

大田地下滴灌土壤水分分布均匀度评价方法

宰松梅^{1,3}, 仵峰^{2,3*}, 温季³, 王朝辉¹

(1. 西北农林科技大学资源与环境学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100;
3. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453003)

摘 要: 灌水均匀度是评价灌水质量的重要指标, 灌水后的土壤水分分布均匀度是灌水均匀与否的最终体现。选择最佳的土壤水分取样点数是进行经济、准确评价灌水后土壤水分分布均匀度的基础。在新疆地下滴灌棉田中, 灌水后 2 d (土壤水分相对稳定) 进行取样, 实测田间土壤水分分布, 抽样分析了样本数与土壤水分分布特征及均匀度之间的关系。结果表明, 随样本数的增加, 对应的土壤水分分布均匀系数 (克里斯琴森均匀系数 C_u) 的变幅缩小, 并向其均值集中。从样本数量上分析, 样本数在 15 到 60 之间, 其 C_u 的均值变化并不明显; 在试验条件下, 进行大田土壤水分监测评价时, 均匀分布的取样点个数应不少于 24 个。 C_u 和配水均匀度 (D_u) 之间存在较好的相关性, 但用实测结果得出的系数与相关手册的推荐值之间存在一定的偏差, 互算时需加以考虑。采用均匀 25 点取样, 对大田棉花地下滴灌的土壤水分分布状况进行了评价。结果表明, 地下滴灌条件下, 毛管附近的土层土壤含水率变幅最大; 与上、下土层相比, 灌水前毛管附近 (20~40 cm) 处的土壤水分均匀度较低, 灌水后其均匀度大幅提高。

关键词: 灌溉, 土壤水分, 取样, 大田, 均匀度

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.12.009

中图分类号: S275.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-12-0051-07

宰松梅, 仵峰, 温季, 等. 大田地下滴灌土壤水分分布均匀度评价方法[J]. 农业工程学报, 2009, 25 (12): 51—57.
Zai Songmei, Wu Feng, Wen Ji, et al. Evaluation method of soil water distribution uniformity under conditions of field subsurface drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 51—57. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

田间测评灌溉系统的灌水均匀度, 是检测和评判系统设计好坏的重要依据, 也是进行系统管理的基础, 还可作为诊断系统设施完好与否的重要参考。目前, 对灌溉系统灌水均匀度的评价方法可分为两大类。一类是间接法, 认为影响均匀度的主要因素是系统的工作压力^[1-2], 通常是通过监测系统的压力、流量分布, 依据灌水器出流与压力等的关系, 计算出灌水均匀度。第二类是直接测量灌溉水的分布状况, 从而对灌水均匀性进行评价。对于在地表可直接观察到灌溉水的灌水方式, 如地面灌、喷灌、地表滴灌等, 可采用在田间布设一定数量的雨量筒等, 来观测灌溉水量的分布状况^[3], 或按照一定的取样方法, 对灌溉后土壤水分的分布进行观测, 从而对灌溉系统的灌水均匀度进行评测^[4-5]。由于地下滴灌的毛管和灌水器埋在地下, 不便直接观察和测量到其出水情况。即便采用挖开地下滴灌毛管的方法对其均匀度进行评测, 也难以取得令人信服的结果, 毕竟滴头挖出后其出流情况与实际不同。有研究表明, 挖开后灌水器的流量

增加 5% 左右^[6]。因此, 田间地下滴灌系统灌水均匀度的观测和评价成为一个难点。

Phene 等^[7]对地下滴灌系统的灌水均匀度进行了测定, 将几种类型毛管的实测均匀度与采用模型得到的模拟值进行了比较。结果表明, 在设计工况下, 模拟的地下滴灌系统灌水均匀度与实测结果基本一致。Camp 等^[8]对地下滴灌系统进行了评估, 认为地下滴灌系统的灌水均匀度小于地表滴灌系统。胡笑涛^[9]从灌水器制造偏差、土壤水分运动及毛管水力学等方面, 研究了不同技术参数对灌水均匀度的影响。Warrick 等^[10]考虑了地下滴灌条件下土壤对灌水器出流的限制, 指出在多数情况下, 采用低流速、多滴头和压力补偿式滴头, 可提高灌水均匀性, 对高变异性土壤效果尤其明显。上述研究均属对灌溉系统均匀度进行的评价, 而从对作物的有效性上讲, 真正意义上的灌水均匀度应是灌溉后土壤水分分布的均匀度。然而, 由于土壤的变异性及土壤水的再分布, 灌溉水分分布均匀度又不完全等同于土壤水分分布的均匀度^[11-14]。如 Li^[11]在研究喷灌均匀度时, 把灌水均匀度与土壤水分分布均匀度分开评述, 认为土壤水分分布均匀度高于灌水均匀度。

