

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.04.019

周金燕, 纪荣婷, 董刚强, 等. 壳聚糖类有机水溶肥对抗白菊苗期生长影响及其机制研究. 土壤, 2020, 52(4): 789–795.

# 壳聚糖类有机水溶肥对抗白菊苗期生长影响及其机制研究<sup>①</sup>

周金燕<sup>1</sup>, 纪荣婷<sup>1</sup>, 董刚强<sup>2</sup>, 闵 炬<sup>1</sup>, 施卫明<sup>1\*</sup>

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 安利(中国)植物研发中心, 江苏无锡 214115)

**摘 要:** 有机种植杭白菊对提高其品质具有重要作用, 壳聚糖有机水溶肥作为一种新型的有机肥料在果蔬上已有广泛应用, 其在有机杭白菊苗期的最佳用量及其促进苗期生长的作用机制尚不清楚。本研究采用盆栽试验, 设置不施肥(CK)、壳聚糖有机水溶肥稀释液 1 000 倍(T1)、500 倍(T2)、300 倍(T3)、100 倍(T4)5 个处理, 分析了各处理对抗白菊生物量、生长发育指标、根系形态特征、光合作用、碳氮含量及碳氮比的影响。结果表明: 与 CK 相比, T3 处理根鲜重、地上部鲜重、叶片数、茎粗和株高分别显著增加了 64%、110%、27%、17% 和 32%, 表明壳聚糖有机水溶肥稀释 300 倍是有机杭白菊苗期最佳用量。此外, 与 CK 比, T3 处理总根长、根表面积、根体积分别提高了 46%、62% 和 69%, 光合速率约增加 64%, 且调节了杭白菊苗期的碳氮比例, 根系与地上部的碳氮比值分别为 19 和 17。综上, 改善杭白菊苗期根系的形态特征, 增强光合作用, 调节植株的碳氮比可能是壳聚糖有机水溶肥促进有机杭白菊苗期生长的机制之一。

**关键词:** 有机水溶肥; 菊花; 生物量; 根系形态; 光合作用; 碳氮比

**中图分类号:** S345; S158.3 **文献标志码:** A

## Effects and Mechanism of Chitosan Organic Water-soluble Fertilizer on Growth of Chrysanthemum

ZHOU Jinyan<sup>1</sup>, JI Rongting<sup>1</sup>, DONG Gangqiang<sup>2</sup>, MIN Ju<sup>1</sup>, SHI Weiming<sup>1\*</sup>

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 Amway (China) Botanical R&D Center, Wuxi, Jiangsu 214115, China)

**Abstract:** Organic cultivation plays an important role in improving the quality of chrysanthemum. Chitosan organic water-soluble fertilizer, as a new organic fertilizer, has been widely used in fruits and vegetables. In this study, 5 treatments were designed for a pot experiment, which included: no fertilizer (CK), chitosan organic water-soluble fertilizer diluents of 1000×(T1), 500×(T2), 300×(T3) and 100×(T4). The effects of these treatments on the biomass, growth and development index, root morphological characteristics, photosynthesis, carbon and nitrogen contents and carbon and nitrogen ratio of chrysanthemum were analyzed. The results showed that compared with CK treatment, the fresh weight of root, fresh weight of aboveground, leaf number, stem diameter and plant height of T3 treatment significantly increased by 64%, 110%, 27%, 17% and 32%, respectively, which indicated that the optimum amount of organic chrysanthemum seedling was 300 times diluted by organic water-soluble fertilizer of chitosan. In addition, compared with CK, the total root length, root surface area and root volume of T3 treatment increased by 46%, 62% and 69%, respectively, and the photosynthesis rate increased by 64%, and the carbon and nitrogen ratio in the seedling stage of chrysanthemum was adjusted, and the values of carbon and nitrogen ratio in the root system and the aboveground part were 19 and 17, respectively. In conclusion, the promotion of chitosan organic water-soluble fertilizer to the growth of organic chrysanthemum in seedling stage could be attributed to improving root morphological characteristics, enhancing photosynthesis and regulating plant carbon and nitrogen ratio.

