

# 不同水肥供应量及施用方式对菠菜产量和品质的影响

袁艺, 龙荣华, 陶婧, 汪骞, 李石开\*  
(云南省农业科学院 园艺作物研究所, 昆明 650205)

**摘要:** 【目的】针对蔬菜生产中水肥过量供应造成水肥利用率过低且污染环境的问题, 以菠菜为材料, 研究使用太阳辐射量灌溉控制仪进行水肥管理时, 不同水肥供应量对菠菜产量及品质的影响, 以期为高效生产优质叶菜类蔬菜的水肥供应方式及供应量提供理论依据与技术支撑。【方法】试验使用太阳辐射量灌溉控制仪进行水肥管理, 当太阳辐射量累积值达到设定阈值时会进行定量灌溉, 通过该仪器设置4个处理(W1处理低水肥、W2处理中水肥、W3处理高水肥、W4处理中水无肥)和对照W5处理(传统栽培)共5个处理, 研究不同水肥量及水肥施用方式对菠菜产量和品质的影响。【结果】W5处理的株高和产量都低于W2处理和W3处理, 硝酸盐量、栽培后土壤中 $\text{NO}_3^-$ -N量和土壤EC值在所有处理中最高。W1处理和W4处理的株高及产量在所有处理中最低, 其中W4处理的硝酸盐量、栽培后土壤中 $\text{NO}_3^-$ -N量和土壤EC值在所有处理中最低。W2处理和W3处理的株高和产量都是所有处理中最高的, W2处理和W3处理之间的株高和产量差异不显著, 而W3处理的水肥供应量是W2处理的1.4倍, 且W3处理叶片内硝酸盐量是W2处理的1.4倍且差异显著。【结论】使用太阳辐射量灌溉控制仪进行菠菜栽培时, 水肥供应方案以W2处理为宜。

**关键词:** 菠菜; 水肥供应量; 灌溉方式; 水肥一体化; 硝酸盐量

中图分类号: S274.2

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022476

OSID: 

袁艺, 龙荣华, 陶婧, 等. 不同水肥供应量及施用方式对菠菜产量和品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(6): 19-24.

YUAN Yi, LONG Ronghua, TAO Jing, et al. Effect of Amount and Method of Irrigation and Fertilization on Yield and Quality of Spinach[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(6): 19-24.

## 0 引言

【研究意义】水肥供应是影响蔬菜品质和产量的重要因素之一, 为追求短期效益过量供应水肥造成水肥利用率过低已成为实际生产中普遍存在的问题<sup>[1-2]</sup>。漫灌作为传统灌溉方式耗水量大且易引起淋溶损失, 并对地下水造成污染<sup>[2]</sup>, 因此科学的水肥管理对降低农业面源污染和农业可持续发展具有重大意义。【研究进展】蔬菜作为喜肥作物, 氮素在其产量和品质方面起到关键作用。据调查, 目前温室栽培施氮量远超蔬菜实际需求量, 过量施氮肥不仅无法提高产量, 而且容易引起蔬菜硝酸盐量过高, 造成土壤盐渍化和地下水污染等环境问题<sup>[3-5]</sup>。水肥一体化技术是将施肥与灌溉相结合, 通过提高水肥利用率达到节水省肥增收的农业新技术, 能有效提高水肥利用率, 被广泛应用于蔬菜和花卉生产中<sup>[6-8]</sup>。目前我国水肥一体化生产栽培中存在控制设备自动化程度低、精准智能化水肥调控系统基本依赖进口和设备成本过高且实用性低等问题<sup>[9-10]</sup>。【切入点】基于太阳辐射量和植物光

合作用之间的紧密关联, 21世纪日本千叶大学提出一种以太阳辐射累积量为基准结合水肥一体化的新型灌溉施肥模式<sup>[11]</sup>。与传统水肥一体化栽培方式相比, 这种新型灌溉施肥模式选择了环境因子中对产量影响最大的太阳辐射量为关键环境因子, 以太阳辐射量为基准对植物的水肥供应量和水肥供应频率进行控制, 能够灵活应对气候的变化并根据植物对水肥的实际需求进行科学的水肥供应, 实现蔬菜栽培自动水肥的精准供应<sup>[12-15]</sup>。该技术具有操作省力、资源节约、环境友好和高产高效等特点, 符合现代设施农业的发展要求且在我国具有广阔应用前景, 该栽培模式目前国内尚未见报道。这种把太阳辐射量与水肥一体化相结合的新型灌溉施肥技术的关键点是确定太阳辐射累积量与植物水肥需求之间的关系。【拟解决的关键问题】本研究拟在温室土壤栽培环境下, 以菠菜为材料, 研究太阳辐射量灌溉控制仪进行水肥管理时, 不同水肥供应量对菠菜品质及产量的影响, 以期为高效生产优质叶菜类蔬菜的水肥供应方式及供应量提供理论依据与技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试菠菜品种为四季大叶菠菜, 营养液配方选用

