

李慧霞, 铃木茂敏, 张冬梅, 等. 营养液定量管理对水培菠菜生长、养分吸收和利用效率的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(24): 147-153.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.24.025

营养液定量管理对水培菠菜生长、养分吸收和利用效率的影响

李慧霞¹, 铃木茂敏², 张冬梅¹, 路亚南¹, 吕福虎¹, 刘明星¹, 杨瑞¹, 郑于莉¹

(1. 包头市农牧业科学研究院, 内蒙古包头 014013; 2. 名城大学农学院, 日本名古屋 4688502)

摘要:在2个不同生长季, 采用营养液定量栽培管理方法, 研究限制供应营养液对菠菜产量和养分利用的影响。在相同硝酸盐浓度处理下, 设定 EC(对照, 整个生育期始终保持设定 N 浓度为 4.5 mmol/L)、WAN(从试验开始提供所有养分)和 AWAN(每隔 3 d 供应营养液总量的 1/7)等 3 个处理, 对水培菠菜在 2 个生长季的生长、养分吸收和利用效率等进行研究。结果显示, 不同季节 EC 处理下叶长、叶宽、地上部鲜质量等均明显大于其他处理, 其中地上部鲜质量在 4 月达到了 32.1 g/株, 显著高于商品规格。2 个生长季各处理下, 硝态氮和各离子吸收效率整体表现为 EC > AWAN > WAN, 且相同定量管理法各营养元素离子吸收效率 4 月大于 11 月。但是, 2 个生长季 EC 和 WAN 处理显著提高了氮元素利用效率。说明在不更换营养液和节约肥料的情况下, 营养液定量管理(WAN 处理)更适合菠菜长季节水培生长。

关键词:营养液定量管理; 硝酸盐; 养分利用率; 水培菠菜; 产量

中图分类号:S636.104 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2021)24-0147-07

菠菜(*Spinacia oleracea* L.)是藜科菠菜属一年生草本植物, 富含维生素、矿物质、纤维素等, 是我国最重要的叶菜类蔬菜之一。随着人们生活水平的不断提高, 消费者对健康、安全的高品质蔬菜产品需求越来越大。在过去的几十年中, 水培蔬菜由于其品质优良、无污染等优点, 在设施栽培中得到了广泛的应用。然而, 在传统的无土栽培中, 种植者通常是通过提供大量的营养液和较高浓度的养分来保持蔬菜的快速生长, 但是在施肥或灌溉下过度使用养分可能导致环境污染, 如淋洗或反硝化而使地下水养分富集^[1-3]。另一方面, 过量施用营养液也会降低养分利用效率, 破坏蔬菜营养生长与生殖生长之间的平衡^[4]。因此, 许多研究通过农艺管理方法来提高养分利用效率, 例如通过控制营养液的施用时期、用量和来源^[5-7]等。此外, 菠菜、生菜等绿叶蔬菜比其他蔬菜更容易积累硝酸盐, 这也给消费者带来了潜在的健康问题。因此, 植物养分的充分利用是蔬菜高产优质栽培的关键。

氮是植物吸收的主要养分之一, 在植物代谢和

生长中起着核心作用^[8], 而 NO₃⁻-N 是无土栽培中最常见和最容易促进生物量增加的氮源^[9]。研究表明, 有许多因素影响硝酸盐的吸收和积累能力, 如遗传因素、环境和栽培方法^[10-12]等。因此, 合理的氮素管理是提高氮素利用率、减少植物硝酸盐积累的关键。一些研究表明, 改变氮的供应形态(硝态氮/铵态氮)^[13-14], 或在收获前几天降低营养液中的氮浓度或中断氮供应^[15-17]能降低植物硝酸盐含量。此外, 一些研究在几种水培蔬菜栽培中采用营养液定量管理(QNM)方法^[18-20], 即在不降低产量的前提下, 通过有限的营养供应来种植植物, 被认为是在短时期内栽培叶菜类蔬菜较为有效的方法。因此, 应用 QNM 法可以提高叶菜类蔬菜养分利用效率, 降低植株体内积累的硝酸盐含量, 减少养分的排放和减轻对环境的负面影响。

大多数学者研究了田间作物的养分利用效率, 但提高养分的吸收和利用效率对水培植物也同样重要^[21-23]。事实上, 增加氮肥浓度可以增加氮的吸收, 这种增加对叶绿素浓度、光合速率、叶片生长、叶片总数量和干物质积累都有积极的影响^[24]。然而, 增加施氮量会降低总氮利用效率并导致氮素过量摄入^[25]。因此, 植物高效吸收和利用养分可以大大提高肥料效率, 降低投入成本, 防止养分流失到环境中^[6], 这与 QNM 方法是一致的。

