

滴灌均匀系数和施氮量对白菜生长及产量和品质的影响

李久生^{1,2}, 尹剑锋³, 张航^{1,2}, 栗岩峰^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院水利科学研究所; 2. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心;
3. 中国农业大学水利与土木工程学院)

摘要: 为了完善滴灌均匀系数设计与评价标准, 在日光温室内研究了滴灌均匀系数和施氮量对白菜生长、氮素吸收、相对叶绿素含量 (SPAD)、产量和品质的影响。试验中均匀系数设置 0.62、0.80 和 0.96 3 个水平, 施氮量设置 150 和 300 kg/hm² 2 个水平。土壤多参数传感器 Hydra Probe 的监测结果表明, 白菜生育期内不同处理的土壤含水率和温度变化动态基本一致, 而不同处理间的土壤电导率的差异主要是由其初始值不同引起的。当滴灌均匀系数不大于 80% 时, 白菜株高、干物质质量、吸氮量和产量的均匀系数大于灌水和施肥的均匀系数, 且滴灌均匀系数对株高、干物质质量、相对叶绿素含量 (SPAD)、吸氮量、产量及 Vc 含量、总糖、硝酸盐、纤维素等品质指标均值和均匀系数的影响均不显著 ($\alpha=0.05$)。因此采用过高的均匀系数, 对提高产量和改善品质的作用不明显, 采用现行滴灌均匀系数的设计和评价标准 (均匀系数 $C_u \geq 0.80$) 不会对白菜的生长、养分吸收和产量造成不利影响, 可考虑适当降低。

关键词: 灌溉, 土壤, 水分, 均匀系数, 白菜, 产量, 品质

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.01.006

中图分类号:

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-01-0036-08

李久生, 尹剑锋, 张航, 等. 滴灌均匀系数和施氮量对白菜生长及产量和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 36-43.

Li Jiusheng, Yin Jianfeng, Zhang Hang, et al. Effects of drip fertigation uniformity and nitrogen application level on growth, yield and quality of Chinese cabbage[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 36-43. (in Chinese with English abstract)

0 引言

滴灌均匀系数设计与评价标准的制定应从水力学设计、经济和环境等多方面来考虑。从 20 世纪 70 年代初期开始, 众多学者对如何通过水力学设计满足或改善系统均匀性开展了大量研究工作, 提出了许多可用于不同坡度条件下支管和毛管的设计方法^[1-3]。随着计算机的普及, 80 年代中后期又提出了一些新的设计方法, 如进步法、退步法等^[4-5], 这些方法可以根据要求的灌水均匀度设计出毛管的有关参数。Bralts 和 Segerlind 将有限单元法引入滴灌单元水力学计算^[6], 随后我国学者康跃虎对有限单元法进行了卓有成效的改进, 使之能够准确设计出满足平均灌水器流量和灌水均匀度的灌水单元^[7]。近年来牛文全等^[8]、张林等^[9]对流量偏差率的计算方法进行了深入探讨, 还有学者从管道变径^[10]、多口出流管道水力损失计算方法^[11]和精确估算毛管局部水头损失^[12]等方面改进滴灌系统设计方法, 以便在投资和运行费用最低的情况下满足均匀性的要求^[13-14]。在经济方面需要考虑的一个很重要因素是均匀系数对作物产量和品质的影响, 前人多采用模拟方法研究产量对均匀系数的响应^[15-17], 而对模型进行验证的试验数据极其缺乏^[18-19], 同时由于在

模型中未考虑水分在土壤中的再分布及土壤特性的空间变异, 忽略了施肥不均匀对产量的影响, 致使模拟得出的均匀系数对产量影响的程度远大于试验结果, 也未见到均匀系数对品质影响方面的研究。在均匀系数对环境的影响方面, 水氮淋失与均匀系数的关系备受关注^[16], 李久生等讨论了均匀系数对土壤水氮动态与分布的影响^[20], 本文旨在分析作物生长及产量与品质对均匀系数的响应特征, 为滴灌均匀系数设计与评价标准的完善提供依据, 同时为产量与均匀系数模拟模型的改进提供试验数据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在国家节水灌溉工程技术研究中心大兴试验基地的日光温室内进行。该基地位于北京市大兴区魏善庄镇, 北纬 39°39', 东经 116°15', 属暖温带半湿润大陆季风气候, 多年平均温度 11.6℃, 多年平均降水量 556.4 mm。日光温室内的土壤为砂质壤土 (国际制)^[21], 质地随深度没有明显变化 (表 1)。

1.2 试验设计

供试作物为大白菜 (*Brassica pekinensis*) “北京新三号”, 2009 年 8 月 12 日播种, 9 月 8 日定植, 株、行距分别为 60 和 40 cm, 11 月 15 日收获, 生育期 93 d。在白菜种植前对所有试验小区进行了均匀的大定额灌水, 以便使土壤具有较一致的初始水分和养分条件。

收稿日期: 2010-07-09

修订日期: 2010-12-03

基金项目: 国家自然科学基金 (50979115); 国家自然科学基金创新研究群体基金 (50721006)

作者简介: 李久生 (1962-), 男, 河北邢台人, 研究员, 博士生导师, 主要从事节水灌溉技术与理论方面的研究工作。北京市海淀区车公庄西路 20 号 中国水利水电科学研究院水利研究所, 100048。Email: lij@swhr.com

