

不同剂量 VB₆、C₀B 对苹果幼树生物学性状和理化性质的影响

高付凤, 于文章, 张佳腾, 杨恒峰, 毛云飞, 王增辉, 陈学森, 毛志泉, 沈向

(山东农业大学园艺科学与工程学院/作物生物学国家重点实验室, 山东 泰安 271018)

摘要: 以富士/平邑甜茶 (*M. hupehensis*) 二年生幼树为试材, 研究盆栽条件下土壤中施加不同剂量的维生素 B₆ (VB₆) 和复合维生素 B (C₀B) 对苹果幼树生物学性状和理化性质的影响。于 2016 年在山东农业大学园艺科学与工程学院果树根系实验室进行富士苹果盆栽试验。5 月 26 对富士苹果土施 VB₆、C₀B, 剂量分别为 0, 0.02, 0.03, 0.04 g/株。6—10 月测定外源维生素条件下苹果幼树株高、茎粗, 叶面积, 叶片抗氧化酶活性, 叶绿素相对含量, 光合荧光参数以及根系的生长分布状况。研究表明, 不同剂量 VB₆ 和 C₀B 对苹果幼树株高、茎粗, 植株生物量, 叶面积, 叶片抗氧化酶活性, 光合荧光参数和根系分布情况有不同程度的影响。盆施不同剂量 VB₆、C₀B 显著改善了植株生长势, 叶面积以 VB₆ 0.03 g 增加最显著为 22%, 植株地上部分以 C₀B 0.04 g 处理对植株株高、茎粗和新梢长度增加最显著, 株高、茎粗和新梢长度在 10 月相比对照分别增加了 24%, 34% 和 45%, VB₆ 0.03 g 与 C₀B 0.04 g 两处理间无显著性差异; 地下部分, VB₆ 0.03 g 与 C₀B 0.04 g 两处理对根系干鲜重、总长度、总体积和总表面积增加尤为显著, 根尖数和根系分叉数也显著增加。VB₆ 0.02 g 和 C₀B 0.02 g 剂量下苹果幼树叶片的抗氧化酶活性相比对照无显著性差异, VB₆ 0.03 g 与 C₀B 0.04 g 植株抗性得到显著性增强, 抗氧化酶活性显著提高。此外, 苹果幼树叶片的叶绿素相对含量显著提高、光合荧光特性也得到显著性改善, 且 VB₆ 0.03 g 与 C₀B 0.04 g 两处理间无显著性差异。综合研究结果, VB₆ 0.03 g/株和 C₀B 0.04 g/株对苹果幼树的生物学性状和理化性质影响最显著, 鉴于 C₀B 的有效施用剂量和市场价格均高于 VB₆, 推荐施用 VB₆ 来改善土壤营养条件。

关键词: VB₆; C₀B; 苹果幼树; 光合作用; 荧光参数; 抗氧化酶; 根系生长状况

中图分类号: S661.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)06-0262-010

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.06.041

Effects of Different Doses of VB₆ and C₀B on Biological Characteristics and Physicochemical Properties of Young Apple Trees

GAO Fufeng, YU Wenzhang, ZHANG Jiateng, YANG Hengfeng,

MAO Yunfei, WANG Zenghui, CHEN Xuesen, MAO Zhiquan, SHEN Xiang

(College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract: The Fuji / *M. hupehensis*. Biennial plants were selected, and the different doses of vitamin B₆ (VB₆) and compound vitamin B (C₀B) were added under pot experiments to study the effects on biological characteristics and physicochemical properties of apple trees. The pot experiments were carried out in 2006. VB₆ and C₀B were added into the soil of Fuji on 26th May. And the doses were 0 (control), 0.02, 0.03, 0.04 g/plant respectively. The plant height, diameter, leaf area, leaf antioxidant activity, chlorophyll relative content, photosynthetic fluorescence parameters and the growth and distribution of roots were determined. The results showed that different doses of VB₆ and C₀B had different effects on plant height, stem diameter, plant biomass, leaf area and antioxidant activity, photosynthetic fluorescence parameters and root distribution of apple trees. The plant growth was significantly improved by the addition of VB₆ and C₀B. C₀B of 0.04 g/plant treatment had the most significant effects on aboveground growth, and VB₆ with 0.03 g/plant increased leaf area most significantly, i. e. 22%. The plant height, stem diameter and tip length were