要评价土壤水分分布的均匀度, 势必需要在土壤中取样。对于小面积的试验, 可以全面多点取样。如对于条 (带) 状灌水, 可沿一条毛管 (或灌水沟) 布点, 呈线状取样^[4-5, 12-13]。若将此线状分布的取样点推及到面上时, 取点数目势必将成倍增加。过多的取样, 不仅意味着工作量加大, 而且对农田和作物的影响也增加。而当取样点数目太少时, 又不能满足其代表性。只有选择适当的取样方法和取样数目, 既可以使得样本具有代表性,

收稿日期: 2009-07-14 修订日期: 2009-09-27

基金项目: 国家 863 计划重点课题 (2006AA100213); 国家自然科学基金项目 (50309016); 国家科技支撑计划课题 (2007BAD38B04)

作者简介: 宰松梅 (1970—), 女, 副研究员, 博士生, 主要从事节水灌溉与劣质水利用方面的研究。新乡 中国农业科学院农田灌溉研究所, 453003。
Email: ggszsm@yahoo.com.cn

*通信作者: 仵峰, 男, 研究员, 主要从事节水灌溉技术及相关理论研究。新乡 中国农业科学院农田灌溉研究所, 453003。

Email: ntggswf@yahoo.com.cn

同时工作量以及对作物的影响也较小时，才能得到期望的结果。由于取样工作的复杂性和繁琐性，除了少数有针对性的小面积试验外，很少有人对大田地下滴灌的灌水均匀度进行评测，因而存在系统设计是否合理、运行能否达到设计要求、设备是否运行在正常工况区等一系列的疑问。本文拟采用土壤水分布的均匀程度作为评价地下滴灌灌水均匀度的标准，以在新疆地下滴灌棉田实测的土壤水分状况为例，分析取样点数目对灌水均匀度评价的影响，以确定适宜的取样点数目。并利用所得结论，对新疆棉田地下滴灌的灌水均匀度进行了评价，以期为指导地下滴灌的运行和管理提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2006 年在新疆生产建设兵团农五师九十团九连进行，该连地处欧亚大陆之腹地——新疆阿拉山口地区，干旱少雨，常年多风，属于典型的干旱荒漠气候。年平均气温 5.8℃，平均降水量 187.4 mm，平均蒸发量 1 558.5 mm，积温 3 116℃，无霜期 170 d，全年日照时数 2 515.8 h，平均风速 1.9 m/s，风向多为西北风。属纯灌溉农业区。土壤为沙壤土，以种植棉花为主，种植模式采用三膜十二行，播种行距为 30-50-30-60 cm，棉花品种为新陆早 12，收获株数 2.28×10^5 株/hm²。

试验地选在九连 2[#]井 3 支控制范围内，地块相对平整，地面最大高差小于 0.5 m。地下滴灌系统建成于 2003 年，供水支管采用 $\Phi 110$ PVC 管，冲洗管为 $\Phi 75$ PVC 管，毛管埋深 35 cm，铺设长度 100 m。毛管采用进口滴灌带，制造偏差小于 5%。毛管由冲洗管连接形成环状管网，小区内各灌水器的工作水头差较小。

根据当地多年来农业实践，棉花生产多采用喷灌出苗、滴灌灌水的模式。从棉种播种到采摘，需要灌播前水、出苗水、苗期水、蕾期水、花铃期水、吐絮期水等，其中播前水、出苗水以喷灌为主，其余全部采用地下滴灌，全生育期共灌水 13~15 次，灌水额定 225~450 m³/hm²，年灌溉定额 3 600~3 900 m³/hm²。

1.2 研究方法

1.2.1 田间布置与取样方法

2006 年 8 月 6 日及 8 月 17 日均为灌水后的第 2 天，对于试验田的沙壤土来说，土壤水分经过 2 d 的再分布后，已不存在有压水和重力水，土壤水分运动速度也相对变缓，最大含水率应为田间持水率，即土壤水分已相对稳定；对于不同的灌水方法和灌水量，此时的土壤水分分布状况才具有一定的可比性。因而以这 2 次的土壤水分状况调查结果为基础，进行棉田地下滴灌的土壤水分分布状况分析。观测区域长、宽各 100 m 左右，考虑当地生产实际（棉花种植模式），在沿毛管方向从地边界向内 5 m，垂直毛管方向从地边界向内 6 m 处，开始布设观测点，沿毛管方向每隔 10 m 布设 1 个点，每行布设 10 个观测点，垂直毛管方向每隔 8 m 布 1 行观测点，计 12 行，共计布设 120 个观测点。采用 TSC- I 土壤水分快速测定仪观测土壤水分含率。由于地下滴灌灌水后，在毛管位置处水分饱和，但湿润区并不一定完全搭接，在水平方向上，土壤水分并非达到一定的含量后才向其他层次运动，因而采用分层取样法进行评价。同时，相对于毛管位置以上的土壤，毛管以下的土壤含水率高且均匀，通常情况下，能够满足该区作物根系吸水的需求。而地表以下至 30 cm 以上的土壤，是作物根系的主要活动区域之一，其土壤水含率及分布对作物和农业生产，以及地下滴灌的优势发挥起到决定性作用，同时为了防止误伤毛管，每个点位分别测定地表以下 5、10、20、30 cm 处的土壤水分含量。

