排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2016 年 2 月 Feb. 2016 | 第 34 卷 第 2 期 Vol. 34 No. 2

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.15.0174

基于样本流量偏差率的微灌灌水均匀度评价方法


鞠学良

鞠学良[1,2]，吴普特[1,2]，朱德兰[2]，张林[1,2]
（1. 西北农林科技大学水土保持研究所，陕西 杨凌 712100；2. 中国旱区节水农业研究院，陕西 杨凌 712100）

摘要：为了探索一种简便有效评价大田微灌系统灌水均匀度的新方法，定义了样本流量偏差率. 基于灌水器流量服从正态分布的假设，建立了样本流量偏差率与现有灌水均匀度评价指标之间的关系，推导了抽样误差的计算公式，提出了合理的样本容量和样本分组数. 建立了基于样本流量偏差率的灌水均匀度评价标准，最终提出了基于样本流量偏差率评价大田微灌灌水均匀度的新方法. 案例应用表明：相比图解法，新方法根据数值计算结果评价灌水均匀度，可避免人为画线误差，提高评价结果的可靠度；相比传统数值法，新方法计算量少，可作为快速评价大田微灌系统灌水均匀度的有效方法.

关键词：微灌；灌水均匀度；样本流量偏差率；评价方法
中图分类号：S277.9　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2016)02-0173-06

鞠学良，吴普特，朱德兰，等. 基于样本流量偏差率的微灌灌水均匀度评价方法[J]. 排灌机械工程学报，2016，34(2)：173-178.

JU Xueliang，WU Pute，ZHU Delan，et al. Estimation of micro-irrigation water application uniformity based on sample emitter flow variation[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2016，34(2)：173-178.(in Chinese)

Estimation of micro-irrigation water application uniformity based on sample emitter flow variation

JU Xueliang[1,2]，*WU Pute*[1,2]，*ZHU Delan*[2]，*ZHANG Lin*[1,2]
(1. Institute of Soil and Water Conservation，Northwest A&F University，Yangling，Shaanxi 712100，China；2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China，Northwest A&F University，Yangling，Shaanxi 712100，China)

Abstract：The field estimation of water application uniformity is the major way to assess the hydraulic design，operation and management and the equipment quality of the micro-irrigation system. The traditional emitter flow variation using the maximum，minimum and average emitter discharge is only used as the hydraulic design uniformity criterion，which could not be used to evaluate the field water application of micro-irrigation systems. The sample emitter flow variation was defined to evaluate the field water application uniformity. The relationships between the sample emitter flow variation and the other traditional indexes of water application uniformity were developed based on the assumption that the emitter flow of the field micro-irrigation systems obeys the normal distribution. The related formulations of sample errors were derived. The sample size and grouping number were also proposed. The criteria of sample emitter flow variation under different sample grouping number were proposed by comparison with those of the ASABE and GB standards. The estimation procedure of sample emitter flow variation

收稿日期：2015-08-08；**网络出版时间**：2015-12-16
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20151216.1553.020.html
基金项目：“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD29B02)；高等学校学科创新引智计划“111”计划项目(B12007)
作者简介：鞠学良(1987—)，山东莱阳人，博士研究生(juxueliang1987@nwsuaf.edu.cn)，主要从事节水灌溉理论与技术研究.
吴普特(1963—)，陕西武功人，研究员，博士生导师(通信作者，gjzwpt@vip.sina.com)，主要从事节水农业与水土保持研究.

was then proposed to assess the field water application uniformity. The application case indicates that the new method is easily adaptable and reliable for estimating the field water application uniformity.

Key words: micro-irrigation; water application uniformity; sample emitter flow variation; estimate method

田间实测灌水均匀度是评价微灌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[1]. 现有的灌水均匀度评价方法依据样本数据处理方法不同,可分为传统数值法[2-5]和图解法[6-10]. 其中,传统数值法是利用测量的样本数据,借助软件计算灌水均匀系数 CU、流量偏差系数 CV_q 或分布均匀系数 DU 等灌水均匀度评价指标,参照相应的评价标准,评价大田实际灌水均匀度. 为了减少样本数据计算工作量,提高评价效率,BRALTS 和 KESNER 建立了以统计均匀系数 Us 为评价指标的图解法,由于操作简单方便易于理解,已被美国[11]、印度[12]等多国采纳为行业标准. 目前,中国微灌工程技术规范[13]也规定在微灌系统试运行阶段参考这一方法评价灌水均匀度. 但在应用此图解法时,存在人为误差较大的缺陷.

