

喷灌施肥均匀性对冬小麦产量影响的田间试验评估³

李久生 饶敏杰

(中国农业科学院农业气象研究所)

摘 要: 喷灌均匀系数是喷灌系统设计的重要参数, 而喷灌洒水与施肥的均匀性对作物产量的影响是确定均匀系数设计值的重要依据。在喷灌施肥的试验中测定了冠层以上承雨筒内肥料溶液浓度和水量的分布, 在冬小麦收获时测定了植株的全氮量。结果指出, 肥料溶液浓度的均匀系数一般高于水量和肥料施入量的均匀系数。通过分析化肥施入量与灌水量的统计分布规律发现, 它们都可以用正态分布来表示。田间试验结果还表明, 对华北平原种植的冬小麦而言, 在试验的喷灌均匀系数变化范围内(62%~82%), 喷灌洒水及施肥的均匀性对产量的影响不明显, 现行规范规定的喷灌均匀系数设计值($CU=75\%$)是偏于安全的。

关键词: 喷灌; 施肥灌溉; 均匀系数; 冬小麦; 产量

喷灌洒水的均匀程度通常用克里斯琴森均匀系数 CU 来定量描述。喷灌均匀系数的选择在喷灌系统设计中的重要性主要体现在两个方面: 第一, 喷灌系统田间设备的投资与喷灌均匀系数密切相关, 提高设计均匀系数会增大系统投资; 第二, 降低喷灌均匀系数设计值可能会对作物产量和品质带来不利影响, 并有可能引起深层渗漏, 对浅层地下水的污染构成威胁(尤其当利用喷灌系统施肥时)。设计均匀系数的选取除了需要考虑喷头本身的水力性能以及环境因子(温度、湿度、风速、风向)外, 还必须考虑喷灌均匀系数对作物产量的影响。有关喷头水力性能对喷灌均匀系数的影响国内外已进行了大量而卓越的研究, 在喷灌均匀系数对作物产量的影响方面, 也进行了一些田间试验^[1,2]和数学模拟^[3-5]。

喷灌的一个重要特点是可以进行施肥灌溉(Fertigation), 但关于喷洒肥料溶液时喷灌洒水均匀性与肥料在田间分布均匀性之间的关系以及肥料喷施均匀性对作物产量的影响研究却很少。

本研究的目的是: (1) 就喷灌均匀系数对冬小麦产量的影响进行田间试验研究; (2) 初步分析喷灌施肥时化肥的分布与洒水分布之间的关系, 探讨喷灌

施肥均匀性对冬小麦产量的影响。

1 材料与方法

试验在中国农业科学院农业气象研究所气象试验站内进行。试验地块的土壤 0~40 cm 深度为砂质粘壤土, 40~60 cm 为壤质粘土。供试小麦为中麦 9 号, 属矮秆抗倒伏品种, 1999 年 10 月 5 日播种, 行距 25 cm, 播种量为 $12.75 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。试验按喷灌均匀系数不同设置 3 个处理(以下记为东处理、中处理和西处理), 各处理之间的灌水量、施肥量保持一致。喷头间距 $15 \text{ m} \times 15 \text{ m}$, 选用 LEGO 公司生产的喷头, 0.3 MPa 压力下的出水量为 $0.8 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 。灌水时, 首先将井水抽到位于试验地旁边的容积为 6 m^3 的储水箱内, 然后通过潜水电泵加压后进行喷灌。选取 4 只喷头包围区域中心 $12 \text{ m} \times 12 \text{ m}$ 的范围作为观测区, 以避免相邻处理之间的干扰。喷灌时, 4 只喷头以 90° 的扇形角同时向观测区喷水。将 $12 \text{ m} \times 12 \text{ m}$ 的观测区划分为 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的小区, 在每一小区中心放置开口面积为 100 cm^2 的圆柱形承雨筒, 用来测试冠层以下(地面)的喷灌水量分布。当小麦生长到对喷灌水量分布有影响(4 月 13 日以后的各次灌水)时, 在冠层以上按 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的网格布设承雨筒(承雨筒规格与冠层以下相同)。冠层以上的承雨筒放置在支架上, 支架的高度随作物的高度的升高而升高。通过选择不同的喷头工作压力获得需要的均匀系数。冬小麦生育期内各处理的灌水日期、灌水量及喷灌均匀系数列于表 1。

