

农田尺度土壤水分的监测

杨诗秀 雷志栋 吴婉如 段新杰

(清华大学水利水电工程系 北京 100084)

提 要 根据田间试验实测资料分析了田间土壤水分的空间变化特征和时间动态变化,探索了监测农田水分变化时如何确定其合理的取样数目,讨论了农田尺度的土壤水分应如何监测,为节水灌溉,提高田间用水管理水平提供科学依据。

关键词 农田尺度 土壤水分 监测

分类号 P641.131

为充分利用华北平原有限的水资源,以促进农业生产持续、稳定地发展,研究提高农业水资源利用效率的途径与技术措施十分重要。在主要作物增产灌溉模式研究中,田间墒情监测及预报不仅是关键技术之一,也是一项非工程措施,旨在通过提高田间管理水平达到提高农业水资源利用效率的目的。要在生产管理中应用墒情监测技术,就要研究如何监测在空间与时间均是变化着的田间土壤水分。

所谓墒情,是指农作物主要根系活动层内的土壤水分状况,是一种俗称(本文以下直接用田间土壤水分一词)。墒情监测的对象是广袤的田野,可以从不同尺度上对其进行研究,即测点尺度,农田尺度,灌区尺度,区域尺度等。从监测田间土壤水分的角度,将农田尺度定义为从分区上可大体视为均一的一定面积的农田(例如小至 1hm^2 ,大至 5000hm^2 甚至更多)。用农田尺度对田间土壤水分变化进行研究时,必然遇到其时空变异特性的问题,为此,使用监测技术时必须妥善处理其变化特性并合理地确定取样数目。

1 田间土壤水分变异特性

1.1 田间试验的布置与取样

分析研究是在田间试验基础上进行的。试验地选在山东冠县王二庄试验站(山东聊城地区所属)的小麦地,布置了四排中子仪测管,排间隔4.5m。每排10个测点,点间隔7.0m,共计40个测点。其平面布置见图1。本地块以砂壤土为主,地下水埋深超过10m。



图1 王二庄试验站中子仪测管布置示意图
Fig. 1. Layout of the neutron probes in the Wangerzhang field test station

本文1994年11月22日收到,1995年4月3日收到修改稿。

* 国家自然科学基金重大项目资助。

各测点测深为 10、30、50、70、90、110 和 130cm，其中 B 排和 C 排还加深到 150 和 170cm。每 10 天观测一次，雨后或灌后加测。

施测所用的中子仪在测坑中进行率定，将中子仪读数换算成含水率的标定式为

$$O_v = -0.1120 + 1.075R/R_0 \quad (1)$$

式中 O_v 为体积含水率； R 为计数值； $R_0=10239$ ，为标准记数。

在 133hm^2 的大田中，布置 50 个取样点，采土布点见图 2。每一取样点在 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 的四个顶点取土，代表取样点实测值。用土钻取土，烘干法测定含水率，取土深度统一为 50cm。1992 年冬季第一次大面积取土测墒；1993 年春小麦返青时第二次测墒，1994 年夏季第三次取土。取土方法稍有变化，即 50 个取样点每点仅取一个测点，每测点在 10cm、30cm、50cm、90cm 各取一个样品。

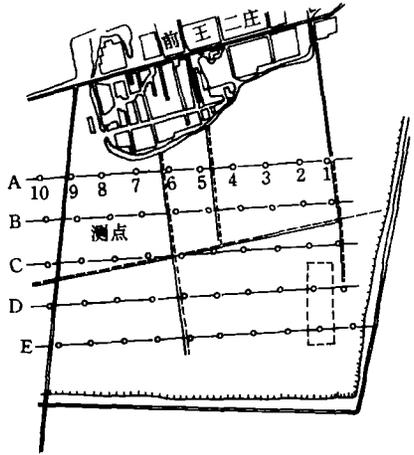


图 2 133hm^2 大田采土布点示意图

Fig. 2. Layout of the sampling sites on 133hm^2 field

1.2 田间土壤水分的统计特征值

40 个测点所测体积含水率的均值与变差系数列于表 1。由表 1 可见：

(1) 对照相邻两天所测结果大体合理。5 月 20 日、21 日正值作物蒸腾与土面蒸发旺盛期，剖面含水量应呈自然消退。个别数值 (90cm) 稍有波动，系测量误差。

