doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.02.037

间作水培生菜与樱桃萝卜产量和品质生物调控研究

于海业[1]　郭晶晶[1]　杨亚平[1,2]　张晨曦[1]　张　涛[3]　张　蕾[1]

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130012; 2. 中机试验装备股份有限公司科技发展部, 长春 130103;
3. 东北师范大学植被生态科学教育部重点实验室, 长春 130024)

摘要: 水培对保障粮食安全与促进农业可持续发展具有积极意义,但依赖人工光温调控实现水培作物优质高产,会增加能耗,且多因子交互作用带来生物调控结果的不确定性。本研究在非严格控制环境下,对比了营养液膜、深液流及雾培 3 种水培方式下单作与生菜/萝卜(数量比 2∶1)间作的栽培效果。结果表明,间作较单作显著提高生菜干物质产量和氮利用效率(最高分别达 19.18% 和 21.54%),同时显著降低了生菜和萝卜亚硝酸盐含量(最高分别达 31.21% 和 33.36%),并显著提高了维生素 C 与可溶性蛋白含量;不同水培方式,营养液膜间作种间竞争最强;间作还引起生菜全氮含量下降,萝卜全氮、钼和钙(Ca)含量上升,其中,Ca 含量最大提高率为 31.94%。这些变化可能通过影响碳氮代谢平衡了作物产量和品质。研究结果为水培蔬菜间作系统优化提供了理论依据。

关键词: 水培; 间作; 产量; 品质; 生物调控

中图分类号: S317; S636.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)02-0384-09　　**OSID**:

Intercropping Hydroponic Lettuce with Cherry Radish for Bioregulation of Yield and Quality

YU Haiye[1]　GUO Jingjing[1]　YANG Yaping[1,2]　ZHANG Chenxi[1]　ZHANG Tao[3]　ZHANG Lei[1]

(1. *College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun* 130012, *China*
2. *Department of Science and Technology Development, Sinotest Equipment Co., Ltd., Changchun* 130103, *China*
3. *Key Laboratory of Vegetation Ecology, Ministry of Education, Northeast Normal University, Changchun* 130024, *China*)

Abstract: Hydroponics contributes to food security and sustainable agriculture. However, achieving high crop quality and yield through artificial light and temperature control increases energy consumption, while multi-factor interactions introduce regulatory uncertainties. Three hydroponic systems, nutrient film technique (NFT), deep-water culture, and aeroponics were evaluated under sole cropping and lettuce/radish intercropping (a quantity ratio of 2∶1) in a non-strictly controlled environment. Results demonstrated that intercropping significantly enhanced lettuce dry matter yield (up to 19.18%) and nitrogen use efficiency (up to 21.54%), while reducing nitrite content in both lettuce (up to 31.32%) and radish (up to 33.36%). Vitamin C and soluble protein contents were also notably increased. Among different intercropping hydroponic systems, the NFT exhibited the strongest interspecific competition (*LEC* = 0.22). Additionally, intercropping led to a decrease in the total nitrogen (TN) content of lettuce and an increase in the TN, molybdenum (Mo), and calcium (Ca) contents of radish, with the highest improvement in Ca content reaching 31.94%. These changes may have balanced crop yield and quality by influencing carbon and nitrogen metabolism. The findings can provide a theoretical basis for optimizing intercropping in hydroponic vegetable cultivation.

Key words: hydroponics; intercropping; yield; quality; bioregulation

0　引言

在环境控制下,水培可大幅提高作物产量,减少病虫害发生,提升品质。但栽培系统运行与环境调控的能源投入限制了当前水培技术大面积推广和应用。氮是提高农业和园艺作物产量的关键调控因

收稿日期: 2025-09-10　修回日期: 2025-09-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(32171913)和四川省现代农业装备工程技术研究中心课题(XDNY2025-009)

作者简介: 于海业(1963—),男,教授,主要从事农业生物环境与能源工程研究,E-mail: haiye@jlu.edu.cn

通信作者: 张蕾(1979—),女,教授,主要从事农业生物环境与能源工程研究,E-mail: z_lei@jlu.edu.cn

素，硝态氮（NO_3^--N）作为主要氮源，是水培营养液中含量最丰富的元素之一。但当作物吸收的 NO_3^--N 超过其同化能力时，硝酸盐（NO_3^-）会在作物体内大量累积，因此，水培蔬菜也普遍存在 NO_3^--N 富集现象。传统上，通过调控营养液与光环境提高蔬菜产量和氮素利用效率（NUE），同时降低 NO_3^--N 含量[1-2]。但现有研究多聚焦单一因素的主效应，而忽视多因子互作机制，导致调控管理缺乏有效阈值、可操作性不足且效果不稳定，这使得包括营养调控在内的外源植物生长调节方式通常难以实现作物产量与品质的协同提升[3]。

生物调控是指生物体通过主动改变其运作模式，以应对内外环境变化，从而抵消干扰的自我调节能力[4]。间作作为一种物种多样化种植策略，具有生物调控的特点。田间间作通常用于减少外源肥料投入、提高资源利用效率并最终增加产量，但间作在水培中的应用并不多见。然而，已有研究表明，不同蔬菜可根据其营养需求差异共享同一营养液[5]，多种蔬菜混合水培有利于实现高产目标[6]。文献[7-8]进一步在受控环境下建立了生菜/萝卜（1∶1）的间作雾培体系，提高了系统总产量，有效降低了生菜叶片中的 NO_3^- 含量。张蕾等[9]基于正交试验，确定了生菜/萝卜（2∶1）间作雾培系统的最佳管理模式。

本研究在非严格受控的温室环境开展试验，针对营养液膜技术、深液流水培和雾培 3 种水培方式[10]，探究生菜（*Lactuca sativa* L. cv. Parris Island Cos）与樱桃萝卜（*Raphanus sativus* cv. Cherry Belle，以下简称萝卜）按照数量比 2∶1 间作，对蔬菜产量、品质及氮素利用的影响，为建立一种更具能源效率、更高产且能产出优质蔬菜的水培生产系统提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验条件