收稿日期: 200020821

3 国家自然科学基金(59779025)和国家重点基础研究(G1999043400)资助项目

李久生, 博士, 研究员, 北京市海淀区中关村南大街 12 号 中国农业科学院农业气象研究所, 100081

表 1 冬小麦生育期内的灌水日期、灌水量及喷灌均匀系数(冠层以上)

Tab 1 Summary of irrigation dates, amounts and Christiansen uniformity coefficients above the canopy during the growing season of winter wheat

东处理			中处理			西处理		
灌水日期6月2日	灌水量 \bar{a}_{mm}	CU $\delta\%$	灌水日期6月2日	灌水量 \bar{a}_{mm}	CU $\delta\%$	灌水日期6月2日	灌水量 \bar{a}_{mm}	CU $\delta\%$
03230	38.1	88	03230	35.8	76	03230	34.2	59
04213	31.7	71	04213	31.6	76	04213	44.0	65
04228	52.8	82	04228	47.1	74	04227	45.6	60
05211	48.5	88	05211	44.7	67	05212	46.0	69
05230	56.3	81	05230	45.1	70	05226	42.6	57
合计	227.4	82 ³	合计	204.3	72 ³	合计	212.4	62 ³

3 生育期内喷灌均匀系数平均值。

冬小麦 6 月 12 日收获,每一小区取 0.75 m²,测定其有效穗数、无效穗数、穗粒数、千粒重、籽粒总重等指标。冬小麦收获时,在每一小区还取 20 个茎(去除穗),采用过氧化钠—硫酸消化法对其全氮量进行了测定。

冬小麦生育期内的土壤水分用 TDR 和中子仪监测。在每一处理的对角线上埋设深度为 1.1 m 的中子管 3 根。0~30 cm 的土壤水分用 TDR 测试,30~100 cm 用中子仪按 10 cm 的等间隔测试。正常情况下每周测试一次土壤水分,灌水前和灌水后 24 h 各加测一次,降雨后也加测一次。

在 3 月 30 日和 4 月 13 日灌水时进行了喷灌施肥,3 月 30 日按 22.2 g \bar{a}_{m^2} 施入碳酸铵,4 月 13 日按 4.4 g \bar{a}_{m^2} 硫酸铵与 13.3 g \bar{a}_{m^2} 尿素混合施入。施肥程序按 104~102~104 的经验模式进行^[6],即首先喷洒设计灌水量的 104 的清水,接着喷洒设计灌水量的 102 的肥料溶液,最后喷洒 104 的清水以冲洗管道和附着在作物叶面上的肥液。喷灌施肥时,根据设计施肥量和灌水量,在储水箱内配置肥料溶液,

然后进行喷洒。灌水结束后,测定各承雨筒内化肥溶液的电导率和体积,然后利用事先率定出的肥料溶液浓度与电导率的关系,将溶液的电导率转化成浓度,再根据承雨筒代表的面积和实测的灌水深度,计算每一小区的化肥施入量。

2 结果及分析

2.1 喷灌施肥分布的均匀性

为了确定喷灌施肥时的化肥施入量与灌水量是否服从正态分布,对 3 月 30 日的测试数据进行了 Kolmogorov-Smirnov 检验。Kolmogorov-Smirnov 检验的判别指标为

$$D_n = \max \beta F_n(x) - F(x) \beta \quad (0 \leq x \leq x_{max}) \quad (1)$$

式中 D_n ——累计分布与经验分布差值的最大值;
 F_n ——正态累计分布;
 F ——观测值的经验分布;
 x_{max} ——观测值中的最大值。

表 2 列出了 Kolmogorov-Smirnov 的检验结果,在 $\alpha=0.05$ 的显著水平下,化肥重量和灌水量都可以用正态分布来表示。

表 2 2000 年 3 月 30 日喷灌施肥、灌水以及生育期累计灌水量、产量的 Kolmogorov-Smirnov 的检验结果

Tab 2 Summary of Kolmogorov-Smirnov tests for water and fertilizer applied on 30 March 2000, cumulative water depth during growing season and crop yield

	东处理				中处理				西处理			
	施肥	灌水	累计	产量	施肥	灌水	累计	产量	施肥	灌水	累计	产量
D_n	0.11	0.09	0.10	0.17	0.11	0.12	0.13	0.11	0.11	0.10	0.12	0.09

图 1 比较了 3 月 30 日喷灌施肥的灌水量、化肥溶液浓度、肥料施入量及冬小麦收获时植株全氮量的均匀系数。从图中可以看出: 1) 喷灌均匀系数较高时,化肥施入量的均匀系数也较高,例如当灌水均匀系数从 59% (西处理) 提高到 88% (东处理) 时,化肥施入量均匀系数从 68% 提高到 84%; 2) 尽管各处理