(2) 不同测深统计的变差系数 C_v 值一般变化在 0.11~0.35 之间，个别可达 0.38。

(3) 一定深度平均含水率 (<1.0m 平均, 1.4m 平均, 1.8m 平均) 的变差系数 C_v ，一般小于各深度含水率的 C_v 值，变化在 0.1~0.2 左右。

表 1 中子仪 40 个测点含水率统计特征值

Table 1. Statistical values of the soil moisture measured by neutron probest at 40 points

观测日期	统计值	深 度 (cm)									深度平均 (cm)		
		10	30	50	70	90	110	130	150	170	100	140	180
1992 年	均 值	0.208	0.240	0.281	0.321	0.328	0.293	0.255	0.285	0.335	0.276	0.275	0.283
5 月 20 日	变差系数	0.129	0.123	0.127	0.156	0.163	0.263	0.230	0.203	0.213	0.099	0.124	0.112
1992 年	均 值	0.205	0.235	0.279	0.318	0.330	0.288	0.250	0.278	0.327	0.273	0.272	0.279
5 月 21 日	变差系数	0.136	0.117	0.124	0.154	0.165	0.251	0.244	0.209	0.209	0.099	0.120	0.191
1993 年	均 值	0.188	0.221	0.275	0.295	0.284	0.224	0.175	0.189	0.236	0.253	0.238	0.236
3 月 11 日	变差系数	0.100	0.105	0.129	0.193	0.278	0.333	0.313	0.229	0.265	0.136	0.161	0.122
1993 年	均 值	0.233	0.274	0.317	0.334	0.319	0.261	0.210	0.217	0.252	0.296	0.279	0.272
4 月 1 日	变差系数	0.177	0.153	0.129	0.188	0.270	0.308	0.290	0.228	0.269	0.162	0.183	0.144
1993 年	均 值	0.187	0.216	0.269	0.297	0.287	0.241	0.196	0.210	0.247	0.251	0.241	0.244
5 月 1 日	变差系数	0.224	0.194	0.175	0.221	0.317	0.350	0.312	0.232	0.263	0.188	0.209	0.162
1993 年	均 值	0.289	0.296	0.318	0.325	0.307	0.261	0.209	0.217	0.247	0.307	0.287	0.284
6 月 3 日	变差系数	0.221	0.249	0.222	0.266	0.343	0.363	0.327	0.235	0.249	0.245	0.257	0.176

1.3 1m 土层平均含水率空间结构分析

对中子仪测点资料进行了自相关与半方差的分析^[1]，自相关系数 $R(h)$ 由下式计算：

$$R(h) = \frac{\sum(y_i - \bar{y}_i)(y_{i+k} - \bar{y}_{i+k})}{\sqrt{\sum(y_i - \bar{y}_i)^2 \cdot \sum(y_{i+k} - \bar{y}_{i+k})^2}} \quad (2)$$

式中 y_i ($i=1, 2, \dots, n$) 为测定值; $\bar{y}_i = \sum y_i / (n-k)$; $\bar{y}_{i+k} = \sum y_{i+k} / (n-k)$; 测定值间距 $h = k \cdot \Delta x$ ($k=1, 2, \dots$)。半方差 $\gamma_s(h)$ 为

$$\gamma_s(h) = \frac{1}{2(n-k)} \sum [Y(x_i) - Y(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