种植试验于 2023 年 4 月 14 日—5 月 12 日在吉林大学南岭校区（长春市）玻璃温室开展。栽培期间温室未启用自动调控系统，依靠自然光照、自然通风。每日 08:00—15:00 时段平均光合光子通量密度（PPFD）为（200 ± 40）μmol/（m^2·s），平均空气相对湿度（RH）为（65 ± 10）%，平均温度为（25.8 ± 5.7）℃。其中 11:00—16:00 出现日间最高温，达 30 ~ 32℃。

1.2　栽培管理

参照文献[11]的方法进行育苗，选取长势均匀健壮、具 3 ~ 4 片真叶的生菜幼苗与 2 片真叶的萝卜幼苗进行同步定植，开始进行栽培试验。营养液配方同文献[9]。为保证不同水培系统养分供应的一致性，按照每株蔬菜 1 L 计算该系统的营养液供应总量。每日 09:00—10:00，分别测试各栽培系统营养液 pH 值和电导率（EC），通过添加 6% 稀盐酸（HCl）或 8% 氢氧化钠（NaOH）调节水培营养液的 pH 值在 5.8 ~ 6.5 之间；因栽培周期内 EC 逐渐增大，定量添加曝气自来水保证营养液 EC 小于 2 500 μS/cm。所有栽培系统营养液均采用封闭式循环供应方式。

1.3　试验方案

水培方式作为因素 *A*：营养液膜技术水培（NFT）、深水培（DWC）和雾培（Aer.）作为该因素的 3 个水平；栽培模式作为因素 *B*：单作和间作作为该因素的 2 个水平。

为探讨 2 个因素对蔬菜的主效应和交互作用，采用两因素完全随机区组设计，共 6 个处理。但分别针对 2 种蔬菜分析时，间作处理相同，故将试验总处理数减少至 9 个，如表 1 所示。每个处理 3 次重复，共 27 个试验单元，即 27 个独立栽培系统。单作生菜和单作萝卜分别用 SL 和 SR 表示，间作生菜和间作萝卜分别用 IL 和 IR 表示。

表 1　试验方案

Tab. 1　Scheme of test

处理	水培方式	栽培模式
1	NFT	生菜单作
2	DWC	生菜单作
3	Aer.	生菜单作
4	NFT	生菜萝卜间作
5	DWC	生菜萝卜间作
6	Aer.	生菜萝卜间作
7	NFT	萝卜单作
8	DWC	萝卜单作
9	Aer.	萝卜单作

注：处理 1 ~ 6 和处理 4 ~ 9 分别用于分析生菜和萝卜，其中处理 4 ~ 6 作为间作系统，可同时用于分析生菜和萝卜。

NFT 采用 S 形水培管道，直径约 5 cm，18 个定植孔，单个装置占地面积约 0.45 m^2；DWC 装置采用配备气泵的栽培箱，高度约 11 cm，6 个定植孔，单个装置占地面积约 0.15 m^2；雾培装置采用雾培箱，高度约 33 cm，6 个定植孔，单个装置占地面积约 0.15 m^2。每个装置中，相邻植株间距约 15 cm × 15 cm。为避免不同装置带来的影响，以相同水培方式下，间作植株较单作植株产量与品质的相对变化进行评价。

1.4　测量指标与方法

1.4.1　原位检测光合指标

在移栽后第 27 天收获并完成各项指标测量。

收获日 09:00—11:30,各栽培系统中每种蔬菜随机选取 1 株,利用光合作用测量系统(Li-6400XT 型,美国)和调制叶绿素荧光仪(OS1p 型,美国)分别测定倒数第 2 片新生叶气体交换参数和叶绿素荧光参数,每个处理取 3 株,计算平均值[12-13]。

1.4.2 离体检测品质指标

(1)收获完成原位检测的植株,按地上地下部分分别称量鲜质量后,取生菜叶片 10~12 g 测定叶绿素 a(Chla)和叶绿素 b(Chlb)含量、Rubisco 酶活性、NO_3^- 含量、亚硝酸盐(NO_2^-)含量、可溶性蛋白(SP)含量、抗坏血酸(VC)含量;取萝卜叶片 3~4 g,测定 Chla、Chlb 含量和 Rubisco 酶活性,另取去皮萝卜块根 7~8 g 测定 NO_3^-、NO_2^-、SP、VC 含量。VC 含量测定采用 RQflex ® 2 反射仪(Merck,德国)+Reflectoquant ® 试纸条(Merck,德国),检测范围 25~450 mg/L。Rubisco 活性采用试剂盒(Solarbio,中国);其余指标参照现行方法检测[14-15]。剩余可食部位鲜样干燥后,测定可溶性糖(SS)含量[14]。NO_3^- 和 NO_2^- 含量作为蔬菜安全品质指标,VC、SS 和 SP 含量作为蔬菜营养品质指标。

(2)收获各栽培系统中的其余植株,按地上地下部分分别称量鲜质量,即鲜物质质量;然后干燥至恒定质量,分别测定地上地下部分干质量,即干物质质量。称量干质量后,每个处理任意选取每种蔬菜 3 株,将单株蔬菜地上和地下部分混匀、研磨,测量养分元素含量,取平均值。采用微量凯氏定氮法[14]测定总氮(TN)含量;采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)[16]测定磷(P)、钾(K)、钙(Ca)、镁(Mg)、硫(S)、铁(Fe)、锰(Mn)、硼(B)含量;采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)[17]测定锌(Zn)、铜(Cu)、钼(Mo)含量。

1.5 计算与数据分析

根据称量的鲜质量和干质量结果,分别计算单株植株平均干质量(DW,g/株)、单位面积可食用部分(生菜叶片、萝卜块根)平均鲜物质产量(FMY,g/m^2)和单位面积整株干物质产量(DWY,g/m^2)

氮素营养指数(*NNI*)计算式为

$$NNI = N_a / N_c \tag{1}$$

其中

$$N_c = aD_W^{-b} \tag{2}$$

式中 N_a——总氮(TN)含量

N_c——关键氮含量

D_W——单株蔬菜干质量

a、b——与作物种类相关的系数

其中,生菜取 $a = 4.56$,$b = 0.357$[18];萝卜取 $a = 4.8$,$b = 0.34$[19]。当 $NNI = 1.0$ 作物氮营养状况最佳,$NNI < 1.0$ 氮营养不足,$NNI > 1.0$ 氮营养过剩。