收稿日期: 2022-08-29 修回日期: 2023-03-07 网络出版日期: 2023-05-05  
基金项目: 云南省科技厅重大专项(202102AE90005); 云南省陆良县蔬菜科技特派团项目(202104BI090006)  
作者简介: 袁艺(1986-), 女, 副研究员, 硕士, 主要从事设施栽培及育种研究。E-mail: lareine.1213@163.com  
通信作者: 李石开(1968-), 男, 研究员, 本科, 主要从事蔬菜栽培及育种研究。E-mail: lishikai@126.com  
©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

日本园试营养液，大量元素配方：590 mg/L  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ，505 mg/L  $\text{KNO}_3$ ，95 mg/L  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ，307.5 mg/L  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ；微量元素配方：23.6 mg/L  $\text{Fe-DETA}$ ，2.86 mg/L  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ，2.11 mg/L  $\text{MnSO}_4 \cdot 4\sim 5\text{H}_2\text{O}$ ，0.22 mg/L  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ，0.08 mg/L  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ，0.02 mg/L  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。使用日本 SHINKO 公司的太阳辐射量灌溉控制仪 (SWCS-100) 进行水肥供应管理，其原理如图 1 所示。控制仪以每秒为单位对太阳辐射量进行测量累积，当太阳辐射量累积值到达设定的阈值 (SV) 时，会按照已设定的灌水持续时间进行 1 次灌水，每次太阳辐射量累积值到达阈值 (SV) 后将清零后再次累积。

### 1.2 试验方法

试验于 2018 年 4 月在云南省昆明市团结乡试验基地塑料大棚内进行。播种前将菠菜种子浸种 24 h 后，用潮湿纱布包裹后放入 30 °C 恒温箱催芽，每穴播种 3 粒，行距和株距均为 15 cm，每小区 4 行共计 44 株，试验共设 5 个处理，每个处理 6 次重复，共计 30 个小区，随机区组排列。本试验将菠菜生长划分为 2 个阶段，0~10 d 为幼苗期，11~25 d 为生长期，

其中 W1 处理 (低水肥)、W2 处理 (中水肥)、W3 处理 (高水肥)、W4 处理 (中水无肥) 使用太阳辐射量灌溉控制仪进行水肥供应管理，W1、W2 处理和 W3 处理使用日本园试营养液进行灌溉，W4 处理使用井水灌溉。参考 Shinohara 等<sup>[11]</sup>试验结果设定 W1 处理的水肥供应模式，由于昆明整体空气湿度和土壤含水率均明显低于日本，W2 处理和 W3 处理的水肥供应量分别设定为 W1 处理的 1.65 倍和 2.30 倍，W4 处理采用与 W2 处理相同的供水模式进行栽培；W5 处理为传统栽培方式 (人工撒施+滴灌)，具体水肥供应计划见表 1。

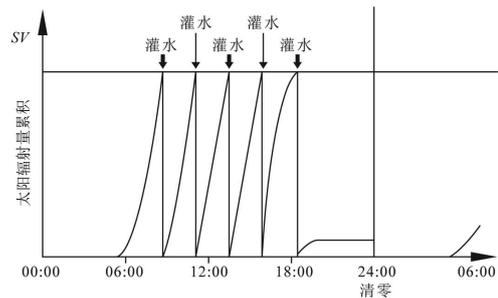


图 1 太阳辐射量灌溉控制仪原理

Fig.1 Principle of the solar-radiance-irrigation controller

表 1 菠菜栽培不同水肥处理方案

Table 1 Different water and fertilizer methods for spinach cultivation

处理	生长阶段	太阳辐射量累积/(MJ m <sup>-2</sup> )	时间/d	单株供水次数/次	单株单次供水量/mL	单株供水总量/mL	单株氮肥施用次数/次	单株单次氮肥施用量/mg	单株氮肥施用总量/mg
W1	幼苗期	0~163	10	23	4.0		23	12.9	
	生长期	164~368	15	38	6.0	320	38	31.9	45.080
W2	幼苗期	0~163	10	28	5.5		28	21.6	
	生长期	164~368	15	63	6.0	530	63	52.9	74.242
W3	幼苗期	0~163	10	35	6.0		35	29.4	
	生长期	164~368	15	97	5.5	740	97	74.6	103.404
W4	幼苗期	0~163	10	28	5.5		-	0.0	
	生长期	164~368	15	63	6.0	530	-	0.0	-
W5	幼苗期	0~163	10	5	132.0		1	511.4	
	生长期	164~368	15			660			511.4

