11.	000000001111111222233333333444444
379.00	-10.	55555566666667777777788888889999999
304.00	-10.	0000001111122222233333334444444
320.00	-9.	555555666666677777777888888999999
315.00	-9.	0000001111122222233333333444444
247.00	-8.	555556666666677788888999999
212.00	-8.	0000000111222223334444
153.00	-7.	555666778889999
97.00	-7.	0112233444
66.00	-6.	56778899
47.00	-6.	123448
21.00	-5.	98
5.00	-5.	8
18.00	Extremes	(>=-.63)

图 4 20 cm 土壤含水率数据对数变换后的茎叶图

Fig 4 Stem and leaf diagram of logarithm data of soil moisture at the depth of 20 cm

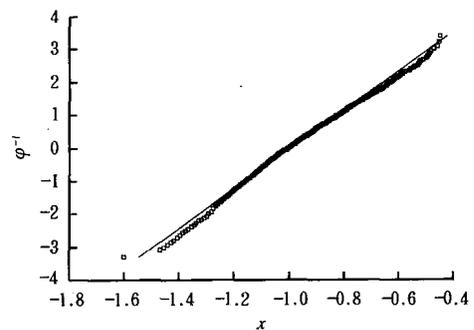


图 5 20 cm 土壤含水率深度数据对数变换后的 QQ 图

Fig 5 QQ diagram of logarithm data of soil moisture at the depth of 20 cm

探索性分析后,对对数变换后的取样数据用QQ 正态概率图 5 做正态性检验。QQ 图是由这样的点构成的散点图:  $(\Phi^{-1}(\frac{i-0.375}{n+0.25}), x(i))$  ( $i$  在 1 和  $n$  之间,  $n$  为取样总数目,  $x(i)$  是第  $i$  点的对数变换后的取样数值)。图 5 显示出数据点接近于一条直线,证明区域内土壤水分空间分布上是近似对数正态分布的。

对合理取样数目的计算,在对数正态分布这一前提下进行。

### 2.2 区域内合理取样数目

数据分析前,一般要做离群值处理,把箱式图中的离群值去掉,这些点可能是误差产生,也可能是真实状况的反映。具体到本次实验,由于研究对象的范围大,地形、气候等各个复杂因素的共同作用,任何数值都可能存在,故给予全部保留。

定义对数变换后的数据

$$K = \lg S_{20} \quad (1)$$

式中  $S_{20}$ ——20 cm 深度土壤含水率数据。根据上面的统计分析,考虑到测量的数目  $n = 3022$ ,远大于 50,属于较大的数值,将其构成研究对象全体。那么,这个总体近似服从正态分布,即  $K \sim N(\mu, \sigma^2)$ 。其中:  $\mu = -0.99314, \sigma^2 = 0.028$ 。

从总体中,选择容量为  $N$  的样本  $K_1, K_2, \dots, K_N$ ,由概率与数理统计的知识

$$\overline{K_N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_i \quad (2)$$

而且  $\overline{K_N} \sim N(\mu, \sigma^2/N)$ ,当样本的数目  $N$  逐步增大时,  $\overline{K_N}$  向总体均值接近。

这样构造出的随机变量  $\eta = \frac{\overline{K_N} - \mu}{\sqrt{\sigma^2/N}}$  是服从标准正态分布的。

考虑在 95% 的置信水平,即:多次取  $N$  个样,这些次取样能以 95% 的概率接近总体的均值,体现出总体的特点。如果以这样的  $N$  个样本数目,来代替  $n$  个数目的取样,有理由相信取样数目是足够和合理的。

查标准正态对数表对应数值是 1.96

即:  $\eta = 1.96$  于是推导出

$$N = (1.96\sigma / |\overline{K_N} - \mu|)^2 = (1.96 \frac{\sigma}{|\mu|} (\frac{1}{|\frac{\overline{K_N} - \mu}{\mu}|}))^2$$