**Key words:** Organic water-soluble fertilizer; Chrysanthemum; Biomass; Root morphology; Photosynthesis; Carbon and nitrogen ratio

①基金项目: 无锡市企业院士工作站科研项目(CYR1607)和企业院士工作站科研项目(BC20160005Z)资助。

\* 通讯作者(wmshi@issas.ac.cn)

作者简介: 周金燕(1987—), 女, 河南沈丘人, 博士, 助理研究员, 主要从事植物营养生理代谢研究。E-mail: 23240962@163.com

杭白菊(*Chrysanthemum morifolium* Ramat.)是菊科多年生植物,具有散风清热、平肝明目的功能<sup>[1]</sup>,社会需求量大,是我国大宗药材和重要出口药材。大量实践表明,杭白菊苗期对速效肥料非常敏感,施用不当将严重影响杭白菊的产量及品质<sup>[2]</sup>。采用有机种植对提高杭白菊产量和品质具有重要意义。有机种植体系,作为有机农业的重要组成部分,通过逐步改善土壤生物、理化性质来提高土壤肥力,达到改良作物品质,减轻环境风险,维护土壤、环境、生态系统健康发展的目的,在全世界得到了普遍关注和发展<sup>[3-7]</sup>。有机种植体系严禁化学肥料、农药、生长调节剂的施用。因此,有机产品无化学药品残留、无污染,品质优良,价格一般为其他同类产品的3倍~8倍,有机种植带来的经济效益远远高于常规种植<sup>[8]</sup>。然而,国内外学者研究表明,在有机种植的前期,由于有机肥料养分释放慢,矿化过程较长,土壤培肥慢,会导致作物产量降低。在高利润的刺激下,为了追求产量,过量施用有机肥料和灌水也成为有机种植业发展的普遍现象。合适的有机肥料投入成为有机种植体系前期产量保证的重要前提之一。壳聚糖作为一种天然多糖,广泛存在于虾、蟹、昆虫等的甲壳以及高等真菌的外壁和细胞壁内,在自然界中的蕴藏量非常大<sup>[9]</sup>。在相关的微生物肥及调理剂的使用中发现,壳聚糖不仅能显著提高作物本身的抗逆能力,大幅度降低化肥农药的使用<sup>[10]</sup>,还能促进有益微生物的增殖、改良土壤、维护农业生态环境,并且果蔬产品的口感和品质均显著提升<sup>[11]</sup>。因此,壳聚糖被认为是解决现代农业污染问题的有效方式之一,是无公害农产品生产和可持续农业的重要资源<sup>[12]</sup>。壳聚糖有机水溶肥作为一种新型的有机肥料,结合了水肥两种模式,与传统的固体有机肥料相比,在玉米和莴苣上能显著提高养分的利用率、减少损失,提高作物产量和品质<sup>[13-14]</sup>。近年来,壳聚糖类肥料在果蔬作物上的应用效果报道较多,但对其作用机制研究涉及的较少,且壳聚糖类肥料在杭白菊种植上的应用鲜见报到。本课题在前期研究中对杭白菊苗期进行了有机水溶肥类型的筛选试验,发现与海藻提取物类、鱼提取物类、蚯蚓粪类、植物分解物类的有机水溶肥相比,壳聚糖有机水溶肥能够显著促进杭白菊苗期的生长发育<sup>[15]</sup>。但促进杭白菊苗期生长的最佳壳聚糖有机水溶肥用量尚不明确,而这对指导生产实践非常重要。此外,壳聚糖有机水溶肥促进杭白菊苗期生长的作用机制也不清楚。为此,本试验通过设置不同的壳聚糖有机水溶肥施用水平,研究其对杭白菊苗期生长的影响,明确杭白菊

苗期生长的最佳施用量;并通过分析杭白菊苗期的根系生长特征、光合作用以及碳氮比,来探索壳聚糖有机水溶肥促进杭白菊苗期生长的作用机制。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

供试杭白菊品种为金菊2号,由安利(中国)植物研发中心研究农场提供。供试肥料为中国广东省湛江市博泰生物化工科技实业有限公司生产的壳聚糖有机水溶性肥料(经南京国环有机产品认证中心认证),其pH 7.2,全氮 98 g/L,全磷 1.3 g/L,全钾 23.2 g/L。供试土壤基本理化性状分别为:pH 5.1,矿物态氮 30 mg/kg,有效磷 15.5 mg/kg,速效钾 48.1 mg/kg。

### 1.2 试验设计

采用盆栽试验,在中国科学院南京土壤研究所温室进行。选择长势基本一致同一批次扦插的杭白菊苗定植于规格为盆高 12 cm × 直径 12 cm 的塑料盆中,栽培基质为土壤和珍珠岩按体积比 2 : 1 混合,每盆定植 1 棵杭白菊幼苗,常规水肥管理。