NUE 参照文献[20]计算。

土地当量比(*LER*)、超额增产指数(*TOI*)、净效应比(*NER*)和土地当量系数(*LEC*)[21]计算式分别为

$$LER = LER_L + LER_R = y_L / Y_L + y_R / Y_R \tag{3}$$

$$TOI = (y_L + y_R) / \max(Y_L, Y_R) \tag{4}$$

$$NER = (y_L + y_R) / (P_L Y_L + P_R Y_R) \tag{5}$$

$$LEC = LER_L LER_R = y_L / Y_L \times y_R / Y_R \tag{6}$$

式中 LER_L——间作系统中生菜偏土地当量比

LER_R——间作系统中萝卜偏土地当量比

y_L、Y_L——IL 和 SL 单位面积干物质产量

y_R、Y_R——IR 和 SR 单位面积干物质产量

P_L——间作系统中生菜所占比例,取 2/3

P_R——间作系统中萝卜所占比例,取 1/3

参照文献[22]方法,生菜与萝卜 2∶1 间作,$LER_L > 0.67$ 时,生菜具有产量优势,$LER_R > 0.33$ 时,萝卜具有产量优势;$LEC < 0.22$ 时,间作作物间存在种间竞争,该值越小,竞争越激烈;*LER*、*TOI* 和 *NER* 大于 1.0 时,间作系统产量超过单作。

针对生菜和萝卜分别开展双因素方差分析(Two-way ANOVA),确定影响因素主效应和交互作用;两变量间差异性分析采用 t 检验。SPSS 24.0 与 Origin 2025 用于数据统计分析与绘图。

2 结果与分析

2.1 间作对蔬菜产量与质量的影响

2.1.1 间作对蔬菜产量的影响

由图 1a(图中 * 和 ** 分别表示差异在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 达到显著水平,ns 表示未达到显著水平)可知,NFT 下,IL 可食用部分鲜物质产量较 SL 有显著提高(8.37%)。这表明,间作对 NFT 下蔬菜生产的经济收益有利。但从图 1b 来看,3 种水培方式下,IL 均显著高于 SL,NFT、DWC 和雾培下分别提高 12.85%、7.67% 和 19.18%;IR 则在 NFT 下显著低于 SR(11.53%),DWC 下无显著差异,但在雾培下显著高于 SR(6.32%)。这表明,与萝卜间作,显著提高了生菜有机物合成与积累,且雾培对 2 种蔬菜干物质合成与积累均有显著促进作用。

由图 1c 可知,3 种水培方式下,生菜 LER_L 均高于临界值 0.67,而萝卜 LER_R 未均高于 0.33。这表明,在所有间作系统中生菜均占据优势地位。各间作系统 *LER* 和 *NER* 均大于 1.0,但 *TOI* 均低于 1.0,说明水培间作虽能提高土地利用率并获得更高的相对产量,但未必能实现蔬菜生产超量优势。在雾培

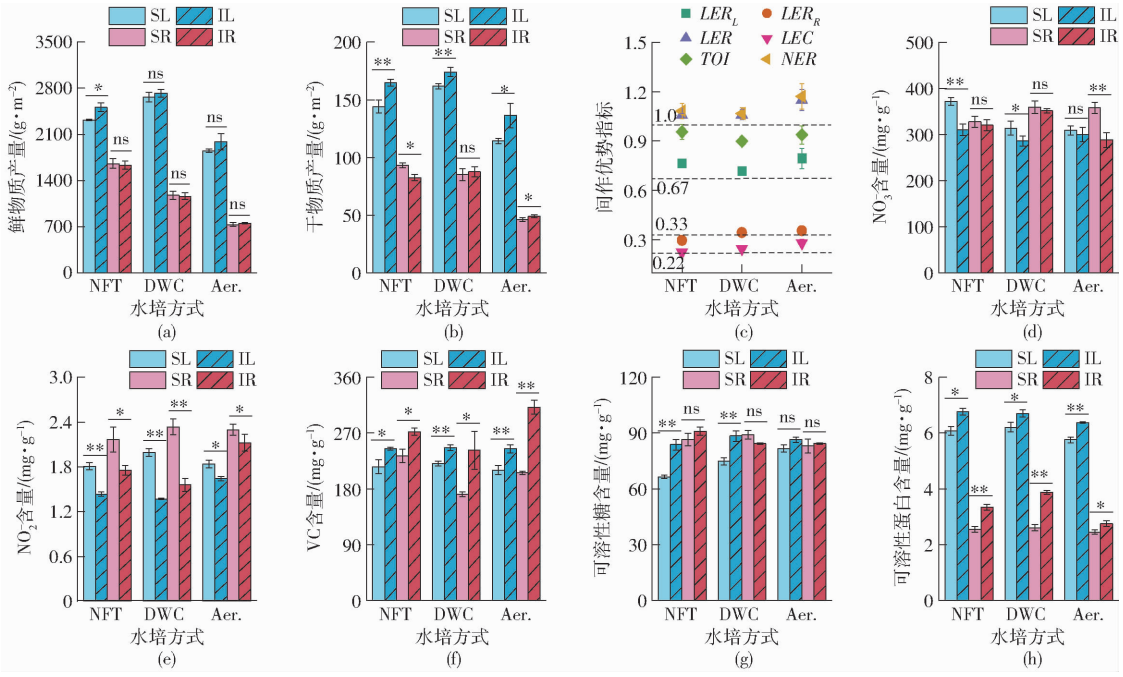

图 1　蔬菜产量、品质与间作优势

Fig. 1　Yield and quality index of vegetables and intercropping advantages

条件下，LER_R、LER_L、LER、LEC、TOI 和 NER 均高于 NFT 和 DWC 方式，表明雾培在本文的试验环境下，蔬菜干物质产量提升和间作系统优势明显高于另外 2 种水培方式。间作系统 LEC 在 NFT 下最小(0.22)。这表明，NFT 下间作蔬菜间的竞争高于其他 2 种水培方式。