式中  $\frac{|\overline{K_N} - \mu|}{\mu}$  —— 考核样本均值和总体均值相近程度的估值精度。

令  $\Delta = \frac{|\overline{K_N} - \mu|}{\mu}, C_v = \frac{\sigma}{|\mu|}$ 。可以由前面的统计数据表 2 计算出  $C_v = 16.9\%$  (对数变换后的变差系数)。于是有

$$N = \frac{(1.96 \times 0.169)^2}{\Delta^2} = \frac{0.10972}{\Delta^2} \quad (3)$$

要注意的是估值精度是对数坐标下的。

考虑到对数坐标下 98% 的估值精度(相当于变换前的 95% 的估值精度)有

$$N = 274$$

即:取样试验涉及到的通州 800 多  $\text{km}^2$  面积上,有 95% 的把握在取得 274 点的数据后,和总体的趋势一致。

式(3)是单纯的,在一定置信区间下的只与精度有关的函数。如果有类似面积的平原区域,可以参考上述计算过程得出的取样点数目。

### 2.3 区域内的取样方式

在 GIS 上做地统计分析<sup>[19]</sup>得图 6,图中的三维坐标分别是  $x$  (经度)、 $y$  (纬度)、 $z$  (体积含水率)。在  $xyz$  中的是墒情取样点的数值,  $xy$  面上投影的是墒情数据取样点的位置,其余两面上的点是土壤含水率在经度、纬度上的投影。其中坐标轴平面上的两个粗线条,显示着随着经度和纬度变化土壤水分空间变化趋势在  $x$  经度面和  $y$  纬度面上的投影,投影呈现增加趋势,图中趋势呈一阶线性。进一步分析,会发现图 7 的现象:北高南低,北西- 南东方向变化缓慢,南西- 北东方向变化很快并且逐渐增加。比较通州地图,与境内主要的水系北运河以及东北部的潮白河的北西- 南东的河水流向一致。

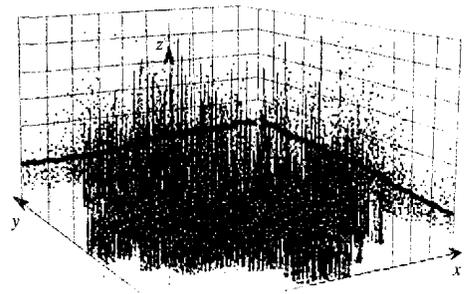


图 6 通州墒情三维趋势图

Fig 6 Three-dimensional trend diagram of soil moisture condition at Tongzhou district of Beijing

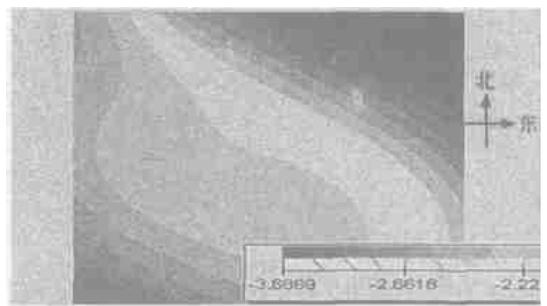


图 7 通州墒情空间变化趋势

Fig 7 Spacial variation trend of soil moisture condition at Tongzhou district of Beijing

在 ESDA<sup>[19]</sup> (地统计分析) 上考虑到空间对数正态分布、空间趋势变化、相关和空间各异性等因素影响,用普通克里格法就可以在 GIS 上生成墒情形势图(图 8)。图中显示着区域内土壤水分分布的复杂和规律性,在这样的区域中取样,要考虑到土壤水分数据的代表性,也要考虑随机性,避免人为因素的干扰。