文中定义样本流量偏差率的计算式,分析样本流量偏差率与现有样本灌水均匀度评价指标的关系,建立基于样本流量偏差率的灌水均匀度评价标准,提出通过合理分组与简单数值计算快速评价大田实际灌水均匀度的新方法,为完善大田微灌系统灌水均匀度的评价方法提供理论参考.

1 样本流量偏差率

为使流量偏差率适用于快速评价大田微灌系统灌水均匀度,文中定义样本流量偏差率为

$$q_v = \frac{q_L}{q_H}, \tag{1}$$

式中:q_v 为样本流量偏差率,q_v 值越大,表示灌水均匀度越高,$0 < q_v < 1$;q_H 为占样本总量 $1/m$ 的最大样本灌水器流量之和,$q_H = \sum_{i=1}^{n} q_i$,单位为 L/h;q_L 为占样本总量 $1/m$ 的最小样本灌水器流量之和,其中 $q_L = \sum_{i=N-n}^{N} q_i$,单位为 L/h;$q_i$ 为从大到小排序的样本灌水器流量,单位为 L/h;i 为样本流量从大到小排序的序号,$i = 1,2,3,\cdots\cdots,N$;N 为样本容量;m 为样本分组数,n 为每组样本数,$n = N/m$,m 与 n 均为整数,$m > 2$.

根据工程实践经验及前人研究[14],当微灌小区灌水均匀度较高时,灌水器流量服从正态分布. 根据正态分布随机变量的特性,q_H 和 q_L 可以分别表示为

$$q_H = q_N(1 + f_H CV_q), \tag{2}$$

$$q_L = q_N(1 + f_L CV_q), \tag{3}$$

式中:q_N 为样本流量之和,$q_N = \sum_{i=1}^{N} q_i$,单位为L/h;f_H,f_L 分别为标准正态分布右侧和左侧面积为 $1/m$ 的横坐标的平均值,如图 1 所示;CV_q 为流量偏差系数.

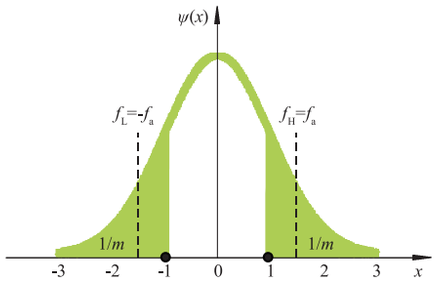


图 1 标准正态分布曲线示意图(x 为任意实数,$\psi(x)$ 为标准正态密度函数)

Fig. 1 Diagram of standard normal distribution curve (x is an arbitrary real number, $\psi(x)$ is standard normal probability density function)

将式(2),(3)代入式(1),整理得到样本流量偏差率 q_v 与流量偏差系数 CV_q 的关系式为

$$q_v = \frac{1 - f_a CV_q}{1 + f_a CV_q}, \tag{4}$$

式中:f_a 为标准正态分布特征参数,表 1 给出了常见样本分组数 m 对应的 f_a 值.

表 1 样本分组数 m 对应的 f_a 值

Tab. 1 Values of f_a corresponding to sample number m

参数	m																		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
f_a	0.80	1.09	1.27	1.40	1.50	1.58	1.65	1.70	1.75	1.80	1.84	1.87	1.91	1.94	1.97	1.99	2.02	2.04	2.06

1.1　式(4)的验证

为说明式(4)的可靠性,选取了文献[10]中的案例数据进行验证对比. 按照随机取样方法和原则(见 3.1),案例中提供了田间实测原始样本数据,见表 2. 样本容量 $N=18$,数据形式为接满同一体积量杯所需的时间 t_i. 对表 2 中原始样本数据进行 Kolmogorov – Smirnove 检验,得 K – S $Dist.=0.077$,$P>0.20$,证明案例中样本数据服从正态分布. 为方便使用新方法选择计算数据,将原始数据按从大到小的顺序进行排序.