收稿日期:2021-04-07

基金项目:内蒙古自治区包头市青年创新人才项目;内蒙古自治区科技计划项目(编号:NM2019BT021)。

作者简介:李慧霞(1984—),女,山西浑源人,博士,助理研究员,主要从事设施蔬菜栽培生理研究。E-mail:243049122@qq.com。

之前 Takei 等曾报道过在不影响菠菜生长的情况下限制硝酸盐的供应可以生产商品规格的菠菜^[26],本试验通过不同 QNM 方法和不同生长季对水培菠菜进行研究,从而找出不同季节适合水培菠菜的最佳营养液管理方法,以最大效率地利用营养液和解决肥料浪费问题,为实际生产提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

菠菜(Okame, Takii Seed Co., 日本京都)种子播种在 128 穴穴盘中,基质比例为 5:4:1(蛭石:泥炭藓:稻壳),每穴 1 粒种子。种子萌发第 1 张真叶长出后,以 1/2 倍基本营养液施肥至第 5 张真叶展开,基本营养液组成为 5.250 mmol/L NO_3^- 、0.750 mmol/L NH_4^+ 、3.350 mmol/L K、1.125 mmol/L P、1.875 mmol/L Ca 和 1.125 mmol/L Mg。3 周后,将长势一致的幼苗移栽到 4 cm × 4 cm × 10 cm 的塑料网钵中,用 1 倍浓度的营养液施肥 3 d 后定植在 60 cm × 60 cm × 5 cm 水培容器中,并放置在泡沫塑料盖板上,深液流技术(DFT)系统供液,营养液循环总量为 20 L。每处理 14 株,重复 3 次,株距 12.5 cm。

1.2 试验处理

试验设置 3 个处理,春季(4 月)和秋季(11 月)处理一致,分别为:EC(对照,整个生长期始终保持 N 浓度 4.5 mmol/L),采用人工调节营养液电导率,每隔 3 d 恢复 1 次,每隔 6 d 完全更换 1 次营养液;全量营养处理(WAN),在开始时添加所有必需的营养素;累积全量营养素处理(AWAN),每隔 3 d 补充 1/7 的矿质营养素。WAN 和 AWAN 处理硝酸盐供应总量为 399 mg/株,根据之前的研究结果计算得出,生物量在 21 d 的产量达到最大值 25 g^[26]。营养液配方:4.500 mmol/L NO_3^- -N、2.250 mmol/L K、2.250 mmol/L Ca、1.125 mmol/L Mg、1.125 mmol/L P、1.125 mmol/L Na。

1.3 测定项目及方法

2 个生长季 DFT 系统的流速均设置为 5 min。保持 pH 值在 6.0 左右,每隔 3 d 补充 1 次水分,水量保持在 20 L。在调整过程中,记录补充的水和营养储备液的体积,以计算水和营养液的投入。调整前后采集营养液样品进行无机分析。试验结束时称量植株鲜质量,然后在烘箱中于 80 °C 干燥,测量干质量并研磨用于测定无机离子含量。采用光学反射法(RQflex plus 10;德国达姆施塔特默克公司)

测定菠菜植株硝酸盐含量,用火焰光度计(ANA-10KL;日本东京光电株式会社)测定 K 和 Na 浓度,用原子吸收分光光度计测定 Ca 和 Mg 浓度(ANA-182F;日本东京光电株式会社),采用凯氏定氮法测定全氮含量,采用钒钼黄比色法-紫外分光光度计测定 P 浓度。

硝酸盐含量测定取样 2 次(定植后 10 d 和 21 d),分别测定地上部和地下部硝酸盐含量,并将地上部叶片平均三等分,分别为上部叶片、中部叶片和中部叶柄、下部叶片和下部叶柄。

各营养元素利用效率按照 Eckstein 等的方法^[27]计算如下:

$$\text{元素利用效率} = [(m_2 - m_1)/(T_2 - T_1)] \times [(\ln N_2 - \ln N_1)/(N_2 - N_1)]。$$

式中: m_1 、 m_2 分别为植株干物质积累量; T_1 、 T_2 为取样时间; N_1 、 N_2 为植株所吸收的元素量。

试验于日本名古屋市名城大学温室内进行,试验期间 4 月白天和夜间的平均温度为 23 °C,最高为 30 °C,最低为 18 °C;11 月平均温度为 21 °C,最高为 25 °C,最低为 16 °C。

1.4 数据处理

用 Excel 2010 软件进行数据计算和绘图,采用 SPSS 19 进行方差分析和差异显著性检验(Duncan's 新复极差法, $\alpha = 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同营养液定量管理法对菠菜生长与营养含量的影响