试验共设置 5 个处理:CK 为不施肥、T1 为 1 000 倍有机水溶肥稀释液、T2 为 500 倍有机水溶肥稀释液、T3 为 300 倍有机水溶肥稀释液、T4 为 100 倍有机水溶肥稀释液。缓苗一周后进行处理,每次浇灌肥料稀释液 50 ml,CK 处理浇灌等量去离子水,每 5 d 浇灌 1 次,连续 6 次。每个处理 20 盆,共 100 盆。

### 1.3 测定项目及方法

样品采集后测定植株叶片数、茎粗和株高,并将植株分为根系和地上部两部分,先用去离子水清洗干净,用吸水纸吸干表面水分后,测定鲜重;于 105℃烘箱中杀青 30 min 后再降温至恒重,用于养分含量的测定。

1.3.1 光合特性的测定 采用 Li-Cor 6400 型光合作用测定仪在 09:00—11:00 对完全展开的新叶进行净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度(Ci)以及蒸腾速率(E)的测定。测定光照强度设置为 1 000 μmol/(m<sup>2</sup>·s),CO<sub>2</sub> 浓度调整为大气 CO<sub>2</sub> 浓度(380~400 μmol/mol),叶片温度设置在 25~28℃,叶室内空气湿度控制在 40%~60%。

1.3.2 根系形态参数的测定 采用根系扫描仪对根系形态参数进行成像测定。成像前,将根系放置在与成像扫描仪配套的凹槽中,加水将根系浸没其中,用木质牙签或徒手将根系分开以尽量减少对根系的伤害。成像后,选择目标根系区域,通过根系分析系统软件 WinRHizo2004b (Regent Instrument Inc., Canada)对根长、根体积和根表面积进行图像参数分析。

1.3.3 全碳和全氮含量的测定 将烘干的样品磨细,过100目筛,采用元素分析仪对植株全碳和全氮含量进行测定。

#### 1.4 数据分析

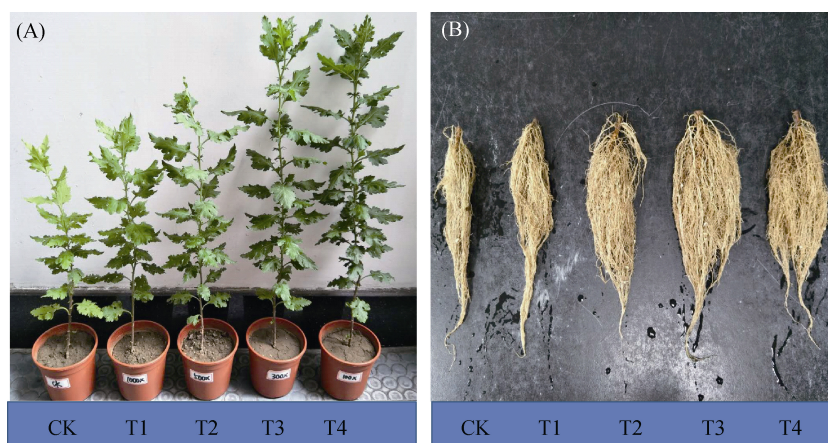
试验数据采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 16.0 进行整理和统计分析,采用 Duncan 法进行多重比较 ( $P<0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同壳聚糖有机水溶肥供应水平对抗白菊苗期根系和地上部生长的影响

供应不同水平的壳聚糖有机水溶肥均能显著促进杭白菊苗期根系和地上部的生长,根系显著增大,

地上部显著增高增壮(图1)。表1数据表明,随壳聚糖有机水溶肥剂量的增加,杭白菊生物量及生长发育指数(如叶片数、株高、茎粗)显著增加,T3处理达到最大,T4处理与之相比无显著差异,而T2处理较T1处理无显著差异。T3处理根鲜重、地上部鲜重、叶片数、茎粗和株高与CK相比分别显著增加了66%、115%、27%、17%和32%,而较T1处理则分别显著增加了18%、42%、16%、9.6%和15%。此外,随壳聚糖有机水溶肥剂量的增大,杭白菊根冠比逐渐减小,且T3处理与T4处理相比无显著差异,说明T3处理下植株所需养分已经能够满足植物较好生长。综合考虑经济投入成本,300倍有机水溶肥稀释液(T3处理)为杭白菊壮根促苗较适宜浓度。



(本图片拍摄于壳聚糖有机水溶肥处理后的第30天)