表 1 供试土壤物理特性
Table 1 Physical properties for the experimental soil

深度/ cm	不同粒径颗粒所占百分数/%			干体质量/ (g·cm ⁻³)	饱和含水率/ (cm ³ ·cm ⁻³)	田间持水率/ (cm ³ ·cm ⁻³)
	2.0~0.02 mm	<0.02~0.002 mm	<0.002 mm			
0~20	70.43	29.52	0.05	1.33	0.47	0.33
>20~90	66.53	33.37	0.10	1.45		

试验考虑滴灌均匀性和施肥量 2 个因素。滴灌均匀性用克里斯琴森均匀系数 Cu 表示^[22]：

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

式中， q_i 为第 i 个灌水器的流量，L/h； \bar{q} 为灌水器的平均流量，L/h； n 为所测灌水器个数。

试验中 Cu 设置高、中、低 3 个水平（简记为 C_1 、 C_2 和 C_3 ），施氮量设置 150 和 300 kg/hm² 2 个水平（简记为 N_1 和 N_2 ），高水平施氮量与北京郊区现行地面灌溉白菜施氮量相近^[23-24]。采用完全组合试验设计，共 6 个处理，每个处理设置 3 个重复，共 18 个试验小区。小区尺寸为 7 m × 2.4 m，在温室内随机排列，2 个小区间留 0.3 m 的缓冲区，以防止小区间的横向水分交换并方便试验观测。

试验要求的均匀系数采用 5 种不同标称流量（1.05、1.4、1.65、2.3 和 2.6 L/h）的灌水器组合而成，每种灌水器的个数按灌水单元内灌水器流量服从正态分布的原则^[25]，利用 Monte-Carlo 方法确定^[26]。毛管铺设前对组合毛管的均匀系数进行了实测，结果表明，与高、中、低 3 个滴灌均匀系数设计水平对应的实测值分别为 0.62、0.80 和 0.96，对应的灌水器平均流量分别为 1.76、1.69 和 1.67 L/h。在每个小区内，每条毛管控制两行白菜，毛管按图 1 所示方式铺设，长度约 22.6 m。沿毛管的灌水器间距为 40 cm。每个小区首部都装有闸阀和水表，用于控制灌水和计量灌水量。

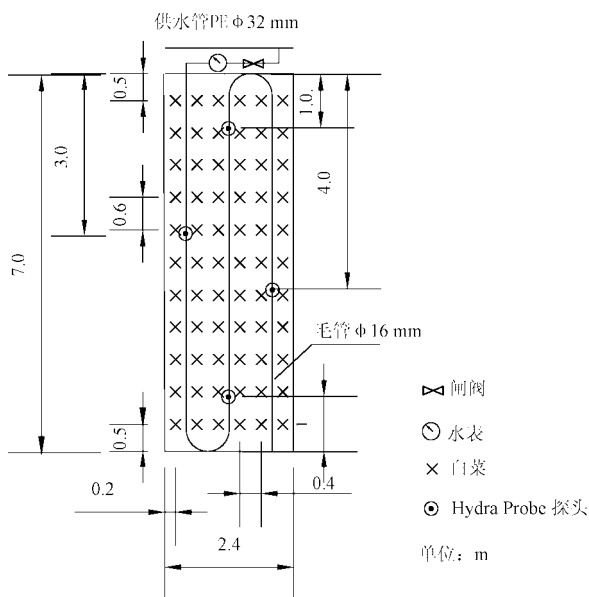


图 1 滴灌毛管和 Hydra Probe 探头在试验小区内布置
Fig.1 Schematic of the dripline lateral installation and Hydra Probe sensors

在每个处理的一个小区内按照沿毛管均匀分布的原则安装 Hydra Probe 土壤多参数传感器（美国 Stevenswater 公司）（图 1），监测土壤含水率、温度和电导率（ EC_b ）在 15~25 cm 深度的时空变化（探头长度 10 cm，垂直安装），取样间隔 30 min。鉴于土壤硝态氮含量与电导率具有较好的相关性^[27]，本研究用传感器测得的土壤电导率值间接反映无机氮含量的变化。

1.3 灌水与施肥

当小区内 Hydra Probe 探头测出的体积含水率均值为田间持水率的 60%~70%，即含水率为 0.2~0.23 cm³/cm³ 时进行灌水，根据情况灌至田间持水率或田间持水率的 90% 左右，由于白菜的行距仅为 40 cm，所以湿润比近似取为 1。计划湿润层深度在苗期取为 20 cm，莲座期以后取为 40 cm。各处理的灌水量相同，通过安装在各小区首部的水表控制。灌水日期与累积灌水量见图 2，生育期内共灌水 8 次，灌溉定额 158.9 mm。

设计施氮量的 20% 在白菜播种前作为基肥施入，选用复合肥（N：P₂O₅：K₂O=15%：15%：15%）。定苗后开始通过滴灌系统施氮，10 d 左右一次，共施 6 次，即莲座期和结球期各 1 次，分别占施用总量的 20%，其他 4 次均为总量的 10%，具体时间和施氮量见图 2。施肥时将尿素溶于肥料桶中，用比例式施肥泵（Mix Rite Model 2504，以色列 Tefen）施入试验小区。