2 个生长季(4 月和 11 月)叶长和叶宽总体表现为 EC > AWAN > WAN。地上部鲜质量、根鲜质量、地上部干质量 EC 处理最大,其中,地上部鲜质量 4 月和 11 月分别达到了 32.1、22.2 g/株,且 WAN 和 AWAN 处理在不同生长季地上部鲜质量、根鲜质量和地上部干质量差异不显著。2 个生长季 WAN 和 AWAN 处理的根冠比大于 EC 处理,且 4 月份的差异显著。各生长指标总体表现为 4 月 > 11 月,但 11 月各处理下产量均低于 25 g/株,说明达到标准鲜质量还需延长生长周期(表 1)。

2 个生长季不同处理营养离子吸收量、吸收率见表 2。4 月菠菜收获后,各处理对 NO_3^- -N 和 K 的吸收量、吸收率趋于完全或略高于供应量,N 和 K 的吸收率分别为供应量的 101% ~ 128% 和 94% ~ 128%,然而 11 月各处理 N 和 K 没有被完全吸收,

特别是 WAN 和 AWAN 处理仍有残留,说明夏季气温高、光照充足更有利于各离子的吸收。2 个生长季其他养分(Ca、Mg、P、Na)的吸收量、吸收率总体

表现为 EC > AWAN > WAN, EC 处理的 Ca 和 Mg 吸收量最大,特别是 4 月 Mg 被完全吸收,说明较高的 EC 值能促进 Ca 和 Mg 的吸收。

表 1 营养液定量管理对菠菜 2 个生长季生长特性的影响

生长季	处理	叶长 (cm)	叶宽 (cm)	叶片数 (张)	地上部鲜质量 (g/株)	根鲜质量 (g/株)	地上部干质量 (g/株)	根干质量 (g/株)	根冠比
4 月	EC	20.2a	6.26a	22.1a	32.1a	18.3a	3.94a	1.16a	0.57b
	WAN	17.4b	4.88c	21.2a	24.9b	16.3b	3.05b	1.02b	0.65a
	AWAN	18.0b	5.52b	20.2a	25.6b	16.4b	3.18b	1.03b	0.64a
11 月	EC	15.5a	5.60a	14.2a	22.2a	9.1a	2.87a	0.51b	0.41a
	WAN	13.9b	4.68b	12.7a	18.6b	8.1a	2.05b	0.48b	0.44a
	AWAN	15.1a	4.92b	13.8a	19.3b	8.8a	2.19b	0.60a	0.46a

注:同列数据后不同小写字母表示相同生长季不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下表同。

表 2 2 个生长季不同处理下营养离子和水分吸收量

生长季	元素	初始供应量 (mg/株)	吸收量(mg/株)			吸收率(%)		
			EC	WAN	AWAN	EC	WAN	AWAN
4 月	NO ₃ -N	399	512	403	478	128	101	120
	K	126	161	118	130	128	94	103
	Ca	129	106	41	61	82	32	47
	Mg	39	39	16	23	100	41	59
	P	100	58	14	44	58	14	44
	Na	37	67	48	57	181	130	154
	NO ₃ -N	399	365	228	319	91	57	80
11 月	K	126	115	77	99	91	61	79
	Ca	129	78	36	38	60	28	29
	Mg	39	23	14	19	59	36	49
	P	100	28	10	19	28	10	19
	Na	37	41	25	32	111	68	86

注:EC 处理计算按每次重新置换营养液吸收量相加得到总吸收量。

2.2 不同营养液定量管理法对营养液各离子吸收和利用的影响

由图 1 可见,2 个生长季不同处理的初始 EC 值(元素利用效率)分别为 94、95、28 mS/m,且在处理开始时缓慢增加。4 月 EC 和 WAN 处理的 EC 值在生育中后期变化迅速,而在此期间产量也积累较快。WAN 和 AWAN 处理营养液供应总量相同,生长结束后 EC 值接近。而 11 月各处理 EC 值变化较 4 月缓慢,WAN 处理在定植 6 d 后略有上升后缓慢下降,生长结束后 AWAN 处理 EC 值大于 WAN 处理。

由图 2 可见,4 月各处理在生长中后期对硝态氮的吸收较为明显,其中 WAN 处理在定植后 6 ~ 12 d 对 N 的需求急剧增加,到 12 d 后营养液中硝态

氮已经被完全吸收,WAN 处理在生长后期处于 N 亏缺的状态;AWAN 处理硝态氮含量在定植 12 d 后被完全吸收,虽然后期每隔 3 d 补充营养液,但是在下一回补给前也被完全吸收。11 月各处理营养液中硝态氮变化较 4 月缓慢,WAN 和 AWAN 处理在整个生长过程中分别处于缓慢下降和缓慢上升状态,生长结束后硝态氮含量 AWAN 处理大于 WAN 处理。