1.2.2 数据处理方法

1) 样品处理方法

为了分析样本数对均匀度的影响，以 120 组数据为基础，按奇数和偶数进行抽样，即可得到 2 组样本数分别为 60 的土壤水分值，分别记作奇、偶；再在 2 组 60 个样本的基础上，仍按奇数和偶数进行抽样，得到 4 组样本数为 30 的土壤水分值，记作奇奇、偶奇、奇偶、偶偶；最后以 4 组 30 个样本为基础，仍按奇数和偶数进行抽样，得到 8 组样本数为 15 的土壤水分值，记作奇奇奇、偶奇奇、奇偶奇、偶偶奇、奇奇偶、偶奇偶、奇偶偶、偶偶偶。表 1 为上述取样方法对前 10 个样本的抽样示例，其余依此类推。上述样本的产生方法，相当于生产实践中逐次成倍加大取样间距所得的样本。

表 1 样本抽取示例
Table 1 Demonstration for sampling method

| 原始 编号 | 样本容量 120 | 样本容量 60 | | 样本容量 30 | | | | 样本容量 15 | | | | | | | |
|----------|-------------|---------|---|---------|----|----|----|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | 奇 | 偶 | 奇奇 | 偶奇 | 奇偶 | 偶偶 | 奇奇奇 | 偶奇奇 | 奇偶奇 | 偶偶奇 | 奇奇偶 | 偶奇偶 | 奇偶偶 | 偶偶偶 |
| 1 | √ | √ | | √ | | | | √ | | | | | | | |
| 2 | √ | | √ | | √ | | | | √ | | | | | | |
| 3 | √ | √ | | | | √ | | | | √ | | | | | |
| 4 | √ | | √ | | | | √ | | | | √ | | | | |
| 5 | √ | √ | | √ | | | | | | | | √ | | | |
| 6 | √ | | √ | | √ | | | | | | | | √ | | |
| 7 | √ | √ | | | | √ | | | | | | | | √ | |
| 8 | √ | | √ | | | | √ | | | | | | | | √ |
| 9 | √ | √ | | √ | | | | √ | | | | | | | |
| 10 | √ | | √ | | √ | | | | √ | | | | | | |

按照上述方法产生的样本数为倍比关系，即样本数成倍增减。为缩小相邻样本组间的样本数差距，另在 120 组基础样本数据中，按等差方法抽取样本数为 20、24 各 6、5 组样本，即每隔 5、6 个样本数据，取 1 个数据，组成新的样本组，与上述样本一起进行土壤水分分布均匀度分析。

2) 评价方法

按照国内外常用的克里斯琴森 (Christiansen) 均匀系数，对地下滴灌灌水后的土壤水分分布均匀度进行计算，并计算对应的配水均匀度。

2 结果与分析

针对地下滴灌条件下土壤水分分布均匀度评价的难点，通过考查不同样本数与计算均匀度间的关系，确定地下滴灌条件下合理的取样数目，并与配水均匀度进行比较，用实测结果验证克里斯琴森均匀系数与配水均匀度换算关系。

2.1 样本的统计特征

经计算，两次观测结果的主要统计特征见表 2。

表 2 样本的主要统计量 (2006 年)

Table 2 Statistics of samples in 2006

| 特征值 | 8 月 6 日 | | | | 8 月 17 日 | | | |
|------|---------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|
| | 5 cm | 10 cm | 20 cm | 30 cm | 5 cm | 10 cm | 20 cm | 30 cm |
| 最大/% | 41.40 | 42.80 | 44.00 | 44.50 | 40.50 | 42.80 | 40.80 | 40.60 |
| 最小/% | 15.20 | 17.80 | 20.30 | 20.70 | 18.50 | 20.20 | 21.50 | 17.70 |
| 平均差 | 4.34 | 4.04 | 4.11 | 3.62 | 2.93 | 2.90 | 2.87 | 3.17 |
| 样本方差 | 28.00 | 26.01 | 26.78 | 22.38 | 15.08 | 13.37 | 13.23 | 17.74 |
| 均值/% | 32.51 | 33.42 | 34.52 | 35.11 | 32.66 | 33.93 | 33.89 | 33.40 |

2.2 地下滴灌土壤水分分布均匀度

灌溉的目的是为作物生长提供必要的水分条件。灌溉水大多需以土壤水作为媒介，即灌溉水先转化为土壤水，再由作物根系从土壤中吸收，才能供作物利用。因而，土壤水分的分布均匀性，是评价灌溉质量好坏的一个重要标准。

