

井井井井井井井井井井井井井井井井  
井 国外科技资料简介 井  
井井井井井井井井井井井井井井井

## 喷 灌

国外农田水利建设事业，近十多年来发展较快。就喷灌来说——即所谓人工降雨灌溉法或喷洒灌溉法，据估计全世界的喷灌面积每年增长10%左右，个别国家的增长幅度还要大得多。例如，朝鲜的喷灌面积1972年已达150万亩，占灌溉面积的11.1%。英国于1969年喷灌占灌溉面积的40%，法国于1970年占42%，罗马尼亚于1965年占50%，苏联于1970年占16%，美国于1969年占18%，以色列为最高于1965年占90%。

喷灌之所以发展较快，主要原因是：

**1. 节省用水。**据报导，喷灌比沟灌省水，在朝鲜省水20—30%，在苏联省水33—50%，在美国、意大利、阿联、西德等国可省水55—70%。

**2. 增产显著。**朝鲜旱田作物喷灌比沟灌增产20—30%，如单季麦类作物每公顷增产1.5吨，由于喷灌保证了第二季作物的生育，又可收获玉米5—6吨，一年能增产6—7吨，因而使二季作面积扩大。蔬菜推广喷灌后，产量提高了二倍。日本水稻采用喷灌的产量每亩为548斤，沟灌为416斤，喷灌增产32%。美国加利福尼亚州喷灌棉花每亩为224斤，沟灌为150斤，增产41%。苏联的喷灌试验，一般旱田作物增产20—50%，蔬菜增产40—50%，有的增产几倍，苹果增产8%，葡萄增产34%。可见，喷灌不仅能显著增产，而

且还能高提产品质量。

**3. 节省人力，提高工效。**据苏联报导，一般大田沟灌每垧需要50—60个工日，喷灌只需7—8个工日，蔬菜能节省人力71—83%，棉花为71%。美国1965年调查，一般田间工程条件下，喷灌比沟灌效率高25—100%。

**4. 调节田间小气候。**在酷热干旱天气下，喷灌可以降低植株温度，提高株间空气湿度，从而防止高温干旱的危害。经济作物又可以利用喷灌防霜冻，一般可防御零下2°—3.5°C的低温。

**5. 适应性强。**不平整的地块和不同土壤，特别是透水性强与粘重土壤，都可以使用。喷灌可与施肥、喷药结合进行，减少流失提高肥效。据苏联资料，一般可提高肥效10—20%，节省人力2—3倍。

**6. 保护土壤。**喷灌可以保持土壤结构，防止土壤板结、冲刷和次生盐渍化。

此外，喷灌还有不用筑渠，既减少沟渠占地，又便于机械化耕作；清洗植物叶片的灰尘、昆虫以及淋浴植株体内氨分解的有毒物质等优点。现已较为广泛地应用在旱田作物、经济作物、蔬菜、果树和牧草等灌溉中。

喷灌设备每公顷所需投资较高，但据朝鲜经验，一、两年就可以从实际受益中全部收回，

## 一、喷头和喷灌系统类型：

### (一) 喷头的类型

目前各国生产的喷灌设备型号繁多。一般按喷头工作压力划分为三类。

1. **低压喷头。**工作压力为1—2公斤/厘米<sup>2</sup>，喷射半径在15米以内，流量小，喷灌范围内水量分布均匀。

2. **中压喷头。**工作压力为2.1—5公斤/厘米<sup>2</sup>，喷射半径在20—40米之间，喷灌范围内水量分布比较均匀，应用范围很广。

3. **高压喷头。**工作压力为5.1—7.0公斤/厘米<sup>2</sup>，也有7.0公斤/厘米<sup>2</sup>以上的。这类喷头射程远，水滴大，分布均匀程度不如前两种，消耗能力大。

再按喷头上的喷咀数量可分为单喷咀、双喷咀、三喷咀及多喷咀。按旋转速度分为快速旋转与慢速旋转（一转/分左右）。按喷灌面的形状分为圆形喷灌和扇形喷灌等。

当前国外一般均采用慢速旋转的中压喷头。因为这类喷头消耗能量比高压喷头少，但射程与工作效率比低压喷头高，水量分布的均匀程度比高压喷头好，与低压喷头相似。并且适用于喷灌各种作物。