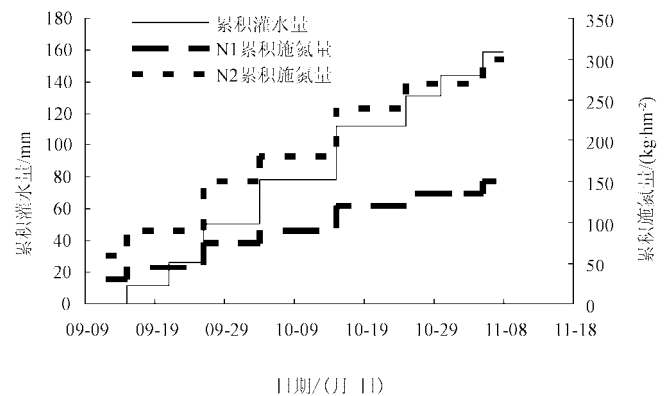


图 2 白菜生育期内累积灌水量和累计施氮量
Fig.2 Cumulative amounts of irrigation and nitrogen applied during the growing season of Chinese cabbage

1.4 白菜生长指标和品质监测

从莲座期开始，每 10 d 测量 1 次株高，进入结球期后每 10 d 测 1 次球高和球直径，由球高除以球直径得到球形指数。测试取样点的位置与 Hydra Probe 探头埋设的位置相同（没有探头的小区也按探头对应的位置布置取样点），每个测试点随机标记两株，以后均测试该 2 株

白菜。

鉴于白菜叶片的相对叶绿素含量 (SPAD 值) 与氮素吸收有很好的相关性^[28], 从 9 月 16 日开始, 每周测量 1 次 SPAD 值 (便携式叶绿素仪 SPAD-502, 精度 ± 1.0 SPAD 单位, KONICA MINOLTA, 日本)。

10 月 3 日 (莲座期)、10 月 18 日 (结球期) 和 11 月 15 日 (收获时) 各取样 1 次, 取样点与株高相同, 每个点取一棵, 称鲜质量, 然后取白菜的 1/4 在温度 65°C 左右烘干至恒质量, 称量植株干物质质量, 并对干物质样品研磨后, 用凯氏定氮仪 (Kjeltec2300, FOSS, 丹麦) 测试植株全氮含量, 计算植株吸氮量 (植株全氮含量乘以地上部分的干物质质量)。

白菜收获时, 每个小区沿滴灌带每隔 2 m 取一个点 (共 10 个点), 每点取 2 棵进行测产。白菜的品质取样点与株高相同, 每点一棵, 委托中国农业科学院蔬菜花卉研究所测试白菜的维生素 C (Vc)、总糖、硝酸盐和纤维素等品质指标。

白菜生长和品质指标在试验小区内分布的均匀程度也用克里斯琴森均匀系数 C_u 表示。

2 结果与分析

2.1 土壤含水率及电导率与温度在生育期内的变化

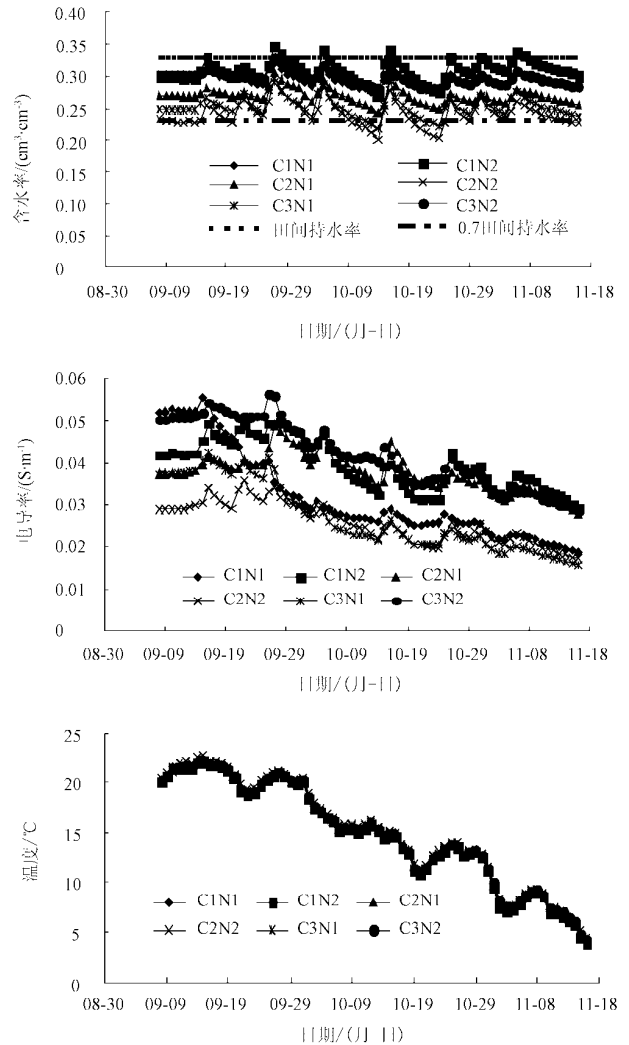
图 3 给出了不同处理土壤含水率、电导率和温度在白菜生育期内 Hydra Probe 探头的监测结果。在整个生育期内, 除个别处理的个别时段外, 土壤含水率都在 70%~100% 的田间持水率, 土壤水分适宜白菜生长^[29]。灌水后土壤含水率上升, 而后随着作物耗水和土壤蒸发逐渐减少。各处理之间的差异主要是由于初始土壤含水率不同造成的, 土壤初始含水率较高时, 生育期内土壤水分也较高。例如土壤初始含水率较高的 C1N2 处理 ($0.3\text{ cm}^3/\text{cm}^3$), 生育期平均土壤含水率为 $0.31\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 而初始含水率较低的 C2N1 处理 ($0.27\text{ cm}^3/\text{cm}^3$), 生育期平均土壤含水率仅为 $0.27\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