单株供水设定：W1 处理 10 d 前太阳辐射量每累积 6 MJ/m<sup>2</sup> 灌溉 4 mL，10 d 后太阳辐射量每累积 5 MJ/m<sup>2</sup> 灌溉 6 mL；W2 处理 10 d 前太阳辐射量每累积 5 MJ/m<sup>2</sup> 灌溉 5.5 mL，10 d 后太阳辐射量每累积 3 MJ/m<sup>2</sup> 灌溉 6 mL；W3 处理 10 d 前太阳辐射量每累积 4 MJ/m<sup>2</sup> 灌溉 6 mL，10 d 后太阳辐射量每累积 2 MJ/m<sup>2</sup> 灌溉 5.5 mL；W4 处理与 W2 处理相同，每隔 5 d 手动调整灌溉误差。W5 处理根据气候及菠菜生长情况分 5 次使用滴灌进行供水，总计 660 mL。

施肥设定：W1、W2 处理和 W3 处理采用电导度值 (Electrical Conductivity, EC) 为 1.5 dS/m 的园试营养液进行栽培，肥料溶解于水中以滴灌方式施用；W4 处理为不施肥处理；W5 处理在处理开始后按照 750 kg/hm<sup>2</sup> 的施肥量施用复合肥 ( $\omega(\text{N}) : \omega(\text{P}_2\text{O}_5) : \omega(\text{K}_2\text{O}) = 15 : 15 : 15$ ) (6 个重复共计用地 12 m<sup>2</sup>，

施用 900 g 复合肥，其中氮肥施用量为 135 g)。

菠菜栽培期间太阳辐射量累积量见图 2，菠菜生长 25 d 太阳辐射量累积量为 367.46 MJ/m<sup>2</sup> 时收获并进行生理指标测量，取样时每小区随机选择 10 株进行调查。

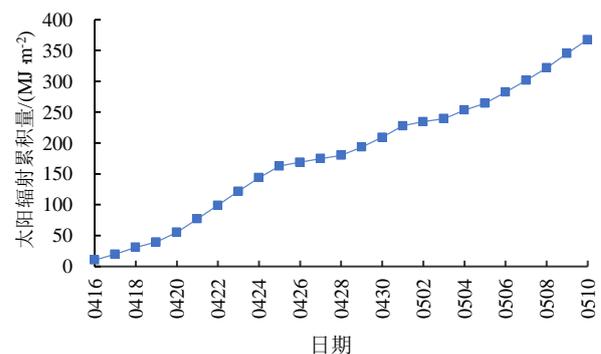


图 2 菠菜栽培期间太阳辐射量累积量

Fig.2 Accumulation of solar radiation during spinach cultivation

### 1.3 测定项目及方法

株高：测量从茎基部到顶部之间的距离。

单株质量：单株质量=小区总质量/小区株数。

产量：根据单株质量，按照每个温室（220 m<sup>2</sup>）栽培 3 168 株菠菜，每公顷搭建 42 个温室计算得出。

叶绿素量：用叶绿素计 SPAD-502PLUS, Konica Minolta 测量最新一片完全展开叶，结果取平均值。

硝酸盐量：08:00—10:00 采样，用 RQflex plus 10 (Merck, Darmstadt, Germany) 进行测量<sup>[11,16]</sup>。

维生素 C 量：08:00—10:00 采样，用 RQflex plus 10 (Merck, Darmstadt, Germany) 进行测量<sup>[17]</sup>。

土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 量：选取 10 cm 剖面土壤，105 ℃ 烘干 24 h。将其过筛后重悬于蒸馏水中，离心取上清液，用 RQflex plus 10 (Merck, Darmstadt, Germany) 进行测量<sup>[18]</sup>。

肥料产量贡献率：肥料产量贡献率=(施肥区产量-不施肥区产量)/施肥区产量×100<sup>[19]</sup>。

灌溉水生产效率：灌溉水生产效率=产量/灌水量<sup>[20]</sup>。

### 1.4 数据处理

采用 SPSS 19.0 软件及 Excel 2003 软件对试验数据进行统计分析，并利用 Duncan 法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同灌溉施肥方式对菠菜生物量的影响

