

考虑滴头堵塞位置分布的灌水均匀度计算方法^{*}

牛文全^{1,2} 张若婵¹ 罗春艳³

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 3. 沈阳工学院能源与水利学院, 沈阳 113122)

摘要: 为合理评价滴灌工程在运行过程中堵塞滴头对灌水均匀度及作物生长的影响, 以克里斯琴森均匀系数为基础, 建立了堵塞滴头位置分布均匀性的概念和计算方法, 提出了以堵塞滴头位置分布均匀系数和滴头流量均匀系数的算术平均值为指标的灌水均匀度计算方法, 并分别对比分析了毛管和灌水小区两个尺度的灌水均匀度计算结果。结果表明: 与克里斯琴森均匀系数相同, 考虑滴头堵塞位置分布的灌水均匀系数可以合理反映堵塞滴头数量和滴头堵塞程度对灌水均匀度的影响; 同时, 该评价指标还可以反映堵塞滴头的位置分布和集中程度对灌水均匀度的影响, 有效地解决了克里斯琴森均匀系数仅考虑流量差异而无法正确评价集中堵塞滴头对作物供水及生长影响的问题。

关键词: 滴灌系统 堵塞滴头 堵塞位置 灌水均匀度

中图分类号: S275.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)06-0147-06

Drip Irrigation Uniformity Calculation Considering Distribution Location of Clogged Emitters

Niu Wenquan^{1,2} Zhang Ruochan¹ Luo Chunyan³

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. College of Energy and Water Resources, Shenyang Institute of Technology, Shenyang 113122, China)

Abstract: Irrigation uniformity is one of the most important indicators of drip irrigation system, and clogging is perhaps the most common factor which affects the uniformity. In order to evaluate the influence of clogged emitters on the irrigation uniformity and the growth of crops during the operational process of drip irrigation system, the concept and computational method of location distribution uniformity of clogged emitters were set up based on the Christiansen uniformity, and then a new computational method of drip irrigation uniformity was proposed by using the arithmetic mean of the location distribution uniformity of clogged emitters and the flux uniformity of emitters, finally a comparison between several types of computational method of uniformity in a lateral and a subunit was made. The results showed that both the drip irrigation uniformity which considered the location distribution of clogged emitters and the Christiansen uniformity can reflect the influence of the amount of clogged emitter and the level of clogging on irrigation uniformity. In the meanwhile, the proposed method can also reflect the influence of location distribution of clogged emitters on the irrigation uniformity and overcome the weakness of Christiansen uniformity which only considered the influence of flow deviation.

Key words: Drip irrigation system Clogged emitter Location of clogged emitter Irrigation uniformity

引言

灌水均匀度是评价滴灌系统灌水质量的重要指标,也是系统设计的重要参数^[1]。目前,滴灌系统的灌水均匀度主要通过灌水均匀系数和流量偏差率来评价。灌水均匀系数主要有克里斯琴森均匀系数、面积加权克里斯琴森均匀系数、Keller 均匀系数、分布均匀系数、Beale 分布均匀系数等。这些均匀系数的计算公式均以滴头实际流量的平均偏差为基础。其中,分布均匀系数^[2]考虑了流量较小的滴头对灌水均匀度的影响,Beale 分布均匀系数^[3]则考虑流量较大的滴头对灌水均匀度的影响,Keller 均匀系数^[4]研究了综合制造偏差和水力偏差在最不利组合时的灌水均匀度,克里斯琴森均匀系数^[5]反映各滴头流量与滴头平均流量的偏差情况。流量偏差率为滴灌系统中最大流量和最小流量的偏差与滴头设计流量之比。

目前,我国现行《微灌工程技术规范》要求滴灌系统设计灌水均匀度不能小于 85%,实测灌水均匀度不能小于 80%^[6]。国内一些学者在流量偏差率的计算方面进行了大量的研究,如张国祥阐述了 Keller 均匀度两个定义的内涵及优缺点,提出了流量总偏差率的计算公式以及允许流量总偏差率的推荐值^[7-8];张林等分析了均匀坡度下滴灌系统流量偏差率与水力偏差率、制造偏差率以及地形偏差率三者之间的关系,推导出考虑三偏差的流量偏差率计算公式^[9-10];朱德兰等确定了考虑三偏差因素的灌水均匀度计算公式,进而得到总流量偏差率与总灌水均匀度之间的关系^[11-12];牛文全等提出了同时考虑三偏差的微灌系统综合流量偏差率和极限综合流量偏差率的计算方法^[13-14]。以上评价方法虽各具特色,但仅能反映滴灌系统中滴头流量的均匀性,均未反映出较小流量滴头的集中程度和分布位置对灌水均匀度的影响。例如在生产实践中,当滴灌工程在运行一段时间后,毛管尾段区域的滴头往往发生集中的堵塞现象,导致滴头流量变小,致使该部分作物的需水得不到满足,进而影响到作物的生长。若采用传统的评价指标,得到的评价结果与实际灌水情况会存在一定的差异。