符号意义同上。计算得 1m 土层平均含水率自相关和半方差如图 3 所示。

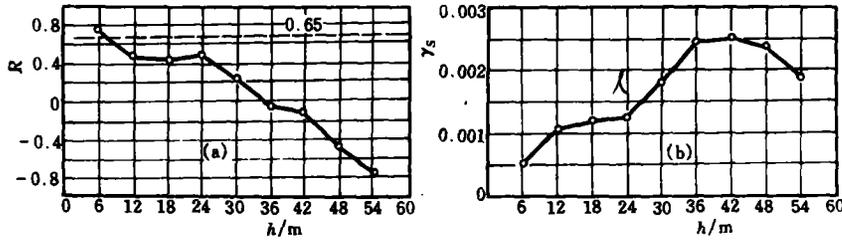


图3 1m 上层平均含水率

(a) 自相关图; (b) 半方差图

Fig. 3. Average soil moisture in 0~100cm

(a) Autocorrelation (b) Semi-variance diagram

从自相关图 (a)、半方差图 (b) 上看, 监测点间距离如超过 10.0m, 则应认为是空间无关。根据笔者在北方多省的田间布置试验测定墒情的空间结构, 两点间有显著性关系的亦未超过 15.0m^[2]。

1.4 50cm 深度处含水率特征

一年监测资料分析还表明, 1m 土层平均含水率值与同一测点 50cm 处含水率的数值比较接近, 相差均小于 10%, 且多数小于 5%。

若将这两个含水率直线相关, 相关系数达 0.979, 见图 4。因此当监测 1.0m 土层平均含水率时, 可取 50cm 深度处含水率代替。

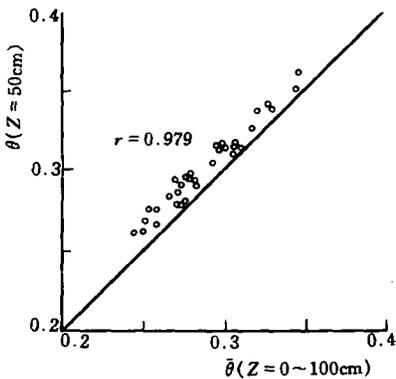


图4 50cm 深度处含水率与 100cm 土层平均含水率相关图

Fig. 4. Correlation between the average soil moisture at 0~100cm and at the depth of 50cm

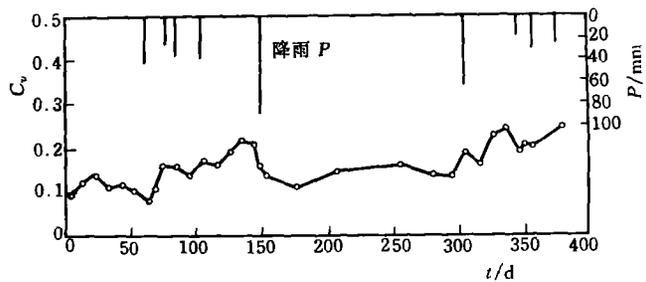


图5 1m 土层平均含水率 C_s 值变化情况

Fig. 5. Variance of the average soil moisture at 0~100cm

1.5 1m 土层平均含水率的变差系数 C_v 随时间变化特征

试验地各次监测的 C_v 值变化见图 5。与降雨值相对应, 当降雨量大, 土壤偏湿时, 变差系数小, 而干旱状况因含水率绝对值小, C_v 值大。年内的 C_v 值变化范围在 0.08~0.25, 离散程度远小于某些土壤参数 (例如导水率)。

2 田间监测取样数的确定

2.1 合理的取样数

本处土壤含水率空间结构不明显, 一般超过 10m 取的样品, 可认为是随机独立的, 而在 133hm² 大田中 50 个测点取样时, 相互距离均超过 100m, 可视作随机独立变量。由此可用统计分析原理确定取样数目。