喷灌均匀系数之间差别很大(东处理 88%, 中处理 76%, 西处理 59%), 但化肥溶液浓度在处理内均匀性较好,且各处理之间差别不大(东处理 83%, 中处理 90%, 西处理 83%), 也就是说喷灌均匀系数对化肥溶液浓度均匀性的影响不大; 3) 对均匀系数高的东处理来说,化肥施入量的均匀系数与喷灌均匀系

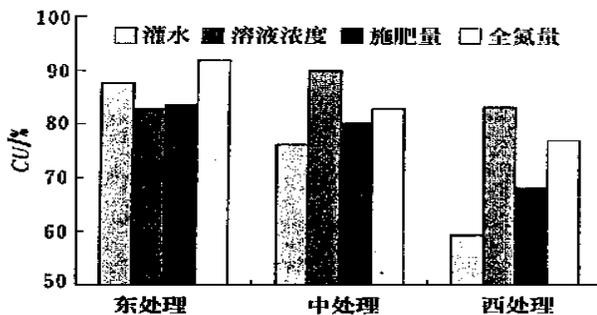


图1 喷灌均匀系数、肥料溶液浓度均匀系数、肥料施入量均匀系数与植株全氮量均匀系数的比较

Fig 1 Comparison of Christiansen uniformity coefficients for water application, fertilizer solution concentration,

fertilizer applied and total nitrogen of plant stem 数差别较小,但低灌水均匀系数处理(中、西处理)的化肥施入量均匀系数明显大于灌水均匀系数;4)植株全氮含量的均匀系数大于化肥施入量均匀系数和灌水均匀系数。这意味着,作物对氮素的吸收均匀性的改善可能在一定程度上减轻施肥不均匀对作物产量的影响。

为了分析植株对氮素吸收与施肥量的关系,图2绘出了西处理的植株全氮量与3月30日施肥量的关系。植株全氮含量随施肥量的增加呈增大趋势,但它们之间的相关关系不是非常密切,由此可以看出,作物对氮素的吸收除了与施肥的均匀性有关外,还与土壤初始含氮量及土壤水分的空间分布等因素有关。

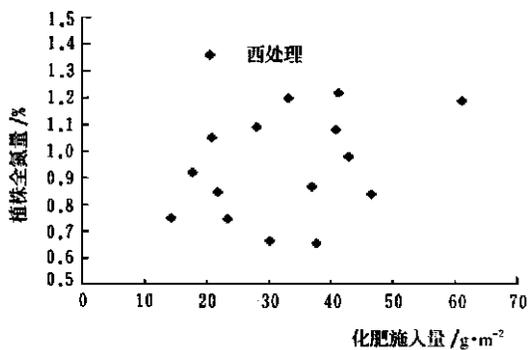


图2 冬小麦收获时的植株全氮量与3月30日化肥施入量之间的关系

Fig 2 Total nitrogen of winter wheat stem at harvest as a function of fertilizer applied on 30M arch 2000 for the low CU plot

2.2 喷灌及施肥均匀性对产量的影响

冬小麦生育期内累计灌水量和产量的Kolmogorov-Smirnov的检验结果也列于表2,类似

地,在A= 0.05的显著水平下,它们都可以用正态分布来表示。图3给出了3个处理累计灌水量和产量的累计频率曲线及其与正态分布的拟合情况。图中的横坐标的标准化值是指实测值与均值之比。通过比较产量和累计灌水量的累计频率曲线可以看出,对给定的处理而言,产量的变化范围比累计灌水量的变化范围要小,尤其对低喷灌均匀系数处理(西处理)更是如此。为了更清楚地了解喷灌均匀系数对产量分布均匀程度的影响,表3总结了不同均匀系数处理时产量诸要素(有效穗数、穗粒数、千粒重、产量)和累计灌水量的均值和平均均匀系数(平均喷灌均匀系数是指各次灌水喷灌均匀系数的算术平均值CU平均)。分析表中数据可以发现,尽管不同处理的累计灌水量之间有较大差别,但所有产量要素的均匀系数之间差别不大,并且其均匀系数都在91%以上,也就是说,喷灌均匀系数对产量构成要素分布的均匀性影响不明显。

