

河西地区喷灌自动化若干问题的研究

徐富安 杨苑璋 许绣云 汪仁真

(中国科学院南京土壤研究所)

1983—1986年,我们参与了高台骆驼城喷灌试区与黑河灌溉试验站自动喷灌工程部分设备的研制,主要有以下几方面的工作:(1)研制喷灌试区计算机数据采集系统和调试各类传感器;(2)提供相应的自动喷灌控制模式,及有关的软件编程依据;(3)为研究喷灌及大型灌机在河西走廊地区的适用性进行相应的试验。

一、采集参数的传感器的确定

为研究戈壁地区大型喷灌机的适用性问题,决定对试验参数采集用先进的微机数据采集和处理系统。用传感器将土壤湿度,降水量(喷灌水量),蒸发量,土壤温度,气温等参数汇集于微机系统,以了解试区内土壤水分动向(入渗过程与去向),喷灌的灌水效率,大气与作物蒸散强度,灌溉周期及合宜灌水量的确定等,并实施喷灌的自动化。因此,各类传感器的精度、可靠性在系统中处于重要的地位。

(一)土壤湿度传感器

1. 土壤湿度传感器的选择:由于土水势是土壤水分运动的主要驱动力,作物根系吸水首先取决于土水势,因此,确定以土壤水基质势指示灌溉。通过压阻式传感器将负压计中土壤水基质势值转换成电压值^[1],传输给计算机系统,计算机具有数据采集,储存,运算和控制的能力。

土壤湿度传感器在使用前,对其输出值和放大值进行了标定,线性度都小于0.5%,这个精度是较理想的。该湿度传感器在田间与真空表型土壤湿度计进行了比较,结果表明,它们的测定结果,平均误差不超过 $\pm 2\%$,最大误差不大于 $\pm 5\%$ 。

2. 湿度传感器的布局:圆型喷灌机绕行一周需几天时间,喷后土壤含水量呈扇形分布,因而只要将传感器沿机架的方向埋入地下即可。我们根据土地相对均匀的土壤条件,确定每个灌区设4个测量点,各个点之间的间隔约为100米;每点分4层,在20、40、60和80厘米处埋设湿度传感器。

传感器长间时埋入土中,主要受温度的影响,但在地面以下15厘米处,昼夜温差不大,季节性温度变化也不超过 20°C ,传感器输出产生的最大误差为0.1毫伏,这个影响是很小的。

3. 土壤含水量值的求得:在传感器埋设地段采取原状土样,测得土壤水分特征曲线。根据土壤水分特征曲线,用多项式逐步回归的方法,得出它们的方程式(表1)。大多数曲线可归纳为两类, $\theta = a - b \ln T$ 和 $\theta = a + bT^4 - \ln T$ 。式中 θ 为土壤含水量, T 为土壤水基质势, a 、 b 为待定系数。将这些方程式编入程序,计算机就能自动地从土壤水基质势值计算得到相应的含水量值。进而,又可获得土壤剖面的贮水量。但由于土壤本身的滞后现象,和基质势测定的误差,会使计算的含水量值产生误差,当含水量高时,误差较大,反之,误差较小。

(二)土温与气温传感器

表 1

土壤水分特征曲线方程式

剖面号	方 程 式	剖面号	方 程 式
A ₁	$\theta = 39.0 + 1.20 \times 10^{-12} T^4 - 4.0 \ln T$	E ₁	$\theta = 49.3 - 4.00 \ln T$
A ₂	$\theta = 34.0 - 2.78 \ln T$	E ₂	$\theta = 36.8 - 0.40 T^{1/2}$
B ₁	$\theta = 39.6 - 3.68 \ln T$	F ₁	$\theta = 63.5 - 4.73 \ln T$
B ₂	$\theta = 31.5 - 2.70 \times 10^{-12} T^4 - 2.17 \ln T$	F ₂	$\theta = 40.2 - 2.60 \ln T$

注：(1) 表中为部分剖面的曲线方程；(2) 式中 θ 为土壤含水量，T 为对应的土壤水基质势。

我们采用由两个热敏电阻和两个固定电阻组成的可互换线性热敏电阻阻件作为温度传感元件，它具有很高的输出灵敏度 ($5\text{mV}/^\circ\text{C}$) 和很小的线性偏离 (0.1°C) 以及较高的互换精度 ($\pm 0.2^\circ\text{C}$)。用这类传感元件制成土温、气温传感器，其测温精度为 0.5°C ，测温范围为 -30 — 50°C ，分辨率为 0.1°C 。