表 2 为不同灌溉施肥方式对菠菜生物量的影响。由表 2 可知，W1 处理的单株质量、产量和株高是所有处理中最低的，分别为 113.58 g、15 113 kg/hm<sup>2</sup> 和 32.02 cm，W1 处理单株质量、产量和株高与 W2 处理和 W3 处理均存在显著差异，因此根据文献[11]试验结果得出的 W1 处理水肥供应量明显不足。W4 处理的单株质量、产量和株高与 W2 处理间差异显著，表明在供水量相同的情况下，仅靠土壤自身养分无法满足菠菜生长。W2 处理和 W3 处理的单株质量、产量和株高均无显著差异。由此可见，W3 处理尽管增加了水肥供应但不能较 W2 处理显著提升产量。因此 W2 处理是在昆明地区使用太阳辐射量灌溉控制仪获得菠菜高产的最优灌溉方案。W5 处理的常规栽培方式的单株质量、产量和株高均比 W2 处理低，但处理间差异不显著。

### 2.2 不同灌溉施肥方式对菠菜品质的影响

表 3 为不同灌溉施肥方式对菠菜品质的影响。由表 3 可知，所有处理中不施肥的 W4 处理的菠菜叶片硝酸盐量最低为 458.62 mg/kg，与其他处理相比差异显著。W1、W2 处理和 W3 处理中菠菜叶片硝酸盐量最高的是 W3 处理，为 735.47 mg/kg，与 W2 处理硝

酸盐量差异显著。W1 处理施肥量最低却与 W2、W3 处理之间叶片硝酸盐量差异不显著，可能土壤含水率会限制植物体内硝酸盐的转移和下降，当植物处于水胁迫状态下，在影响其生长的同时体内硝酸盐量反而会增加，张金秀<sup>[21]</sup>的研究也得到了相同的结论。W5 处理的菠菜叶片硝酸盐量在所有处理中最高，约为 W2 处理的 2 倍，相较其他处理差异显著。

表 2 灌溉施肥方式对菠菜生物量的影响

Table 2 Effect of irrigation and fertilization methods on spinach biomass

处理	单株质量/g	产量/(kg hm <sup>-2</sup> )	株高/cm
W1	113.58±18.93c	15 113±2 789c	32.02±3.07d
W2	144.33±13.58ab	19 204±1 662ab	40.12±4.97ab
W3	150.64±24.71a	20 043±3 264a	43.38±4.72a
W4	118.42±13.43c	15 756±1 480c	34.49±1.32cd
W5	126.26±20.04bc	16 800±2 285bc	36.65±2.74bc

注 按照 1 hm<sup>2</sup> 的温室栽培 133 056 株计算。

表 3 灌溉施肥方式对菠菜品质的影响

Table 3 Effect of irrigation and fertilization on spinach quality

处理	叶片硝酸盐量/ (mg kg <sup>-1</sup> )	叶片维生素 C 量/ (mg (100g) <sup>-1</sup> )	SPAD 值
W1	647.42±203.27bc	50.91±6.73a	67.63±1.13ab
W2	519.71±129.72c	64.31±5.20a	60.75±4.47b
W3	735.47±102.18b	62.37±21.24a	65.18±2.73ab
W4	458.62±90.09d	55.49±8.55a	65.47±4.99ab
W5	978.49±111.31a	66.31±8.03a	69.10±2.55a

不同水肥处理对菠菜叶片维生素 C 量没有显著影响，最高的是 W5 处理的 66.31 mg/100 g，最低的是 W4 处理的 55.49 mg/100 g。SPAD 值方面，最高的 W5 处理为 69.10，最低的为 W2 处理的 60.75，2 个处理间存在显著差异。由表 3 可知，不同灌溉施肥方式对菠菜叶片维生素 C 量无影响，对叶片硝酸盐量造成影响，在水分供应充足的情况下，氮肥施用量和植物体内硝酸盐量正相关。5 种灌溉施肥方式栽培的菠菜叶片硝酸盐量均远低于欧盟的硝酸盐残留限量标准（新鲜菠菜硝酸盐量≤3 500 mg/kg，冷冻加工菠菜≤2 000 mg/kg）<sup>[22]</sup>，其中叶片硝酸盐量最低的是 W2 处理和不施用肥料栽培的 W4 处理。

### 2.3 水肥用量对灌溉水生产效率和肥料产量贡献率的影响

表 4 为水肥用量对灌溉水生产效率和肥料产量贡献率的影响。由表 4 可知，W1、W2 处理和 W3 处理的供水量分别约为 W5 处理的 50%、80% 和 110%，而 W1、W2 处理和 W3 处理的灌溉水生产效率分别约为 W5 处理的 1.9、1.4 倍和 1.1 倍。由此可知使用太阳辐射量灌溉控制仪栽培菠菜时，增加灌水量反而会降低灌溉水生产效率，与传统栽培方式相比，使用太阳辐射量灌溉控制仪栽培菠菜能显著提高灌溉水生产效率。W1 处理和 W3 处理的水肥供应量分别为