表 2　案例样本时间

Tab. 2　Sample time of case　　s

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
原始样本数据	89	104	92	96	100	99	97	107	100	94	98	102	110	93	103	108	91	87
从大到小排序	110	108	107	104	103	102	100	100	99	98	97	96	94	93	92	91	89	87

利用全部样本数据计算的样本流量偏差系数 CV_q 为

$$CV_q=\frac{\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(q_i-\bar{q})^2}}{\bar{q}}=0.067. \quad (5)$$

在田间实际评价灌水均匀度时,实测样本数据的形式[8]通常为接满相同体积的量杯所需要的时间 t_i,或者是同一时间内取样灌水器流出水的体积 V_i. 根据灌水器流量的定义,样本流量偏差率 q_v 还可表示为

$$q_v=\frac{t_L}{t_H}=\frac{V_L}{V_H}, \quad (6)$$

式中:t_H 和 t_L 分别为占样本总量 $1/m$ 的最大和最小样本时间之和,$t_H=\sum_{i=1}^{n}t_i$,$t_L=\sum_{i=N-n}^{N}t_i$;t_i 为从大到小排序的样本时间;V_{HP}和 V_{LP}分别为占样本总量 $1/m$ 的最大和最小样本水量之和,$V_H=\sum_{i=1}^{n}V_i$,$V_L=\sum_{i=N-n}^{N}V_i$;V_i 为从大到小排序的样本水量. 显然,在实地评价大田微灌灌水均匀度时,可以使得式(6)的运算将比式(5)更加简单高效. 对同一组样本数据,分组数 m 越大,每组样本数 n 越小,样本流量偏差率的计算量也越小.

根据样本容量大小,此案例中样本分组有 5 种方案. 利用样本数据排序结果(表 2),计算每种分组情况下的参数 t_H 与 t_L,根据式(7)计算样本流量偏差率 q_v;同时依据表 1 中的 f_a 值及样本流量偏差率 q_v,根据式(4),计算流量偏差系数 CV_q. 具体计算结果见表 3,表中 n 为每组样本数,m 为样本分组数,t_H 为最大的 n 个样本时间之和,t_L 为最小的 n 个样本时间之和,q_v 为样本流量偏差率,CV_q 为式(4)计算的流量偏差系数.

从表 3 可以看出,对同一组样本数据,样本流量偏差率 q_v 不是定值,而随 m 增大而减小,随 n 减小而减小. 当 $n\geqslant 3$ 时,式(4)计算的流量偏差系数 CV_q 与式(5)计算值 0.067 非常接近,只是当 $n=2$ 和 1 时,存在 6% 和 14% 的偏差. 因此,在合理选择样本分组数 m 的前提下,q_v 可以作为评价微灌灌水均匀度的新指标.

表 3　案例数据灌水均匀度系数计算结果

Tab. 3　Calculation results of water application uniformity coefficient of case

相关参数	样本分组数 m				
	2	3	6	9	18
n	9	6	3	2	1
t_H/s	933	634	325	218	110
t_L/s	837	546	267	176	87
q_v	0.897	0.861	0.822	0.807	0.791
CV_q	0.068	0.068	0.065	0.063	0.058

1.2　抽样误差分析

根据抽样理论,样本流量偏差系数 CV_q 服从正态分布,则实际流量偏差系数 CV_q^* 的置信度为 α 的置信区间[6]为

$$P(CV_q-\Delta CV_q\leqslant CV_q^*\leqslant CV_q+\Delta CV_q)=1-\alpha, \quad (7)$$

式中:ΔCV_q 为样本流量偏差系数的估计误差[6],$\Delta CV_q=t_{\frac{\alpha}{2}}\frac{CV_q}{\sqrt{2N}}\sqrt{1+2CV_q^2}$,其中,$\alpha$ 为置信度参数,一般取值为 0.05 或 0.10,$t_{\alpha/2}$为 t 分布的置信限,与 α, N 相关,可查 t 分布表;CV_q^* 为实际流量偏差系数.