监测土温装置做成多点式温度传感器，采用多个温度传感元件安装于一根绝热测棒上。所得讯号经缓冲器缓冲后可作长线传输(达450米)，具有灵敏、稳定的输出特性。该温度传感器部件功耗极微，采用干电池供电，并带有电压低落时更换电池的提醒显示装置。

(三) 蒸发量传感器

水面蒸发量的测定对研究灌溉有重要参考意义。将水面蒸发量转换为电讯号，是利用蒸发器自动供水管上气压变化值，经由小压差固态压力传感器转换而成。所测得的电压变化经传输放大，模数转换，由计算机取数，经数据处理后，得水面蒸发量数据。

蒸发量与电压值之间，补水量与电压值之间都有良好的线性关系，它们的相关系数为 0.999。模拟试验表明，传感器的灵敏度较高，分辨率达到 $0.1\text{mm}/0.1\text{mV}$ ，平均误差为 $0.7\text{mm}/\text{日}$ 。

(四) 降水量传感器

降水量传感器的设置是研究喷灌入土水量、喷洒均匀度、灌水效率等指标所必须。降水量传感器是用翻斗式遥测雨量筒改装。喷灌机开动后，由遥测雨量筒收入降水，筒内测量翻斗每翻转 1 次，干簧管便动作 1 次。雨量筒内配有电子线路，以 0.2 毫米分辨率将翻斗数记录下来(并可手动显示)，并传给计算机取数。。经计算机运算后，完成各监测点降水量的测量。并提供降雨强度、均匀度等信息。

二、有关喷灌自动化的若干问题

(一) 自动喷灌方式的选择

根据灌区的作业要求，以及采用的传感器类型的差别，自动喷灌的实施有以下几种方式：

1. 表决盘方式：对单一灌机作简单的自动喷灌控制时可用这种方式，采用 TS—2 型开关式土壤水分传感器作敏感器件^[2]。根据土壤水分的变化，当土壤干燥到某一土壤基质势值时，传感器线路处于导通状态，利用这个原理，进行灌机的自动控制。当埋设于田间的 4 支传感器中，若有任何 3 处的土壤湿度已达灌水指标的话，表决电路即可发出缺水讯号，闭合继电器，经交流接触器将信号放大，启动灌机实施喷灌。显然，用这种方式实施的自动喷灌，其费用最省。其灌水量可通过串联延时继电器预先设定时间来确定。

2. 单板机程控方式：当一台灌机负担几个小型灌区的喷灌时，需对来自各灌区的信息及各种灌水阀门动作作程序控制，这时可由单板机来控制。土壤湿度信息的监测仍用开关式土

壤水分传感器。田间埋设的传感器，在同一灌区里可采用串接方式，将2、3支传感器合在一起，使提供的需灌信号更可靠。对于这种方式，每天或隔天开动1次单板机监测土壤湿度讯号即可。一旦某一灌区传来需灌讯号程控器即可按预先设定的程序，先后启动有关灌区的进水阀门与灌机，对作物实施按需供水。

3. 计算机控制方式：在微机数据采集系统的基础上，可实行对喷灌机的自动控制。微机系统在采集数据的同时，可对喷灌机发出需灌信号。例如，在春小麦苗期，当埋设于20厘米处的4支土壤湿度传感器中有3支吸力值达50千帕以上时，计算机即发出灌水指令，信号经传输放大，通过执行机构启动灌机喷水。在小麦生育的中后期，当40厘米土层处4支传感器中有3支传感器吸力值超过60千帕时，计算机即发出灌水指令。这种系统的设计通常既可实行自动喷灌，又可进行手动操作，使用十分方便。当大气蒸散强度大时，可随时修正灌水指标。

(二)传感器的埋设

自动喷灌是否合理、科学，很大程度上决定于传感器所提供的需灌信号是否准确，这不仅与传感器本身的精度有关，而且与传感器的埋设地点、深度等因素有关

田间埋设传感器的地方，应能代表所控制的灌区内的土壤水分状况。因此，必须注意田间土壤状况，平坦度，植物长势，灌溉水分布状况等因素，以确定具体埋设地点。为便于工作，传感器通常埋设在田间道路的附近，但也不能紧靠路边，以免土壤被人为实压，或作物生长不均匀，使土壤水分状况无代表性。