W2 处理的 0.6 倍和 1.4 倍,灌溉水生产效率随着灌水量的增加而下降。由于 W1 处理的产量低于 W4 处理(无水肥处理)产量(表 2),故 W1 处理氮肥农学利用率为负,依据从相似灌溉模式下 W2 处理和 W3 处理的数据可知,供水量与肥料产量贡献率呈正相关,推断 W1 处理出现产量低于 W4 处理是由于供水量不足引起的,因此肥料在供水量不足的情况下对产量无贡献。W5 处理的施肥量为 W2 处理的 9 倍,而灌溉水生产效率是所有处理里最低的且肥料产量贡献率低于 W2 处理和 W3 处理,由此可见传统的栽培方式氮肥施用量过高而贡献率极低。

表 4 水肥用量对灌溉水生产效率和肥料产量贡献率的影响

Table 4 Effect of water and fertilizer dose on the efficiency of irrigated water and the contribution of fertilizer yield

处理	供水量/ (t hm <sup>-2</sup> )	灌溉水生产效率/ (kg m <sup>-3</sup> )	氮施用量/ (kg hm <sup>-2</sup> )	肥料产量 贡献率/%
W1	35.42	426.67	4.96	-4.25
W2	58.33	329.22	8.17	17.95
W3	81.25	246.68	11.38	21.39
W4	58.33	270.11	-	-
W5	72.92	230.39	56.25	6.22

#### 2.4 不同灌溉施肥方式对土壤养分的影响

表 5 为不同灌溉施肥方式对土壤养分的影响。由表 5 可知,栽培后土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 量均有所降低,在 5 个处理中,W1 处理和 W4 处理栽培后土壤中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 量最低,分别是 48 mg/kg 和 33 mg/kg,施肥量最高的 W5 处理栽培后土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 量最高,达到 193 mg/kg。栽培前大棚内土壤 EC 值为 1.0 dS/m,栽培后最高的为 W5 处理的 0.7 dS/m 和 W3 处理的 0.6 dS/m,其他处理均为 0.4 dS/m。各处理栽培后的土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 量与施肥量正相关,而栽培后的土壤 EC 值在施肥量大于 W2 处理时持续上升,小于或等于 W2 处理时则稳定在 0.4 dS/m。因此采用合理的水肥供应方式,能够有效降低土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 量和 EC 值。

表 5 灌溉施肥方式对土壤养分的影响

Table 5 Effect of irrigation and fertilization on the nutrient content of soil

处理	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N 量/(mg kg <sup>-1</sup> )			EC 值/(dS m <sup>-1</sup> )		
	栽培前	栽培后	减少量	栽培前	栽培后	减少量
W1		48±17.84d	185a		0.4b	0.6a
W2		124±12.96c	109b		0.4b	0.6a
W3	233	160±28.66b	73c	1	0.6a	0.4b
W4		33±13.54d	200a		0.4b	0.6a
W5		193±47.10a	40d		0.7a	0.3b

### 3 讨论

本研究表明,使用太阳辐射量灌溉控制仪栽培菠菜时,当水肥供应量小于等于 W2 处理时产量随着水肥供应量的增加而增加,过量供应水肥并不能增加菠菜产量。张金秀<sup>[21]</sup>在菠菜上和周亚婷等<sup>[23]</sup>在结球甘蓝

上的研究结果均显示产量与施肥量正相关,过量施肥会抑制植物生长,这与本研究不完全一致。可能是由于本研究氮肥用量最高的 W5 处理的 56.25 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥施用量明显低于上述研究的高肥处理区,虽然不能显著提高菠菜产量但并没有达到抑制菠菜生长的施用量。低肥 W1 处理的产量较不施肥 W4 处理无显著增加,可以考虑由于 W1 处理 35.42 t/hm<sup>2</sup> 的低供水量造成水分亏缺影响了菠菜对肥料的吸收利用,这与周德霞<sup>[24]</sup>在莴苣上的研究一致。由于菠菜对供水量更为敏感,水分亏缺时其产量降低且增加氮肥供应量对增产没有效果<sup>[21]</sup>。灌水量和频率是影响蔬菜产量的重要因素,大田栽培黄瓜时以 6 d 为灌溉间隔能有效实现黄瓜节水增产的目的<sup>[25]</sup>。郭仁松等<sup>[26]</sup>认为适中的灌溉频次能有效促进棉花生殖生长,增加籽棉产量并提高水分利用效率。本试验中,相较于传统水肥栽培方式 W5 处理,通过太阳辐射量灌溉控制仪进行栽培的 W2 处理和 W3 处理,增加了菠菜产量的同时减少了水肥供应量,提高了灌溉水生产效率和肥料产量贡献率。这证明使用太阳辐射量灌溉控制仪进行蔬菜水肥管理的栽培技术,是一种减肥节水增产的有效措施。