设取样的样本是独立的, 取样数目足够多得使中心极限定理成立, 取样数 N 用下式表示^[3]:

$$N = \lambda_{\alpha, f}^2 (S/\Delta)^2 \quad (4)$$

式中 S^2 为样本方差, $\lambda_{\alpha, f}$ 为 t 分布特征值。当使用者规定了样本均值允许误差即所要求的估值精度 Δ 与置信水平 P_t 后, 则可用 (4) 式算出满足该条件的取样数, 称之为合理取样数。

2.2 133hm² 大田监测成果分析

将 1992 年 12 月、1993 年 3 月和 1994 年 6 月三次监测成果列于表 2。统计时分为 4 点法 (4 个样品取平均) 和 2 点法 (去掉最大点与最小点, 余下 2 点取平均) 处理, 由表列可见, 两种处理法其结果相近。而第三次取样结果变差系数明显减小。分析原因取样时间是雨后, 含水率较高, 离散性减少; 另一方面用了 4 个深度平均含水率代表 1m 土层平均含水率, 比起用某一深度取 4 个样品代表 (如第一、第二次取样做法) 其离散性得到改善。

表 2 133hm² 大田 50 个样点含水率统计

Table 2. Statistical values at 50 sampling points on 133 hm² field

取样日期	取样深度 (cm)	取样方法	计算方法	含水率计算结果	
				均值 μ	变差系数 C_v
1992 年 12 月	50	每点取 四个样	两点平均	0.1422	0.1806
			四点平均	0.1422	0.1792
1993 年 3 月	50	每点取 四个样	两点平均	0.1393	0.1810
			四点平均	0.1403	0.1768
1994 年 6 月	10、30、 50、90	每点取一个样	四个深度平均	0.2827	0.0913

2.3 农田尺度墒情监测合理取样数讨论

农田尺度从分区上可大体视为均一的一定面积, 但这仅是一个宏观概念。当不同条件的农田视作均一时, 其 C_v 值增大, 取样数目亦应增加。仍以 133hm² 大田墒情监测为例。由于分属不同农户, 涉及户数甚多, 难免不统一。若 50 个样品均参加统计, $p_t=80\%$, $\Delta=0.1$, 则取样数目为 10, 但在 50 个样品中第四排第一点 (D_1) 所处的土块不是冬小麦地, 供水情况不同。将其扣除, 用 49 点资料统计, 则取样数目降为 6。另外, (E) 排取样点的土壤相对偏砂性, 含水率系统偏小, 若将此排土样不参予统计, 则取样数可降为 4。

若仍以 50 个样品的统计特征值为依据, 而将估值精度降低为 $\Delta=0.2$, 则取样数目 $N=4$ 。

笔者近年来在田间实测积累的资料见表 3。从山西潇河灌区 4667hm² 农田均匀布点取 100 个样品, 取样深度 50cm, 其 C_v 为 0.146。而从同一灌区 0.67, 6.7, 66.7, 666.7hm² 农田中 50cm 深处取样两次, 第一次其 C_v 值分别为 0.209, 0.187, 0.164, 0.169; 第二次 C_v 值分别为 0.108, 0.158, 0.093, 0.140。在山东茌平县位山灌区分别从 0.67, 6.7, 66.7, 666.7hm² 农田取样两次, 第一次(深 50cm) 其 C_v 值分别为 0.158, 0.131, 0.086, 0.144。第二次(深 30cm) C_v 值分别为 0.118, 0.110, 0.114, 0.205。根据这些统计特征值去确定取样数目均可控制在 3~5 个左右。

以上的田间实测资料表明, 只要合理分区, 合理地选择估值精度与置信水平, 取样数目则完全可控制在可操作的范围之内。据考察^①, 美国加州最大灌区西北地区, 位于中央谷地, 灌区东西宽约 24km, 南北长 112km, 灌溉面积 23 万 hm², 全区内设立了 50 个土壤水分监测点, 用中子仪测定土壤水分, 其每个监测点相当于代表着 5000hm² 耕地的墒情。