传感器的埋设深度决定于灌溉水的入渗深度，作物根系分布状况等因素。田间试验表明，当田间喷灌30毫米水量条件下，实际入渗水量约为16—18米³/亩（10—20%为喷灌过程中蒸发等损耗）。若喷灌前土壤比较干燥，灌溉水大约能入渗到50厘米以下，但主要集中于0—30厘米土层里，该层次含水量可提高5%左右。50厘米深处含水量增加不到1%。当原土壤含水量较高时，喷灌30毫米水量后，在90厘米深处土壤吸力也有所下降。但是，土壤含水量激烈变化的层次仍在0—30厘米左右，50厘米处含水量变化也不大于1%。

这些资料表明，传感器若埋在50厘米处或更深处，传感器对灌溉前后土壤水分变化将不敏感。若埋得过浅，如10—20厘米处，由于受土面蒸发影响大，也不能代表田间水分的实际情况。在1次喷灌30毫米水量的条件下，传感器埋在30—40厘米处是适宜的。若灌水量较大，如在淹灌条件下，传感器则可适当埋深一些。作物根系分布层的深度也是决定传感器埋深的因素之一。一般农作物如小麦、黄豆等根系可伸展到70—80厘米以下。莴苣、芹菜、甘蓝等蔬菜作物根系较浅。但对多数作物来说，30—40厘米是根系密集的层次。所以在喷灌条件下，传感器埋在30—40厘米处是适宜的。

(三)灌溉时间的预报

预知灌水时间，对灌机的维修，灌区用电安排均有参考意义。该微机数据采集系统具有灌溉时间预报的功能。具体的做法是，每天采样后，计算机将各采样点某层（如40厘米）4个传感器中3个较大的吸力值进行平均（即 y 值），然后用外推公式(1)，从第4天可以推出10天内的土壤水基质势变化情况。外推公式为：

$$y = y_{n-1} + [(y_{n-1} - y_{n-2})^2] / (y_{n-2} - y_{n-3}) \quad (1)$$

式中： $n = 4, 5, \dots, 10$ ，是灌水后的天数； y_n 为第 n 天土壤水基质势的平均值。然而，由于土壤水基质势受土壤，大气和植物多种因素综合的影响，上述预报每天须进行修正。

三、喷灌在河西地区适用性问题

河西走廊地区气候干燥，高台县多年平均降水量为104毫米，而年蒸发量高达2215毫米，水资源十分宝贵，因此，农田必须实行节水灌溉。

在骆驼城灌区，无地面水源，仅依赖于祁连山区雪水补给的地下水源。该灌区采用 DYP—456 型电动圆形(时针式)喷灌机喷灌。此种灌机由11个塔架组成，总臂长 456 米，单机灌溉面积约1000亩，每绕行一圈，最快速度约需13小时，最慢为156小时(约6.5天)，每小时喷158立方米水，灌机绕行一周最大降水深为 37 毫米(6.5天走一圈)。这样的喷灌水量，是否能满足作物需要，且又不浪费水资源。为此，我们在该灌区进行了田间灌溉试验。

当地春小麦于3月底播种，3月底到5月下旬，麦子生长较缓。这段时间气温较低，蒸散量较低；从拔节至成熟期，气温和蒸发量明显升高，作物耗水量大。此时土壤水分和灌水量对作物产量影响很大。对春小麦田0—100厘米水分状态观察结果表明(图1)，6月7日喷灌45毫米水后，经过12天，40厘米土层处土水吸力达到50千帕需灌指标，当年6月下旬后阴天较多，蒸散强度较弱，6月21日再次喷灌30毫米水后，经11天后40厘米土层处吸力才再次上升至50千帕。

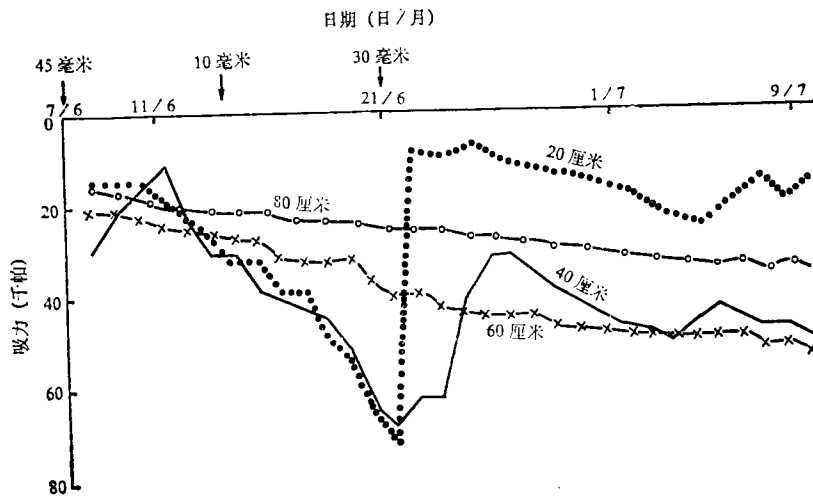


图1 春小麦抽穗至成熟期土壤水吸力动态(图中箭头代表灌水)