2.1.2　间作对蔬菜品质的影响

由图 1d 可知，3 种水培方式下，IL 的 NO_3^- 含量均显著低于 SL，其中 NFT 下降最多(16.44%)。IR 的 NO_3^- 含量也有所下降，但只有雾培下，降低达到显著(19.42%)。从图 1e 来看，3 种水培方式下，所有 IL 和 IR 可食用部分的 NO_2^- 含量均显著低于对应的单作蔬菜，NFT、DWC 和雾培下间作生菜分别降低 20.58%、31.21% 和 10.63%，间作萝卜分别降低 18.97%、33.36% 和 7.62%。间作蔬菜 VC、SP 含量均显著高于对应的单作蔬菜(图 1f、1h)。其中，NFT、DWC 和雾培下，IL 的 VC 含量分别提高 13.39%、11.69% 和 16.21%，IR 分别提高 16.54%、41.42% 和 51.30%；IL 的 SP 含量分别提高 11.43%、7.89% 和 10.64%，IR 分别提高 31.28%、49.10% 和 12.24%。这表明间作对提高萝卜 VC 和 SP 含量的作用优于生菜。

2.1.3　水培方式与栽培模式对蔬菜产量品质的作用

由表 2 可知，水培方式对生菜和萝卜干物质产量均具有最重要的主效应。栽培模式对生菜的干物质产量具有显著作用，而栽培模式对萝卜干物质产量的影响主要通过与水培方式交互作用实现，不具备显著的单因素作用。栽培模式对生菜和萝卜的安全品质和营养品质指标均具有最显著的主效应，特别是生菜的 VC 含量，仅受到栽培模式单一因素的影响。另外，栽培模式与水培方式对 2 种蔬菜的 NO_3^-、NO_2^-、SS 含量，以及萝卜的 VC、SP

表 2　水培方式与栽培模式对蔬菜干物质产量与品质影响的方差分析(F 值)

Tab. 2　Variance analysis for hydroponics type and cultivation pattern affecting dry matter yield and quality of vegetable (F-values)

蔬菜	变量	干物质产量	安全品质		营养品质		
			NO_3^- 含量	NO_2^- 含量	VC 含量	SS 含量	SP 含量
生菜	A	64.23**	14.79**	8.44**	0.88	14.81**	11.55**
	B	34.43**	23.69**	273.37**	60.68**	73.65**	66.27**
	$A\times B$	0.92	5.09*	26.44**	0.40	7.13*	0.65
萝卜	A	193.44**	9.17**	7.51**	15.52**	20.99**	44.78**
	B	0.91	16.00**	53.03**	74.03**	25.16**	203.84**
	$A\times B$	5.59*	8.50**	7.71**	5.39*	14.60**	25.89**

注：* 表示结果达到显著($0.01\leqslant P<0.05$)，** 表示结果达到极显著($P<0.01$)，下同。

含量也存在显著的交互作用。这表明,间作主要影响生菜干物质产量,且对 2 种蔬菜品质的影响大于干物质产量。

2.2 间作对蔬菜光合生理变化的影响

由图 2 可知,3 种水培方式下,IL 和 IR 的净光合速率(Pn)和实际光合效率 Y(Ⅱ)均显著高于单作作物,间作蔬菜的 Rubisco 酶活性也较单作有所提高。IL 和 IR 的 Pn 最大提高率均出现在 NFT 下,分别为 18.80% 和 35.73%。在 3 种水培方式下,IL 的 Chla 和 Chlb 含量均显著高于 SL,而 IR 的情况恰好与之相反。但观察 Chl a/b 时却发现,在 3 种水培方式下,IL 的 Chl a/b 较 SL 有降低趋势,特别是雾培下,降低达到显著;在 3 种水培方式下,IR 的 Chl a/b 较 SR 变化规律不一致。

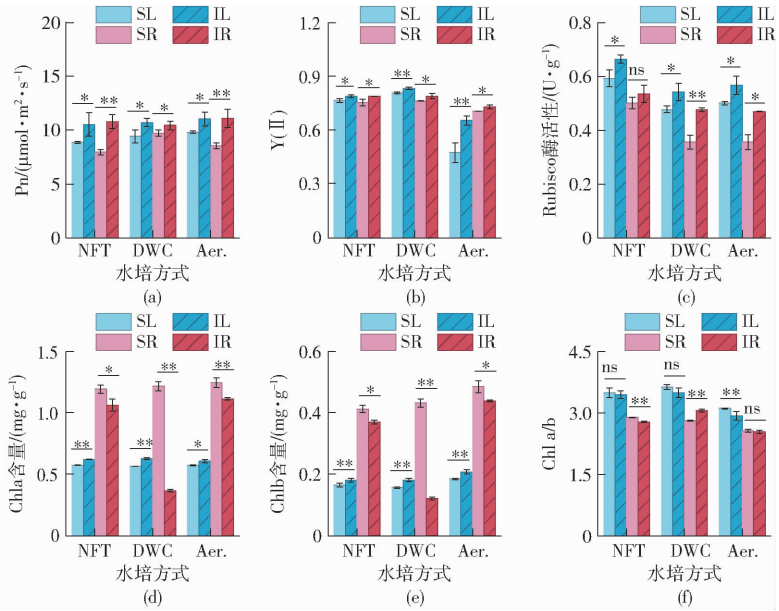

图 2 蔬菜光合生理指标

Fig. 2 Photosynthesis physiological index of vegetables

2.3 间作对蔬菜养分吸收与氮素利用的影响

2.3.1 间作对蔬菜养分吸收的影响

如图 3 所示,在 3 种水培方式下,IL 较 SL 的 TN 含量均呈降低趋势,而 IR 较 SR 的 TN 含量均呈升高趋势,这种相反的变化趋势在 NFT 下达到显著。这表明,间作蔬菜间可能存在养分竞争,特别是在 NFT 栽培系统中,这与 *LEC* 结果一致。所有间作系统中,萝卜的 Mo 和 Ca 含量均显著高于单作,其中,NFT 下,Ca 含量提高率(31.94%)最大。值得注意的是,NFT 下 IL 的 Ca 含量较单作也呈现显著提高(7.70%)。