### (二) 喷灌系统的类型：

目前采用的喷灌系统一般分为三类。

1. **移动式喷灌系统。**整个系统——水泵、动力部分（电动机、柴油机、汽油机或拖拉机等）、输水管与喷头或者是整个喷灌机均可以移动。一般由渠道供水，可以边移动边喷灌，也可以定点喷灌。这种喷灌系统造价低，需要金属材料少，在已有的农田灌溉网的基础上易于应用。但是在应用过程中，每次所需的费用多，同时，由于需要整修渠道，对于地势起伏的农田则需要大量的劳动力。

2. **半固定式喷灌系统** 水泵、动力设备和总输水管道是固定的，而支管与喷头是可以移动的。这种喷灌系统需要金属材料多，造价高，但比前种省水，每次喷灌所需的费用低，效率高。

3. **固定式喷灌系统。**除喷头外，整个系统都固定不动。这种喷灌系统需要金属材料更多，造价昂贵，约等于半固定式的三倍，一般只在经济作物等特殊场合使用。

目前，一方面尽量实现搬运工作机械化，另一方面，英美日等国开始向自动化喷灌系统发展，如英国设计的雷恩格7型自动化控制的旋转式大型喷灌机，旋转一周灌溉面积达100垧；美国法权公司研制的自动化旋转式大型喷灌机，旋转一周需要40—259小时，灌溉面积为50垧。同时，为了节省大量的金属材料，各国均都注意用料塑代替金属，使用塑料管和塑料喷头。目前我省已开始成批生产中压双咀的塑料喷头，性能良好，造价低廉。

## 二、喷头射程的计算

喷头射程（或称作用半径）是最重要的水力参数。它决定着—个位置上的喷灌面积，喷灌强度和喷头间的距离等，是喷灌系统设计中—个很重要的指标。在这里介绍几种计算公式。

(一) A.N.季捷布里切公式：

$$R = \frac{H}{\alpha + x \cdot H} \cdot \nu$$

式中：R—射程半径；H—压力

a—系数， $a = 0.42$ ；

x,  $\nu$ —取决于喷咀直径(c)与仰角( $\alpha$ )的函数值，其值如下：

$d$	7	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$x$	0.0324	0.024	0.0169	0.0129	0.0106	0.009	0.0079	0.007	0.0063	0.0058
$\alpha$	5	10	15	20	30	32	34	40	45	50
$\gamma$	0.5	0.6	0.716	0.89	1.0	1.0	1.0	0.96	0.88	0.8

(二) B.M. 马利克娃利特捷公式:

$$R = \frac{2\mu^2 \cdot H \cdot \sin 2\alpha}{1 + \mu^2 \left(1 - \sqrt{\frac{H}{1.6^i}}\right) \cdot \frac{H}{d} \cdot \sin \alpha}$$

式中  $\mu$ —流量系数,  $\mu = 0.93-0.95$ ;

$e$ —自然对数的底数。

将此公式计算值与试验资料相比较, 计算结果稍大, 但不超过试验资料的3.3%。

(三) M.N. 那扎洛夫公式:

$$R = A \cdot \left(\frac{H}{d}\right)^{0.81}$$

式中  $A$ —取决于喷嘴直径的系数,

$$A = 0.78 (d)^{1.1}$$

因此,

$$R = 0.78 H^{0.81} \cdot d^{0.3}$$

上述各式的计算结果仅为无风情况下, 喷头不旋转时射程的计算值。但在有风与喷头旋转时, 射程要比计算值小。一般地, 旋转速度为一转/分时, 射程减少10—15%。随着旋转速度的加快, 增加了水的压力损失, 因而射程将缩短。M.N. 那扎洛夫根据试验资料得出喷头旋转一周的时间( $t$ )与 $H$ 、 $d$ 之间的关系式为:

$$t = 3 \cdot \left(\frac{d}{H}\right)^{2/3}$$

风对射程影响极大。П.Н. 捷米道夫指出, 风速在3米/秒以内不致引起喷滞状况变坏; 风速高于3.5米/秒时, 造成水量分布不均匀并减少灌溉面积; 当风速在4米/秒左右, 灌溉面积减少15—20%, 在9米/秒时, 减少75%, 降低灌溉效率。

M.N. 那扎洛夫根据多次试验资料, 得出灌溉面积大小与喷头水力参数和风速之间的关系式。

$$K = \frac{d \cdot l}{H} \cdot W$$

式中  $d$ —喷头直径(米);