土壤水分的分布均匀度通常采用克里斯琴森 (Christiansen) 均匀系数 C_u 来表示，即

$$C_u = 1 - \frac{\Delta\theta}{\bar{\theta}}$$

(1)

$$\Delta\theta = \frac{\sum_{i=1}^N |\theta_i - \bar{\theta}|}{N}$$

(2)

式中： C_u ——均匀系数； $\bar{\theta}$ ——平均土壤含水率； $\Delta\theta$ ——每个取样点的实际土壤含水率与平均值之差的绝对值的平均值，即平均差； θ_i ——每个取样点的实际土壤含水率； N ——取样点个数。

1) 均匀度系数与样本数的关系

利用式 (1)、(2)，计算不同土层的水分分布均匀系数。以 5 cm 和 30 cm 土层的均匀系数为例，对应的均匀系数随样本数变化情况见图 1。

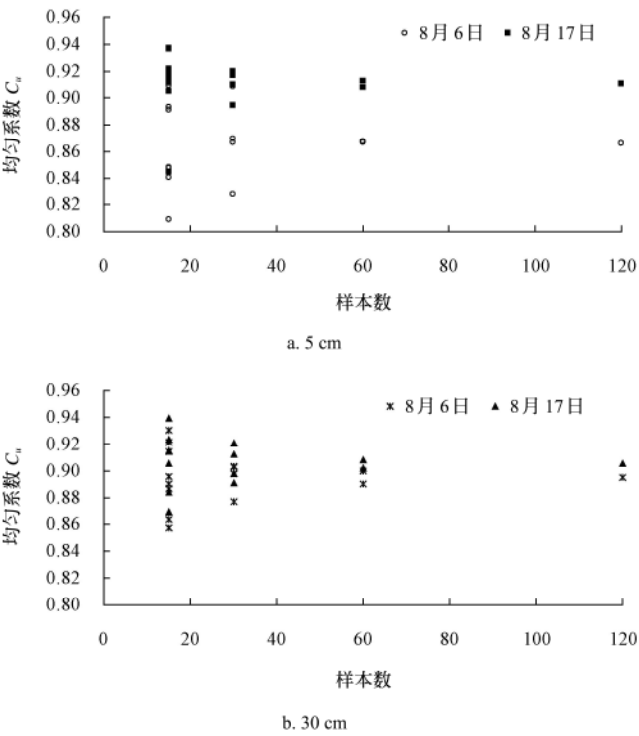


图 1 5 cm 和 30 cm 土层的土壤水分均匀系数 C_u 随样本数变化

Fig.1 Changes of soil water distribution uniformity coefficient C_u at 5 cm and 30 cm depth with sample number

由图 1 可以看出，随样本数的增加，对应的均匀系数 C_u 的变幅缩小，并向其均值集中。说明该条件下土壤水分样本符合正态分布，且样本分布是相对均匀的。从样本数量上分析，样本数在 15 到 60 之间， C_u 的均值变化并不明显。这一方面说明，随着样本数量的增加，计算出的均匀系数更能反映真实情况；同时也表明，对于小样本取值，也有可能接近其真值。在取样时，可以采用多次重复，取其均值，以反映实际状况。

此外，在计算中发现，对于样本中缺失的数据，经过多次抽样后，样本的均值将发生变化，其原因是由于不同样本组中，缺失数据对样本的均值产生了影响。若将缺失数据用对应样本组的均值代替，则不会影响该样本组的均值。同一缺失数据，在不同样本组中，可能有不同的表现。本次调查中缺失数据 3 个，在上述计算过程中，未对其做处理，对应值以空白表示。

由式 (1) 知，样本的平均差和均值的变化均将引起计算均匀度的改变。为了分析引起该均匀度变化的原因，对样本的平均差和均值进行计算，以 30 个样本的分析为例，并以 8 月 6 日的原始数据 (120 个样本) 为基础，计算其变化情况，结果见表 3。

从表 3 可以看出，同一样本的平均差与均值的变化不一致。与完全样本 (样本数 120) 相比，多数情况下，当均值增加时，样本的平均差减小。由式 (1) 知，平均差与均匀系数呈负相关，而均值与均匀系数为正相关，二者相反的变化趋势，放大了由于样本数变化而引起的均匀系数的改变。比较而言，样本平均差的变化率要比

样本均值的变化率大得多，因而，样本平均差的变化，是引起均匀系数变化的主要原因。

表 3 不同深度处土壤水分的平均差、均值和 C_u 及变化

Table 3 Mean difference, mean value and C_u of soil moisture at different depths and their changes