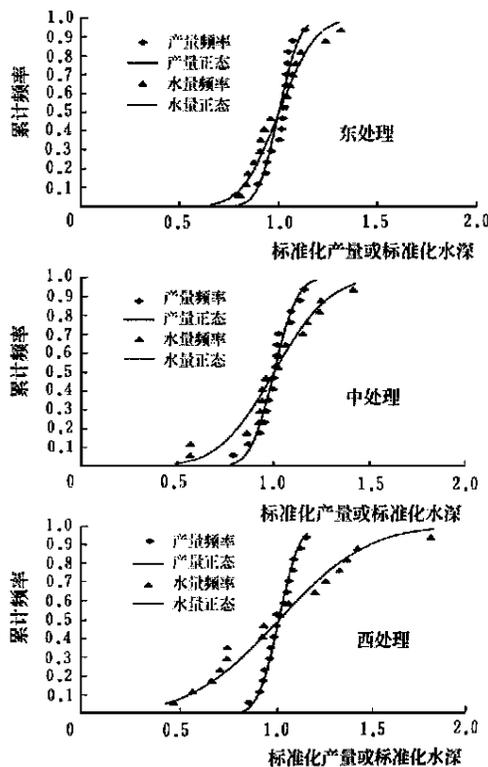


图3 冬小麦生育期冠层以上累计灌水量与产量的累计频率曲线及其与正态分布的拟合情况

Fig 3 Cumulative frequency curves and normal distribution functions for seasonal water application depth above the canopy and winter wheat yield for the three experimental plots

表 3 累计灌水量及产量构成要素的均值及均匀系数

Tab 3 Summary of mean and Christiansen uniformity coefficient for cumulative water depth and components of yield

处理	累计灌水量 $\bar{\Delta}_{nm}$		有效穗数 $\bar{\delta}_{穗} \cdot m^{-2}$		穗粒数		千粒重 $\bar{\delta}_g$		产量 $\bar{\delta}_t \cdot hm^{-2}$	
	均值	CU %	均值	CU %	均值	CU %	均值	CU %	均值	CU %
东处理	227.4	82	350.5	91	49.6	95	48.2	96	6.98	94
中处理	204.3	72	324.1	94	48.8	93	48.1	97	6.43	93
西处理	212.4	62	371.7	92	50.5	94	46.1	95	7.02	94

图 4 绘出了由 1999 年^[8]和 2000 年田间试验得出的产量与平均喷灌均匀系数的关系。该图清楚地显示出喷灌均匀系数对产量的影响不明显。

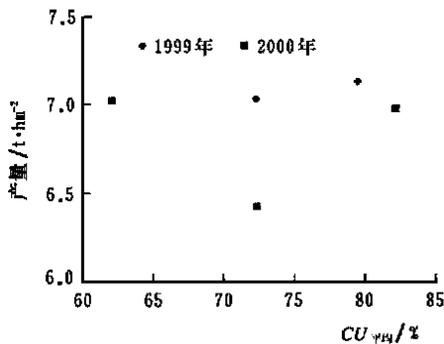


图 4 冬小麦产量与冠层以上平均喷灌均匀系数的关系

Fig 4 The yield of winter wheat as a function of seasonal average Christiansen uniformity coefficient above the canopy

为了分析喷灌施肥均匀性对产量的影响, 图 5 绘出了低均匀系数处理(西处理)的各小区产量与 3 月 30 日各小区施入化肥量的关系。由图可清楚地看出, 产量对喷灌施肥的均匀程度同样也不敏感。

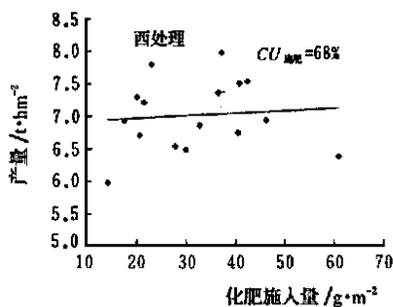


图 5 冬小麦产量与 3 月 30 日喷灌施肥量之间的关系

Fig 5 The yield of winter wheat as a function of fertilizer applied on 30 March 2000 for the low uniformity plot

喷灌均匀系数对产量影响不明显的原因可以归结为: 1) 作物冠层的截留使喷灌水量分布的均匀性得到一定程度改善^[7]; 2) 灌水季节内累计灌水量均匀系数大于各次灌水的均匀系数平均值, 这也在一定程度上减轻了由于各次灌水量分布不均匀对作物