$l$ —整流器长度(米);

$H$ —喷头工作压力(米);

$W$ —灌溉面积(米<sup>2</sup>);

$K$ —比例系数。

从  $K = f(v)$  的关系图上, 得到关系式:

$$W = \frac{A \cdot H}{v \cdot d \cdot l}$$

式中  $v$ —风速(米/秒);

$A$ —取决于整流器长度的系数,

$$A = 1.7 l^{0.85}$$

因此, 上式变为:

$$W = \frac{1.7H}{v \cdot 0.5 \cdot d \cdot l^{0.15}}$$

在已知喷头的水力学参数和风速时, 此式可以预先得出每个喷头的灌溉面积, 便于在设计喷灌系统时布置喷头或者喷灌机。

据3.N. 灭切利斯基的研究, 为了减轻风对喷灌的影响, 喷头仰角小于30°, 并且喷头布置在风向相反的方向上, 将能改善喷头的工作状况。喷头与风向相反的合理偏角为10°左右, 根据风速可增加到45°。输水支管一般与风向垂直布置, 这样可以使喷射的

有效直径受风的影响较小。

### 三、喷嘴直径的计算：

喷嘴直径的大小是喷头设计中又一重要

$$d_0 \leq \left(\frac{\alpha_1}{100}\right)^4 \cdot \left(\frac{\alpha_2}{100}\right)^4 \cdot \left(\frac{\alpha_3}{100}\right)^4 \cdot \frac{3770\alpha^0 K^3 \rho^2 \cdot \sin^4 2\alpha}{[1 + \mu^2(1 - e - K/1.6) \cdot K \cdot \sin\alpha]^4 \cdot \beta^2}$$

式中  $\alpha_1$ —喷头旋转速度对射程影响系数；

$\alpha_2$ —机具运转对射程影响系数；

$\alpha_3$ —喷嘴上的裂缝和可能的危害对射程的影响系数；

$\mu$ —喷嘴流量系数；

$K$ —比例系数， $K = H/d$ ；

$\alpha$ —喷头与水平方向的仰角；

$e$ —自然对数的底数；

$\beta$ —几个机具同时工作情况下流量系数；

$\beta$ —许可的最大降雨强度 (mm/分)。

对于一个喷灌机工作 ( $\beta = 1$ )，喷头不旋转 ( $\alpha_1 = 100\%$ )，摇臂型 ( $\alpha_2 = 100\%$ )，园型喷嘴和长园锥型喷嘴并且精密加工 ( $\mu = 1$ )，没有裂缝和固定机具的间隔 ( $\alpha_3 = 100\%$ )，仰角  $\alpha = 32^\circ$  时，上式可以简化为：

$$\rho \leq \frac{2450K^3 \cdot \rho^2}{[1 + 0.53(1 - e - K/1.6) \cdot K]^4}$$

根据此公式，喷嘴最大直径依赖于比例系数  $K$  的变化。在各种  $\rho$  情况下，随着系数  $K$  的增加，喷嘴最大直径开始增加，达到最高限度以后开始减小，这个高度限度位于  $K = 2100 - 3000$  之间。

确定了喷嘴直径后应该考虑的另一个问题是喷嘴的最有利形式。实践证明，喷嘴为某种园锥体的形式最适宜，但是，园锥角的大小直接影响到流量系数与紧缩度。在园锥角为  $16^\circ$  左右时，流量系数最大 ( $\mu = 0.95$ )，以后随着园锥角的增加，流量系数逐渐减小。

参数，它影响到射程的远近，又决定水滴的大小，即关系到喷头性能的好坏。

B.M. 马利克娃利特捷确定喷嘴直径的关系式：

### 四、雨滴大小的确定：

雨滴大小关系到喷灌效果，是喷头性能好坏的指标之一。雨滴过大，作物一般受不了打击，易造成土壤板结，影响水分向土壤的渗透，形成径流及冲蚀土壤。雨滴过小，虽对作物有益，但消耗能量多，影响射程，易被风吹走，同时蒸发损失严重。