2.3.2 间作对蔬菜氮素利用的影响

根据图 3g、3h,在 NFT、DWC 和雾培下,IL 的 NUE 较 SL 分别显著提高 21.54%、12.51% 和 17.98%。但 IR 的 NUE 没有显著高于 SR,甚至在 NFT 下显著降低。NFT 和 DWC 下,所有蔬菜 *NNI* 均大于 1.0,在雾培下,所有蔬菜 *NNI* 小于 1.0,但 3 种水培方式下,IL 的 *NNI* 均有更接近 1.0 的趋势,雾培下 IR 的 *NNI* 也更接近 1.0。这表明,NFT 和 DWC 水培方式下,间作均有助于控制生菜的 N 奢侈吸收;雾培方式下,间作对 2 种蔬菜氮素营养最佳状态调节均有促进作用,这与 IL 和 IR 中 NO_3^- 含量降低的结果一致(图 1c)。

2.3.3 水培方式与栽培模式对蔬菜养分吸收和氮素利用的作用

由表 3 可知,水培方式与栽培模式的单因素主效应及交互作用对蔬菜养分吸收均存在显著影响。其中,生菜和萝卜的 TN 含量以及萝卜的 Ca、Mo 含量受栽培模式的影响最为突出。水培方式对生菜和萝卜的 NUE 和 *NNI* 的主效应最显著;生菜的氮素利用还受到栽培模式的显著影响,氮素营养则受到栽培模式与水培方式的交互影响;而栽培模式对萝卜的影响主要体现在对氮素营养主效应的显著性。

3 讨论

生菜和樱桃萝卜分别属于菊科和十字花科作物。虽然从移栽到收获期间,二者株高相近且对光温需求相似,但生菜的冠层较萝卜发达(图 4a、4b),二者根系形态也存在明显差异:生菜为须根系,萝卜为直根系(图 4b)。在间作系统中,资源竞争导致的负相互作用常与生态位互补、促进作用等正相互作用共存[22]。CHEN[23]等指出,直根系与须根系作物的互补效应可提升同一种植系统的资源获取效率。本研究中,水培生菜与萝卜的种子萌发试验未显示

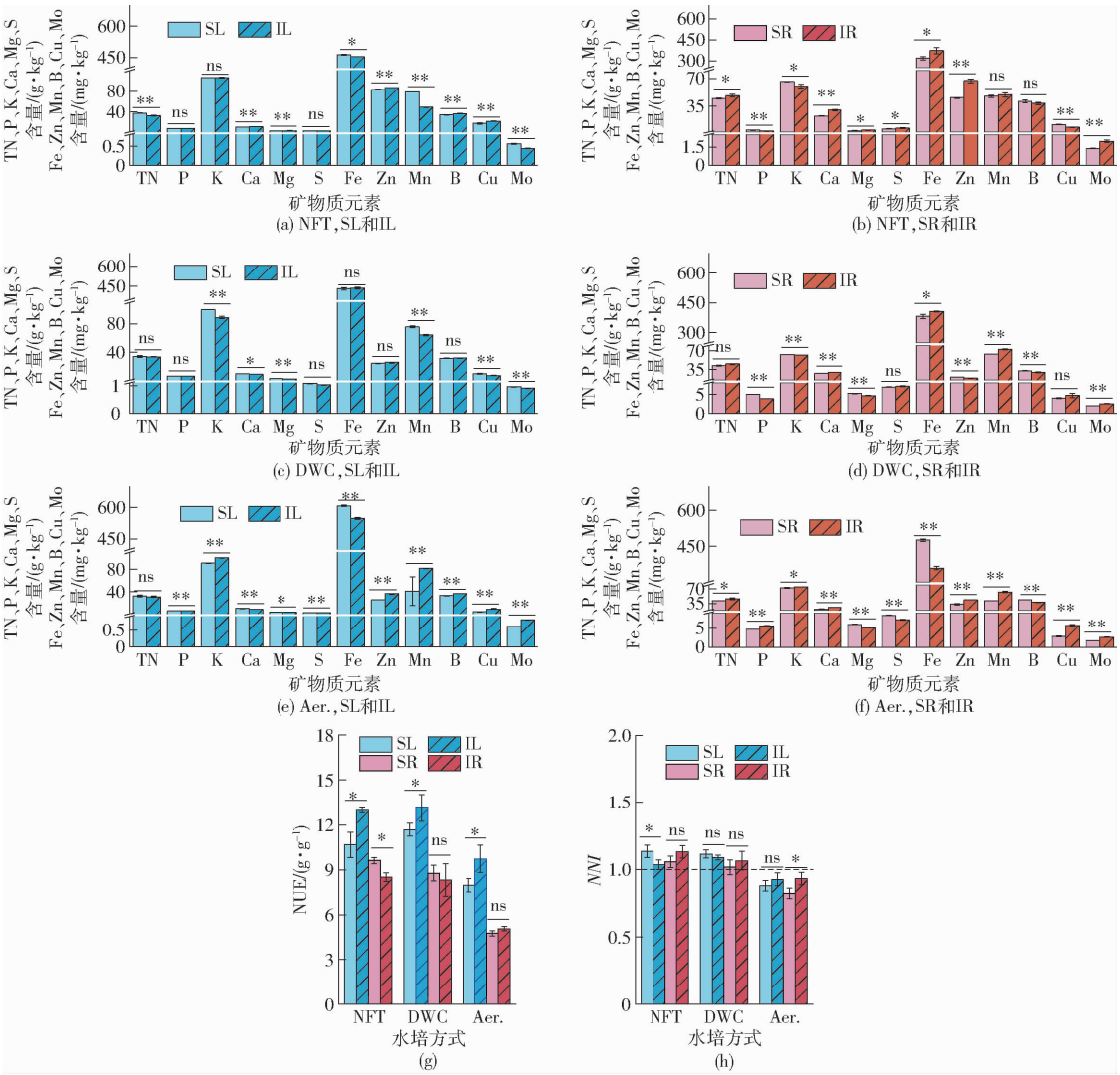

图 3　蔬菜矿物质元素含量、氮素利用率(NUE)与氮素营养指数(*NNI*)

Fig. 3　Mineral element content, NUE, and *NNI* of vegetable

表 3　水培方式与栽培模式对蔬菜养分吸收与氮素利用影响的方差分析(*F* 值)