| 土层深度/cm | 样本数 | 平均差 | | 均值/% | | C_u | | 抽样方式 |
|---------|-----|------|--------|-------|-------|---------|-------|------|
| | | 计算值 | 变化率/% | 计算值 | 变化率/% | 计算值 | 变化率/% | |
| 5 | 120 | 4.34 | | 32.51 | | 0.86643 | | |
| | 30 | 4.14 | -4.66 | 31.70 | -2.49 | 0.86953 | 0.36 | 奇奇 |
| | | 5.43 | 25.05 | 31.59 | -2.83 | 0.82817 | -4.42 | 偶奇 |
| | | 4.33 | -0.23 | 32.58 | 0.22 | 0.86704 | 0.07 | 奇偶 |
| | | 3.13 | -27.88 | 34.17 | 5.10 | 0.90842 | 4.85 | 偶偶 |
| 20 | 120 | 4.11 | | 34.52 | | 0.88087 | | |
| | 30 | 5.18 | 26.03 | 32.98 | -4.46 | 0.84285 | -4.32 | 奇奇 |
| | | 3.73 | -9.25 | 34.31 | -0.61 | 0.89130 | 1.18 | 偶奇 |
| | | 4.03 | -1.95 | 35.08 | 1.62 | 0.88512 | 0.48 | 奇偶 |
| | | 3.30 | -19.71 | 35.70 | 3.42 | 0.90748 | 3.02 | 偶偶 |

2) 合理样本数的确定

为了确定合理的取样数，在上述成倍加大取样点间距的同时，按等间距取样的原则，增加了 20 和 24 两个样本组，分别计算上述各组样本的 C_u 值，取其均值与样本数为 120 时的 C_u 值进行对比，各样本数的 C_u 值与样本数为 120 时的 C_u 值相差结果见图 2。

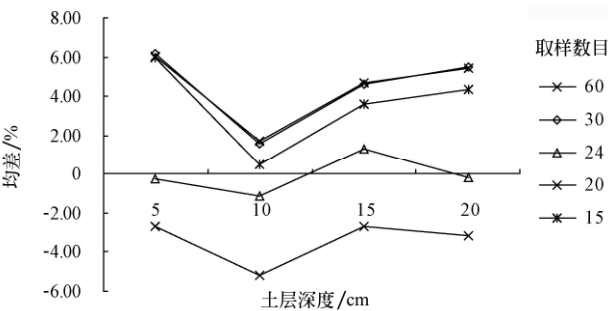


图 2 不同样本数的 C_u 值与样本数为 120 时 C_u 值的误差
Fig.2 Errors of C_u value between various sample size and sample size for 120

从图 2 可以看出，当取样数目为 24 时，计算的 C_u 值与样本数为 120 时的 C_u 值最接近。

从图 1 可以看出，抽样计算出的样本均匀系数呈标准的正态分布，按照参考文献[15]的方法，确定大田尺度的土壤水分合理的取样数目，计算参数与结果见表 4。

表 4 确定合理取样数目参数及结果

Table 4 Parameters and results for a reasonable number of sampling

| 土层深度/cm | 均值 μ | 标准差 σ | 变差系数 C_v | 取样数目 N |
|---------|----------|--------------|------------|----------|
| 5 | 32.66 | 4.61 | 0.14 | 31 |
| 10 | 33.93 | 4.24 | 0.13 | 24 |
| 20 | 33.89 | 4.01 | 0.12 | 21 |
| 30 | 33.40 | 4.37 | 0.13 | 26 |

注：计算时，置信水平 P 取 95%，精度要求 k 取 5%。

结合图 2 和表 4 可以看出，当样本数小于 20 时，对

地下滴灌土壤水分分布均匀度存在过高估计的可能；在 24 点取样时，土壤水分分布均匀度评价结果与原始样本（120 点）比较接近，由此推断，合理的取样数大于 24 点。因此，在对大田土壤水分分布状况进行监测和评价时，可采用均匀 25 点取样。

2.3 灌水均匀度与配水均匀度

如前所述，评价灌水均匀度的方法有多种。除了用克里斯琴森均匀系数来表示外，灌溉水在田间实际分布的均匀状态还可用配水均匀度 (D_u) 来评价。参照文献[14]指出，配水均匀度是将所有取样按其值的大小进行排列后，用其占总取样数目 1/4 的低值部分的平均值占所有取样平均值的百分数，来表示均匀度，即

$$D_u=100\times(\text{占取样数目 } 1/4 \text{ 的低值平均数}\div\text{取样平均值}) \tag{3}$$

从定义上看，灌水均匀度是设计时拟定的值，而配水均匀度才是灌溉系统的后验值，且配水均匀度更加重视最不利灌水处土壤水分分布状况的评价，对作物生长的影响更大，对农业生产活动的意义也更明显，为此，对两种均匀度进行对比和分析。为保证灌水质量，灌溉要求达到一定的均匀度。对于一个良好的灌溉系统，现行的《节水灌溉技术规范》中明确要求 C_u 大于 70%。上述 C_u 分析结果表明，取样数据是以均值为中心的正态分布。按照文献[14]中 D_u 的定义，可将 C_u 改写为

$$C_u\approx 100\times(\text{占取样数目 } 1/2 \text{ 的低值平均数}\div\text{取样平均值}) \tag{4}$$