图1 不同壳聚糖有机水溶肥供应水平对抗白菊苗期生长的影响

Fig. 1 Effects of different supply levels of chitosan organic water-soluble fertilizer on the growth of chrysanthemum at seedling stage

表1 不同壳聚糖有机水溶肥供应水平对抗白菊苗期生物量及生长发育指标的影响

Table 1 Effects of different supply levels of chitosan organic water-soluble fertilizer on biomass and growth and development indexes of chrysanthemum at seedling stage

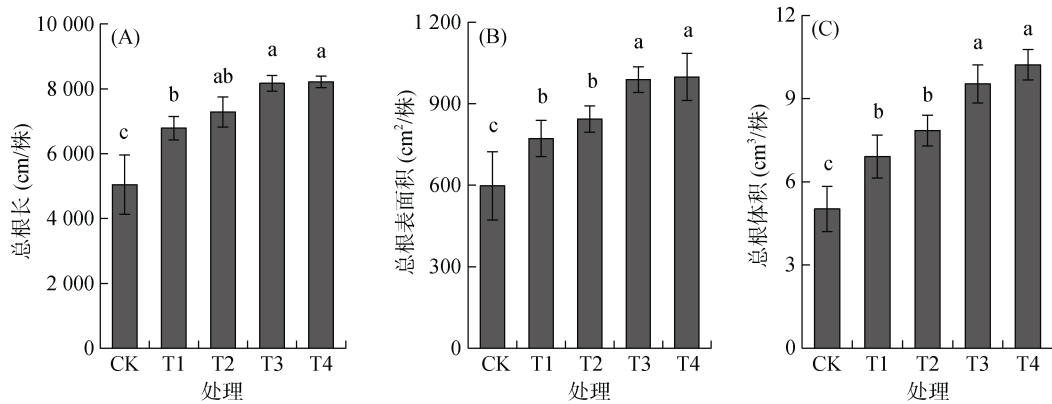
处理	鲜重(g/株)		根冠比	每株叶片数	茎粗 (cm)	株高 (cm)
	根系	地上部				
CK	5.57 ± 0.84 d	11.32 ± 1.15 c	0.51 ± 0.06 a	24.5 ± 2.1 c	4.20 ± 0.16 d	40.25 ± 1.26 c
T1	7.83 ± 0.41 c	17.15 ± 0.58 b	0.46 ± 0.02 ab	26.7 ± 2.4 b	4.50 ± 0.28 cd	46.00 ± 3.16 b
T2	8.03 ± 0.57 bc	18.59 ± 2.24 b	0.43 ± 0.02 b	26.5 ± 3.1 b	4.60 ± 0.35 bc	46.75 ± 1.29 b
T3	9.26 ± 0.53 ab	24.36 ± 0.65 a	0.38 ± 0.01 c	31.0 ± 2.2 a	4.93 ± 0.21 ab	53.00 ± 1.83 a
T4	9.46 ± 1.18 a	26.32 ± 1.45 a	0.38 ± 0.04 c	32.5 ± 2.6 a	5.05 ± 0.21 a	54.50 ± 3.11 a

注:表中同列不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ ),下表同。

### 2.2 不同壳聚糖有机水溶肥供应水平对抗白菊苗期根系形态的影响

杭白菊苗期根系形态特征对不同壳聚糖有机水溶肥供应水平的响应程度存在显著差异。由图2可以看出,供应不同水平的壳聚糖有机水溶肥均显著改善了苗期杭白菊的总根长、根表面积和根体积,且均在

T3处理时达到最大值,改善的比例为  $T3 \approx T4 > T2 \approx T1$ 。与CK和T1处理相比,T3处理根体积改善幅度最大,分别增加了69%和38%,根表面积则分别提高了62%和28%,而总根长改善幅度最小,分别提高了46%和20%。说明壳聚糖有机水溶肥对根系形态的改善主要表现在根体积和根表面积。



(图中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下图同)

图 2 不同壳聚糖有机水溶肥供应水平对抗白菊苗期根系形态的影响

Fig. 2 Effects of different supply levels of chitosan organic water-soluble fertilizer on root morphology of chrysanthemum at seedling stage