由于春小麦生育季节较短，当地在7月10日—15日即可收获。在麦子拔节—乳熟期气温虽已逐渐升高，但尚未达到高峰。从灌溉试验的初步结果看，灌水周期为7天的圆形喷灌机是可行的。从有些试验资料看，土壤的深层储水对小麦的增产效果十分显著。在大型灌机灌溉周期7天的限制下，1次喷灌水量约在30毫米左右，不可能对40厘米以下土层储水有多少贡献。必须利用年前秋冬季节做好冬灌工作，以减轻灌机超负荷运行的现象，为高产创造条件。

对于秋熟作物来说，情况有所不同。因大秋作物生长于5、6、7、8、9几个气温和蒸散量最高的月份，耗水量高于春小麦。对谷子的灌溉微区试验分别在砂壤土和粘壤土上进行。图2资料反映了两种土壤40厘米深处土壤水吸力动态变化过程。这两种土壤的水分状况有很大的不同。7月14日以前，谷子处于苗期，蒸腾耗水较小。在相似灌水条件下，土壤水分差异主

要在于土面蒸发水量的差异。砂壤土上，6月19日灌水30毫米，40厘米深处，直至7月14日，土壤水吸力一直在10千帕以下，土壤湿润，而粘壤土在此期间灌了两次水(共60毫米)，吸力却一直处于50—60千帕摆动，土壤较干燥。观察资料表明(表2)，砂壤土水分入渗快，30毫米的灌水量可影响到(渗到)80厘米深处。因此，通过土面蒸发损耗的水就较少。而在粘壤土上，由于水分下渗缓慢，1次灌水30毫米后，主要湿润0—30厘米土层，难以渗至50厘米以下，水分易通过土面蒸发而损失。砂壤质土壤上，7月13日—8月9日，虽然天气酷热，但每次浇水30毫米后，可维持11—12天，40厘米处土壤吸力才上升到50千帕(需灌临界值)以上。8月上旬后，谷子进入抽穗旺长阶段，需水量增加，8月9日至25日，2次灌水各30毫米，每次可维持8天。从这一资料看，以7天为一个喷溉周期的大型喷灌机，在砂质土壤上种植秋熟谷子基本上是可以适用的。

表 2 灌溉水下渗所需时间(小时)

到达深度(厘米)	细砂壤土	粘壤土
10	<1	1~2
20	1~2	2~4
30	1~2	3~24
40	2~3	12~24

注：灌水量为30毫米。

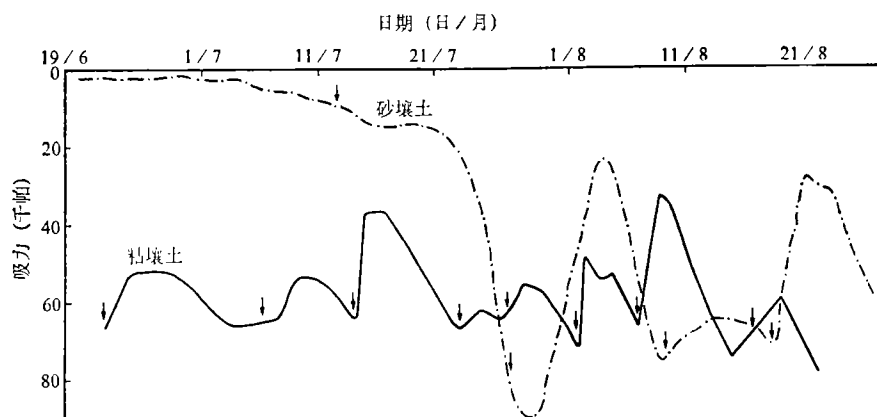


图 2 谷子地40厘米处土壤吸力变化曲线(图中箭头代表灌水，除粘壤土上8月6日、16日灌水为60毫米外，其余每次均灌水30毫米)