收稿日期: 2017-07-01

资助项目: 山东省现代农业产业技术体系创新团队项目 (SDAIT-06-07); 现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-28); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201303093); 支撑计划专项 (2014BAD6B102)

第一作者: 高付凤 (1992—), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事果树生物学研究。E-mail: 18854811758@163.com

通信作者: 沈向 (1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事果树种质资源评价及生物技术育种研究。E-mail: shenx@sdau.du.cn

increased by 24%, 34% and 45% significantly, compared with the control in October, and no significant difference were observed between VB₆ of 0.03 g/plant and C₀B of 0.04 g/plant. The total length, weight, volume and surface area of the underground were significant improved under VB₆ of 0.03 g/plant and C₀B of 0.04 g/plant, and the number of root tip and bifurcation also increased significantly. There was no significant difference in antioxidant enzyme activities of apple leaves under VB₆ of 0.02 g/plant and C₀B of 0.02 g/plant, compared with control. The resistance of plants was significantly enhanced under VB₆ of 0.03 g/plant and C₀B of 0.04 g/plant, with the increased activities of antioxidant enzymes. The chlorophyll relative contents in apple leaves were significantly improved, and the photosynthetic fluorescence characteristics were also improved remarkably, and there was no significant difference between VB₆ of 0.03 g/plant and C₀B of 0.04 g/plant. The results showed that VB₆ of 0.03 g/plant and C₀B of 0.04 g/plant had the most significant effect on the biological traits and physicochemical properties of apple trees. In view of the higher effective dose and cost of C₀B, it was recommended to use VB₆ to improve soil nutritional conditions.

Keywords: Vitamin B₆; Compound Vitamin B; apple trees; photosynthesis; fluorescence parameters; antioxidant enzymes; root growth status

目前,我国苹果种植面积、总产量、人均占有量与出口量均居世界首位,已经成为世界上最大的苹果生产国和消费国^[1],但在苹果栽培生产过程中面临着许多问题,如许多传统优势栽培区进入老龄化,土壤有机质严重下降,树体不断衰弱,果园经济寿命减短等^[2]。因此,改良土壤养分供应情况,增强树势,获得更好的经济效益是目前苹果生产的重要任务。

化肥的施用不但污染环境且易造成土壤板结,于是很多研究提倡施用有机肥来改善土壤营养条件,但有机肥肥效缓慢且大面积施用较为困难。有机肥发挥作用主要是有机质分解为有机营养既可改变土壤理化性质,也可与土壤直接作用,从而改变土壤肥力、理化性质及微生物环境。有机营养亦称小分子活性物质,具有很强的生化活性,不仅可以直接被植物所吸收,而且可以有效地促进土壤中有效成分的释放^[3]。土壤有机质经过一系列的合成与分解过程,转化成小分子活性有机物即有机营养,小分子活性有机物就包括 B 族维生素^[4]。作为土壤重要小分子活性物质,维生素对植物有特殊的调节作用,近年来,外源维生素在高等植物中所起的作用引起国内外科研人员重视^[5-6]。研究表明,一定剂量的烟酰胺、叶酸、VB₂ 和盐酸吡哆辛对菜豆浸种处理,除根质量和根系活力没有得到显著促进外,菜豆地上部分生长有显著促进作用,降低了植株的根冠比^[7]。在黄瓜、大田作物小麦等的研究上也发现 VB₆ 能显著调节植株生理代谢,提高品质和产量^[8-10]。阮元等^[11]研究表明在 60 mL 液体培养基中加入维生素 B₆ 能显著提高发酵液中虫草素产量,且以 0.05 g 添加量产量最高。外源 VB₆ 能改善拟南芥突变体膜脂质的过氧化作用,促进植物的发育、增强植株对胁迫的耐受能力^[12]。李洋等^[13]研究发现维生素 B₆ 能引发老化玉米种子,