为准确评价滴灌工程的灌水均匀度及其对作物生长的影响,本文在克里斯琴森均匀系数的基础上,通过将克里斯琴森均匀系数与反映滴头堵塞位置变化的均匀性指标相结合,提出一种考虑滴头堵塞位置分布的灌水均匀度计算方法。

1 灌水均匀度计算方法的建立与依据

滴灌系统中,滴头流量分布主要受水头损失、地

形和制造偏差等因素的影响,而堵塞滴头的位置主要由滴头的结构以及其他随机因素决定。因此,可以假定滴头流量分布和滴头堵塞位置分布二者为相互独立事件。基于上述假设,考虑滴头堵塞位置的灌水均匀度计算应先分别计算滴头流量分布均匀度和滴头堵塞位置分布均匀度,然后综合考虑上述两个因素,最终确定滴灌系统的灌水均匀度。

1.1 滴头流量分布均匀度

目前滴灌系统灌水均匀度基本都以基于流量大小分布的统计方法作为计算和评价依据。在不考虑滴头堵塞位置时,滴头流量分布均匀度采用克里斯琴森均匀系数^[6]表示,即

$$C_u = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |q_i - \bar{q}|}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (1)$$

式中 C_u ——滴头流量分布均匀系数

q_i ——第 i 个滴头的流量, L/h

\bar{q} ——所有滴头的平均流量, L/h

n ——滴头总数

C_u 值在 0~1 之间。 C_u 值越接近于 1, 每个滴头的流量越接近于平均值, 流量分布均匀性越好。

1.2 滴头堵塞位置分布均匀度

一般情况下,当滴头实际流量与设计流量之比小于 75% 时^[15],则认为该滴头发生了堵塞。本文将流量小于设计流量 75% 的滴头定义为堵塞滴头,其他滴头定义为有效滴头。滴灌属于局部灌溉,可以认为每个滴头都具有相同的灌溉湿润区域。为了便于计算和分析,本文将滴灌理解为全面灌溉方式,在滴头未发生任何堵塞的情况下,整个灌水区域平均分配给每个滴头。当滴灌系统发生堵塞时,堵塞滴头的灌水控制区域平均分配给紧邻的滴头(包括紧邻的堵塞滴头),故堵塞滴头周围紧邻的有效滴头的控制区域则相应地增大。若某控制区域内包含 1 个有效滴头,则称其为 A 类区域;若无有效滴头,则为 B 类区域。所有 A 类区域均分别作为单个堵塞滴头位置分布均匀性计算的区域,简称计算区域。对于 B 类区域,若其完全被灌水小区边界或者 A 类区域包围,则将该 B 类区域也作为单个计算区域;若某个 B 类区域与另外一个 B 类区域相邻,则将它们合并形成一个新的 B 类区域,直到任何 B 类区域完全被灌水小区边界或者 A 类区域包围为止。通过上述方法划分与合并后,整个灌水区域被重新分为若干个计算区域。采用与克里斯琴森均匀系数类似的方法,滴头堵塞位置分布均匀度的计算式为

$$R_u = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k |r_i - \bar{r}|}{\sum_{i=1}^k r_i} \quad (2)$$

式中 R_u ——滴头堵塞位置分布均匀系数

r_i ——第 i 个计算区域的大小

\bar{r} ——所有计算区域大小的平均值

k ——计算区域的个数

由于存在堵塞滴头,当灌溉区域被重新划分以后,计算区域的个数 k 不大于滴头的总数 n 。当 1 个堵塞滴头分布在灌水区域的边界上时,计算区域的数量与滴头数量相等;当堵塞滴头分布在非边界区域时,计算区域数量必然小于滴头数量。

集中堵塞滴头的数量越多,形成的 B 类区域越大,计算区域的数量则越少,滴头堵塞位置分布均匀度越低。

1.3 滴灌系统灌水均匀度

从本质上来讲,滴头流量均匀性指标和滴头堵塞位置分布均匀性指标均为平均偏差。在评价灌水均匀度时,二者相互独立,所占比重相当,故以其算数平均值作为滴灌系统灌水均匀度的评价指标。其