尽管各处理的土壤电导率在每次灌水施肥后都表现出一定程度的增加, 但总体上随作物生长呈现出降低的趋势, 说明施入土壤的肥料在被作物持续吸收利用。与土壤含水率类似, 不同处理之间电导率的差别主要是由于初始电导率差异引起的, 初始土壤电导率较高时, 生育期内土壤电导率也维持在较高水平。

白菜生育期内土壤温度呈现出波动性减低, 变化范围为 $22\sim 3.7^{\circ}\text{C}$, 各处理间几乎没有差异。

2.2 滴灌均匀系数对作物生长的影响

图 4 给出了白菜株高的均值和均匀系数在生育期内的变化。生育期内各处理株高的变化趋势一致, 均匀系数在 0.92~0.98。白菜的球形指数各处理之间差异不大, 均匀系数也都在 0.90 以上 (图 5)。方差分析结果表明除了施氮量对 11 月 8 日白菜株高均匀系数影响显著外 (显著性水平 $\alpha=0.05$, 以下同), 其他情况下滴灌均匀系数和施氮量对株高的均值和均匀系数的影响均不显著。



注: C1、C2、C3 均匀系数分别为 0.62、0.80、0.96; N1、N2 施氮量分别为 150、300 kg/mm^2

图 3 土壤含水率、电导率和温度在白菜生育期内的变化 (Hydra Probe 监测结果)

Fig.3 Dynamic variations of soil water content, bulk electrical conductivity and temperature measured by Hydra Probe sensors during the growing season of Chinese cabbage

2.3 滴灌均匀系数对干物质积累和吸氮量的影响

表 2 给出了地上部分干物质质量在生育期内的均值和均匀系数。不同处理之间的差异多是由随机因素引起的, 因为方差分析结果表明滴灌均匀系数和施氮量对地上部分干物质质量均值和均匀系数的影响均不显著。

图 6 给出了叶绿素仪测得的相对叶绿素含量 SPAD 的均值和均匀系数在生育期内的变化。所有处理的 SPAD 均值从 9 月 17 日的 36.3 增大到 10 月 30 日 51.3, 而后又稍有下降。不同处理的 SPAD 值非常接近, 在试验小区内也非常均匀 ($C_u>95\%$), 均匀系数和施氮量的影响均不显著。

植株吸氮量随白菜生长而增加, 尽管施氮量对植株吸氮量均值和均匀系数的影响未达到统计学意义上的显著水平, 但高施氮量处理 (N2) 的吸氮量一般高于低施氮量处理 (N1), 例如 C1N2 处理 3 次取样测得的吸氮量均值比 C1N1 高 10% (表 3)。滴灌均匀系数对吸氮量均值和均匀系数的影响也不显著, 但较高滴灌均匀系数

处理的吸氮量均匀系数较高, C1、C2、C3 处理的吸氮量 均匀系数均值分别为 0.76、0.80 和 0.82 (表 3)。

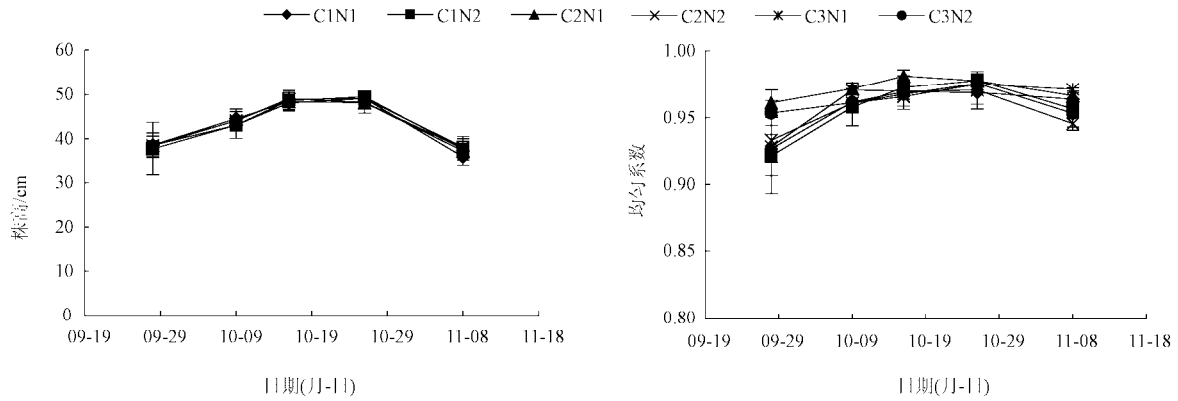


图 4 白菜株高的均值和均匀系数在生育期内的变化

Fig.4 Variations of the mean and uniformity coefficient for plant height during the growing season of Chinese cabbage