提高玉米种子发芽率、苗高和苗鲜重。外源 B 族维生素在果树方面的研究相对较少,对橄榄、龙眼的实生苗和成年树分别进行土施和叶面喷施维生素 B₁、维生素 B₅、维生素 B₆ 的混合液,可显著促进植株叶片叶绿素 a、b 含量和叶片光合速率,而且叶片栅栏组织和新梢粗度也有明显增加^[14]。王安然等^[15]研究发现,外源 VB₆ 对苹果果实品质的提高有重要影响,但外源维生素对果树树体影响尚未作出详细研究。本文通过研究施加不同剂量 VB₆(维生素 B₆)、C₀B(复合维生素 B)下苹果幼树的株高、径粗,叶片抗氧化酶活性,叶绿素含量,荧光特性以及根系的生长状况,探讨苹果植株增强生长势经济有效维生素剂量,并且丰富有机营养的种类,为苹果生产中更好地增强树势、提高果树经济寿命提供施肥理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为富士/平邑甜茶(*M. hupehensis*)二年生幼树,选择长势健壮、生长整齐一致的苗木移植,苹果幼树栽植后统一初始高度为 50 cm。土壤选用泰安郊区农田土壤,土壤养分含量分别为:有机质 1.7%,有效氮 131.56 mg/kg,有效磷 63.37 mg/kg,速效钾 150.03 mg/kg,土壤 pH 6.3。混匀后装入口径 20.5 cm,深 21 cm 的透气塑料盆中,每盆土重 6 kg。试验所用维生素为 VB₆ 和 C₀B(天津力生制药股份有限公司),VB₆ 10 mg/片,C₀B(复方制剂)每片主要成分 VB₁ 3 mg,VB₂ 1.5 mg,VB₆ 0.2 mg,烟酰胺 10 mg,泛酸钙 1 mg。辅料为淀粉、硫酸钙和硬脂酸镁。

1.2 试验处理

试验于 2016 年 5—10 月在山东农业大学园艺科学与工程学院果树根系实验室进行。试验共设 4 个

梯度,每个梯度为 1 个处理,每个处理的 VB_6 和 C_0B 施用量分别为 0(CK),0.02,0.03,0.04 g/株,共 7 个处理。每个处理 15 盆,每盆 2 株,于 2016 年 5 月 26 日施入盆中。按常规管理方式统一管理,6—10 月定期对各项指标进行测定。

1.3 试验方法

1.3.1 株高和径粗的测定 幼树株高和径粗分别用直尺和游标卡尺进行测量。株高从植株嫁接口处为起点开始测量,径粗在嫁接口上 1 cm 处测量。株高和径粗自 6 月 26 日开始,每隔 30 d 测量 1 次。

1.3.2 SOD、POD 和 CAT 活性的测定 超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定参照 Zhang 等^[16]的方法,采用氮蓝四唑法(NBT)测定,以抑制氮蓝四唑(NBT)光还原 50% 为 1 个酶活力单位(U),用 $FW\ U/(g \cdot min)$ 表示。过氧化物酶(POD)采用愈创木酚法,按 Omran^[17]的方法,测定 470 nm 吸光度的变化,以每分钟内引起 470 nm 吸光度变化 0.01 的酶量为 1 个酶活力单位(U),用 $FW\ U/(g \cdot min)$ 表示。过氧化氢酶(CAT)活性的测定按照 Singh 等^[18]的方法测定 240 nm 吸光度变化,以每分钟内使 240 nm 吸光度减少 0.1 的酶量为 1 个酶活力单位(U),用 $FW\ U/(g \cdot min)$ 表示。每个处理均测定 5 次,取平均值。

1.3.3 叶面积、叶绿素含量和净光合速率的测定 叶面积于 8 月 23 日测量,刻度尺测量叶片的长和宽,长(a)从叶片基部到叶尖,宽(b)为叶片最宽处,近似叶面积 $S=2/3ab$,每个处理重复测定 20 次。在天气晴朗的上午 9:00—10:00,选取植株第 5~7 片完全展开的健康成龄叶(自下而上),用 SPAD—502 便携叶绿素仪进行叶绿素含量的测定;叶片净光合速率用 CIRAS—2 型(PP-Systems)便携式光合作用测定系统测定。自 6 月 26 日开始,每隔 30 天测定 1 次(测量时间前后不超过 2 天),每个处理均测定 5 次。