### 2.3 不同壳聚糖有机水溶肥供应水平对抗白菊苗期光合特性的影响

由表 2 可知, 供应不同水平的壳聚糖有机水溶肥均能显著促进杭白菊苗期光合作用。与 CK 相比, 随壳聚糖有机水溶肥剂量的增加, 各处理植株光合速率 ( $P_n$ )、气孔导度 ( $G_s$ )、胞间二氧化碳浓度 ( $C_i$ ) 及蒸腾速率 ( $E$ ) 均显著增加且变化趋势基本一致, 变化幅度为  $T_3 \approx T_4 > T_2 \approx T_1$ 。T3 处理各光合参数较 CK 分别增加了 67%、42%、23% 和 67%, 而较 T1 处理则分别提高了 26%、26%、13% 和 28%。说明 T3 处理下, 光合作用的提高是由于杭白菊的根系形态得到较好改善, 为植株提供了充足的养分, 从而为促进杭白菊苗期生长提供了物质和能量。

### 2.4 不同壳聚糖有机水溶肥供应水平对抗白菊苗期碳氮代谢的影响

由图 3 可知, 不同壳聚糖有机水溶肥供应水平对抗白菊苗期根系和地上部碳氮代谢的影响存在显著差异。与 CK 相比, T4 处理根系和地上部的全碳含量均显著下降, 下降幅度分别为 4.4% 和 3.8%, 而其他处理均无显著差异。随壳聚糖有机水溶肥剂量的增加, 杭白菊苗期根系和地上部的全氮含量均显著增

加, 与 CK 相比, 各处理根系全氮含量增加幅度分别为 0.65 倍、1.46 倍、2.75 倍和 4.84 倍; 地上部全氮含量增加幅度则分别为 0.38 倍、0.88 倍、1.01 倍和 1.61 倍。此外, 各处理根系和地上部的碳氮比均随壳聚糖有机水溶肥剂量的增加显著下降。表 1 表明, 与 T4 处理相比, T3 处理杭白菊苗期生物量无显著差异, 而植株全碳含量较高, 说明 T4 处理下, 杭白菊苗期氮素代谢旺盛, 而碳代谢可能不足。从而进一步说明合适的碳氮比是 T3 处理杭白菊苗期生长较好的关键, 而 T3 处理下, 杭白菊苗期根系和地上部的碳氮比值分别为 19 和 17。

## 3 讨论

本试验研究结果表明, 与 CK 相比, 增施不同水平的壳聚糖有机水溶肥均能显著促进杭白菊苗期生长, 且 T3 (300 倍有机肥稀释液) 处理效果较显著 (图 1, 表 1)。这是由于壳聚糖有机水溶肥含有大量的养分和生物调节物质壳聚糖, 能够快速被植物吸收, 从而促进杭白菊苗期地上部生长<sup>[16-17]</sup>。植物根冠比能较好反映植物对外在营养条件的需求<sup>[18]</sup>。T3 处理与 T4 处理相比, 根冠比无显著差异 (表 1), 说明 T3 处理植

表 2 不同壳聚糖有机水溶肥供应水平对抗白菊苗期光合特性的影响

Table 2 Effects of different supply levels of chitosan organic water-soluble fertilizer on photosynthetic characteristics of chrysanthemum at seedling stage

处理	光合速率 $P_n (\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$	气孔导度 $G_s (\text{H}_2\text{O}, \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$	胞间 $\text{CO}_2$ 浓度 $C_i (\text{CO}_2, \mu\text{mol}/\text{mol})$	蒸腾速率 $E (\text{H}_2\text{O}, \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$
CK	$8.9 \pm 0.6$ c	$0.21 \pm 0.01$ c	$277 \pm 5$ c	$4.8 \pm 0.7$ c
T1	$11.8 \pm 0.3$ b	$0.24 \pm 0.01$ b	$303 \pm 10$ b	$6.3 \pm 0.6$ b
T2	$12.8 \pm 0.4$ b	$0.25 \pm 0.17$ b	$312 \pm 12$ b	$6.7 \pm 0.2$ b
T3	$14.8 \pm 1.1$ a	$0.30 \pm 0.01$ a	$342 \pm 5$ a	$8.0 \pm 0.7$ a
T4	$15.0 \pm 1.0$ a	$0.31 \pm 0.01$ a	$352 \pm 6$ a	$8.3 \pm 0.7$ a