利用这一关系，文献[14]将 D_u 和 C_u 间的关系近似表示为

$$C_u=100-0.63(100-D_u) \tag{5}$$

或

$$D_u=100-1.59(100-C_u) \tag{6}$$

为了验证上述分析的可靠性，假定式 (5)、(6) 的系数未知，分别称之为均匀度折算系数 x 和 y ，则式 (5)、(6) 改写成

$$x=(100-C_u)/(100-D_u) \tag{7}$$

或

$$y=(100-D_u)/(100-C_u) \tag{8}$$

根据分组取样的计算结果，对不同深度的 D_u 进行计算。在计算 D_u 过程中，对于低 1/4 样本数为非整数时，采用内差法确定对应的值。如当样本数为 30 时，低 1/4 的样本数 7.5，即为样本值由低到高排序后前 7 个样本均值与前 8 个样本均值的加权平均值。

再利用式（7）、（8），计算均匀度折算系数 x 和 y ，结果见图 3 和图 4。

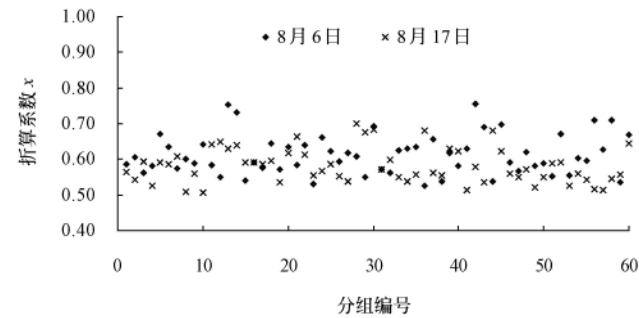


图 3 均匀度折算系数 x
Fig.3 Conversion coefficient x of uniformity

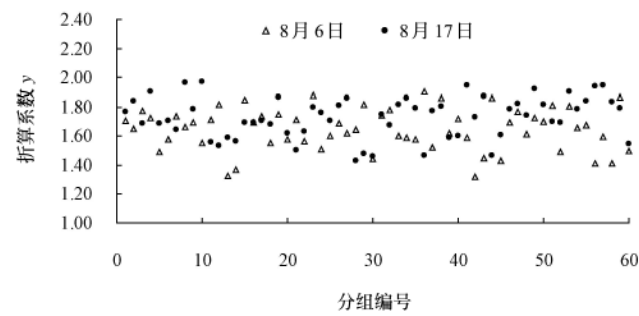


图 4 均匀度折算系数 y
Fig.4 Conversion coefficient y of uniformity

上述结果表明，两种不同均匀度表示方法之间，确实存在着较强的相关性，可以由一种均匀度换算出另一种均匀度。两次观测结果对应的 x 、 y 的均值分别为 0.61、1.65 和 0.58、1.73，标准偏差分别为 0.06、0.05 和 0.14、0.14，与文献[14]中推荐的参数间存在一定的偏差，产生该差异的主要原因有二，一是文献[14]给出的 D_u 和 C_u 关系式（4）本身就是一种近似表达，式（5）和式（6）的系数本身也是一种近似，与真实值间存在一定的差异；二是文献[14]中推荐的参数是理论的推导，而本文中得到的均匀度折算系数是通过实测数据计算结果，二者来源不同，也会产生一定的偏差；但总体规律比较一致，在使用时酌情加以考虑即可。

3 地下滴灌土壤水分分布均匀度评价实例

3.1 取样位置

为了评价地下滴灌的灌水效果，以新疆农五师九十团九连 1[#]、2[#]和 3[#]井的棉花地下滴灌为例，分别对 3 块地进行取样测定灌水均匀度。在灌水前、后，按均匀布设取样点的方法，测量每个小区不同土层深度的土壤含水率。按照前述的取样原则，试验小区的长宽分别为 100 m、各保留 10 m 的边界，同时考虑取样间距与取样点数目设为整数便于测量和分析，设定取样点的间距为 20 m，即采用均匀 25 点取样，在长、宽均为 100 m 的尺度上，每 400 m² 范围内取 1 个样点。同时，为减少取样时对农作物和毛管的损伤，取样时一般顺作物种植方向（毛管与其一致）布点。