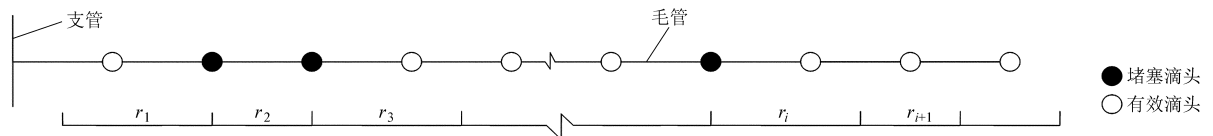


图1 单条毛管计算距离示意图

Fig. 1 Diagram of calculative distance in a lateral

当毛管上的滴头未发生堵塞时,所有滴头均为有效滴头,滴头的计算区域是以滴头为中心向两侧各外延 $1/2$ 滴头间距的长度,如图 1 中所示的 r_{i+1} 。当毛管上有连续堵塞的滴头时,有效滴头的计算距离仅能延伸至与其相邻的堵塞滴头处,形成了如图 1 中所示 r_1 、 r_2 、 r_3 等长度不等的计算区域。

2.1.2 算例比较与分析

为了验证式(3)评价单条毛管灌水均匀度的合理性,假设 11 种典型的滴头流量分布和位置分布情况,并分别计算这 11 种情况下的克里斯琴森均匀系数 C_u 、考虑滴头堵塞位置分布的灌水均匀系数 \bar{U}_R 和 Keller 均匀系数 E_u 。

选某型号滴灌带,滴头设计流量 q 为 1.11 L/h,滴头制造偏差系数 C_v 为 0.026。以 25 个滴头为例,滴头的间距设为单位距离 1,以滴头设计流量的 75% 为标准筛选堵塞滴头。设定的 11 种堵塞情况(表 1)分别为:①所有滴头均未堵塞(毛管 1)。②所有滴头均堵塞 50%(毛管 2)。③所有滴头的平均流量相同,堵塞滴头数量相同,堵塞滴头的集中

计算式为

$$\bar{U}_R = \frac{C_u + R_u}{2} = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\sum_{i=1}^n |q_i - \bar{q}|}{\sum_{i=1}^n q_i} + \frac{\sum_{i=1}^k |r_i - \bar{r}|}{\sum_{i=1}^k r_i} \right) \quad (3)$$

式中 \bar{U}_R ——考虑滴头堵塞位置的灌水均匀系数

一般情况下, \bar{U}_R 的计算值在 0~1 之间,计算结果越接近于 1,滴灌系统的灌水均匀度越好;反之则越差。

由于 \bar{U}_R 既考虑了滴头流量的均匀性,又考虑了堵塞滴头位置分布的均匀性,故从理论上讲,能较好地评价滴灌系统的灌水均匀度。

2 实例应用与分析

2.1 单条毛管的灌水均匀度

2.1.1 计算距离说明

对于单条毛管,滴头的计算区域为线段,其大小可用线段的长度表示,即计算距离,如图 1 所示。

区域不同,即堵塞滴头集中分布在毛管的中段(毛管 3)和末段(毛管 4)。④所有滴头的平均流量相同,堵塞滴头数量相同,但堵塞滴头分布的集中程度不同,分别为毛管末段有较为集中的堵塞滴头(毛管 5)、毛管末段有少量集中堵塞的滴头但堵塞滴头在整条毛管分布比较均匀(毛管 6)和堵塞滴头均匀分布在整条毛管(毛管 7)。⑤所有滴头的平均流量相同,堵塞滴头数量分别为 9 和 4 时,堵塞滴头集中或均匀的分布在整条毛管上,即堵塞滴头数为 9 且均匀分布在整条毛管(毛管 8)、堵塞滴头数为 9 且集中分布在毛管末段(毛管 9)、堵塞滴头数为 4 且均匀分布在整条毛管(毛管 10)和堵塞滴头数为 4 且集中分布在毛管末段(毛管 11)。

按不同的灌水均匀度计算方法分别计算上述 11 种不同情况下的灌水均匀度,计算结果见表 2。

从表 2 可以看出,当所有滴头均发生相同程度的堵塞时,如毛管 2, C_u 、 \bar{U}_R 和 E_u 与滴头正常出流时(毛管 1)的 C_u 、 \bar{U}_R 、 E_u 一样。这是因为当所有滴头的堵塞程度相同时,各滴头的流量与平均流量之

表1 不同灌水情况下堵塞滴头流量与位置分布

Tab.1 Emitter discharge and locations of clogged emitters under different irrigation situations