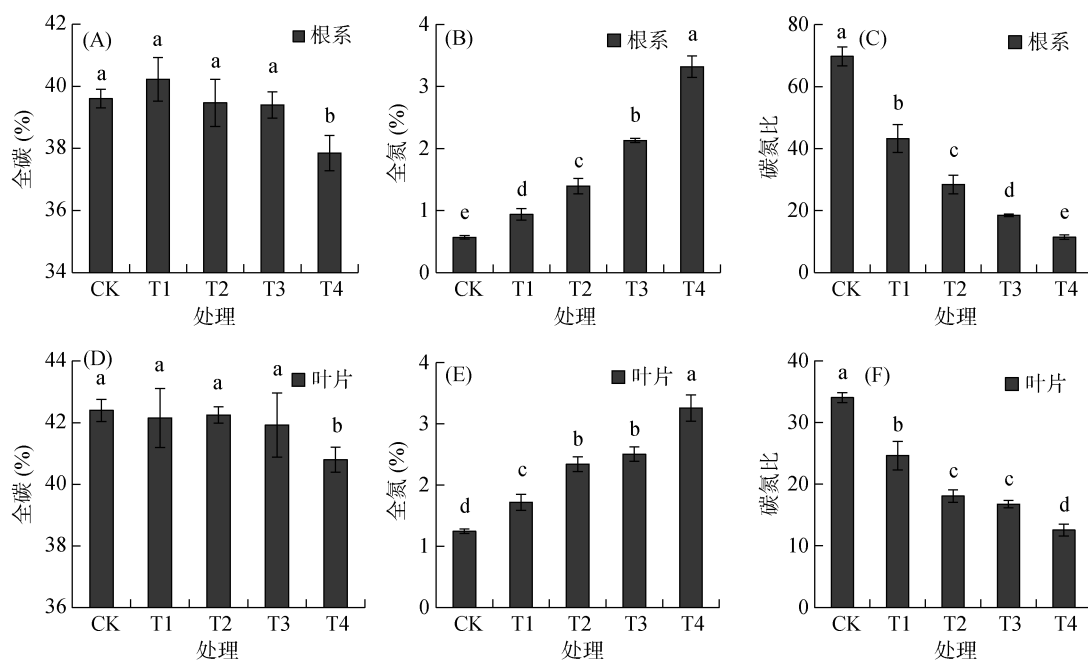


图 3 不同壳聚糖有机水溶肥供应水平对抗白菊苗期碳氮代谢的影响

Fig. 3 Effects of different supply levels of chitosan organic water-soluble fertilizer dilution on carbon and nitrogen balance of chrysanthemum at seedling stage

株地上部养分的供应能够满足植株较好生长,综合考虑经济投入成本,在有机种植体系中,300倍有机肥稀释液为促进杭白菊苗期生长的最佳浓度。

根系是植物吸收养分和水分的最主要的器官。研究表明,根系受遗传信息和外界环境的影响,具有很强的可塑性<sup>[19]</sup>。本试验结果表明,与CK相比,各处理下植株根系形态均有显著改善,而T3处理改善幅度较大,根长、根表面积和根体积分别提高了46%、62%和69%(图2),对抗白菊苗期壮根效果显著。而根系形态的改变一方面与壳聚糖能够促进植株根系的伸长有关<sup>[20-21]</sup>,如Katiyar等<sup>[22]</sup>报道壳聚糖能够显著促进拟南芥根系的生长;另一方面则是由于增施有机肥可以改善土壤的团粒结构,提高土壤的蓄水保墒能力,从而促进根系的伸长延伸<sup>[23-24]</sup>。研究表明,根系形态参数的增加能够增加养分的吸收利用,从而增加植物生物量<sup>[25]</sup>。因此,T3处理下根系形态的改善可能是有机种植体系下杭白菊苗期生长较好的机制之一。

根系是决定叶片生长和活力的主要因素。根系发达,活力强,能够促进植株吸收养分的能力,从而提高光合作用<sup>[26-27]</sup>。光合作用是植物生长的基础,是植物生产力构成的最主要因素<sup>[28-29]</sup>。本试验结果表明,与CK相比,增施不同水平的壳聚糖有机水溶肥均能显著促进植物的光合作用(净光合速率、气孔导度、胞间CO<sub>2</sub>浓度、蒸腾速率均显著增大),且T3处理时

增强幅度较大(表2)。而T3处理光合作用与T4处理相比无显著差异,则可能是由于T3处理下参与杭白菊光合作用的Rubisco酶活性较高,从而提高了杭白菊光合氮素利用率<sup>[30-31]</sup>,而进一步增加壳聚糖有机水溶肥用量则不能进一步显著增强Rubisco酶活性,从而表现出光合作用接近饱和的状态。