M.N. 那扎洛夫根据试验资料得出雨滴大小与喷头压力和距离喷头的远近之间的关系式：

$$dk = KL^{0.75}$$

式中  $dk$ —雨滴直径 (mm)；

$L$ —测量点距喷头的距离；

$K$ —取决于喷头压力的系数，

$$K = \frac{5}{H^{0.85}}; \text{因而,}$$

$$dk = \frac{5 \cdot L^{0.75}}{H^{0.85}}$$

假如  $L = R$ ，而  $R = 1.63H^{0.73} \cdot d^{0.17}$ ，则最远处的雨滴直径为：

$$d_k^{\max} = \frac{7.2d^{0.13}}{H^{0.3}}$$

此式表明，雨滴大小直接取决于喷嘴直径和喷头压力。

3.N. 灭切利斯基认为，不同喷嘴直径产生适宜的雨滴所需的工作压力如下表：

喷嘴直径 (d毫米)	32	22	12	10	6	5
需要的工作压力	65—70	40—45	20—24	18—20	14—15	12—14
(H, 米) $H/d$	2000—2200	1800—2000	1700—2000	1800—2000	2300—2500	2400—2800

从表内看出，比例系数 $H/d$ 一般地均在1800—2400之间。M. A. 马尔金试验证明，喷头出口水压（ $H$ 米）与喷嘴直径（ $d$ 米）的比例可由下式确定：

$$Mk = \frac{Hk}{dk} = \frac{V^2}{\phi^2 \cdot 2g \cdot h}$$

式中 $Mk$ —喷头压力与喷嘴直径比例的限制值；

表2

$\frac{H}{d}$	$\frac{H}{R}$	降雨特性	应用范围
900以下	0.59	形成水流而不应粉碎成雨滴	
900—1500	0.62—0.72	暴雨	不适于灌溉
1500—1600	0.77	大雨	仅用于牧场（草地）灌溉
1700—1800	0.83	中雨	用于农作物长成时的灌溉
2000—2200	0.91	小雨	用于各种农作物的灌溉
2400—2600	1.00	很小的雨	用于最细嫩的或开花植物的灌溉
3000以上	1.11或更大	增加功率损失的不合理形式	

认为雨滴直径一般为1—2毫米适宜。朝鲜的试验认为，适宜的雨滴直径为0.5—2.5毫米，喷灌不同作物采用的 $Mk$ ，蔬菜为 $Mk = 4000—6000$ ，粮食作物为 $Mk = 3000—4000$ ，一般旱田为 $Mk = 1000—2000$ 。

## 五、降雨强度

降雨强度是指喷灌面积上一分钟内降落的水层厚度（毫米）。它对作物和土壤结构影响很大。降雨强度应符合土壤透水性。

A. H. 考斯加可夫认为，在降雨强度等于0.10—0.15mm/分时，不仅保持土壤结构和它的通气性，而且可根据土壤的可透性相应的提高降雨强度；粘重土壤的降雨强度为0.1—0.2mm/分，中壤土为0.2—0.3mm/分，轻质土壤为0.5—0.8mm/分。降雨

$V$ —水流速度；

$h$ —喷嘴直径；

$g$ —重力加速度（ $g = 9.8$ 米/秒<sup>2</sup>）；

$\phi$ —流量系数。

$Mk$ 值不同，产生不同特性的人工降雨。

B. B. 别良也夫和B. M. 列别捷夫试验结果如表2。

强度愈高和雨滴愈大，土壤结构破坏得愈严重而且愈紧实，很容易形成硬壳，出现水流，而且土壤浸湿深度减小。

全苏水利技术和土壤改良研究所关于降雨强度对黑土0—10厘米（容重为0.95）的影响试验（表3、4）表明，一般喷灌机的降雨强度应为0.5—1.0mm/分。

表3 土壤浸湿深度与降雨强度的关系

降雨强度 (mm/分)	降水层 (mm)	浸湿深度 (cm)
0.39	50.0	22.30
0.98	49.1	21.40
2.45	49.1	19.10
3.00	50.0	17.60

表4

喷灌对土壤结构的影响

降雨强度 (mm/分)	< 1mm的微粒增加百分数 (%)	硬壳厚度 (mm)	0—10cm层 土壤容重	土壤孔隙度 (%)	到开始有水流的时间 (分)	到出现水流的灌溉标准 (mm)
0.25	2.7	无	0.97	48.8	无水流	80
0.50	9.5	8	0.98	51.7	11	80
1.00	13.8	11	0.99	52.9	65	65
2.00	13.4	15	1.01	51.0	25	50
3.00	21.4	20	1.06	53.3	15	45
沟灌	30.0	25	1.06	51.6	—	—