L/h

滴头序号	毛管1	毛管2	毛管3	毛管4	毛管5	毛管6	毛管7	毛管8	毛管9	毛管10	毛管11
1	1.13	0.57*	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.12	1.12
2	1.06	0.53*	1.08	1.08	0.41*	1.08	1.08	1.12	1.12	1.06	1.06
3	1.08	0.54*	1.14	1.14	1.08	0.21*	1.14	0.80*	0.80*	1.08	1.08
4	1.06	0.53*	1.12	1.12	1.14	0.31*	0.21*	1.13	1.13	0.10*	1.14
5	1.14	0.57*	1.11	1.11	1.12	1.14	1.12	1.10	1.13	1.14	1.08
6	1.08	0.54*	1.13	1.13	1.11	1.12	1.11	0.60*	1.10	1.08	1.11
7	1.11	0.56*	1.08	1.08	1.13	1.11	0.31*	1.11	1.11	1.11	1.11
8	1.13	0.57*	1.13	1.13	0.31*	1.13	1.13	1.12	1.12	1.11	1.12
9	1.12	0.56*	0.21*	1.14	1.13	1.13	1.13	0.70*	1.13	1.12	1.14
10	1.08	0.54*	0.31*	1.10	1.13	1.13	0.41*	1.10	1.12	0.50*	1.06
11	1.14	0.57*	0.41*	1.13	0.41*	0.41*	1.13	1.12	1.10	1.14	1.13
12	1.06	0.53*	0.41*	1.14	1.14	1.14	1.14	0.70*	1.12	1.06	1.12
13	1.13	0.57*	0.21*	1.08	1.10	0.31*	0.41*	1.12	1.12	1.13	1.06
14	1.10	0.55*	0.11*	1.12	1.13	1.10	1.10	0.70*	1.13	0.20*	1.09
15	1.12	0.56*	0.31*	1.10	1.14	1.13	1.13	1.13	0.60*	1.12	1.07
16	1.06	0.53*	0.21*	1.13	1.08	1.14	0.21*	0.65*	0.70*	1.06	1.08
17	1.14	0.57*	1.14	0.21	1.12	1.08	1.14	1.13	0.70*	1.09	1.09
18	1.07	0.54*	1.10	0.21	1.10	1.12	1.08	0.50*	0.70*	1.07	1.07
19	1.08	0.54*	1.13	0.31	1.13	1.10	0.11*	1.13	0.65*	1.08	0.20*
20	1.12	0.56*	1.14	0.41	0.21*	1.13	1.12	0.60*	0.50*	1.09	1.09
21	1.07	0.54*	1.08	0.41	0.31*	1.08	1.10	1.12	0.74*	1.07	1.08
22	1.11	0.56*	1.12	0.21	0.21*	0.21*	0.31*	0.74*	0.60*	0.10*	0.10*
23	1.13	0.57*	1.10	0.11	0.11*	0.11*	1.13	1.12	1.12	1.09	0.10*
24	1.08	0.54*	1.13	0.31	0.21*	0.21*	1.08	1.11	1.11	1.08	0.50*
25	1.11	0.56*	1.08	1.08	1.08	0.41*	0.21*	1.13	1.13	1.11	1.11

* 该滴头发生了一定程度的堵塞,滴头流量小于设计流量的75%。

表2 单条毛管上不同堵塞情况下的灌水均匀度

Tab.2 Irrigation uniformity under different irrigation situations in a lateral

灌水均匀度	毛管1	毛管2	毛管3	毛管4	毛管5	毛管6	毛管7	毛管8	毛管9	毛管10	毛管11
C_u	0.976	0.976	0.566	0.566	0.566	0.566	0.566	0.788	0.788	0.755	0.755
\bar{U}_R	0.988	0.988	0.550	0.550	0.554	0.630	0.716	0.803	0.664	0.779	0.778
E_u	0.941	0.941	0.296	0.296	0.296	0.296	0.296	0.643	0.643	0.591	0.591

间的偏差 $|q_i - \bar{q}|$ 按滴头堵塞程度等比例缩小,此时各滴头流量的总和也按相同比例缩小,因此 C_u 值不变。同理,该堵塞情况下最小流量 q_{\min} 与平均流量 \bar{q} 也按相同比例缩小,故二者的比值也保持不变,因此 E_u 值不变。在毛管2中,所有滴头均发生堵塞,此时仅有一个计算控制区域, $R_u = 1$,同时,在2种情况下, C_u 值相同,所以 \bar{U}_R 也保持不变。

当堵塞滴头的集中程度相同时, C_u 、 \bar{U}_R 和 E_u 均不随集中堵塞部分整体位置的变化而变化,如毛管3和毛管4。当堵塞滴头集中分布在毛管的中段和末段时,由于各滴头流量和控制距离均相同,因此在这2种情况下, C_u 、 \bar{U}_R 和 E_u 均保持不变,分别为0.566、0.550和0.296。