碳氮代谢是植物生长发育最基本的两大代谢,碳氮比则反映了植株碳氮代谢的相对强弱,在调节植株生长方面起着非常重要的作用<sup>[32-33]</sup>。碳氮代谢的协调程度不仅影响植物的生长发育,也显著影响作物的产量和品质<sup>[34-35]</sup>。本试验研究结果表明,添加不同剂量的壳聚糖有机水溶肥均显著降低了杭白菊苗期的碳氮比。而与CK相比,T4处理下杭白菊根系和地上部的全碳含量均显著下降,而其他处理均无显著差异(图3)。说明T4处理下,氮素过量,可能导致杭白菊苗期氮素代谢旺盛,而碳代谢产物降低。这一结果也与Commichau等<sup>[36]</sup>报道相符合。这可能是由于参与碳氮代谢的一些相关酶活性发生了变化<sup>[37-38]</sup>。研究表明,壳聚糖会显著改变植株氮同化等一些酶的活性<sup>[39-40]</sup>,而具体怎样影响碳氮代谢则有待于进一步研究。此外,结合不同处理下的生物量及碳氮比(图1、图3),则可以进一步证实合适的碳氮比是促进杭白菊苗期生长的关键和可能机制之一。而本试验体系下,针对杭白菊苗期较合适的植株碳氮比值根系和地上部则分别为19和17。

## 4 结论

通过设置不同壳聚糖有机水溶肥供应水平对杭白菊苗期生长的试验,明确了稀释 300 倍后的壳聚糖有机水溶肥是杭白菊苗期生长最佳用量,初步探明了促进杭白菊苗期生长的作用机制与壳聚糖有机水溶肥促进了杭白菊根系形态的改善、增强了光合作用和调节了植株的碳氮平衡等生理过程有关。