朝鲜对不同土壤类型的喷灌(降雨)强度规定为:粘土—0.14mm/分;粘壤土—0.17mm/分;壤土—0.2mm/分;沙壤土—0.25mm/分;沙土—0.33mm/分。

日本对不同土壤类型和不同地势、地表的最大灌溉强度,从表5看出,许可的最大灌溉强度随着耕地坡度的增加而相应的缩小。

表5 最大灌溉强度

土壤类型	最大灌溉强度 (mm/时)							
	倾斜0—5%		5—8%		8—12%		12%以上	
	被复良好	裸地	被复良好	裸地	被复良好	裸地	被复良好	裸地
粗砂土	50	50	50	38	38	25	25	13
砂壤土	44	25	31	20	15	15	19	10
壤土	25	13	20	10	15	8	10	5
重粘土	5	4	4	3	3	2	3	2

为了使降雨强度符合作物的要求并有利于保护土壤结构,可根据水利学参数和喷头结构来选择。M.N.纳扎洛夫根据试验资料得出确定降雨强度的关系式:

$$h = \frac{3q \cdot d^{2/3}}{H^{2/3} \cdot W}$$

式中h—降雨强度 (mm);  
q—喷头流量 (升/分);  
W—灌溉面积 (m<sup>2</sup>);  
d—喷咀直径 (mm)。

如果按  $R = 1.63H^{0.73}d^{0.17}$  计算灌溉面

积(W),则上式变为:

$$h = \frac{0.36d^{6.32}}{H^{2.12}}$$

## 六、降雨分布均匀性的测定

降雨分布不均匀,会造成产量波动,甚至有的地块会导致减产。因此,测定降雨分布的均匀性,是研究喷头或喷灌机性能好坏的基本指标。目前,确定降雨分布均匀性的方法是在实际测量的基础上进行计算分析。

可根据灌溉面积的大小和要求的精确度,在喷灌范围内按一定距离(0.5—5米)布置量雨筒。量雨筒布置方式有四种:正方形、同心园式、棋盘式与辐射式。这四种方式对射程远的喷头和喷灌机都适用,对射程近的仅用第一、二种方式为宜。这四种形式中以棋盘式为最好。

主要计算方法有以下几种:

1. I. E. 希立斯天森公式:

$$Cu = 100 \left( 1 - \frac{\sum x_i^2}{n \bar{x}} \right)$$

式中Cu—降雨均匀性系数(%);

$\bar{x}$ —平均降水量

$x_i$ —第*i*点的降水量与平均降水量的偏差

n—测量点数。

2. 维利寇克斯公式:

维利寇克斯和斯外利斯根据试验研究,

出均匀性系数的计算公式为：

$$N = 100 - \frac{100SD}{M} = 100 \left(1 - \frac{SD}{M}\right)$$

式中N—降雨均匀性系数；

SD—降水量的标准差；

M—平均降水量。

3. B. B. 别良也夫公式：

$$K_p = \frac{pcp}{pcp + [\Delta pcp]}$$

式中 $K_p$ —降雨分布均匀性系数；

$pcp$ —平均降雨强度；

$[\Delta pcp] = \frac{\sum |p_i - pcp|}{n}$ ，即第*i*点降雨强度与平均降雨强度离均差绝对值的算术平均值。

如果将上式稍稍变化一下为：

$$K_p = \frac{1}{1 + \frac{[\Delta pcp]}{pcp}}$$

它类似于变化系数。

但是，在应用上述公式时，往往会出现有相同的平均值和均匀系数，然而它们的分布状况却是完全不同的，实际上均匀性也是不同的。因而，它不能十分正确地反映出降雨分布的差异性来。这里应该特别指出的是第二种公式，由于式中采用的是标准差，因而，即使在平均值和离均差相同的情况下，标准差也是不同的，所以均匀性系数也就不同，从而能反映出降雨分布的差异，由此可以认为，它比其它方法好。

## 七、喷灌网路形式

在设计喷灌系统时，为了使喷灌区域内的降水量分布达到均匀，重要的问题在于确定管路或渠道间的距离以及喷头间的距离。

采用圆形喷灌，适宜的形式有五种。

### 1. 正方形布置

如图1，喷头间距 $L_1 = 2R \cos 45^\circ = \sqrt{2}R = 1.412R$ ；两相邻支管或渠道间的距离 $L_2 = L_1$ 。这种布置方式中有57.1%的面积喷