由图 3 可见,菠菜在 4 月和 11 月生长前期对 K 的需求不大,各处理均有缓慢上升,之后开始下降,其中 4 月 WAN 处理在定植 6 d 后持续下降,直到生长结束后略有剩余,AWAN 处理在 12 d 后营养液中的 K 含量已趋于吸收完全。11 月营养液中 K 的含量变化较缓慢,直到生长结束后各处理的 K 含量趋

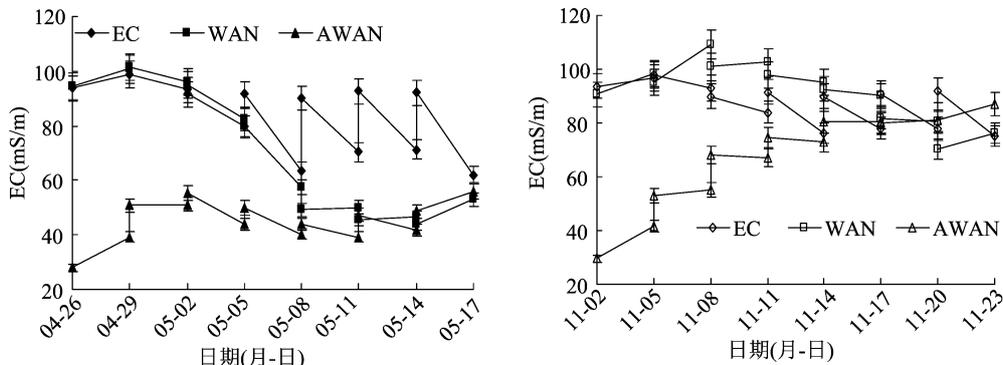


图1 2个生长季不同处理营养液 EC 值的变化

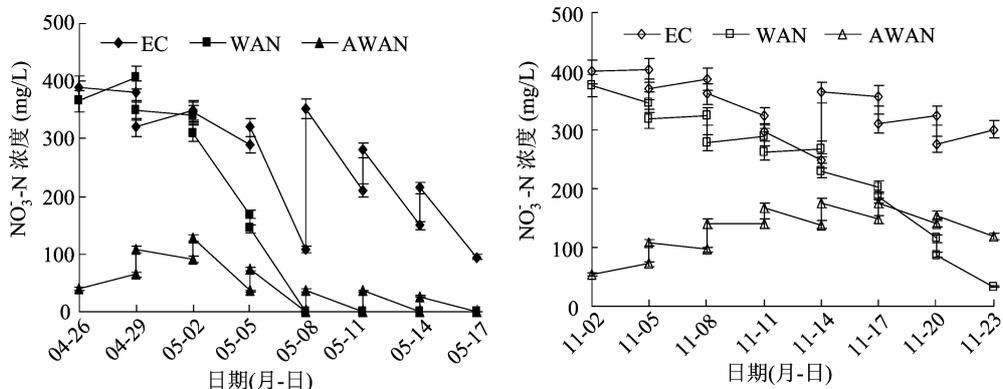


图2 2个生长季不同处理营养液 NO₃⁻-N 浓度的变化

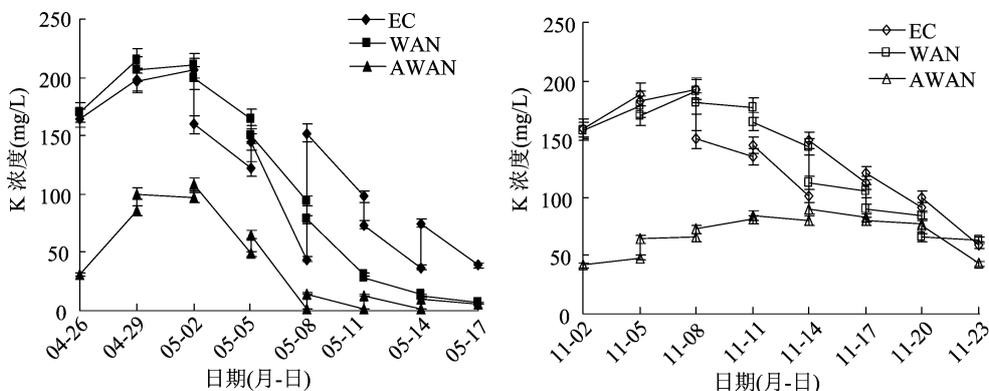


图3 2个生长季不同处理营养液 K 浓度的变化

于一致。

2个生长季不同处理单位干质量各离子含量见表3。11月各处理N、K和Mg含量分别大于4月各处理。其中,由于2个生长季EC处理持续供应大于标准量的N(399 mg),全N含量明显大于WAN和AWAN处理,且相同处理下,11月份的N含量明显大于4月各处理。K含量整体表现为11月份各处理大于4月,且WAN处理K含量最小。2个生长季Ca含量EC处理最小,说明高盐浓度不利于Ca的积累。相同处理不同季节Mg、P和Na的含量变化较小,说明其受季节的影响不大。N和K的元素