滴头流量相同而堵塞滴头的集中程度不同时,

如毛管4、毛管5、毛管6和毛管7,堵塞滴头分别集中分布在毛管末段、较集中分布在毛管末段、较均匀分布在整条毛管上和均匀分布在整条毛管,这4种情况下的 C_u 、 E_u 均保持不变,分别为0.566、0.296;而 \bar{U}_R 存在显著的差异,堵塞滴头分布的集中程度越高, \bar{U}_R 越小。

当滴头的平均流量保持不变时, C_u 和 E_u 仅随着堵塞滴头数量的变化而变化,而 \bar{U}_R 不仅随堵塞滴头数量的变化而变化,也随着堵塞滴头位置的变化而变化,如毛管9和毛管11。堵塞滴头数量越多,堵塞滴头的集中度和位置分布对 \bar{U}_R 的影响越大。毛管8和毛管9堵塞滴头的数量为9,但毛管9堵塞滴头非常集中,因此,毛管8的 \bar{U}_R 为0.803,毛管9的 \bar{U}_R 为0.664,二者相差0.139。毛管10和毛管11

堵塞滴头的数量为 4, \bar{U}_R 分别为 0.779 和 0.778, 二者相差仅为 0.001。这是因为当堵塞滴头数量较多时, 堵塞滴头集中分布时形成的 B 类区域与平均计算区域之间的偏差明显大于堵塞滴头较少的情况。堵塞滴头越多, 堵塞滴头的集中程度越高, \bar{U}_R 越小。

2.2 灌水小区的灌水均匀度

2.2.1 计算区域说明

灌水小区内每个滴头的控制区域可以理解为面积相同的矩形, 每个控制区域的面积按照 1 个单位计算。当灌水小区内没有堵塞滴头时, 每个滴头的控制区域即为计算区域, 它们均是以滴头为中心、滴头间距为长、毛管间距为宽的一个矩形。如图 2 所示, 虚线所示的矩形方格即为有效滴头计算区域。当灌水小区中有滴头发生堵塞时, 计算区域将被重新划分。

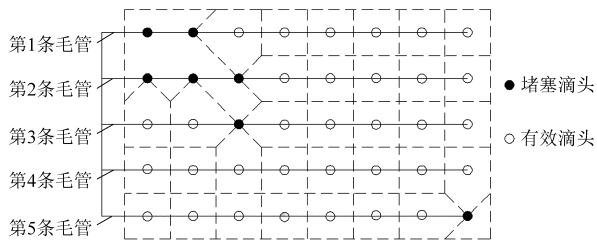


图 2 灌水小区计算区域划分示意图

Fig. 2 Diagram of calculative spaces in subunit

每个滴头控制区域被对角线划分为 4 个部分。当某个滴头堵塞时, 周围紧邻 4 个滴头的控制区域分别扩大 1/4。如图 2 所示, 第 5 条毛管上第 8 个滴头发生堵塞时, 该滴头紧邻的有效滴头控制区域将扩大到原来的 5/4 倍, 为 A 类区域; 而该滴头原控制区域的剩余部分为 2/4, 为 B 类区域。由于该 B 类区域完全被其他 A 类区域和小区边界包围, 所以它作为一个单独的计算区域。第 1 条、第 2 条毛管和第 3 条毛管上的 6 个滴头发生集中堵塞, 将堵塞滴头原控制区域重新划分后, 形成 1 个面积为 4 的 B 类区域, 作为 1 个计算区域。集中

分布的堵塞滴头数量越多, B 类区域越大, 而 A 类区域最大仅为 2。

当一定数量的堵塞滴头集中分布在某一区域时, 则形成 1 个面积较大的计算区域, 与灌水小区内所有计算区域面积平均值的偏差增加, R_u 减小, 因此, \bar{U}_R 也相应地减小, 此时 $\bar{U}_R < C_u$ 。若堵塞滴头均匀分布在灌水小区时, 每个计算区域的面积都近似相当, 接近于计算区域面积的平均值, 故 R_u 较大, 此时 $\bar{U}_R \geq C_u$ 。

2.2.2 算例比较与分析

为了验证考虑堵塞滴头位置分布的灌水均匀度计算方法在灌水小区内的合理性, 假设了 9 种典型的灌水情况, 并分别计算了这 9 种情况下的克里斯琴森均匀系数、考虑滴头堵塞位置的灌水均匀系数和 Keller 均匀系数。