3.2 不同土层土壤水均匀度

经计算，灌水前、后 3 个小区的土壤水分均匀度变化情况见表 5。

表 5 各小区灌水前后不同深度的均匀度变化

| Table 5 Changes of uniformity in every plots at different depths before and after irrigation | | | | | | | | | % |
|--|------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|
| 土层深度/ cm | 1 [#] 井 | | | 2 [#] 井 | | | 3 [#] 井 | | |
| | 灌前 | 灌后 | 提高率/% | 灌前 | 灌后 | 提高率/% | 灌前 | 灌后 | 提高率/% |
| 0~20 | 75.83 | 71.37 | -5.89 | 92.14 | 92.83 | 0.75 | 83.26 | 84.38 | 1.35 |
| 20~40 | 69.46 | 78.28 | 12.69 | 81.06 | 88.01 | 8.58 | 76.89 | 85.57 | 11.29 |
| 40~60 | 81.13 | 77.70 | -4.23 | 77.45 | 82.27 | 6.23 | 87.72 | 86.28 | -1.64 |
| 60~80 | 77.80 | 70.37 | -9.55 | 78.67 | 79.53 | 1.09 | 81.14 | 78.07 | -3.78 |
| 80~100 | 79.42 | 76.84 | -3.25 | 83.66 | 87.28 | 4.32 | 73.07 | 77.03 | 5.43 |
| 100~120 | 79.73 | 79.76 | 0.03 | 84.79 | 90.81 | 7.10 | 71.59 | 74.52 | 4.09 |

从表 5 可以看出。灌水前，各层土壤水分的分布均匀度并不一致，尤其是在毛管附近（20~40 cm）的土层土壤水分分布的均匀度反而较低。这表明地下滴灌条件下，土壤水分的消耗以毛管为中心，符合作物根系向水性这一特征。虽然毛管上部 and 下部土层的均匀度都较高，但二者有着本质的差别，上部（即地表）土壤是低土壤含水率条件下的均匀，即表层土壤是以趋于干燥状态的均匀；而下部土壤的均匀度提升，表明试验条件下，土壤

水分向下运动明显，是以较高的含水率达到一种均匀。灌水后，以滴灌带为中心的土层（20~40 cm）的土壤水分分布均匀度将大幅提高；对与之相邻的上、下土层的均匀度也有明显的影响，说明地下滴灌减少了由于水分消耗而引起的土壤水分分布不均匀性的速度。此外，深层土壤水分均匀度的增加，表明在此类砂壤土中，较大的灌水量（一次灌水 8~12 h），将会导致土壤水分向深层运动，其利弊还有待进一步分析，如土

壤洗盐作用、深层水分利用率等。

4 结论与讨论

从新疆棉花地下滴灌的生产实践出发,以灌水后实测的 120 组土壤水分数据为基础,分析了抽样样本数与土壤水分分布特征之间的关系,得出以下初步结论:

1) 随样本数的增加,对应的均匀系数 C_u 变幅缩小,向其均值集中。从样本数量上分析,样本数在 15 到 60 之间,各样本组 C_u 的均值变化并不明显。影响系统均匀度的平均差和均值都随样本数的变化而改变,比较而言,样本平均差的变化率要比样本均值的变化率大,对最终均匀度的影响也大。

2) 在试验条件下,采用均匀布点取样对大田尺度的土壤水分均匀性进行监测和评价时,适宜的取样点个数应在 25 个以上。

3) 灌水均匀系数与配水均匀度之间存在着较强的相关性,二者可以互算。在应用时,应选择适宜的换算系数,以提高其准确度。

4) 地下滴灌条件下,土壤水的消耗主要以毛管为中心。与其上、下土层相比,灌水前在毛管附近土壤水分的均匀度较低。毛管上部(即地表)的土壤是低含水率下的均匀,下部土壤整体含水率较高。灌水后,滴灌带附近土层(20~40 cm)的土壤水分分布均匀度大幅提高,与滴灌带相邻的上下土层的均匀度提升并不明显。

地下滴灌土壤水分分布状况,是地下滴灌灌水器制造偏差和工作压力、土壤质地、毛管间距、滴头间距、甚至堵塞等因素共同作用的结果。本次分析中,重点考查了地下滴灌条件下,大田尺度的土壤水分分布均匀度的最终结果,并没有将影响土壤水分分布均匀度的因素进行区分;在今后的研究中,还需分析影响土壤水分分布均匀度的原因,明确各因素对土壤水分分布均匀度的影响程度,进而找出每一种因素与土壤水分分布均匀度间的定量关系,为获得适宜的田间土壤水分分布均匀度提供技术支持和理论指导。

[参 考 文 献]