利用效率表现为EC和WAN处理较大,特别是11月显著大于AWAN处理。2个生长季Ca、P的利用效率WAN处理显著高于EC和AWAN处理。2个生长季不同处理对菠菜吸水量影响不显著,且4月吸水量大于11月,这与菠菜生长量保持一致。

2.3 不同营养液定量管理法对菠菜硝酸盐含量的影响

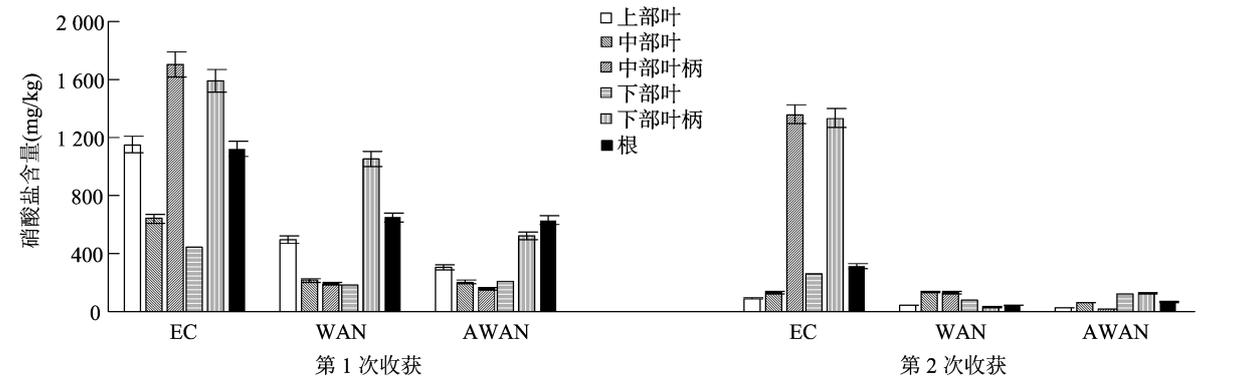
由图4可见,2个生长季第1次收获(10 d)时,硝酸盐含量主要集中分布在上部叶、中部叶柄和下部叶柄中,此外,各处理根的硝酸盐含量较高。4月第2次收获(21 d)时,EC处理由于持续供应

$\text{NO}_3^- - \text{N}$, 叶柄中仍保持较多的硝酸盐含量, 但 WAN 和 AWAN 处理, 由于后期营养液中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 处于亏缺状态, 菠菜各个部位(地上部和地下部)硝酸盐含量处于较低水平。11 月第 2 次收获时, 由于

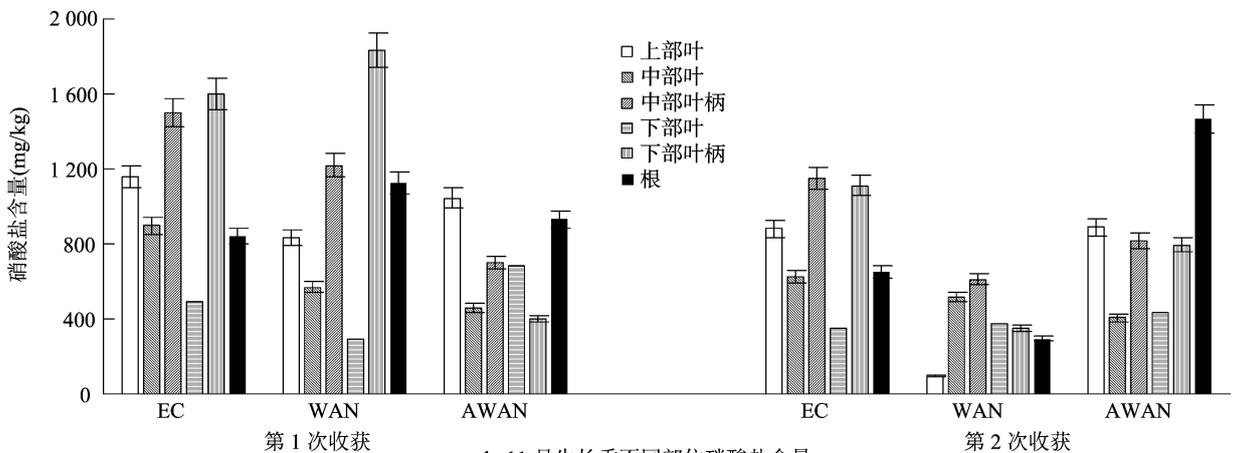
各处理营养液中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 有部分残留, 菠菜各部位硝酸盐含量仍集中分布在上部叶、中部叶柄、下部叶柄和根中。