### 参考文献:

- [1] 国家药典委员会. 中国药典 I 部[S]. 北京: 中国医药科技出版社, 2010.
- [2] 刘大会, 朱端卫, 郭兰萍, 等. 氮肥用量对药用菊花生长及其药用品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 188-195.
- [3] 纪荣婷, 董刚强, 闵炬, 等. 有机种植与常规种植体系的比较——基于土壤与肥料的视角[J]. 土壤, 2016, 48(4): 627-633.
- [4] 黄萍, 纪拓, 岳松青, 等. 垂直孔施有机物对土壤硝酸盐代谢及苹果叶片光合作用的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(5): 1276-1285.
- [5] 刘金光, 李孝刚, 王兴祥. 连续施用有机肥对连作花生根际微生物种群和酶活性的影响[J]. 土壤, 2018, 50(2): 305-311.
- [6] 黄维. 富硒有机肥、复合肥和灌水量对番茄产量和品质的影响[J]. 土壤, 2018, 50(6): 1160-1164.
- [7] Morgan K, Murdoch J. Organic vs. conventional agriculture: knowledge, power and innovation in the food chain[J]. Geoforum, 2000, 31(2): 159-173.
- [8] IFOAM. The World of Organic Agriculture 2008. IFPAM and FiBL, 2008: 22-29, 122-129
- [9] 蒋挺大. 甲壳素[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [10] 赵小明. 壳寡糖诱导植物抗病性及其诱抗机理的初步研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(大连化学物理研究所), 2006.
- [11] 刘金凤. 壳聚糖对蔬菜产量品质、根系生长及土壤理化性状的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2006.
- [12] 刘志恒, 李学荣, 孙军德, 等. 几丁聚糖在农业上应用的研究进展[J]. 沈阳农业大学学报, 2001, 32(6): 459-464.
- [13] Dordas C A, Lithourgidis A S, Matsi T, et al. Application of liquid cattle manure and inorganic fertilizers affect dry matter, nitrogen accumulation, and partitioning in maize[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2008, 80(3): 283-296.
- [14] Toonsiri P, del Grosso S J, Sukor A, et al. Greenhouse gas emissions from solid and liquid organic fertilizers applied to lettuce[J]. Journal of Environmental Quality, 2016, 45(6): 1812-1821.
- [15] Ji R T, Dong G Q, Shi W M, et al. Effects of liquid organic fertilizers on plant growth and rhizosphere soil characteristics of chrysanthemum[J]. Sustainability, 2017, 9(5): 841.
- [16] Nelson P V, Pitchay D S, Niedziela C E, et al. Efficacy of soybean-base liquid fertilizer for greenhouse crops[J]. Journal of Plant Nutrition, 2010, 33(3): 351-361.
- [17] Ziani K, Ursúa B, Maté J I. Application of bioactive coatings based on chitosan for artichoke seed protection[J]. Crop Protection, 2010, 29(8): 853-859.
- [18] Sainju U M, Allen B L, Lenssen A W, et al. Root biomass, root/shoot ratio, and soil water content under perennial grasses with different nitrogen rates[J]. Field Crops Research, 2017, 210: 183-191.
- [19] Malamy J E. Intrinsic and environmental response pathways that regulate root system architecture[J]. Plant Cell and Environment, 2005, 28(1): 67-77.
- [20] Kim H J, Chen F, Wang X, et al. Effect of chitosan on the biological properties of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(9): 3696-3701.
- [21] Yin H, Fretté X C, Christensen L P, et al. Chitosan oligosaccharides promote the content of polyphenols in Greek oregano (*Origanum vulgare* SSP. hirtum)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(1): 136-143.
- [22] Katiyar D, Hemantaranjan A, Singh B. Chitosan as a promising natural compound to enhance potential physiological responses in plant: A review[J]. Indian Journal of Plant Physiology, 2015, 20(1): 1-9.
- [23] 张向前, 曹承富, 陈欢, 等. 长期定位施肥对砂姜黑土小麦根系性状和根冠比的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(3): 382-389.
- [24] 李娇, 信秀丽, 朱安宁, 等. 长期施用化肥和有机肥下潮土干团聚体有机氮组分特征[J]. 土壤学报, 2018, 55(6): 1494-1501.
- [25] 王力朋, 晏紫伊, 李吉跃, 等. 指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(23): 7452-7462.
- [26] 孙艳, 王益权, 杨梅, 等. 土壤紧实胁迫对黄瓜根系活力和叶片光合作用的影响[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2005, 31(5): 545-550.
- [27] Gai Z J, Zhang J T, Li C F. Effects of starter nitrogen fertilizer on soybean root activity, leaf photosynthesis and grain yield[J]. PLoS One, 2017, 12(4): e0174841. DOI:10.1371/journal.pone.0174841.
- [28] Berry J A, Downton W J S. Environmental regulation of photosynthesis // Photosynthesis [M]. 1982, 263-343
- [29] Zelitch I. Photosynthesis, photorespiration, and plant productivity[M]. New York: Academic Press, 1971: 240-242
- [30] Cheng L L, Fuchigami L H. Rubisco activation state decreases with increasing nitrogen content in apple leaves[J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51(351): 1687-1694.
- [31] Ghannoum O, Evans J R, Chow W S, et al. Faster rubisco is the key to superior nitrogen-use efficiency in NADP-malic enzyme relative to NAD-malic enzyme C4 grasses[J]. Plant Physiology, 2005, 137(2): 638-650.
- [32] Coruzzi G M, Bush D R. Nitrogen and carbon nutrient and metabolite signaling in plants[J]. Plant Physiology, 2001, 125(1): 61-64.

- [33] 刘利, 雷小龙, 黄光忠, 等. 机械化播栽对杂交稻氮素积累分配及碳氮比的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 831–844.
- [34] Swank J C, Below F E, Lambert R J, et al. Interaction of carbon and nitrogen metabolism in the productivity of maize[J]. *Plant Physiology*, 1982, 70(4): 1185–1190.
- [35] Lawlor D W. Carbon and nitrogen assimilation in relation to yield: mechanisms are the key to understanding production systems[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(370): 773–787.
- [36] Commichau F M, Forchhammer K, Stulke J. Regulatory links between carbon and nitrogen metabolism[J]. *Current Opinion in Microbiology*, 2006, 9(2): 167–172.
- [37] 岳红宾. 不同氮素水平对烟草碳氮代谢关键酶活性的影响[J]. *中国烟草科学*, 2007, 28(1): 18–20, 24.
- [38] Konishi N, Ishiyama K, Beier M P, et al. Contributions of two cytosolic glutamine synthetase isozymes to ammonium assimilation in *Arabidopsis* roots[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2016, 68(3): 613–625.
- [39] 李平平, 苗秀琴, 武军杨, 等. 壳聚糖在香椿种子萌发及幼苗生长上的生理效应[J]. *西北林学院学报*, 2011, 26(6): 44–47.
- [40] Zhang X Q, Li K C, Xing R, et al. Metabolite profiling of wheat seedlings induced by chitosan: revelation of the enhanced carbon and nitrogen metabolism[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 2017.