Tab. 3　Variance analysis for hydroponics type and cultivation pattern affecting mineral element uptake and nitrogen utilization (*F*-values)

蔬菜	变量	TN	P	K	Ca	Mg	S	Fe
生菜	*A*	7.53**	199.97**	287.16**	59.95**	448.56**	3 450.88**	1 040.33**
	B	13.69**	4.40	2.17	7.49	0.08	19.77**	57.87**
	A×*B*	5.25*	9.86*	163.66**	48.23**	87.97**	32.96**	49.85**
萝卜	*A*	5.30*	113.54**	141.31**	113.77**	79.22**	27.02**	36.00**
	B	22.32**	84.54**	7.50*	226.12**	31.07**	0.29	3.09**
	A×*B*	0.36	209.49**	14.70**	30.48**	58.13**	39.55**	57.25**

蔬菜	变量	Zn	Mn	B	Cu	Mo	NUE	*NNI*
生菜	*A*	13 606.25**	0.77	109.06**	375.00**	4 531.66**	59.81**	37.06**
	B	243.61**	0.01	102.15**	37.75**	3.57	29.80**	1.51
	A×*B*	80.70**	12.27**	25.06**	31.92**	651.63**	0.75	4.64**
萝卜	*A*	870.37**	213.91**	121.51**	378.21**	311.17**	73.84**	29.21**
	B	187.54**	158.48**	48.16**	0.05	804.26**	1.91	10.47**
	A×*B*	90.49**	44.70**	4.45*	78.51**	24.77**	1.80	0.56

明显化感作用(试验细节与数据在本文中未列出)，因此研究重点集中于生态位调控下的资源竞争、互补及协同获取机制。

在营养液膜法栽培系统中，基于营养液层较薄

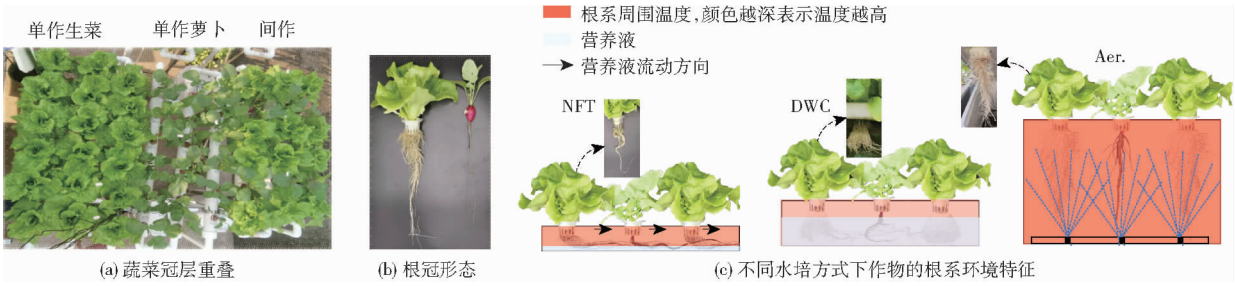

图 4 蔬菜表型特征与根系环境

Fig. 4 Phenotypic traits and root environment

(通常不超过 1 cm),根系氧气浓度充足,但这也同时带来 2 个问题:① 根系对环境变化的缓冲能力较弱,比如高温。② 毗邻植株根系更易随营养液流动形成缠绕(图 4c),进而造成相邻植株间养分竞争强度加剧。这也是本研究中发现间作系统 *LEC* 在 NFT 下低于另外 2 种水培方式,且最接近 0.22 的原因。这种剧烈的种间竞争也可能是造成该水培方式下 IL 与 IR 干物质产量没有同时提高的原因。另外,在 NFT 栽培系统中,IL 与 IR 的 TN 含量较单作变化趋势的反向特征也可以作为竞争剧烈的证据。

在深液流栽培系统中,约 2/3 的根系浸没于营养液中,植株根系具有较高的空间独立性,即使当根系发育至足够大时,也仅在 DWC 栽培槽底部出现边缘性重叠(图 4c)。营养液以静态方式持续包裹根系,这种环境不仅缓解了单株植物的资源限制,还使根系对热胁迫的敏感性显著低于营养液膜技术。这就可以解释 DWC 间作系统中 2 种蔬菜间竞争强度低于 NFT 的原因。尽管 DWC 间作系统的蔬菜可食用部分鲜物质产量均与单作无显著差异,但其栽培模式具有重要实践价值:该系统能同步生产多种蔬菜品类,更好满足市场对农产品多样性的消费需求。

在雾培系统中,营养液以定时定量方式喷洒于黑暗环境中悬空的根系。雾培方式通过物理隔离实现根系空间分离(图 4c),不仅限制了单株植物每次喷雾获取的水分量和养分量,同时为根系创造了最佳供氧环境。这种特性使得雾培系统呈现如图 1c 所示,3 种水培方式下,最高间作系统 *LEC*、微弱种间竞争强度带来的资源互补利用潜力、*LER* 等指标展现出的明显间作优势。但该系统中作物根系热缓冲能力较弱,导致蔬菜根系承受的热胁迫显著高于 NFT 和 DWC 系统。这就解释了图 1b 中所示的雾培下 SL 与 SR 干物质产量均低于 NFT 和 DWC 系统的原因。

植物生物产量的 90% 以上由纤维素、淀粉、糖类和脂质等有机物质构成,而干物质总量的 1% ~ 5% 为氮,其是蛋白质、核酸、叶绿素、辅酶等不可或缺的组成部分[3]。因此,产量与品质的形成与光合碳同化过程以及高效的硝酸盐还原和氨同化作用密切相关。增强光合效率可为氮代谢提供充足还原力和碳骨架,同时保障 CO_2 同化。有研究表明[24-25],活跃的 CO_2 同化可以促进亚硝酸盐还原,可溶性糖作为碳同化产物,能维持 NR 和 NiR 活性。这可以解释间作生菜和间作萝卜表现出的硝酸盐、亚硝酸盐含量降低,Pn、Rubisco 酶活性与 SS 含量提升的同步性。