灌两次，42.9%的面积喷灌一次。总的喷灌受益面积为 $2R^2$ 。

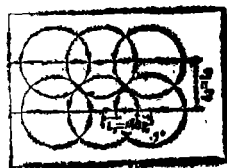


图1. 正方形布置

### 2. 三角形布置

如图2，喷头间的距离 $L_1 = 2R \cos 30^\circ = \sqrt{3}R = 1.732R$ ；两相邻管路间的距离 $L_2 = R(1 + \sin 30^\circ) = 1.5R$ 。总的受益面积为 $2.6R^2$ ，比正方形布置的受益面积增加30%。这种形式中有79.1%的面积喷灌一次，20.9%的面积灌溉二次。

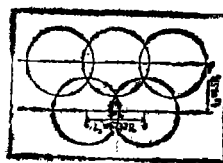


图2. 三角形布置

### 3. 矩形布置

(1) 如图3—1，喷头间距 $L_1 = R$ ，两相邻管路间的距离 $L_2 = \sqrt{3}R = 1.732R$ 。在这种布置中，一次喷灌面积为18.6%，二次喷灌面积为81.4%。它比正方形布置的喷灌受益面积减少15%左右。

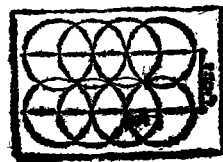


图3—1. 矩形布置

(2) 如图3—2, 喷头间距 $L_1 = R$ ; 两相邻管(渠)道间的距离 $L_2 = 1.458R$ 。这种布置形式中, 一次灌溉面积为4.6%; 二次喷灌面积为79.1%; 三次喷灌面积为12.6%; 四次喷灌面积为3.7%。

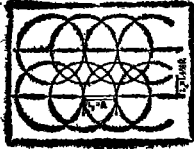


图3—2. 矩形布置

(3) 如图3—3, 喷头间距 $L_1 = R$ ; 两相邻管(渠)道间距 $L_2 = 1.63R$ 。在这种形式中, 一次喷灌面积为11.5%; 二次喷灌面积为84.8%; 三次喷灌面积占3.2%; 四次喷灌面积为0.5%。实践证明, 对蔬菜喷灌这是一种较好的布置形式。

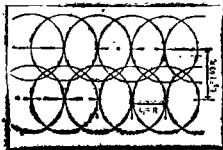


图3—3. 矩形布置

从以上五种布置方式可以看出, 在两相邻管(渠)道 $L_2 = (1.4-1.6)R$ 时, 喷灌比较均匀。这样也可以部分地平衡风力的影响。

采用扇形喷灌, 适宜的布置方式有二种。

### 1. 正方形布置

如图4, 喷头间距 $L_1 = R$ ; 相邻管(渠)道间的距离 $L_2 = 2R \cos 30^\circ = \sqrt{3}R = 1.732R$ 。

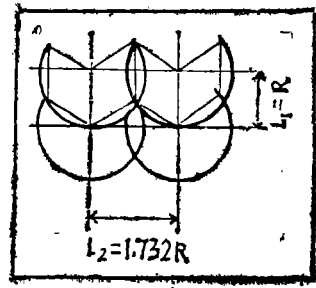


图4. 正方形布置

### 2. 三角形布置

如图5, 喷头间距 $L_1 = R$ ; 相邻管(渠)道间距 $L_2 = R(1 + \cos 30^\circ) = 1.865R$ 。

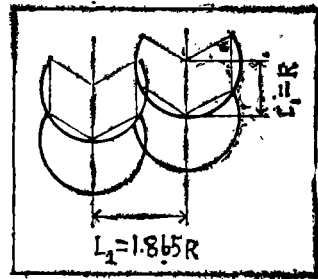


图5. 三角形布置

每根支管的长度多少, 一般的原则为此支管上第一个喷头与最后一个喷头的压力差在20%以内为宜。否则支管太长, 前后压力差太大, 影响喷灌质量; 支管短了, 又降低工作效率。

风对布置间距影响很大。风速在2米/秒以下时, 支管间距离缩短5—10%; 风速在2—4米/秒时, 支管间距离缩短20—25%; 当风速达4米/秒以上时, 支管间距则缩短到55—65%。

丁希泉整理