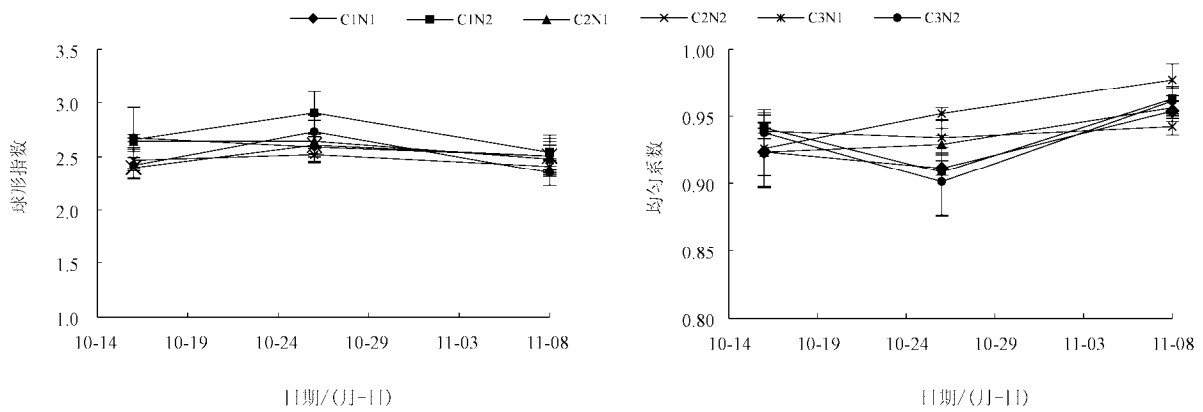


图 5 白菜球形指数的均值和均匀系数在生育期内的变化

Fig.5 Variations of the mean and uniformity coefficient for head height to diameter ratio during the growing season of Chinese cabbage

表 2 白菜干物质质量的均值和均匀系数 C_u

Table 2 Mean and uniformity coefficient C_u for dry matter above ground of Chinese cabbage

特征值	日期/ 月-日	处理					
		C1N1	C1N2	C2N1	C2N2	C3N1	C3N2
均值/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	10-03	1231.81	1512.92	1899.72	1325.14	1326.81	1401.94
	10-18	3427.64	3428.19	3508.06	3637.64	3058.75	3347.78
	11-15	5158.16	5611.99	4514.21	5005.31	6017.02	4627.32
C_u	10-03	0.71	0.73	0.74	0.74	0.83	0.80
	10-18	0.77	0.81	0.89	0.82	0.79	0.80
	11-15	0.85	0.66	0.84	0.81	0.83	0.90
C_u 均值		0.78	0.73	0.82	0.79	0.82	0.83

注: C1、C2、C3 表示 3 个均匀系数水平, 分别为 0.62、0.80 和 0.96; N1 和 N2 表示 2 个施氮量水平, 分别为 150 和 300 kg/hm^2 , 下同。

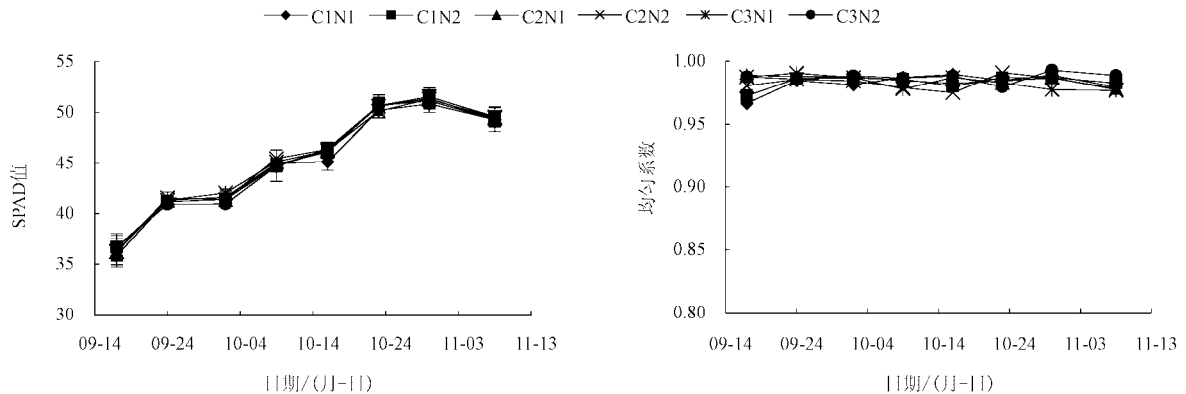


图 6 相对叶绿素含量 SPAD 的均值和均匀系数在生育期内的变化

Fig. 6 Variations of mean and uniformity coefficient for chlorophyll meter readings (SPAD) during the growing season of Chinese cabbage

表3 白菜植株吸氮量的均值和均匀系数 C_u
Table 3 Mean and uniformity coefficient C_u for nitrogen uptake of Chinese cabbage

特征值	日期 (月-日)	处理					
		C1N1	C1N2	C2N1	C2N2	C3N1	C3N2
均值/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	10-03	50.83	63.18	76.95	55.02	54.23	58.37
	10-18	137.58	142.89	140.23	150.25	122.68	132.10
	11-15	193.64	197.74	164.45	184.50	220.91	178.68
C_u	10-03	0.70	0.75	0.75	0.76	0.81	0.80
	10-18	0.76	0.80	0.86	0.83	0.79	0.81
	11-15	0.82	0.70	0.84	0.78	0.80	0.91
	C_u 均值	0.76	0.75	0.82	0.79	0.80	0.84

2.4 滴灌均匀系数对白菜产量和品质的影响

白菜产量为 $124.2 \sim 135.6 \text{ t/hm}^2$ ，最高与最低产量之间相差 8%；高均匀系数处理(C3)的产量均匀系数(0.89)略高于低均匀系数处理(C1和C2)(0.87)，但其差别明显小于滴灌均匀系数之间的差别(表4)。方差分析结果指出，滴灌均匀系数和施氮量及其交互作用对产量均值和均匀系数的影响均不显著。