在粘壤土上情况却不同，由于土壤渗透性差，土表灌溉水蒸发损失大。从6月19日至8月底，砂壤土上共需灌水6次，共180毫米，同期，粘壤土上共灌水9次，共360毫米，相差1倍。从7月25日至8月5日，粘壤土上谷子1次灌水30毫米，只能维持5—6天，8月6日至21日谷子进入旺长阶段，1次灌水60毫米只能维持5—8天。这是大型喷灌机运行所难以达到的。若在灌区粘质土壤上大批种植大秋作物，则会出现干旱现象。为提高喷灌效益，获得高产，我们建议采用以下措施：

1. 合理安排作物茬口。按一定比例面积种植秋熟作物谷子、玉米等和春小麦。春小麦在小暑后几天收获，在冬灌充足情况下，收获前处于高温时间不长，一般情况下，灌溉周期为7天的喷灌机能满足麦子的水分要求，而秋熟作物需水高峰却遇7、8、9月高温季节，在粘质土上，若全面种植秋熟作物就有发生水分供应不上的危险，但搭配种植一定面积，喷灌仍可适用。

2. 改良土壤。一方面根据土壤砂粘情况，安排种植不同作物，实行因土种植。如粘质土上安排种植春小麦，砂质土上安排种植秋熟作物和其他适合砂土的作物；另外，表面过分粘闭板结的土壤应改善其不良特性，当地砂土资源十分丰富，可考虑在其上复盖一层砂土，以利水分

入渗和减少地面蒸发。

3. 平整土地。田间测定表明,在未经灌溉的荒地上,土壤的饱和透水系数为11.0—25.3毫米/小时。但是,在经过多次灌溉以后的粘土上,透水性大为下降,饱和透水系数减至1.0毫米/小时。这与灰棕漠土的土壤结构稳定性不良有关。这种土壤中,有机质不足,土粒遇水后容易分散,而且土中富含粉砂颗粒和碳酸钙,灌溉后土壤极易板结和结壳,阻碍水分向下渗透,而大型灌机的每小时降水量达30毫米。因此,在实施喷灌时,若粘质土地段地面不够平整,则地面将产生径流现象,结果将使高低不平的土壤上水分分布很不均匀。在喷灌后的第3天(6月7日),我们在这种地段的不同的地形部位土壤上进行了含水量测定:处于高处的顶坡,20—60厘米处土壤含水量约5.1%,已达凋萎含水量,麦子正在枯死;中部土壤含水量在9.4%左右;而坡底部土壤含水量为11.7—12.8%,麦子生长较好。结果使整块麦田的长势极不均匀。

参 考 文 献

- [1] 杨苑璋、汪仁真、陈志雄,自动记录湿度计。土壤,第15卷,第3期,1983。
- [2] 徐富安,水银触点式土壤水分传感器的研制和应用。土壤,第19卷,第2期,1987。

(上接第18页)

应规律,参考小麦的需肥特点及对氮、磷肥的利用率,按不同土壤肥力水平上不同的增产指标计算得出基本的施肥量。从而拟出小麦的基本施肥方案(表6)。

值得指出,表6中的土壤基础产量是指不施肥对照区的产量水平。由于作物产量受“最低因子律”的限制,因此实践中最好能依据具体土壤的养分含量或根据田块施肥历史加以适当调整。例如,有的土壤速效磷已达30mg/kg,此时甚至可进一步降低施磷量;若土壤速效磷在5—10mg/kg的水平,此时尚需增加施磷量;如果前两季磷肥用量较高,似可少施磷;如果连续两季未施磷肥,则必须保证磷肥用量。对于钾肥,在大多数砂姜黑土上,若有有机肥施用,则暂可不施;若连续只施用化学氮、磷肥,则在淀白黑姜土、黄姜土和部分黑姜土上应补施少量钾肥。

参 考 文 献

- [1] 张俊民,论砂姜黑土的生产潜力和综合治理,砂姜黑土综合治理研究,2—11页,安徽科技出版社,1988。
- [2] 张效朴,主要作物均衡增产营养调节对策,淮北地区水土资源开发与治理研究,61—73页,周明枞等主编,科学出版社,1962。
- [3] 吴文荣、方世经、周恩嘉、郭熙盛、刘枫,砂姜黑土磷素状况及磷肥施用,砂姜黑土综合治理研究,172—178页,安徽科技出版社,1988。
- [4] 蒋柏藩、李阿荣、顾益初,石灰性土壤磷肥施用的探讨,土壤,18(4):186—188页,1989。
- [5] J·Karlovsky (陆宝树译) 农业生态系统中的养分循环以及植物对养分的利用,土壤学进展,第4期,18—30页,1982。