根据式(4),样本流量偏差率 q_v 与样本流量偏差系数 CV_q 呈函数相关关系,因此与式(7)类似,实际流量偏差率 q_v^* 的置信度为 α 的置信区间可表示为

$$P(q_v-\Delta q_{vL}\leqslant q_v^*\leqslant q_v+\Delta q_{vH})=1-\alpha, \quad (8)$$

式中:q_v^* 为实际流量偏差率,Δq_{vL}和 Δq_{vH}分别为样本流量偏差率的左右两侧估计误差,其分别满足

$$q_v-\Delta q_{vL}=\frac{1-f_a(CV_q+\Delta CV_q)}{1+f_a(CV_q+\Delta CV_q)}, \quad (9)$$

$$q_v + \Delta q_{vH} = \frac{1 - f_a(CV_q - \Delta CV_q)}{1 + f_a(CV_q - \Delta CV_q)}. \quad (10)$$

将式(4)及 ΔCV_q 代入式(9),(10),并整理得

$$\Delta q_{vL} = \frac{(1 - q_v^2)A}{1 + q_v + (1 - q_v)(1 + A)}, \quad (11)$$

$$\Delta q_{vH} = \frac{(1 - q_v^2)A}{1 + q_v + (1 - q_v)(1 - A)}, \quad (12)$$

式中:A 为计算参数,$A = \frac{t_{\frac{\alpha}{2}}}{\sqrt{2N}}\sqrt{1 + 2\left(\frac{1}{f_a}\frac{1 - q_v}{1 + q_v}\right)^2}$.

除估计误差外,还常使用相对误差来衡量灌水均匀度评价结果的可靠性. 根据式(11),(12)影响相对误差的因素包括:样本总量 N,样本分组数 m,样本流量偏差率 q_v 和置信度 α 等参数. 表4给出了利用案例数据计算样本流量偏差率 q_v 的估计误差 ε_e 及相对误差 ε_r.

表4 案例数据样本流量偏差率 q_v 的估计误差及相对误差
Tab.4 Estimation error and relative error of the sample emitter flow variation of the case

误差		m				
		2	3	6	9	18
ε_e	Δq_{vL}	0.034	0.044	0.055	0.059	0.063
	Δq_{vH}	0.035	0.047	0.059	0.063	0.068
ε_r/%	$\Delta q_{vL}/q_v$	3.760	5.150	6.750	7.330	8.020
	$\Delta q_{vH}/q_v$	3.900	5.410	7.180	7.850	8.630

从表4可以看出,各分组情况下 Δq_{vH} 与 Δq_{vL} 差异很小;相对误差 $\Delta q_{vL}/q_v$ 和 $\Delta q_{vH}/q_v$ 均在10%以内,这证明用样本流量偏差率 q_v 评价灌水均匀度具有较高的可靠性.

1.3 样本容量 N 与样本分组数 m

样本容量 N 是大田微灌灌水均匀度评价方法的重要参数. 样本容量太小,根据式(11),(12)会引起较大的估计误差,降低评价结果的可靠性,目前ASAE. 2005d. EP-458 推荐的样本容量 N 的下限值为18;样本容量的增加可以提高评价的可靠性,但是会增加评价过程的人力及时间成本. WU 等[15]通过数值分析证明:样本容量 $N > 54$ 时,样本容量的增加对灌水均匀度的评价结果影响并不显著,因此建议样本容量的上限为54.

根据式(1),对同一组样本数据,样本流量偏差率 q_v 与样本分组数 m 直接相关. 样本分组越多,则每组样本数 n 越小,q_H 及 q_L 所需的计算量越小,计算效率越高;但表4显示随着样本分组数增加,样本流量偏差率的相对误差也越大,评价结果的可靠性降低. 根据实践经验,取样过程中每个取样点最少重复取样3次,因此,根据样本总量 N 的取值范围,建议样本分组数 m 取值为6~18,使得每组样本分组数 n 不小于3.