提高 Chl a/b 已被视为增加生物量生产的创新有效策略,研究者认为较高的 Chl a/b 可通过增强植物对强光环境的适应能力及光合电子传递效率,进而优化初级光合反应过程[26]。而在遮荫条件下,通常出现叶绿素含量增加伴随 Chl a/b 下降的现象,体现了植物对弱光环境的适应性进化,使其能在低光条件下提升光合效率。已有研究表明[27],通过提高 Chlb 含量可实现喜光作物的室内栽培效果。该发现与图 2 所示的生菜叶绿素含量及 Chl a/b 变化规律高度吻合。这一结果可作为间作提高生菜对温室弱光环境适应力的重要证据,也是 IL 干物质产量显著高于 SL 的内在生理原因之一。IR 在产量和品质方面的平衡与 IL 类似,但其 Chla 与 Chlb 含量的下降,可能源于 VC 和 SP 合成过程中对还原力及碳骨架的竞争性消耗。这一机制可通过图 1f、1h 的数据获得支持。

植物的氮素利用与氮吸收、转运和同化过程均相关,而氮吸收和同化效率又与体内硝酸盐或铵盐转运蛋白和氮同化关键酶关系密切。相关研究还发现,氮同化利用率很大程度上与碳、氮代谢 2 个过程都紧密相连,碳、氮代谢相互影响和制约[28]。3 种水培间作系统中生菜产量、Pn、Rubisco 酶活性、TN 吸收、NO_3^- 含量和 NO_2^- 含量的变化符合这些规律。但 NFT 间作栽培系统中的萝卜,在 Pn 较单作提高最多的情况下(图 2),干物质产量显著低于单作(图 1),可能与间作改变萝卜根系化合物分泌有关。SHARMA 等[29]提出,40% 的光合碳同化产物可以通过根系分泌释放到根域环境中。植物

在应对非生物胁迫时，其根系分泌物的组成和数量可能发生变化，分泌各种有机酸、酚类和氨基酸也可能发生变化[30]。据此推测，IR 可能在实现更高效率的光合有机物合成的同时，因为面临优势作物——生菜带来的竞争压力，分泌更多的碳同化产物，从而造成干物质产量下降。这一推论尚需进一步的试验验证。

Mo 作为硝酸还原酶的辅酶组分，其缺乏将直接导致叶片硝酸还原酶活性下降。间作萝卜 Mo 含量的提高可能对萝卜产量和品质调控起到重要作用。Ca 作为第二信使的功能在植物生理学和分子生物学领域备受关注，其能够增强植物对非生物胁迫（如光照和高温）的耐受性[31]。此外，TAN 等[32]研究发现，外源施加氯化钙（$CaCl_2$）可通过提高放氧复合体（OEC）的热稳定性来增强高温胁迫下烟草植株的光合作用。LU 等[33]也发现，在坐果期叶面喷施钙可提高成熟果品的可溶性固形物含量。K 在植物应对非生物胁迫及耐受性方面同样发挥重要作用，其可通过调节水分关系来降低植物对高温的敏感性[34]。在高温胁迫条件下，K 能够通过调节 Rubisco 酶和蔗糖合成酶活性来增强固碳能力[35]。因此，尽管雾培条件下生长的 IL 根系暴露于更严重的高温环境且 Ca 含量未见显著增加，但其仍能较 SL 获得更高的干物质产量和可溶性糖含量，很可能与其 K 含量提高有关。

4　结论

（1）从蔬菜产量角度来看，生菜在间作系统中均占据优势地位，萝卜促进了生菜的有机物合成与积累；间作对提高 NFT 栽培系统中蔬菜生产的经济收益有利；DWC 间作栽培系统的蔬菜总产量未显著超越单作，但该系统能同步生产 2 个蔬菜品类，更好地满足市场对农产品多样性的消费需求；雾培是发挥间作促进生菜和萝卜干物质合成与积累最有利的水培方式。

（2）从蔬菜品质角度来看，间作对 2 种蔬菜品质提升的作用较产量更明显；间作蔬菜 VC、SP 含量均显著高于对应的单作蔬菜，尤其是萝卜。

（3）从蔬菜养分吸收角度来看，间作对 2 种蔬菜的 TN 含量以及萝卜的 Ca、Mo 含量影响最为突出；NFT 间作栽培系统中，2 种蔬菜间可能存在养分竞争；NFT 和 DWC 水培方式下，间作均有助于控制生菜的 N 奢侈吸收；雾培方式下，间作对 2 种蔬菜氮素营养最佳状态调节均有促进作用。

参　考　文　献

[1] VIRSILE A, BRAZAITYTE A, VASTAKAITE-KAIRIENE V, et al. The distinct impact of multi-color LED light on nitrate, amino acid, soluble sugar and organic acid contents in red and green leaf lettuce cultivated in controlled environment[J]. Food Chemistry, 2020, 310(8): 125799.

[2] 吴尘萱，栗君谊，韩亚芬，等. 面向植物合成生物学的植物工厂生产关键技术与装备研究进展及应用展望[J]. 农业机械学报，2025，56(7)：300－315.
WU Chenxuan, LI Junyi, HAN Yafen, et al. Research progress and application prospects of key technologies and equipment for plant factory production in plant synthetic biology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 300－315. (in Chinese)

[3] MARSCHNER P. Marschner's mineral nutrition of higher plants[M]. 3rd edition. New York: Academic Press, 2012.

[4] BICH L. Organisational teleology 2.0: grounding biological purposiveness in regulatory control[J]. Ratio, 2024, 37(4): 327－340.

[5] 杨其长，汪晓云，刘文科，等. 无土栽培新模式——营养液梯级利用初探[J]. 中国农学通报，2006，22(7)：553－556.
YANG Qizhang, WANG Xiaoyun, LIU Wenke, et al. Principle and preliminary study on a new pattern of soilless culture—nutrient solution completed utilization[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(7): 553－556. (in Chinese)

[6] 靳润岁，项鹏宇，周冠荣，等. 不同营养液配方对几种水培叶菜间作生长的影响[J]. 农业工程技术（温室园艺），2006(3)：34－36.