表 3 营养液定量管理对菠菜离子和硝酸含量的影响

生长季	处理	离子含量(mg/100 mg, 干质量)						元素利用效率(%)						吸水量(L/株)
		$\text{NO}_3^- - \text{N}$	K	Ca	Mg	P	Na	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	K	Ca	Mg	P	Na	
4 月	EC	3.4a	8.4a	0.7a	0.6a	0.6a	0.2a	3.0a	7.7a	10.7c	22.8c	17.0b	15.2a	1.41a
	WAN	1.4b	4.6b	1.0a	0.4a	0.8a	0.1b	2.9a	7.8a	17.6a	33.6a	36.5a	15.6a	1.34a
	AWAN	1.9b	6.3b	1.0a	0.5a	0.8a	0.2a	2.6b	7.5a	13.5b	27.3b	17.2b	14.2a	1.31a
11 月	EC	4.8a	12.8b	0.3b	1.0a	1.0a	0.1a	2.6a	6.6a	9.0c	21.8a	19.2b	14.6a	1.09a
	WAN	4.3ab	11.9b	0.7a	1.0a	1.1a	0.1a	2.8a	6.5a	11.5a	21.9a	26.6a	14.9a	1.03a
	AWAN	3.4b	15.4a	0.6a	0.8a	0.8b	0.1a	2.0b	5.0b	10.3b	16.6b	16.6c	11.6b	1.06a



a. 4 月生长季不同部位硝酸盐含量



b. 11 月生长季不同部位硝酸盐含量

图 4 2 个生长季不同部位硝酸盐含量变化

3 讨论与结论

一般认为施氮肥能提高作物产量, 但植物吸收氮量取决于植物生长阶段、品种和环境条件等多个因素。菠菜在收获前的几天内, 降低硝酸盐或硝态氮肥料的供给, 不会影响菠菜的生长, 还能提高菠菜的产量, 降低叶片中的 NO_3^- 含量, 增加维生素 C 的含量^[14-17]。丸尾提出了 QNM 法^[20], 即通过设置

较低的营养元素供给, 菠菜植株的生物量没有降低, 但是硝酸盐含量降低。本试验基于标准养分供应下的菠菜, 在 4 月达到了商业产量(25 g/株), 但在 11 月产量有所下降, 表明低温弱光环境下菠菜收获所需的平均天数比高温条件下长^[28]。另一方面, 缓释和控氮肥料(AWAN 处理)对增加生物量影响不大, 但可以有效防止高盐积累和减缓植株转化硝酸盐的速度^[25]。

植物氮代谢过程中硝酸盐消失最快,这为植物能够在短时间内动员氮以维持氮的代谢提供了证据^[29]。但也有报道表明,在氮饥饿后,植物的氮浓度下降不是由于氮缺乏,而是由于当植物变得更大时所需的结构材料数量的增加所致,即植株的生长速率显著快于其对各元素的吸收速率而造成“稀释”作用^[21,30]。本研究相同供氮水平下植株含氮量4月小于11月,特别是4月WAN和AWAN处理,这与处理后期NO₃⁻-N处于亏缺状态保持一致,但菠菜整株硝酸盐含量也最少,所以植株硝酸盐含量的减少不是由于地上部质量的增加,而是营养液硝态氮急剧减少,植株必须消耗自身养分来满足其生长所致。

绿叶蔬菜中的硝酸盐大部分是自然产生的,受植物种类、光照强度、温度和栽培等因素的影响。大多数研究表明,冬季硝酸盐含量高于春季^[31],这是由于硝酸盐含量呈昼夜节律,白天减少,晚上恢复^[32-33],因此,在光周期短或弱光条件下,硝酸盐的吸收超过还原^[10]。也有研究表明,菠菜中硝酸盐含量在高温条件下较高^[25,34],夏季硝酸盐浓度呈明显增加趋势^[28,35]。2个生长季相同处理硝酸盐吸收量4月均大于11月,但11月叶柄和根中硝态氮含量较高,说明低光周期延缓了菠菜植株对NO₃⁻-N的吸收和转化,导致了硝态氮的积累。此外,11月供氮量相同的EC处理上部叶、叶柄和根系硝酸盐含量较WAN处理高,吸收量也最低,说明低光周期和缓慢供给使植株对硝态氮的同化延迟,导致体内硝态氮积累增加。