周亚婷等<sup>[23]</sup>研究表明,适度水分胁迫能增加结球甘蓝的维生素 C 量,张金秀<sup>[21]</sup>研究表明,供水量过高或者过低都会降低菠菜的维生素 C 量。本研究 W1 处理和 W4 处理的维生素 C 量较其他处理偏低,各处理间没有显著差异,这与上述研究不一致。可能是由于本研究的供水量上下限并没有造成严重干旱胁迫或过度灌溉的情况,此外样品间方差较大可能也对结果造成一定影响。W5 处理叶绿素量最高,且 W2 和 W5 处理间差异显著,说明增加氮肥供应量能够提高菠菜叶绿素量,这与刘丹<sup>[27]</sup>与田建柯<sup>[28]</sup>在番茄和玉米中的研究结果一致,且菠菜施用过氮肥比施用适度氮肥处理的叶绿素量提高了 18.6%<sup>[21]</sup>。使用太阳辐射量灌溉控制仪栽培的处理间叶绿素量差异不显著可能是由于各处理氮肥施用量的差异没有大到对叶绿素量造成影响,而使用 SPAD-502PLUS 测量叶绿素量时对叶片测量位置的选择可能也对结果造成一定影响。菠菜硝酸盐量和栽培后土壤中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 残留量均随氮肥供应量的增加而增加,这与前人研究<sup>[21,29-31]</sup>结果一致。W2 处理与 W3 处理产量差异不显著,W2 处理的菠菜硝酸盐量和栽培后土壤中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 残留量均显著低于 W3 处理,这表明施入土壤中的氮肥大多被植物吸收,而植物吸收的氮也大多转化为有机物而非硝酸盐。硝酸盐在植物中可作为一种渗透压调节剂储存在植物液泡中,当植物遭受渗透胁迫时明显积累<sup>[32]</sup>。W5 处理土壤中的氮肥量和菠菜叶片中硝酸盐量过高,产量却低于 W2 处理和 W3 处理,表明了

过量且不科学的施肥方式对产量没有贡献还增加硝酸盐在植物体内的积累,同时无法被植物吸收的养分则残留于土壤中对环境造成负面影响。本研究栽培后土壤的  $EC$  值也验证了这一想法,不合理的施肥方式会使土壤电导率增加,引起盐分积累最终对植物生长造成不利影响<sup>[21,24]</sup>。

## 4 结论

1) 使用太阳辐射量灌溉控制仪栽培菠菜实现了水肥自动化管理,能减少水肥供应量且有效提高灌溉水生产效率和肥料产量贡献率,是一种减肥增产的有效措施。

2) 当使用太阳辐射量灌溉控制仪进行菠菜栽培时,使用 W2 处理的水肥供应方案能够较好满足栽培期菠菜水肥需求且显著降低其食用部位的硝酸盐量。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