1.3.4 荧光参数的测定 选取与测量净光合速率相同的叶片,测定时间同净光合速率测定时间一致,用 Junior-PAM(德国 WALZ)便携式荧光仪进行叶片叶绿素荧光参数的测定。获取的主要参数有:实际光化学效率($\varphi PS II$)、光化学猝灭系数(qP)、非光化学猝灭系数(NPQ)、PS II 原初光能转换效率(F_v'/F_m')、电子传递速率(ETR),每处理均测定 5 次。

1.3.5 根系及生物量的测定 在 11 月对整棵植株取根,分别称量地上(去叶)、地下部鲜重,110 ℃ 杀青 20 min,80 ℃ 烘干 10 h 后分别测定干重。根系的测定参照程瑞梅等^[19]的方法,用水清理干净根部杂物,使根系完全舒展开,用 EPSON 植物根系分析仪进行根系的扫描。对根系的总长度、表面积、总体积、根尖数和根系分叉数等进行分析,每个处理均测定 5 次。

1.4 数据处理与分析

试验数据采用 Excel 2010 和 DPS. V 7.05 软件进行统计分析与作图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对苹果株高、径粗和新梢长度植株生物量的影响

由表 1 可知,在整个生长季中,苹果幼树生长量呈现先升高后降低的趋势,7—8 月植株生长量最大。施加 VB_6 和 C_0B 后,从 7 月开始,对苹果幼树株高和径粗呈现显著性促进作用,且与对照存在显著性差异。株高的增加,以 VB_6 0.03 g 和 C_0B 0.04 g 剂量下效果最为显著,7—10 月分别为同期对照的 1.52, 1.39, 1.25, 1.24 倍和 1.41, 1.42, 1.24, 1.24 倍。径粗的增加相比 VB_6 , C_0B 的促进效果更为显著,到 10 月 C_0B 0.02 g、 C_0B 0.03 g、 C_0B 0.04 g 和 VB_6 0.03 g 处理分别为对照的 1.30, 1.33, 1.34, 1.30 倍。

从表 2 可知,植株新梢 6—8 月生长较快,8 月后生长逐渐减慢。从 7 月开始,施加 VB_6 和 C_0B 处理相比对照存在显著促进作用,其中以 VB_6 0.03 g、 C_0B 0.03 g 和 C_0B 0.04 g 增加最为显著,10 月份分别为同期对照的 1.43, 1.36, 1.45 倍。对植株整体取根称量,施加不同剂量的 VB_6 、 C_0B 地上部和地下部均有不同程度的增加(表 3),其中也以 VB_6 0.03 g 和 C_0B 0.04 g 增加最显著,地上部、地下部干鲜重分别为对照的 1.47, 1.38, 1.16, 1.16 倍和 1.33, 1.30, 1.21, 1.40 倍。由此可以得出,盆施不同剂量的 VB_6 和 C_0B 对幼树的株高、径粗和植株生长量均具有显著性影响,以 VB_6 0.03 g 和 C_0B 0.04 g 剂量下对株高的促进效果最佳。 C_0B 对径粗和地下部生长进效果较 VB_6 更明显,且以 C_0B 0.04 g 剂量表现出最佳的促进效果。

2.2 不同处理对苹果幼树叶片抗氧化酶活性的影响

由图 1 可以看出,苹果幼树叶片 SOD 活性在 6—10 月呈逐渐升高的变化趋势,且在 10 月迅速增加。施加 VB_6 和 C_0B 后,除 VB_6 0.02 g 和 C_0B 0.02 g 处理与对照无显著性差异,其他处理 SOD 活性均高于对照,且差异性显著,其中以 VB_6 0.03 g 和 C_0B 0.04 g 处理最为显著,分别为同期对照的 1.54, 1.57, 1.30, 1.49, 1.32 倍和 1.54, 1.55, 1.24, 1.65, 1.30 倍。