生长带来的影响^[7]; 3) 灌溉水和肥料在土壤中的再分布, 使得它们在土壤中分布的均匀程度得到改善^[8], 再加上灌水过程中一部分水会沿作物茎直接渗入根区满足作物的需水要求; 另外, 作物根系的水平伸展, 使得作物都可以均匀地获得所需要的水量; (4) 生育期内的天然降水给灌水量小的区域的作物吸水提供了补充。上述所有因素都在一定程度上减轻了喷灌不均匀性对产量的影响。

3 结论与讨论

作物从播种到形成经济产量是一个十分复杂的过程, 影响产量的因素除了本文讨论的灌水均匀性与灌水量、施肥均匀性与施肥量外, 还有土壤特性的空间变异、田间管理措施、病虫害的防治技术等, 包含上述所有因素的田间试验或数学模拟将是一个庞大的系统工程。有关喷灌施肥的适宜肥料种类、肥液浓度等也需要进一步研究。本研究得出下述主要结论。

1) 喷灌施肥时, 化肥施入量的均匀性随喷灌均匀系数的提高而提高, 而喷灌均匀系数对化肥溶液浓度均匀性的影响不明显; 化肥施入量的均匀系数一般大于喷灌均匀系数。

2) 对华北平原种植的冬小麦而言, 在试验的平均喷灌均匀系数变化范围(62% ~ 82%)内, 产量及植株全氮含量的均匀性明显优于喷灌水量和化肥施入量的均匀性, 喷灌均匀系数对作物产量及其要素均值和分布均匀程度的影响不明显, 并且产量对喷灌施肥的不均匀性也不敏感。因此,《喷灌工程技术规范》^[9]规定的均匀系数设计值(CU = 75%)是偏于安全的, 在某些情况下可以考虑适当减小, 以降低喷灌系统的投资和运行费用。

[参 考 文 献]

[1] Stern J and E Bresler. Nonuniform sprinkler irrigation and crop yield. Irrigation Science, 1983, 4: 17~ 29
 [2] Mateos L, E C Mantovani and F J Villalobos. Cotton response to nonuniformity of conventional sprinkler irrigation. Irrigation Science, 1997, 17: 47~ 52
 [3] Warrick A W and W R Gardner. Crop yield as affected by spatial variations of soil and irrigation. Water Resource Research, 1983, 19: 181~ 186
 [4] Mantovani E C, F J Villalobos, F Orgaz, et al. Modeling the effects of sprinkler irrigation uniformity on crop yield. Agricultural Water

- Management, 1995, 24: 243~ 257
- [5] Li J. Modeling crop yield as affected by uniformity of sprinkler irrigation system. Agricultural Water Management, 1998, 38(2): 135~ 146
- [6] Burt C, K O'Connor and T Ruehr. Fertigation Irrigation Training and Research Center, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, California, U SA, 1998 15
- [7] 李久生, 饶敏杰. 冬小麦冠层对喷灌水量分布的影响. 灌溉排水, 1999, 18(增): 106~ 111
- [8] 李久生, 饶敏杰. 喷灌均匀系数对土壤水分及冬小麦产量影响的试验研究. 水利学报, 2000 (1): 9~ 14
- [9] 中华人民共和国国家标准. 喷灌工程技术规范, GBJ85285. 北京: 计划出版社, 1985

Field Evaluation of Yield Response of Winter Wheat to Uniformity of Sprinkler Applied Fertilizer

Li Jiusheng Rao Minjie

(Agriculture Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: The influence of uniformity of sprinkler water and fertigation on crop yield is fundamentally important for determining the target uniformity. Field experiments were therefore conducted to evaluate the influence on winter wheat yield of the uniformity of sprinkler applied water and fertilizer. Christiansen uniformity coefficient (CU) was used in this article. Three experimental plots, designed as low uniformity, medium uniformity and high uniformity, were used in the field experiments. Catch cans were placed above and below canopy in a 3 m × 3 m grid for each plot. The amounts of water and the concentrations of fertilizer solution caught in the cans were measured after fertilizer was applied. Total nitrogen of plant stem for each grid was also tested when winter wheat was harvested. The experimental results showed that the uniformity of fertigation increased with sprinkler water uniformity. Christiansen uniformity coefficients for fertilizer concentration caught in the cans is usually higher than CUs of water application. The distributions of both fertilizer and water applied through sprinkler system can be represented by an approximate similar normal distribution function. Field experiments also demonstrated that the uniformity of sprinkler applied water and fertilizer has insignificant effect on the yield of winter wheat grown in north China plains for the studied CU range of 62% ~ 82%.

Key words: sprinkler irrigation; fertigation; uniformity coefficient; winter wheat; yield