## 参考文献:

- [1] 周婷. 日光温室蔬菜施肥现状及减肥潜力研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.  
ZHOU Ting. Status of fertilization and potential to reduce fertilizer surplus in solar greenhouse vegetable fields[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017.
- [2] 张泽锦, 王力明, 唐丽, 等. 滴灌水量对设施土壤养分分布和黄瓜养分吸收的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(9): 72-78.  
ZHANG Zejin, WANG Liming, TANG Li, et al. Improving nutrient use efficiency in facility production of cucumber by regulating drip irrigation amount[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(9): 72-78.
- [3] 邢金鑫, 邢英英, 王秀康, 等. 不同施肥量对陕北日光温室番茄生长、产量和土壤硝态氮的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(6): 29-35.  
XING Jinjin, XING Yingying, WANG Xiukang, et al. Effects of different fertilizers application on soil nitrate, growth and yield of tomato growing in solar greenhouse in Northern Shaanxi Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(6): 29-35.
- [4] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6.  
ZHU Zhaoliang. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. Soil and Environmental Sciences, 2000, 9(1): 1-6.
- [5] 夏体渊, 张彩仙, 年耀萍, 等. 养分管理对生菜生物量与硝酸盐含量影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(11): 2 552-2 556.  
XIA Tiyan, ZHANG Caixian, NIAN Yaoping, et al. Effect of nutrition management on aboveground biomass, underground biomass and nitrate accumulation in lettuce[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2017, 30(11): 2 552-2 556.
- [6] 曹云娥. 日光温室番茄滴灌营养液土壤栽培试验研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2005.  
CAO Yun'e. Study on the one-a-day fertilizers of tomato soil culture by drip irrigation in greenhouse[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2005.
- [7] 陈喜靖, 孔海明, 奚辉, 等. 水肥一体化应用的主要技术及方法[J]. 浙江农业科学, 2015, 56(6): 757-761.  
CHEN Xijing, KONG Haiming, XI Hui, et al. Key technologies and methods for integrated water and fertilizer applications[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2015, 56(6): 757-761.
- [8] 李帅, 卫琦, 徐俊增, 等. 水肥一体化条件下控灌稻田土壤氮素及水稻生长特性研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(10): 79-86.  
LI Shuai, WEI Qi, XU Junzeng, et al. Improving nitrogen use efficiency and growth of paddy rice using controlled fertigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(10): 79-86.
- [9] 牛寅. 设施农业精准水肥管理系统及其智能装备技术的研究[D]. 上海: 上海大学, 2016.  
NIU Yin. Research of precision fertigation control system and equipment technology in facility agriculture[D]. Shanghai: Shanghai University, 2016.
- [10] 付蕾, 魏珉, 李岩, 等. 不同灌溉施肥方式对日光温室甜椒生长、产量和品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(8): 8-14.  
FU Lei, WEI Min, LI Yan, et al. Effects of different fertigation on growth, yield and quality of solar-greenhouse sweet pepper[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(8): 8-14.
- [11] SHINOHARA Y, TSUKAGOSHI S, HAYASHI N, et al. Practical use of the fertigation control based on cumulative solar radiation to decrease the nitrate concentration in spinach[Spinacia oleracea]grown in the greenhouse[J]. Horticultural Research (Japan), 2007, 6(2): 189-193.
- [12] SHINOHARA Y, TSUKAGOSHI S, HAYASHI N, et al. Practical use of the fertigation control based on cumulative solar radiation to decrease the nitrate concentration in spinach[Spinacia oleracea]grown in the greenhouse[J]. Horticultural Research, 2007, 6(2): 195-199.
- [13] INDECHE A, YOSHIDA Y, MIYAJI D, et al. Defoliating to 12-15 leaves increases calcium concentration and decreases blossom-end rot incidence in fruit of tomato plant grown under moderate water stress[J]. Scientific Reports of the Faculty of Agriculture, Okayama University, 2020, 109: 21-27.
- [14] SAPUTRA R, NUGROHO A P, MURTININGRUM, et al. Development of irrigation monitoring and control systems to support the implementation of the system of rice intensification (SRI)[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Smart and Innovative Agriculture (ICoSIA 2021)“, ”Advances in Biological Sciences Research. November 3-4, 2021. Yogyakarta, Indonesia. Paris, France: Atlantis Press, 2022: 150-157.
- [15] 董海波, 陈小平, 冯绍元, 等. 模拟气候变化对极端干旱区棉花产量和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(9): 23-32, 51.  
DONG Haibo, CHEN Xiaoping, FENG Shaoyuan, et al. Effects of climate change on seed yield and water use efficiency of cotton in arid regions: A simulation study[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(9): 23-32, 51.
- [16] LI H X, INOKUCHI T, NAGAOKA T, et al.  $NO_3^-$  requirement and the quantitative management method of nutrient solution based on  $NO_3^-$  supply in hydroponic culture of radish plants[J]. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 2014, 83(1): 44-51.
- [17] JIANG C Y, JOHKAN M, HOHJO M, et al. Photosynthesis, plant growth, and fruit production of single-truss tomato improves with supplemental lighting provided from underneath or within the inner canopy[J]. Scientia Horticulturae, 2017, 222: 221-229.
- [18] INOUE K, KOGA T, ISHIMATSU T. Effect of drip fertigation on soil chemical properties, yield and quality of asparagus[J]. Bull. Fukuoka Agric.For.Res.Cent., 2018, 4: 135-140.
- [19] 区惠平, 周柳强, 黄金生, 等. 长期不同施肥对甘蔗产量稳定性、肥料贡献率及养分流失的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(10): 1 931-1 939.  
OU Huiping, ZHOU Liuqiang, HUANG Jinsheng, et al. Effects of long-term different fertilization on sugarcane yield stability, fertilizer contribution rate and nutrition loss[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(10): 1 931-1 939.
- [20] 张乐, 尹娟, 王怀博, 等. 不同灌水处理对玉米生长特性及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(2): 24-29.  
ZHANG Le, YIN Juan, WANG Huaibo, et al. Effects of different irrigation treatments on growth characteristics and water use efficiency