为了更直观地分析滴灌均匀系数对产量的影响，图7

比较了产量(3个重复的均值)和灌水器流量沿毛管的变化。从图中可以看出，虽然C1和C2处理下灌水器流量沿毛管起伏很大，灌水器流量最大值与最小值之比分别达到3.14和2.60，但产量沿毛管的变化与高均匀系数C3处理没有明显差别，最高产量与最低产量之比为1.22~1.43(表4)，远小于灌水器流量的波动，这再次说明滴灌均匀系数对产量均匀性的影响不明显。从表4还可以看出C1和C2处理的产量均匀系数大于滴灌均匀系数，

表4 白菜产量与灌水器流量均值和均匀系数的对比

Table 4 Comparison of the mean and uniformity coefficient between Chinese cabbage yield and emitter discharge rates

特征值		处理					
		C1N1	C1N2	C2N1	C2N2	C3N1	C3N2
产量	均值($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	129.8	128.4	128.2	135.6	132.2	124.2
	最大值/最小值	1.22	1.36	1.43	1.36	1.29	1.32
	C_u	0.87	0.87	0.87	0.87	0.90	0.89
灌水器流量	均值($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)	1.76	1.76	1.69	1.69	1.67	1.67
	最大值/最小值	3.14	3.14	2.60	2.60	1.17	1.17
	滴灌 C_u	0.62	0.62	0.80	0.80	0.96	0.96

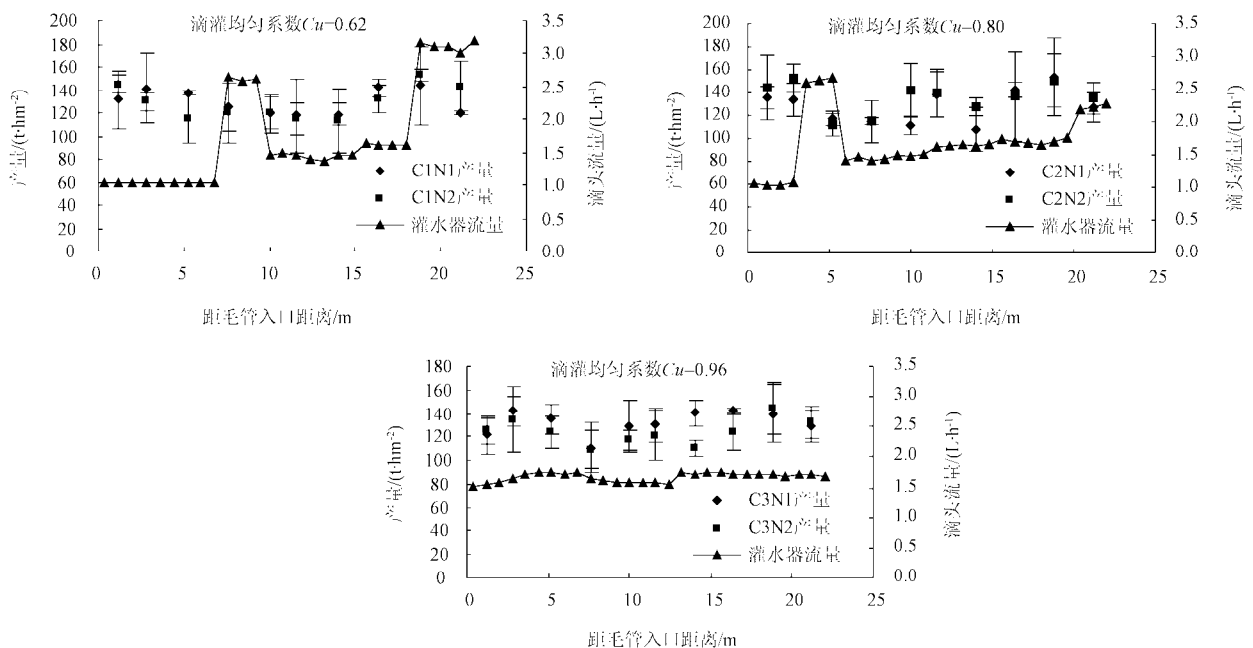


图7 白菜产量和灌水器流量沿毛管变化情况比较

Fig.7 Variations of Chinese cabbage yield and emitter discharge along a dripline

这可能意味着灌水和施肥的不均匀性通过水分和氮素在土壤中的再分布以及根系交错与吸收得到一定程度改善，从而使作物最终产量的均匀程度高于灌水和施肥的均匀程度。由于高均匀系数 C3 处理的灌水和施肥接近完全均匀 ($C_u = 0.96$)，因此可以认为其产量的不均匀性主要是由于土壤特性和初始养分含量的不均匀引起的，试验田块的土壤初始硝态氮和铵态氮含量的均匀系数仅

分别为 0.45~0.59 和 0.34~0.62^[20]。

白菜收获时的维生素 C 含量、糖分、硝酸盐以及纤维素 4 个品质指标如表 5 所示。各处理的品质指标差异不明显，均匀系数为 0.83~0.99，对各品质指标的方差分析结果表明，滴灌均匀系数和施氮量以及两者的交互作用对白菜的各品质的影响均没有达到显著水平。

表 5 白菜品质指标的均值和均匀系数 C_u
Table 5 Mean and uniformity coefficient C_u for quality indexes of Chinese cabbage