提高养分吸收和利用效率是促进作物生长、提高养分利用效率的2种途径^[36]。在土壤或无土栽培中,最佳施肥管理方法可以有效地提高养分利用效率。许多研究者针对不同大田作物(马铃薯、向日葵、水稻等)最佳施氮量做了大量研究^[37-40],即在最适的施肥条件下,作物产量最大,肥效利用率最高。无土栽培较大田作物养分吸收和利用更为简单^[21,41],养分供给和吸收等可以人为控制,但受季节等环境因素的影响较大。本研究缓释供给比正常施肥增加了养分的吸收效率,但是元素利用效率较正常施用低,产量也没有明显增加,这与大田作物研究结果^[42-43]不一致,张玉树等研究表明控释肥料可增加作物产量,改善品质,提高肥料利用率^[42]。这也许和大田复杂的养分环境有关,缓释供给应在不同季节养分利用有待进一步研究。

蔬菜无土栽培可在设施内周年生产,但不同季节蔬菜生长受温度、光照等环境因素影响较大,特别是生长周期较短(21~30 d)的叶菜类,一年内可以连续生产。因此,合理的施肥管理方法和栽培技术是设施安全生产的关键。本研究限制硝酸盐供应不仅不影响菠菜的产量,而且提高了元素利用效率,降低了植株体内硝酸盐的含量,这些结果为建立设施水培蔬菜周年栽培技术和优化灌溉管理提供了基础数据。

参考文献:

- [1] Power J F, Schepers J S. Nitrate contamination of groundwater in North America[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1989, 26(3/4): 165-187.
- [2] Byrnes B H. Environmental effects of N fertilizer use - An overview [J]. *Fertilizer Research*, 1990, 26(1/2/3): 209-215.
- [3] Davies D B, Sylvester - Bradley R. The contribution of fertiliser nitrogen to leachable nitrogen in the UK: a review[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1995, 68(4): 399-406.
- [4] Pardossi A, Malorgio F, Tognoni F. Control of mineral nutrition in melon plants grown with nft[J]. *Acta Horticulturae*, 1995 (396): 173-180.
- [5] Ali A, Tucker T C, Thompson T L, et al. Effects of salinity and mixed ammonium and nitrate nutrition on the growth and nitrogen utilization of barley [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2001, 186(4): 223-228.
- [6] Baligar V C, Fageria N K, He Z L. Nutrient use efficiency in plants [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2001, 32(7/8): 921-950.
- [7] MacDuff J H, Bakken A K. Diurnal variation in uptake and xylem contents of inorganic and assimilated N under continuous and interrupted N supply to *Phleum pratense* and *Festuca pratensis* [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2003, 54(381): 431-444.
- [8] Haynes R J, Goh K M. Ammonium and nitrate nutrition of plants [J]. *Biological Reviews*, 1978, 53(4): 465-510.
- [9] Redinbaugh M G, Campbell W H. Higher plant responses to environmental nitrate [J]. *Physiologia Plantarum*, 1991, 82(4): 640-650.
- [10] Blom - Zandstra M. Nitrate accumulation in vegetables and its relationship to quality [J]. *Annals of Applied Biology*, 1989, 115(3): 553-561.
- [11] Guadagnin S G, Rath S, Reyes F G R. Evaluation of the nitrate content in leaf vegetables produced through different agricultural systems [J]. *Food Additives & Contaminants*, 2005, 22(12): 1203-1208.
- [12] Lucarini M, D'Evoli L, Tufi S, et al. Influence of growing system on nitrate accumulation in two varieties of lettuce and red radicchio of Treviso [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2012, 92(14): 2796-2799.