- of maize[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(2): 24-29.
- [21] 张金秀. 灌溉与施氮对菠菜生长及其土壤中水氮运移特征的影响[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.  
ZHANG Jinxiu. The effect of irrigation and nitrogen on spinach growth, water and nitrogen migration in soil[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2016.
- [22] PAGLIANO E, MEIJA J, CAMPANELLA B, et al. Certification of nitrate in spinach powder reference material SPIN-1 by high-precision isotope dilution GC-MS[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2019, 411(16): 3 435-3 445.
- [23] 周亚婷, 张国斌, 刘华, 等. 不同水肥供应对结球甘蓝产量、品质及水肥利用效率的影响[J]. *中国蔬菜*, 2015, 314(4): 54-59.  
ZHOU Yating, ZHANG Guobin, LIU Hua, et al. Effect of different water and fertilizer supply on wild cabbage yield, quality, water and fertilizer use efficiency[J]. *China Vegetables*, 2015, 314(4): 54-59.
- [24] 周德霞. 不同水肥处理对莴笋水分利用效率和养分吸收特性的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2014.  
ZHOU Dexia. Effects of different water and fertilizers treatment on water use efficiency and nutrient absorption characteristics of asparagus lettuce[D]. Lanzhou : Gansu Agricultural University, 2014.
- [25] 冀健红, 张晔, 李艳丽, 等. 不同灌水量和灌水频率对田间黄瓜耗水特性及产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(3): 63-69.  
JI Jianhong, ZHANG Ye, LI Yanli, et al. Effects of irrigation amount and frequency on water consumption and yield of field cucumber[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(3): 63-69.
- [26] 郭仁松, 陈平, 程强, 等. 深松条件下灌溉频次对棉花水分利用效率及产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(7): 17-22.  
GUO Rensong, CHEN Ping, CHENG Qiang, et al. Effect of irrigation frequency on water use efficiency and yield of cotton after loosening the deep soil[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(7): 17-22.
- [27] 刘丹. 不同水肥供应量对设施番茄生长、产量及品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.  
LIU Dan. Effects of different water and fertilizer supply on plant growth, yield and quality of tomato[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.
- [28] 田建柯. 灌溉制度和施肥对作物生长和水肥利用的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.  
TIAN Jianke. Effects of irrigation schedule and fertilization on crop growth, water and nutrient use efficiency[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.
- [29] 王瑞, 胡笑涛, 王文娥, 等. 菠菜水培不同营养液浓度的产量、品质、元素利用效率主成分分析研究[J]. *华北农学报*, 2016, 31(S1): 206-212.  
WANG Rui, HU Xiaotao, WANG Wen'e, et al. Different concentrations of nutrient solution based on principal component analysis comprehensive evaluation of hydroponic spinach[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2016, 31(S1): 206-212.
- [30] 于红梅, 龚元石, 李子忠, 等. 不同水氮管理对苋菜和菠菜的产量及硝酸盐含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(3): 302-305.  
YU Hongmei, GONG Yuanshi, LI Zizhong, et al. Effect of different water and nitrogen management on yield and nitrate content of amaranth and spinach[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2004, 10(3): 302-305.
- [31] 陈宝明. 蔬菜硝态氮临界含量及其影响因素[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2002.  
CHEN Baoming. Critical Nitrate-N concentration in vegetables and influencing factors[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2002.
- [32] COLLA G, KIM H J, KYRIACOU M C, et al. Nitrate in fruits and vegetables[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 237: 221-238.

## Effect of Amount and Method of Irrigation and Fertilization on Yield and Quality of Spinach

YUAN Yi, LONG Ronghua, TAO Jing, WANG Qian, LI Shikai\*

(Horticultural Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China)

**Abstract:** 【Objective】 Low water and fertilizer use efficiency and environmental pollution caused by excessive water and fertilizer supply are common in vegetable production. Taking spinach as an example, this paper studies the effect of irrigation and fertilization amount and method on its yield and quality. 【Method】 The experiment was conducted using a solar radiation irrigation controller to manage the irrigation and fertilization in that it started irrigation and fertigation when the accumulated solar radiation reached a pre-set threshold. We compared four treatments: low irrigation and fertilization (W1), moderate irrigation and fertilization (W2), sufficient irrigation and fertilization (W3), moderate irrigation without fertilization (W4). The control was conventional irrigation and fertilization used by local farmers (CK). 【Result】 The height and yield of the spinach in W5 were lower than that in W2 and W3. W5 led to the highest nitrate content in spinach and highest *EC* in soil after harvest. The height and yield of the spinach in W1 and W4 were the lowest. Nitrate content in the spinach, nitrate content and *EC* in the soil were the lowest in W4. W2 and W3 gave the highest plant height and yield. There was no significant difference in plant height and yield between W2 and W3, even though W3 used 1.4 times more water and fertilizer than W2. Nitrate content in spinach leaves in W3 was 1.4 times higher than that in W2. 【Conclusion】 For all treatments we compared, W2 was optimal for reducing water and nitrogen application without compromising spinach yield and quality.

**Key words:** spinach; availability of water and fertilizer; irrigation methods; water and fertilizer integration; nitrate content

责任编辑: 赵宇龙