选取某滴灌带, 滴头设计流量 q 为 1.11 L/h, 滴头制造偏差系数 C_v 为 0.026, 滴头间距为 0.30 m, 毛管间距为 1.00 m。每个灌水小区内 有 30 ~ 40 条毛管, 毛管铺设长度为 80 ~ 100 m, 则每条毛管上有 240 ~ 300 个滴头。本文将堵塞滴头分别按照集中、较集中、均匀分布等 3 种情况分布于整个灌水小区, 共设定 9 种工况, 分别为: ①堵塞滴头数为滴头总数的 20%, 滴头堵塞程度为 30%, 即堵塞滴头的平均流量为滴头设计流量的 70%, 有工况 1、工况 2 和工况 3。②堵塞滴头数为滴头总数的 30%, 滴头堵塞程度为 30%, 有工况 4、工况 5 和工况 6。③堵塞滴头数为滴头总数的 30%, 滴头堵塞程度为 50%, 有工况 7、工况 8 和工况 9。滴头堵塞位置分布的局部情况如图 3 所示。

按不同的灌水均匀度计算方法分别计算上述 9 种工况下的灌水均匀度, 计算结果见表 3。

从表 3 可以看出, 当滴头堵塞程度相同时, C_u 、 \bar{U}_R 、 E_u 基本随堵塞滴头数量的增多而减小, 如工况 3 和工况 6, 滴头堵塞程度均为 30%, 当堵塞滴头数占

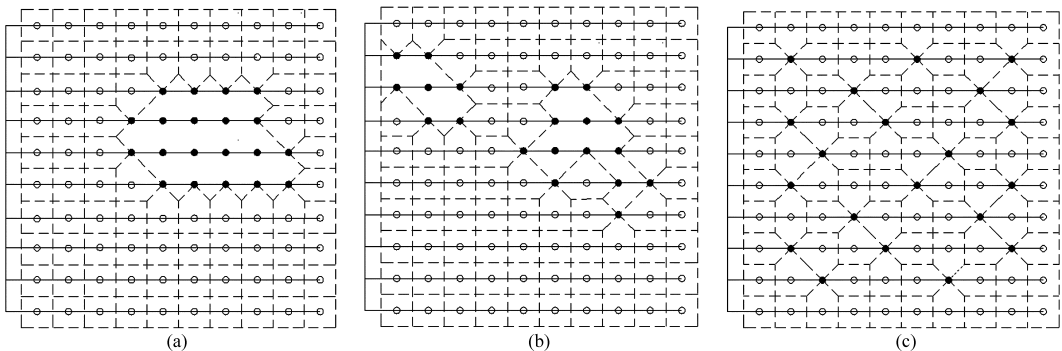


图 3 堵塞滴头位置分布示意图

Fig. 3 Distribution of clogged emitters under different situations

(a) 堵塞滴头集中分布 (b) 堵塞滴头较集中分布 (c) 堵塞滴头均匀分布

滴头总数的比例从 20% 增加到 30% 时, C_u 、 \bar{U}_R 、 E_u 依次分别从 0.886、0.895、0.758 减小为 0.858、0.791、0.752。当堵塞滴头占总滴头的比例相同时, C_u 、 \bar{U}_R 、 E_u 随着滴头堵塞程度的增加而减小, 如工况 6 和工况 9, 堵塞滴头占总滴头的比例均为 30%, 而

堵塞程度从 30% 增大到 50% 时, C_u 、 \bar{U}_R 、 E_u 依次分别从 0.858、0.791、0.752 减小为 0.757、0.740、0.576。 \bar{U}_R 随堵塞滴头占滴头总数比例和滴头堵塞程度变化而变化的趋势与 C_u 、 E_u 基本相同, 说明 \bar{U}_R 能准确地描述因滴头堵塞引起的灌水均匀度变化。

表 3 不同堵塞情况下灌水均匀度

Tab. 3 Irrigation uniformity under different irrigation situations

灌水均匀度	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7	工况 8	工况 9
C_u	0.886	0.886	0.886	0.858	0.858	0.858	0.757	0.757	0.757
\bar{U}_R	0.757	0.818	0.895	0.649	0.737	0.791	0.599	0.686	0.740
E_u	0.758	0.758	0.758	0.752	0.752	0.752	0.576	0.576	0.576