2 灌水均匀度评价标准

目前,各国根据各自采用的灌水均匀度评价指标,建立了不同的灌水均匀度评价标准. 美国土木工程师协会[11]提出了以统计均匀系数 Us 为评价指标的灌水均匀度评价标准,而中国微灌工程技术规范[13]则规定灌水均匀系数 CU 不宜小于0.80. 在假设灌水器流量近似服从正态分布的基础上,根据式(4),样本流量偏差率 q_v 与统计均匀系数 Us 和灌水均匀系数 CU 的关系为

$$q_v = \frac{1 - f_a(1 - Us)}{1 + f_a(1 - Us)} = \frac{0.798 - f_a(1 - CU)}{0.798 + f_a(1 - CU)}. \quad (13)$$

参考 ASAE. 2005d. EP-458 及 GB/T 50485—2009,根据式(13)计算了基于样本流量偏差率 q_v 的微灌灌水均匀度评价标准,见表5.

表5 基于样本流量偏差率 q_v 的灌水均匀度评价标准
Tab.5 Evaluation criteria of water application uniformity based on sample emitter flow variation

参考依据	灌水均匀度参考指标	灌水均匀度评价分级	m												
			6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ASAE. 2005d. EP-458	Us=0.90	极好	0.740	0.730	0.720	0.710	0.700	0.700	0.690	0.680	0.680	0.680	0.670	0.670	0.660
	Us=0.80	良好	0.540	0.520	0.500	0.490	0.480	0.470	0.460	0.450	0.450	0.440	0.440	0.430	0.430
	Us=0.70	一般	0.380	0.360	0.340	0.320	0.310	0.300	0.290	0.280	0.270	0.260	0.260	0.250	0.250
	Us=0.60	不良	0.250	0.230	0.210	0.190	0.180	0.160	0.150	0.140	0.130	0.130	0.120	0.110	0.110
GB/T 50485—2009	CU=0.80	合格	0.450	0.430	0.420	0.400	0.390	0.380	0.370	0.360	0.350	0.350	0.340	0.330	0.330

从表5中可以看出,样本流量偏差率 q_v 的评价标准与样本容量 N 无关,仅与样本分组数 m 相关. 例如表3中,当样本分组数 $m=6$ 时,样本流量偏差率 $q_v = 0.822 > 0.740 > 0.450$,则根据美国标准ASAE. 2005d. EP-458 和国标 GB/T 50485—2009,灌水均匀度分别评价为“极好”和“合格”;同理,当样本分组数 $m=9$ 时,样本流量偏差率 $q_v = 0.807 > 0.710 > 0.400$,根据 ASAE. 2005d. EP-458 和 GB/T 50485—2009,灌水均匀度评价结果也为“极好”和“合格”.

3　灌水均匀度评价方法

3.1　取样方法

合理的取样方法是准确评价灌水均匀度的基础. 随机取样法简单方便，可适用于各种微灌小区管网布置形式及地形条件，已被广泛采纳为行业标准[11-12]. 随机取样方法的基本原则包括：① 以轮灌组为评价单元，根据轮灌组面积及地形条件，确定样本容量 N（$18 \leqslant N \leqslant 54$）. 当轮灌组面积较小，地形相对平缓时，可采用较小的样本容量. 轮灌组面积较大，地形起伏较为复杂时，可适当增加样本容量. ② 测试样本分布位置需有代表性，取样点需分布在支管和毛管的进口、中部和末端以及地形的高处、中部和低处. ③ 在每一位置随机选择样本，为避免受灌水器外观的影响，样本灌水器需在系统运行前选择并标记，建议每次取样前，先简单绘制一张灌水小区示意图，在图上标定取样灌水器的分布位置（见图 2），从而提高取样效率[9]. ④ 微灌系统正常运行一段时间后，利用秒表和量杯收集样本数据. 为简化评价过程，样本数据可以是接满同一型号的量杯所需要的时间 t_i，或者是相同时间内取样灌水器流出水的体积 V_i.