[7] 王琳琳，于海业，张蕾，等. 基于生态位适宜度模型和 TOPSIS 模型的间作模式评价[J]. 农业机械学报，2017，48(4)：291－297.
WANG Linlin, YU Haiye, ZHANG Lei, et al. Evaluation of intercropping patterns based on niche-fitness model and TOPSIS model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 291－297. (in Chinese)

[8] 于海业，王琳琳，张蕾，等. 间作对气雾培生菜生长和硝酸盐积累的影响[J]. 农业工程学报，2017，33(24)：228－234.
YU Haiye, WANG Linlin, ZHANG Lei, et al. Effects of intercropping on the growth and nitrate accumulation of lettuce in aeroponics[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 228－234. (in Chinese)

[9] 张蕾，李发秦尉，姚利军，等. 生菜与樱桃萝卜间作气雾培栽培管理模式优化研究[J]. 农业机械学报，2020，51(4)：337－343.
ZHANG Lei, LI Faqinwei, YAO Lijun, et al. Optimization of management modes for intercropping aeroponics of lettuce and cherry radish[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 337－343. (in Chinese)

[10] SHROUF A. Hydroponics, aeroponic and aquaponic as compared with conventional farming[J]. American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences, 2017, 27(1): 247 - 255.
[11] 吉林大学. 一种生菜与樱桃萝卜高效共生管道水培的育苗方法: 202311181658.2[P]. 2023 - 11 - 07.
[12] ZHANG L, WANG L, LI F, et al. Effect of divalent manganese (Mn^{2+}) concentration on the growth and nitrate nitrogen content of lettuce during aeroponic intercropping with cherry radish[J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2021, 62(2): 243 - 251.
[13] MEJIA-LONDONO H A, OTALVARO-GUTIERREZ J D, BARRERA-SANCHEZ C F, et al. Photosynthetic gas exchange and chlorophyll fluorescence of female hemp plants during sexual reversal treatments[J]. Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas, 2023, 22(3): 404 - 416.
[14] 李合生. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
[15] 国家食品药品监督管理局. 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定: GB/T 5009.33—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
[16] 王小平. 不同分解方法对 ICP - AES 测定植物样品中元素含量的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(4): 563 - 566.
WANG Xiaoping. Comparison of different digestion methods used for the decomposition of plant samples in elemental quantification by using ICP - AES[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2005, 25(4): 563 - 566. (in Chinese)
[17] 环境保护部. 土壤和沉积物 12 种元素的测定 王水提取-电感耦合等离子体质谱法: HJ 803—2016[S]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
[18] TEI F, BENINCASA P, GUIDUCCI M. Critical nitrogen concentration in lettuce[J]. Acta Horticulturae, 2003, 627: 187 - 194.
[19] LEMAIRE G. Diagnosis of the nitrogen status in crops[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1997.
[20] LAMMERTS VAN BUEREN E T, STRUIK P C. Diverse concepts of breeding for nitrogen use efficiency. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2017, 37(5): 50.
[21] LIU Z, NAN Z, LIN S, et al. Millet/peanut intercropping at a moderate N rate increases crop productivity and N use efficiency, as well as economic benefits, under rain-fed conditions[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2023, 22(3): 738 - 751.
[22] BOLTE A, VILLANUEVA I. Interspecific competition impacts on the morphology and distribution of fine roots in European beech (*Fagus sylvatica* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.)[J]. European Journal of Forest Research, 2006, 125(1): 15 - 26.
[23] CHEN G, WEIL R R. Penetration of cover crop roots through compacted soils[J]. Plant and Soil, 2010, 331(1): 31 - 43.
[24] PLAUT Z, LENDZIAN K, BASSHAM J A. Nitrite reduction in reconstituted and whole spinach chloroplasts during carbon dioxide reduction[J]. Plant Physiology, 1977, 59(2): 184 - 188.
[25] MORCUENDE R, KRAPP A, HURRY V, et al. Sucrose-feeding leads to increased rates of nitrate assimilation, increased rates of α-oxoglutarate synthesis, and increased synthesis of a wide spectrum of amino acids in tobacco leaves[J]. Planta, 1998, 206(3): 394 - 409.
[26] SIMKIN A J, KAPOOR L, DOSS C G P, et al. The role of photosynthesis related pigments in light harvesting, photoprotection and enhancement of photosynthetic yield in planta[J]. Photosynthesis Research, 2022, 152(1): 23 - 42.
[27] KHAN I, ZADA A, JIA T, et al. Effect of the enhanced production of chlorophyll b on the light acclimation of tomato[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(4): 3377.
[28] THOMAS B, MURRAY B G, MURPHY D J. Encyclopedia of applied plant sciences[M]. New York: Academic Press, 2017.
[29] SHARMA I, KASHYAP S, AGARWALA N. Biotic stress-induced changes in root exudation confer plant stress tolerance by altering rhizospheric microbial community[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1132824.
[30] 沈川, 李夏. 根系分泌物对不同环境胁迫响应的研究进展[J]. 核农学报, 2024, 38(11): 2247 - 2257.
SHEN Chuan, LI Xia. Research progress on responses of root exudates to different environmental stresses[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2024, 38(11): 2247 - 2257. (in Chinese)
[31] GUPTA S, KAUR N, KANT K, et al. Calcium: a master regulator of stress tolerance in plants[J]. South African Journal of Botany, 2023, 163(4): 580 - 594.
[32] TAN W, WEI M Q, BRESTIC M, et al. Photosynthesis is improved by exogenous calcium in heat-stressed tobacco plants[J]. Journal of Plant Physiology, 2011, 168(17): 2063 - 2071.
[33] LU Y Q, LIU H P, WANG Y, et al. Synergistic roles of leaf boron and calcium during the growing season in affecting sugar and starch accumulation in ripening apple fruit[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2013, 35(8): 2483 - 2492.
[34] MOSTOFA M G, RAHMAN M M, GHOSH T K, et al. Potassium in plant physiological adaptation to abiotic stresses[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2022, 186(9): 279 - 289.
[35] ZAHOOR R, DONG H, ABID M, et al. Potassium fertilizer improves drought stress alleviation potential in cotton by enhancing photosynthesis and carbohydrate metabolism[J]. Environmental and Experimental Botany, 2017, 137(5): 73 - 83.