特征值	品质指标	处理					
		C1N1	C1N2	C2N1	C2N2	C3N1	C3N2
均值	Vc/[mg·(100g) ⁻¹]	21.53	21.97	21.73	20.40	20.57	22.10
	总糖/%	2.41	2.32	2.45	2.41	2.30	2.35
	硝酸盐/(mg·kg)	1030.00	1143.67	924.67	1077.33	1044.67	1013.00
	粗纤维 (%)	11.07	10.06	11.57	10.78	10.57	11.07
C_u	Vc	0.96	0.97	0.96	0.98	0.95	0.96
	总糖	0.99	0.88	0.97	0.94	0.95	0.92
	硝酸盐	0.98	0.89	0.83	0.86	0.95	0.93
	粗纤维	0.98	0.95	0.89	0.94	0.97	0.97
	C_u 均值	0.98	0.92	0.91	0.93	0.96	0.95

3 结论与讨论

利用日光温室内的田间试验，研究了滴灌均匀系数在较大范围内 ($C_u=0.62\sim 0.96$) 变化时，白菜生长、干物质积累、氮素吸收、产量和品质对均匀系数和施氮量的响应特征，主要结论如下：

1) 滴灌均匀系数对白菜株高、干物质质量、相对叶绿素含量 (SPAD)、氮素吸收量、产量及 Vc 含量、总糖、硝酸盐、纤维素等品质指标均值和均匀系数的影响均不显著。

2) 滴灌均匀系数较低时，产量、干物质质量和吸氮量的均匀系数大于灌水和施肥的均匀系数 ($C_u=0.62$ 和 0.80)，这说明水分和氮素在土壤中的再分布以及作物根系的交错在一定程度上弥补了灌水和施肥不均匀对作物生长造成的不利影响。

3) 即使滴灌系统的灌水器流量接近完全均匀时 ($C_u=0.96$)，由于土壤特性和养分含量固有的空间变异，作物产量和品质指标在灌水单元内仍会表现出一定的不均匀性，因此滴灌系统设计和管理中采用过高的均匀系数，既对提高产量和改善品质作用不明显，又会造成经济上不合理。采用我国现行滴灌均匀系数的设计和评价标准 ($C_u\geq 0.80$) 不会对白菜的生长、养分吸收和产量造成不利影响，并可考虑适当降低。

白菜是一种根系浅、分布范围小且对水肥响应比较敏感的作物，将本文结论应用于根系较深、交错范围广的作物时一般应该是偏于安全的，因为这类作物能在更大程度上缓解灌水和施肥不均匀对作物生长带来的不利影响。同时应该指出，本研究仅在华北平原温室内进行了一季试验，未包含降雨的影响，有降雨时，均匀的降

雨可以在一定程度上缓解灌水和施肥不均匀对作物生长带来的不利影响，但同时集中强降雨可能加剧在土壤中分布不均的氮素淋失，因此需要在不同降水条件下开展更多的试验，以便为滴灌均匀系数设计与评价标准的完善提供更充分的依据。

[参 考 文 献]

- [1] Myers L E, Bucks D A. Uniform irrigation with low-pressure trickle systems[J]. Journal of Irrigation and Drainage Division, Proc. of the ASCE, 1972, 98(IR3): 341—346.
- [2] Wu I P, Gitlin H M. Hydraulics and uniformity for drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Division, Proc. of the ASCE, 1973, 99(IR2): 157—168.
- [3] Wu I P, Gitlin H M. Drip irrigation design based on uniformity[J]. Transactions of the ASAE, 1974, 17(3): 429—432.
- [4] Warrick A W, Yitayew M. Trickle lateral hydraulics. I. Analytical solution[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 1988, 114(2): 281—288.
- [5] Hathoot H M, Al-Amoud A I, Mohammad F S. Analysis and design of trickle irrigation laterals[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 1993, 119(5): 756—767.
- [6] Bralts V F, Segerlind L J. Finite element analysis of drip irrigation subunits[J]. Transactions of the ASAE, 1985, 28(3): 809—814.
- [7] 康跃虎. 微灌系统水力学解析和设计[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1999.
- [8] 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.
- [9] Niu Wenquan, Wu Pute, Fan Xingke. 2004. Method for calculating integrated flux deviation rate of micro-irrigation