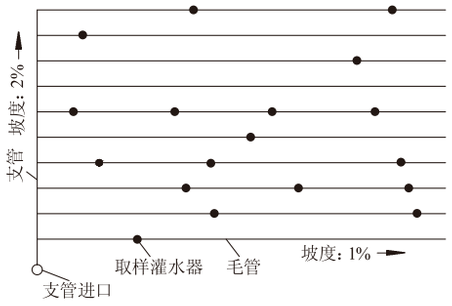


图 2　大田微灌小区取样灌水器分布位置示意图（$N=18$）

Fig. 2　Diagram of sampling emitter distribution on field micro-irrigation unit（$N=18$）

3.2　评价步骤

在田间实测样本数据之后，通过合理分组与计算，得到流量偏差率 q_v' 的具体数据，然后根据表 3 中的评价标准评价灌水小区的灌水均匀度分级. 详细评价步骤如下：

1）根据样本容量 N，确定每组样本数 n（$3 \leqslant n \leqslant 6$）及样本分组数 $m = N/n$，m 与 n 必须为整数；

2）从样本数据中，选择最大的 n 个数值相加，记为 $t_{\max} = \sum_{i=1}^{n} t_i$ 或 $V_{\max} = \sum_{i=1}^{n} V_i$；

3）从样本数据中，选择最小的 n 个数值相加，记为 $t_{\min} = \sum_{i=N-n}^{N} t_i$ 或 $V_{\min} = \sum_{i=N-n}^{N} V_i$；

4）根据记录数据的形式，用式（6）计算样本流量偏差率 q_v，查表 5 评价微灌小区灌水均匀度；

5）用式（12）计算置信度为（$1-\alpha$）的估计误差.

4　应用案例

为充分说明本方法的可靠性和优点，使用表 2 中的案例数据进行验证分析. 分别介绍传统数值法、图解法及文中新方法评价案例灌水均匀度的过程和结果.

4.1　传统数值法

使用所有样本数据，在 Microsoft Excel 中计算流量偏差系数 $CV_q = 0.07$，其估计误差为 $\Delta CV_q = 0.02$. 根据式（6），统计均匀系数 $Us = 0.93$，其 90% 置信区间为［0.91，0.95］，查表 3，根据 ASAE. 2005d. EP-458，此微灌小区的灌水均匀度评价结果为“极好”. 此外，在 Microsoft Excel 中计算灌水均匀系数 $CU = 0.95 > 0.80$，因此，灌水均匀度满足 GB/T 50485—2009 的要求.

4.2　图解法

利用图解法评价微灌灌水均匀度的步骤[10]为首先从表 2 中分别选取最大的 3 个数值（排序序号分别为 1，2 和 3）相加，得 $t_{\max} = 110 + 108 + 107 = 325$，选取最小的 3 个数值（排序序号分别为 16，17 和 18）相加，得 $t_{\min} = 87 + 89 + 91 = 267$，然后分别在图 3 横、纵坐标轴的 267 和 325 处画垂直线，按照两线相交点所处的位置评价灌水均匀度. 如图 3 所示，灌水均匀度评价结果为“极好”.

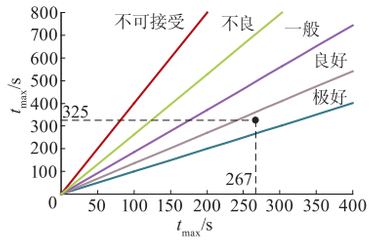


图 3　图解法评价微灌灌水均匀度

Fig. 3　Results of evaluating water application uniformity by graphical method

在使用图 3 作为工具评价灌水均匀度时，由于横、纵坐标轴刻度线的限制，手工画线难免产生误差，会直接影响评价结果的准确性. 另外，图 3 只适

用于样本容量 $N=6n$ 的微灌小区.

4.3 新方法

根据3.2的具体评价步骤,新方法可采用样本分组数 $m=6$ 和3这2种途径评价案例灌水均匀度.根据前述灌水均匀度评价步骤,表6给出了新方法评价灌水均匀度的计算参数及结果.