- [13] Demsar J and Osvald J. Influence of $\text{NO}_3^- : \text{NH}_4^+$ ratio on growth and nitrate accumulation in lettuce (*Lactuca saliva* var. *capitata* L.) in an aeroponic system[J]. *Agrochimica*,2003,47(3):112–121.
- [14] Smith J. Hydroponics; a practical guide for the soilless grower[J]. *HortTechnology*,2005,15(3):731.
- [15] Mozafar A. Decreasing the NO_3 and increasing the vitamin C contents in spinach by a nitrogen deprivation method [J]. *Plant Foods for Human Nutrition*,1996,49(2):155–162.
- [16] Wang X F, Ito T. Effect of lowering nitrate nitrogen and elevating potassium concentrations in the nutrient solution on the growth, yield, and NO_3 content in spinach grown in hydroponics[J]. *Engei Gakkai Zasshi*,1998,67(1):74–80.
- [17] 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 grown in the greenhouse [J]. *Horticultural Research*,2007,6(2):195–199.
- [18] Kageyama Y, Hayashi T, Konishi K. Effect of nitrogen concentration in medium on growth of young *Chrysanthemum* plants[J]. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*,1987,56(1):79–85.
- [19] Kageyama Y. Effect of nitrogen concentration in a hydroponic solution on nitrogen uptake and growth of tomato plants[J]. *Engei Gakkai Zasshi*,1991,60(3):583–592.
- [20] Maruo T, Hoshi H, Hohjo M, et al. Quantitative nutrient management at low concentration condition in nft spinach culture [J]. *Acta Horticulturae*,2001(548):133–140.
- [21] 苏蔚, 李嘉佳, 孙光闻, 等. 营养液更换频率对生菜养分吸收和利用效率的影响[J]. *新疆农业科学*,2014,51(6):1119–1124.
- [22] Neocleous D, Savvas D. The effects of phosphorus supply limitation on photosynthesis, biomass production, nutritional quality, and mineral nutrition in lettuce grown in a recirculating nutrient solution [J]. *Scientia Horticulturae*,2019,252:379–387.
- [23] 李燕青, 温延臣, 林治安, 等. 不同有机肥与化肥配施对氮素利用率和土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*,2019,25(10):1669–1678.
- [24] Najm A, Hadi H S, Fazeli F, et al. Effect of utilization of organic and inorganic nitrogen source on the potato shoots dry matter, leaf area index and plant height, during middle stage of growth [J]. *World Academy of Science, Engineering and Technology*,2010,47(4):900–903.
- [25] Breimer T. Environmental factors and cultural measures affecting the nitrate content in spinach [J]. *Fertilizer Research*,1982,3(3):191–292.
- [26] Takei H, Suzuki S. Nitrate requirement and the quantitative management method of nutrient solution based on the nitrate supply in hydroponic culture of spinach plants[J]. *Scientific Reports of the Faculty of Agriculture*,2013,49(1):25–32.
- [27] Eckstein R L, Karlsson P S. Variation in nitrogen – use efficiency among and within subarctic graminoids and herbs [J]. *New Phytologist*,2001,150(3):641–651.
- [28] Kaminishi A, Kita N. Seasonal change of nitrate and oxalate concentration in relation to the growth rate of spinach cultivars [J]. *HortScience*,2006,41(7):1589–1595.
- [29] Desclos M, Etienne P, Coquet L, et al. A combined ^{15}N tracing/ proteomics study in *Brassica napus* reveals the chronology of proteomics events associated with N remobilisation during leaf senescence induced by nitrate limitation or starvation [J]. *Proteomics*,2009,9(13):3580–3608.
- [30] Caloin M, Yu O. Analysis of the time course of change in nitrogen content in *Dactylis glomerata* L. using a model of plant growth [J]. *Annals of Botany*,1984,54(1):69–76.
- [31] Santamaria P, Elia A, Serio F, et al. A survey of nitrate and oxalate content in fresh vegetables [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*,1999,79(13):1882–1888.
- [32] Matt P, Geiger M, Walch – Liu P, et al. The immediate cause of the diurnal changes of nitrogen metabolism in leaves of nitrate – replete tobacco; a major imbalance between the rate of nitrate reduction and the rates of nitrate uptake and ammonium metabolism during the first part of the light peri [J]. *Plant, Cell & Environment*,2001,24(2):177–190.
- [33] Steingrover E, Ratering P, Siesling J. Daily changes in uptake, reduction and storage of nitrate in spinach grown at low light intensity [J]. *Physiologia Plantarum*,1986,66(3):550–556.
- [34] Scaife A, Schloemer S. The diurnal pattern of nitrate uptake and reduction by spinach (*Spinacia oleracea* L.) [J]. *Annals of Botany*,1994,73(3):337–343.
- [35] Fujiwara T, Kumakura H, Ohta S, et al. Seasonal variation of L – ascorbic acid and nitrate content of commercially available spinach [J]. *Horticultural Research*,2005,4(3):347–352.
- [36] McDonald G, Bovill W, Huang C Y, et al. Nutrient use efficiency [M]// *Genomics and Breeding for Climate – Resilient Crops*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg,2013:333–393.
- [37] 李珺, 刘双全, 仇少君, 等. 典型黑土不同施氮量对马铃薯产量和氮素利用率的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*,2020,26(5):850–857.
- [38] 沈小燕, 周燕, 茅一平. 不同施氮量及穗肥运筹对绿色水稻产量及品质的影响 [J]. *上海农业科技*,2021(1):94–96,105.
- [39] 段玉, 妥德宝, 张君, 等. 氮磷钾平衡施用对油用向日葵产量及肥料效率的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*,2013,19(3):767–771.
- [40] 胡振阳, 程宏, 卢臣, 等. 施氮量和植物生长调节剂对优质稻抗倒能力及产量的调控效应 [J]. *江苏农业科学*,2021,49(6):52–60.
- [41] 王瑞. 水培菠菜营养液最佳配比与品质调控试验研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学,2016:17–19.
- [42] 张玉树, 丁洪, 卢春生, 等. 控释肥料对花生产量、品质以及养分利用率的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*,2007,13(4):700–706.
- [43] 刘飞, 张民, 诸葛玉平, 等. 马铃薯玉米套作下控释肥对土壤养分垂直分布及养分利用率的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*,2011,17(6):1351–1358.