同时, 从表 3 还可以看出, 当堵塞滴头的数量和滴头的堵塞程度不变时, C_u 和 E_u 不会随堵塞滴头位置的变化而改变, 如工况 7、工况 8 和工况 9, C_u 和 E_u 分别为 0.757 和 0.576。堵塞滴头数量和堵塞程度虽然相同, 但滴头堵塞位置分布和堵塞滴头集中程度不同, \bar{U}_R 也有显著差异, 如工况 7、工况 8 和工况 9, 堵塞滴头的集中程度逐渐减小, 而 \bar{U}_R 则呈逐渐增大的趋势。总体而言, 堵塞滴头分布越集中, \bar{U}_R 与 C_u 的差值越大; 堵塞滴头分布越均匀, \bar{U}_R 与 C_u 的差值越小。若堵塞滴头数量和堵塞程度较小, 堵塞滴头分布非常均匀, $R_u \approx 1$, 此时 $\bar{U}_R > C_u$ 。例如工况 1、工况 4 和工况 7, 堵塞滴头分布非常集中, 这些集中工况下的 \bar{U}_R 均小于 C_u ; 工况 3、工况 6 和工况 9, 堵塞滴头位置分布非常均匀, 它们的 \bar{U}_R 与 C_u 非常接近, 甚至出现 $\bar{U}_R > C_u$ 的情况, 如工况 3。

由于 C_u 无法反映堵塞滴头的位置与集中程度, 因此, 工况 1 ~ 工况 6, $C_u > 0.8$, 根据微灌工程技术规范^[6], 这 6 个工况都属于符合要求的运行状况。但实际上滴头发生集中堵塞区域的作物无法得到充足的供水, 如图 3 所示, 作物的生长和产量必然受到很大影响。而 \bar{U}_R 考虑了堵塞滴头的位置分布状况, 在工况 1 ~ 工况 6 中, 只有在堵塞滴头均匀分布于整个灌水小区且堵塞程度较轻的工况 2 和工况 3 中, $\bar{U}_R > 0.8$, 其他 \bar{U}_R 均小于 0.8, 属于不合格系统, 这与作物实际灌水情况相符合。因此 \bar{U}_R 能较为准确地反映滴灌系统中滴头堵塞位置分布均匀性与作

物水分供应之间的关系, 优于目前仅考虑流量分布均匀性的均匀度方法。

3 结论

(1) 目前仅考虑滴头流量差异的灌水均匀度计算方法无法准确反映系统运行过程中滴头堵塞位置和堵塞滴头集中程度的变化, 也无法反映整个灌水区域作物供水差异的变化。

(2) 理论分析和算例比较表明, 除所有滴头均发生堵塞这一极端情况外, 本文提出的灌水均匀度系数同时考虑了滴头堵塞位置分布和滴头流量变化情况, 更加准确、真实地反映了滴灌系统水量空间分布均匀性。

(3) 随着堵塞滴头数量和滴头堵塞程度的变化, 灌水均匀系数 \bar{U}_R 与克里斯琴森均匀度系数 C_u 的变化趋势基本一致。 \bar{U}_R 可反映滴头堵塞位置分布与堵塞滴头集中程度对灌水均匀度的影响, 随着滴头堵塞位置分布均匀度的增大, \bar{U}_R 增大。 \bar{U}_R 有效克服了克里斯琴森均匀系数等评价指标在评价工程运行时无法反映堵塞滴头分布位置的问题。

(4) 建立 \bar{U}_R 时, 假设滴头流量和滴头堵塞位置分布相互独立, 二者互不影响, 并且所占比重相当, 该假设是否最为合理还有待进一步研究。另外, 考虑滴头堵塞位置分布的灌水均匀度如何在滴灌工程设计和评价中使用, 也需进一步研究。

参 考 文 献

- 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 Criddle Wayne D. Methods for evaluating irrigation system[M]. Washington D. C.: Soil Conservation Service U. S. Dept. of Agriculture, 1956.
- 3 Beale J G. Distribution uniformity of sprinkler irrigation systems[M]. Kensington: University of New South Wales, 1965.
- 4 Jack Keller, David Karmeli. Trickle irrigation design parameters[J]. Transactions of the ASAE, 1974, 17(4): 678-684.