- system[J]. Transactions of the CSAE, 20(6): 85—88. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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. 农业工程学报, 2007, 23(8): 40—44. Zhanglin, Wu Pute, Niu Wenquan, et al. Method for calculating flow deviation in drip irrigation system under uniform slope. Transactions of the CSAE, 2007, 23(8): 40—44. (in Chinese with English abstract)
- [11] Yitayew M. Simplified method for sizing laterals with two or more diameters[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 2009, 135(1): 111—114.
- [12] Gurol Y. Determining operating inlet pressure head incorporating uniformity parameters for multioutlet plastic pipelines[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 2008, 134(3): 341—348.
- [13] Provenzano G, Pumo. Experimental analysis of local pressure losses for microirrigation laterals[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 2004, 130(4): 318—324.
- [14] 郑纯辉, 康跃虎, 王丹. 满足灌水器平均流量和灌水均匀度的微灌系统优化设计方法. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 28—33. Zheng Chunhui, Kang Yuehu, Wang Dan. An optimum design method of micro-irrigation system capable of equilibrating water flux and water-discharging uniformity of the douches in micro-irrigation systems. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(1): 28—33. (in Chinese with English abstract)
- [15] Kale R V, Singh R P, Mahar P S. Optimal design of pressurized irrigation subunit. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 2008, 134(2): 137—146.
- [16] 陈渠昌, 郑耀泉. 微灌工程设计均匀度的选定[J]. 农业工程学报, 1995, 11(2): 128—132. Chen Quchang, Zheng Yaoquan. Optimizing determination of irrigation uniformity in the design of micro-irrigation system[J]. Transactions of the CSAE, 1995, 11(2): 128—132. (in Chinese with English abstract)
- [17] Wu I P. Optimal scheduling and minimizing deep seepage in microirrigation[J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(5): 1385—1392.
- [18] Wu I P, Barragan J. Design criteria for Microirrigation systems[J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(5): 1145—1154.
- [19] Bordovsky J P, Porter D O. Effect of subsurface drip irrigation system uniformity on cotton production in the Texas high plains[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2008, 24(4): 465—472.
- [20] Wilde C, Johnson J, Bordovsky J P. Economic analysis of subsurface drip irrigation system uniformity[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2009, 25(3): 357—361.
- [21] 李久生, 尹剑锋, 张航, 等. 滴灌均匀性对土壤水分和氮素分布影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 27—33. Li Jiusheng, Yin Jianfeng, Zhang Hang, et al. Field evaluation of drip fertigation uniformity effects on distributions of water and nitrate in soil[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 27—33. (in Chinese with English abstract)
- [22] 秦耀东. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 7—9.
- [23] 中华人民共和国行业标准. SL 103—1995 微灌工程技术规范[S]. 水利技术标准汇编, 灌溉排水卷, 节水灌溉[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002: 44—71.
- [24] 黄元仿, 曹兵, 胡克林, 等. 施氮量对大白菜的生长与品质的影响[J]. 中国农业大学学报, 1997, 2(增刊): 116—119. Huang Yuanfang, Cao Bing, Hu Kelin, et al. Effect of nitrogen applied on the growth and quality of Chinese cabbage[J]. Journal of China Agricultural University, 1997, 2(supplement): 116—119. (in Chinese with English abstract)
- [25] 李俊良, 张晓晟, 孟祥霞, 等. 大白菜氮肥推荐施用技术的研究[J]. 莱阳农学院学报, 2002, 19(2): 83—85. Li Junliang, Zhang Xiaosheng, Meng Xiangxia, et al. Study of recommended use technology of nitrogenous fertilizer in Chinese Cabbage[J]. Journal of Laiyang Agricultural College, 2002, 19(2): 83—85. (in Chinese with English abstract)
- [26] Nakayama F S, Bucks D A, Clemmens A J. Assessing trickle emitter application uniformity[J]. Transactions of the ASAE, 1979, 22(4): 816—821.
- [27] 裴鹿成, 王衷奇. 蒙特卡罗方法及其应用. 北京: 海洋出版社, 1998.
- [28] 栗岩峰, 李久生. 再生水加氯对滴灌系统堵塞及番茄产量与氮素吸收的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 18—24. Li Yanfeng, Li Jiusheng. Effect of chlorination on yield and nitrogen uptake of tomato and emitter clogging in a drip irrigation system with sewage effluent[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 18—24. (in Chinese with English abstract)
- [29] 罗金葵, 陈巍, 沈其荣. 不同小白菜器官对氮素形态响应的生理差异[J]. 南京农业大学学报, 2004, 27(3): 50—53. Luo Jinkui, Chen Wei, Shen Qirong. Response of different varieties of Chinese cabbage to nitrogen forms. Journal of Nanjing Agricultural University, 2004, 27(3): 50—53. (in Chinese with English abstract)
- [30] 张振贤, 王绍辉, 余阳俊. 大白菜栽培技术问答. 北京: 中国农业大学出版社, 2007.

Effects of drip fertigation uniformity and nitrogen application level on growth, yield and quality of Chinese cabbage

Li Jiusheng^{1, 2}, Yin Jianfeng³, Zhang Hang^{1, 2}, Li Yanfeng^{1, 2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

2. National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research – Beijing, Beijing 100048, China;

3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The effects of drip fertigation uniformity and nitrogen application level on crop growth, nitrogen uptake, chlorophyll meter reading (SPAD), yield and quality of Chinese cabbage were investigated in a solar greenhouse to determine the design and evaluation standard of drip irrigation uniformity. Three Christiansen uniformity coefficients of 0.62, 0.80 and 0.96 and two levels of nitrogen applied at 150 and 300 kg/hm² were used. The continuous measurements using TDR sensors of Hydra Probe demonstrated an approximately similar variation pattern of soil water content and temperature during the growing season of Chinese cabbage for all the treatments tested. The observed difference of soil bulk electrical conductivity (EC_b) for different treatments could mainly attribute to the difference of the initial EC_b values. Plant height, dry matter above ground, nitrogen uptake and yield with the drip irrigation system demonstrated a more uniform distribution than those with water and fertilizers applied at fertigation uniformity coefficient equal to or less than 0.80. It was found that the influence of fertigation uniformity on plant height, dry matter above ground, nitrogen uptake and yield was insignificant at a significance level of 0.05. The quality indexes of Chinese cabbage, including vitamin C, total sugar, nitrate and cellulose were also insignificantly affected by fertigation uniformity at the same significance level. Increasing fertigation uniformity might not necessarily result in an increased yield and an improved quality of Chinese cabbage. As no negative influence of fertigation uniformity on crop growth, nitrogen uptake and yield was observed, it is suggested that lower uniformity values of drip irrigation system below those recommended by the current standards can be considered.

Keywords: irrigation, soils, moisture, uniformity coefficient, Chinese cabbage, yield, quality