表 3 不同农田面积均匀布点测墒情统计分析

Table 3. Results of statistical analysis of soil moisture measured from different area field

灌 区	次 数	深度 (cm)	面积 (hm ²)	点数	均值 (%)	变差系数
潇 河 灌 区	1	50	4667	100	22.7	0.146
			0.67	50	15.7	0.209
	2	50	6.7	50	18.55	0.187
			66.7	50	20.49	0.164
			666.7	50	20.08	0.169
位 山 灌 区	3	50	0.67	50	20.30	0.108
			6.7	50	20.09	0.158
	2	30	66.7	50	19.51	0.093
			666.7	50	19.62	0.140
			0.67	50	16.56	0.158
茌 平 灌 区	1	50	6.7	50	17.32	0.131
			66.7	50	20.04	0.086
	2	30	666.7	50	19.96	0.144
			0.67	50	15.55	0.118
			6.7	50	14.56	0.110
2	30	66.7	50	15.77	0.114	
		666.7	50	16.68	0.205	

3 小 结

根据大田大量实测资料分析, 对农田土壤水分监测取得如下基本认识:

(1) 由于田间墒情的空间变异特性的客观存在, 在农田尺度范围内取样, 应考虑到墒情的空间结构问题。

①根据笔者已有的田间试验数据分析, 1m 土层平均含水率的空间结构尺度在两个取样点间距离超过 15m 时, 所得数据可视为空间无关的随机变量。

②试验资料表明, 一定深度内的含水率平均值的离散性小于各深度含水率的离散性。从

① 新疆自治区塔里木项目灌溉排水考察团 1993 年美国灌溉排水技术考察报告。

实用角度，在监测田间土壤水分时，建议采用 1m 土层平均含水率资料。

③初步分析表明，1m 土层平均含水率与 50cm 处含水率有十分良好的相关性。因此可考虑用 50cm 深度处含水率代替 1m 土层平均含水率。当然，此做法还需经更多田间资料的检验。

④田间资料表明墒情空间变异特性随时间序列有一定的波动，其波动值实际上包涵了取样误差、测量误差和样品容量不足的误差等。

(2) 研究农田尺度的田间墒情空间变异特性，是为了确定合理的取样数目。

合理的取样数目主要取决于一定容量的样本样品的变差系数 C_v 以及根据当地生产和经济条件等选取的取样时估值精度 Δ 与置信水平 P_t 。

笔者已做过的田间试验资料表明，无论是不足 0.1hm²，还是大至 5000hm² 的农田，其 1.0m 深度（主要湿润层）平均含水率的 C_v 值主要分布在 0.1~0.25 范围，相对土壤其它特性（例如导水率等）为小。根据该 C_v 值范围，只要选取合适的估值精度 Δ 和置信水平 P_t ，则所确定的合理取样数目完全是目前国内农业发展水平所能接受的。

田间墒情监测是一项简易实用的技术，随着我国农业集约化、机械化的发展与先进技术的不断渗透，该项技术将在提高田间用水效率和管理水平方面发挥作用。

参 考 文 献

- 1 雷志栋，杨诗秀，谢森传. 土壤水动力学. 北京：清华大学出版社，1988. 321~340
- 2 杨诗秀，雷志栋. 田间土壤含水率的空间结构及取样数目确定. 地理学报. 1993, 48 (5): 447~456
- 3 D Hillel. Application of Soil physics. Academic Press. 1980, 319~332

Soil Moisture Monitoring at Field Scale

Yang Shixiu, Lei Zhidong, Wu Wanru, and Duan Xingjie

(Tsinghua university, Beijing 100084)

Abstract: Soil moisture monitoring at field scale is discussed in this paper. The characteristics of space and time-dynamic variance of soil moisture are analyzed on the base of in situ data, and accordingly, the rational sampling number of soil moisture monitoring can be determined. This study is aimed at improving the level of water-saving irrigation and field water use management.

Key words: field scale; soil moisture; monitoring.