- 22 赵燕东, 聂铭君. 双针结构土壤水分传感器探针最优长度分析与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11): 39-43.
Zhao Yandong, Nie Mingjun. Optimal analysis for determining the dual-pin length of soil moisture probe[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 39-43. (in Chinese)
- 23 彭曾愉, 赵燕东. 基于 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 操作系统的土壤水分实时监测系统[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(6): 114-119.
Peng Zengyu, Zhao Yandong. A monitoring system of real-time soil water content based on $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ operating system[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(6): 114-119. (in Chinese)
- 24 王改改, 魏朝富, 吕家格, 等. 四川盆地丘陵区土壤水分空间变异及其时间稳定性分析[J]. 山地学报, 2009, 27(2): 211-216.
Wang Gaigai, Wei Chaofu, Lü Jiage, et al. Spatial variation and its temporal stability of soil water in hilly area of Sichuan basin [J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27(2): 211-216. (in Chinese)
- 25 周启友, 岛田纯. 土壤水空间分布结构的时间稳定性[J]. 土壤学报, 2003, 40(5): 683-690.
Zhou Qiyu, Jun Shimada. Temporal stability of the spatial distribution pattern of soil water[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(5): 683-690. (in Chinese)
- 26 雷志栋, 杨秀秀, 许志荣, 等. 土壤特性空间变异性初步研究[J]. 水利学报, 1985, 9(9): 10-21.
Lei Zhidong, Yang Shixiu, Xu Zhirong, et al. Preliminary investigation of the spatial variability of soil properties[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, 9(9): 10-21. (in Chinese)
- 27 尹玉凤, 张妙仙, 沈海波, 等. 土壤水分特征曲线滞后性与比水密度拟合研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(6): 50-53.
Yin Yufeng, Zhang Miaoxian, Shen Haiibo, et al. Fitting research on hysteresis phenomenon of soil water characteristic curves and soil water capacity[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(6): 50-53. (in Chinese)
- 28 任淑娟, 孙宇瑞, 任图生. 测量土壤水分特征曲线的复合传感器设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 56-58.
Ren Shujuan, Sun Yurui, Ren Tusheng. Design of dual-sensor for measuring soil water characteristic curve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 56-58. (in Chinese)
- 29 刘继龙, 马孝义, 张振华. 不同土层土壤水分特征曲线的空间变异及其影响因素[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 46-52.
Liu Jilong, Ma Xiaoyi, Zhang Zhenhua. Spatial variability of soil water retention curve in different soil layers and its affecting factors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 46-52. (in Chinese)

(上接第 152 页)

- 5 Christiansen J E. Irrigation by sprinkling[R]. Berkeley, CA: University of California, 1942.
- 6 GB/T 50485—2009 微灌工程技术规范[S]. 2009.
GB/T 50485—2009 Technical code for micro-irrigation engineering[S]. 2009. (in Chinese)
- 7 张国祥. 考虑三偏差因素的滴灌系统流量总偏差率[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 27-29.
Zhang Guoxiang. Calculating the total flow deviation rate of drip-irrigation system based on three deviation rates[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 27-29. (in Chinese)
- 8 张国祥. 用凯勒均匀度进行微灌系统设计的质疑[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 6-9.
Zhang Guoxiang. Query about micro-irrigation system design using Keller uniformity[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 6-9. (in Chinese)
- 9 张林, 吴普特, 牛文全, 等. 均匀坡度下滴灌系统流量偏差率的计算方法[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 40-44.
Zhang Lin, Wu Pute, Niu Wenquan, et al. Method for calculating flow deviation in drip irrigation system under uniform slope[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(8): 40-44. (in Chinese)
- 10 张林, 范兴科, 吴普特, 等. 均匀坡度下考虑三偏差的滴灌系统流量偏差率的计算[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 7-14.
Zhang Lin, Fan Xingke, Wu Pute, et al. Calculation of flow deviation rate of drip irrigation system taking three deviation rates into account on uniform slopes[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4): 7-14. (in Chinese)
- 11 朱德兰, 吴普特, 张青峰, 等. 微地形影响下滴灌均匀度设计指标研究[J]. 排灌机械, 2006, 24(1): 22-26.
Zhu Delan, Wu Pute, Zhang Qingfeng, et al. Study on the emission uniformity for the emitter under the condition of farmland micro-terrain action[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2006, 24(1): 22-26. (in Chinese)
- 12 Zhu D L, Wu P T, Merkle G P, et al. Drip irrigation lateral design procedure based on emission uniformity and field microtopography[J]. Irrigation and Drainage, 2010, 59(5): 535-546.
- 13 牛文全, 吴普特, 范兴科. 微灌系统综合流量偏差率的计算方法[J]. 农业工程学报, 2004, 20(6): 85-88.
Niu Wenquan, Wu Pute, Fan Xingke. Method for calculating integrated flux deviation rate of micro-irrigation system [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(6): 85-88. (in Chinese)
- 14 牛文全. 微压滴灌技术理论与系统研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
Niu Wenquan. Theory and system research of micro-pressure drip irrigation technology [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2006. (in Chinese)
- 15 姚振宪, 何松林. 滴灌设备与滴灌系统规划设计[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- 16 韩文霆, 崔利华, 吴普特, 等. 正三角形组合喷灌均匀度计算方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 99-107.
Han Wenting, Cui Lihua, Wu Pute, et al. Calculation methods for irrigation uniformity with sprinklers spaced in regular triangle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 99-107. (in Chinese)