解决这个问题的办法是在区域范围内均匀地取样。

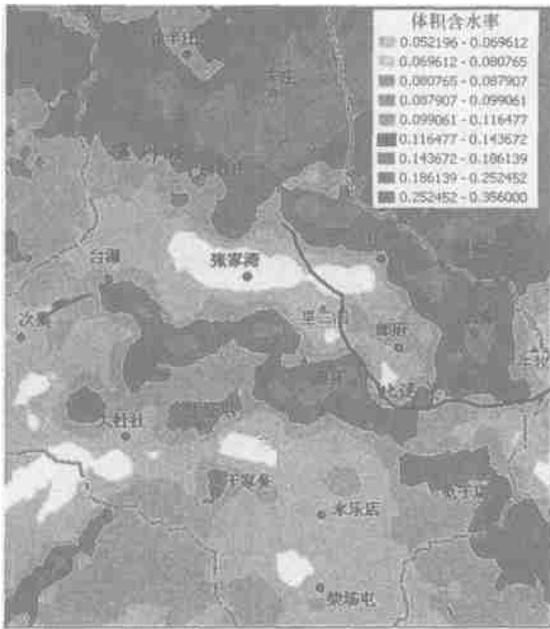


图 8 通州八月份墒情形势图

Fig 8 Distribution diagram of soil moisture condition at Tongzhou district of Beijing in August

10 依然保持着图 9 原有的分布特性。这样达到了以合适的较少的取样点来认识整体的分布状况的目的。

式 (4), 也可以为类似面积的测量工作提供参考。

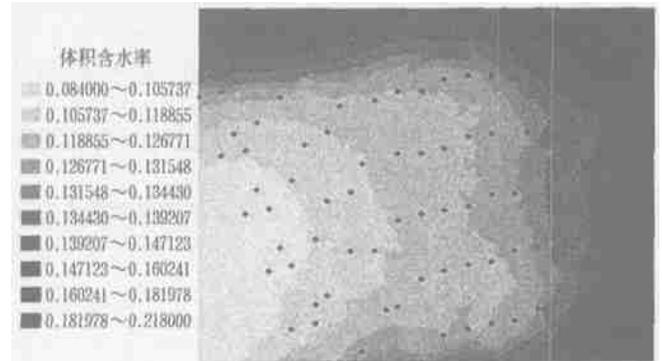


图 10 计算机模拟的土壤水分空间分布图

Fig 10 Spatial distribution diagram of soil moisture by computer simulation

#### 2.4 田间墒情的测量

田间土壤水分分布特性研究, 也用前面介绍的方法。

图 9 是依据 2003 年 10 月 16 日至 18 日在北京市昌平区小王庄中国农业机械化研究院试验农场 (东经 116°27', 北纬 40°16') 一块 13.3 hm<sup>2</sup> 麦田进行 260 点测量, 用克里格方法绘制的 10 cm 深度土壤水分分布图, 图中的点是采样点。

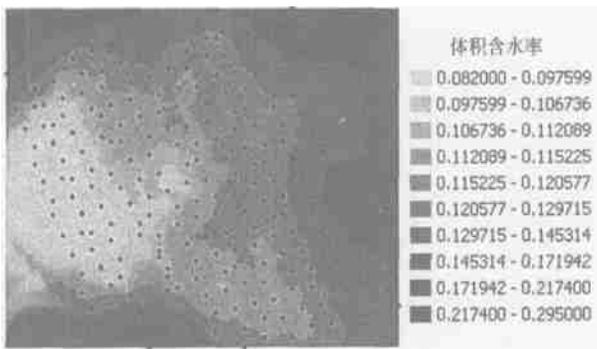


图 9 土壤水分空间分布图

Fig 9 Spatial distribution diagram of soil moisture

对于这样地块的取样如果单纯取 10~15 点, 不能反映出真实情况, 更不能指导大型喷灌设备进行精确灌溉作业。因此, 取样方式上, 应该参考合理的取样数目, 均匀取样, 避免人为因素的影响。

按照对试验测量数据的统计计算, 这块地的变差系数为 9.2%, 因此合理取样数目是

$$N = \frac{0.032515}{\Delta^2} \quad (4)$$

和上面的精度指标相同时, 计算出  $N$  为 81 点。

采用计算机模拟的方法, 在这块田地上抽取 81 点, 用克里格法绘制土壤水分分布图 (图 10), 比较图 9 和图 10 中取样点圈起来的农场田地范围, 尽管色块因为 GIS 软件缘故有些许的差异, 但可以看出: 取样点数减少, 图