- [1] Lesikar B J, Weynand V L, Persynl R A. Evaluation of the application uniformity of subsurface drip distribution systems [C]//On-Site Wastewater Treatment X, Conference Proceedings, Sacramento, California USA, 2004.
- [2] Bralts V F, Kesner C D. Drip irrigation field uniformity estimation[J]. Transactions of ASAE, 1983, 26(5): 1369—1374.
- [3] Mateos L. Assessing whole-field uniformity of stationary sprinkler irrigation systems[J]. Irrig Sci, 1998, 18: 73—81.
- [4] Burt C M. Rapid field evaluation of drip and microspray distribution uniformity[J]. Irrigation and Drainage Systems, 2004, 18: 275—297.
- [5] Kang S Z, Shi P, Pan Y H, et al. Soil water distribution, uniformity and water-use efficiency under alternate furrow irrigation in arid areas[J]. Irrig Sci, 2000, 19: 181—190.
- [6] Sadler E J, Camp C R, Busscher W J. Emitter flow rate changes caused by excavating subsurface microirrigation tubing[C]//Proc 5th Int Microirrigation Congress, St Joseph, Mich: [s.n], 1995: 763—768.
- [7] Phene C J, Yue R, Wu I P, et al. Distribution uniformity of subsurface drip irrigation system[Z]. ASAE Paper No. 92—2569.
- [8] Camp C R, Bauer P J, Hunt P G. Subsurface drip irrigation lateral spacing and management for cotton in the southeastern Coastal Plain [J]. Trans of the ASAE, 1997, 40(4): 993—999.
- [9] 胡笑涛. 地下滴灌灌水均匀度试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2001.
Hu Xiaotao. Experiment on Uniformity of Subsurface Drip Irrigation[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2001.(in Chinese with English abstract)
- [10] Warrick A W, Shani U. Soil-limiting flow from subsurface emitters. II. Effects on uniformity [J]. J Irrigation Drainage Engineering, 1996, 122(5): 296—300.
- [11] Li Jiusheng. Sprinkler Irrigation Hydraulic Performance and Crop Yield[M]. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 2000.
- [12] Amali S, Rolston D E, Fulton A E, et al. Soil water variability under subsurface drip and furrow irrigation[J]. Irrig Sci, 1997, 17: 151—155.
- [13] Burt C M, Clemmens A J, Strelkoff T S, et al. Irrigation performance measures — efficiency and uniformity[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE, 1997, 123(6): 423—442.
- [14] 水利部国际合作司, 水利部农村水利司, 中国灌排技术开发公司, 等. 美国国家灌溉工程手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [15] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.

Evaluation method of soil water distribution uniformity under conditions of field subsurface drip irrigation

Zai Songmei^{1,3}, Wu Feng^{2,3*}, Wen Ji³, Wang Zhaohui¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China;

2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China;

3. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453003, China)

Abstract: Uniformity is one of the important indicators for the evaluation of irrigation quality, and soil water

distribution uniformity is the ultimate expression of irrigation uniformity. Selection of suitable sampling numbers of soil water is the base for economical and accurate evaluation of soil water distribution uniformity after irrigation. Field measurement of soil moisture distribution was measured in the cotton field under subsurface drip irrigation in Xinjiang Uygur Autonomous Region, 2 days after irrigation when the soil moisture had reached a relative stability. Relationship between sampling numbers and soil moisture distribution characteristics, and soil water distribution uniformity were analyzed. Results showed that the coefficient C_u of soil water distribution was close to its mean value with increasing of samples. From the quantitative analysis of samples, the mean of C_u was not obvious change as sample number increase from 15 to 60. Under the condition of experiment, the desirable number of samples should be more than 24 for field soil moisture monitoring and evaluation. There was a significant relevance between C_u and the distribution uniformity (D_u). But a certain deviation occurred between the coefficients derived from the measured data and that recommended by the United States Department of Agriculture. And this should be taken into account when such exchange formula was used. Using uniform 25-point sampling method, soil water distribution of subsurface drip irrigation in cotton fields was evaluated. Results showed that soil moisture uniformity in the vicinity of drip line (20-40 cm) was lower than that in the upper and below layer of drip line before irrigation, and would increase after irrigation, compared with the upper and lower layers. Soil moisture variation near the drip line is the largest in the soil under subsurface drip irrigation.

Key words: irrigation, soil moisture, sampling, field, uniformity

欢迎订阅《农业工程学报》

《农业工程学报》是由中国科学技术协会主管、中国农业工程学会主办的全国性学术期刊。被列为中国科技期刊引证报告 (CJCR) 分析和中国科学引文数据库 (CSCD) 的源期刊、全国中文核心期刊; 被《农业科学——农业工程文摘》、美国工程索引 (Ei Compendex)、俄罗斯《文摘杂志》、英联邦农业局国际生物中心 (CAB International)、美国剑桥科技文摘 (CSA) 等国内外多家权威检索机构收录; 被万方数据网中国数字化期刊群、中国科技期刊网、中国学术期刊 (光盘版) 全文上网收录。2009 年被中国科技信息研究所文献分析中心遴选为“首批精品科技期刊”, 被中国科协评为“精品期刊工程项目”期刊。

《农业工程学报》主要栏目有农业水土工程、农业

装备工程与机械化、农业信息与电气技术、农业生物环境与能源工程、土地整理工程、农产品加工工程。

《农业工程学报》为月刊, 大 16 开本, 每期 300 页左右。中国标准连续出版物号: ISSN 1002-6819, CN 11-2047/S, 邮发代号: 18-57。每期定价 50 元, 全年共 600 元, 直接向编辑部订阅, 可享受八折优惠。

编辑部地址: 北京市朝阳区麦子店街 41 号

邮 编: 100125

电 话: 010-65910066 转 2503 或 3503

传 真: 010-65929451

电子信箱: tcsae@tcsae.org, tcsae@sohu.com

期刊网址: www.tcsae.org