表6 新方法评价灌水均匀度的相关参数及结果

Tab.6 Results of evaluating water application uniformity based on proposed approach

相关参数	途径1	途径2
m	6	3
n	3	6
t_{max}/s	325	634
t_{min}/s	267	546
q_v	0.20	0.15
$\Delta_{q_v'}(\alpha=0.10)$	0.07	0.05
灌水均匀度评价结果 ASAE. 2005d. EP-458	极好	极好
灌水均匀度评价结果 GB/T 50485—2009	合格	合格

从表6可以看出,2种途径的灌水均匀度评价结果均为"极好"和"合格".相比图解法,新方法根据数值计算结果评价灌水均匀度,可避免画线引起的人为误差,提高评价结果的可靠度.

5 结 论

1)重新定义了适用于评价大田微灌系统灌水均匀度的样本流量偏差率计算式,构建了流量偏差率与流量偏差系数,统计均匀系数及灌水均匀系数之间的关系式,并提出了估计误差的计算式和合理的取样方法.在此基础上,提出了以流量偏差率为评价指标的灌水均匀度评价标准及详细评价步骤.相比常规数值法和图解法,新方法简便实用,可作为快速评价大田微灌系统灌水均匀度评价的有效方法.

2)对于新建微灌系统,在试运行阶段,使用本方法测得的灌水均匀度可反应系统的水力设计质量;在日常运行管理中,建议按照本方法定期评价系统灌水均匀度,若评价结果与初始评价结果相比出现显著降低,表明系统设施质量出现问题或发生灌水器堵塞问题,此时建议及时采取相关维护措施以确保系统正常运行.对于运行多年的微灌系统,使用本方法可快速估计灌水均匀度的范围.

参考文献(References)

[1] 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)

[2] PATEL N, RAJPUT T B S. Effect of drip tape placement depth and irrigation level on yield of potato[J]. Agricultural water management, 2007, 88(1/2/3):209-223.

[3] CAMP C R, SADLER E J, BUSSCHER W J. A comparison of uniformity measures for micro-irrigation systems[J]. Transactions of the ASAE, 1997, 40(4): 1013-1020.

[4] BURT M C. Rapid field evaluation of drip and microspray distribution uniformity[J]. Irrigation and drainage systems, 2004, 18(4): 275-297.

[5] JUANA L, RODRIGUES-SINOBAS L, SANCHEZ R, et al. Evaluation of drip irrigation: selection of emitters and hydraulic characterization of trapezoidal units[J]. Agriculture water management, 2007, 90(1):13-26.

[6] BRALTS V F, KESNER D. Drip irrigation field uniformity estimation [J]. Transactions of the ASAE, 1983, 26(5):1367-1374.

[7] BRALTS V F, EDWARDS D M. Field evaluation of drip irrigation submain units[J]. Transactions of the ASAE, 1986, 29(6): 1659-1664.

[8] NAKAYAMA F S, BUCKS D A. Trickle irrigation for crop production. Design, operation and management [M]. Amsterdam: Elsevier,1986.

[9] BRALTS V F, EDWARDS D M. Drip irrigation design and evaluation based on the statistical uniformity concept [J]. Advances in irrigation, 1987,4:67-117.

[10] MEGH R G. Management of drip/trickle or micro irrigation[M]. New Jersey:Apple Academic Press, 2013.

[11] American Society of Agricultural and Biological Engineers. Field evaluation of microirrigation systems: 2005d. EP-458[S]. St Joseph, Mich: ASAE, 2005.

[12] Bureau of Indian Standards. Irrigation equipment—design, installation and field evaluation of microirrigation systems—code of practice: IS 14792: 2000 [S/IS]. New Deli: BIS, 2000.

[13] 国家质检总局.微灌工程技术规范 GB/T 50485—2009[S].北京:中国计划出版社,2009:12.

[14] WARRICK A W. Interrelationships of irrigation uniformity terms[J]. Journal of irrigation and drainage engineering, 1983,109(3):317-332.

[15] WU I P, IRUDAYARAJ J M. Sample size determination for evaluating drip irrigation systems[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(6): 1961-1965.

(责任编辑 盛杰)