#### 4 结 论

在区域性土壤墒情测量基础上, 应用概率与数理统计知识, 验证了土壤水分的近似对数正态分布规律, 完成了合理取样数目的计算过程。用地统计分析知识在 GIS 上生成了土壤水分分布图, 直观地显示出土壤水分空间分布的复杂与规律性, 提出今后进行选点试验时, 以均匀测点方式开展工作的原则。

#### [参 考 文 献]

- [1] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines[J]. Water Resour Res, 1980, 16: 574- 582
- [2] Hainsworth J M, Aymore L G. The use of computer-assisted tomography to determine spatial distribution of soil water content [J]. Australian Journal of Soil Research, 1983, 21(4): 435- 443
- [3] Wheeler P A, Morrison R G. Soil moisture monitoring using gamma-attenuation techniques[J]. American Society of Agricultural Engineers, 1984, 291- 298
- [4] Whalley W R, Leeds-Harrison P B, Bowman G B. Estimation of soil moisture status using near infrared reflectometry [J]. Hydrological Engineers, 1991, 291- 298
- [5] Andreas Weimann. DLR-German Aerospace Center Institute of Space Sensor Technology. Inverting a Microwave Backscattering Model by the Use of a Neural Network for the Estimation of Soil Moisture [C]. Proceeding of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seattle, 1998
- [6] Pan Zaitao, Rymond W A. Soil moisture in a regional climate model: simulation and projection[T]. Geophysical Research Letters, 2001.
- [7] Takeo Tadono, Muhtar Qong, Hiroyuki Wakabayashi, et al. Preliminary studies for estimating surface soil moisture and roughness based on a simultaneous experiment with CRL/NA SDA Airborne SAR [EB/OL]. <http://www.>

- gisdevelopment net
- [8] 罗毅 墒情预测与随机预报及作物系数研究[D] 清华大学, 1998
- [9] 赵燕东 土壤水分快速测量方法及其应用技术研究[D] 中国农业大学, 2002
- [10] 李纪人 旱情遥感监测方法及其进展[J] 水文, 2001, 21(4): 15- 17.
- [11] 雷志栋, 杨诗秀 田间土壤墒情监测指南[R] 清华大学水利水电工程系, 1992
- [12] 北京市水利规划设计研究院 北京市旱情监测系统建设规划实施方案[R] 2002
- [13] 王一鸣 科技部“九五”国家重点科技攻关项目子专题“土壤水分便携式快速测试仪”[R] 专题号: 96-A 23-02-010
- [14] 王一鸣 SWR 型土壤水分测量传感器[P] 中国专利: ZL00233573.5
- [15] 王一鸣 科技部“农业科技成果转化项目”TSC 型智能化土壤水分快速测试仪系列中试与示范[R], 2002
- [16] 孙凯 区域内旱情研究[J] 水利学报, 待发
- [17] 范金城, 梅长林 数据分析[M] 北京: 科学出版社, 2002
- [18] 张文彤 SPSS11 统计分析教程初级篇[M] 北京: 北京希望电子出版社, 2002
- [19] 冯险峰, 汪 闵, 孟雪莲, 等译 ArcGIS 空间分析实用指南[M] Arcinfo 中国技术咨询服务中心, 2002
- [20] 姚永慧, 潘志强, 孙英君, 等译 ArcGIS 地统计分析实用指南[M] Arcinfo 中国技术咨询服务中心, 2002

## Sampling method for soil moisture monitoring

Sun Kai, Wang Yiming, Yang Shaohui

(College of Information and Electronic Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract** A statistical analysis about the distribution of soil water content was made based on the 3022 measured data sampled from the area around 800 km<sup>2</sup> at Tongzhou district of Beijing. The results showed that the soil water content followed the logarithmic normal distribution, so an estimated method was also put forward to predict the reasonable number of sampling in a similar region. The study results will be applied to indicate scientifically how and how many monitoring stations of soil water content are set up. The experimental and theoretical analysis from another region at Changping district of Beijing also verified above results.

**Key words:** drought; soil moisture; regional soil moisture measurement; geology-statistical analysis