施入不同剂量的 VB_6 和 C_0B 后盆栽苹果幼树叶片的 CAT 活性也发生了改变,由图 2 可以看出,在整个生长季中叶片 CAT 活性呈现先升高后降低的变化趋势,且在 9 月达到最高,10 月迅速降低。6 月各处理 CAT 活性低于对照;7 月之后除 VB_6 0.02 g 和 C_0B 0.02 g 处理与对照无显著性差异,其他处理叶片 CAT 活性均有

不同程度的提高,其中以 VB₆ 0.03 g 和 C₀B 0.04 g 处理提高最显著,分别是同期对照的 1.92,1.73,1.38,1.58 倍和 1.72,1.60,1.34,1.67 倍。

在 6—10 月,苹果幼树叶片 POD 活性呈现先升高后降低的变化趋势(图 3),且在 8,9 月达到最高,10 月迅速降低。6,7 月各处理与对照无显著性差异(除 VB₆

0.03 g),8,9 月除 VB₆ 0.02 g 和 C₀B 0.02 g 各处理均高于对照,且差异性显著,其中以 VB₆ 0.03 g、C₀B 0.04 g 处理提高较为显著,且为同期对照的 1.33,1.31 倍和 1.30,1.35 倍。随着季节的变化,VB₆ 0.03 g 处理对 POD 活性的提高在 6—10 月均显著高于同期对照,分别为对照的 1.38,1.14,1.33,1.31,2.70 倍。

表 1 盆施不同剂量的 VB₆、C₀B 对苹果幼树株高和径粗的影响

处理	6 月		7 月		8 月		9 月		10 月	
	株高/cm	径粗/mm	株高/cm	径粗/mm	株高/cm	径粗/mm	株高/cm	径粗/mm	株高/cm	径粗/mm
CK	73.43±0.52d	4.39±0.05c	83.40±1.51e	5.30±0.03d	103.53±4.66d	5.66±0.09d	120.87±3.37e	5.93±0.11d	122.73±2.76d	6.19±0.09c
VB ₆ 0.02 g	76.73±0.41cd	4.55±0.05c	93.67±0.92d	5.55±0.10d	118.23±3.37c	6.43±0.35c	133.50±1.87c	7.17±0.16c	133.83±1.93c	7.28±0.17b
VB ₆ 0.03 g	96.57±2.91a	4.62±0.11c	126.83±3.48a	6.00±0.12c	144.37±2.67a	6.91±0.18bc	150.97±0.88a	7.85±0.17ab	152.53±0.90a	8.02±0.16a
VB ₆ 0.04 g	76.33±0.29cd	4.55±0.07c	105.53±1.97c	5.53±0.05d	130.53±3.32b	6.57±0.11c	139.03±3.99bc	7.19±0.31c	144.30±2.07b	7.23±0.31b
C ₀ B 0.02 g	78.50±1.10bcd	5.09±0.13b	93.83±1.17d	5.95±0.11c	119.03±3.55c	7.00±0.36bc	123.13±2.91d	7.56±0.17bc	124.10±1.21d	8.04±0.12a
C ₀ B 0.03 g	82.77±4.39bc	5.11±0.09b	114.17±0.98b	6.37±0.12b	130.73±3.20b	7.28±0.25ab	146.50±4.22ab	8.18±0.15a	147.57±2.46ab	8.26±0.13a
C ₀ B 0.04 g	85.00±3.52b	5.49±0.15a	117.27±4.37b	6.67±0.06a	146.67±3.41a	7.82±0.09a	150.17±4.11a	8.19±0.08a	152.57±4.10a	8.32±0.08a

注:表中同列数据后不同小写字母表示同年不同处理间在 P<0.05 水平上差异显著。下同。

表 2 盆施不同剂量的 VB₆、C₀B 对苹果幼树新梢生长量的影响

单位:cm

处理	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
CK	38.07±2.92ab	50.08±5.54cd	59.33±11.75c	65.00±9.24c	75.37±7.14b
VB ₆ 0.02	30.30±4.03ab	55.43±8.83bcd	74.57±7.57abc	88.90±12.96abc	90.27±12.40ab
VB ₆ 0.03	44.70±5.98a	75.33±6.92a	92.27±7.79ab	106.27±12.04a	107.43±11.32a
VB ₆ 0.04	23.33±4.68b	51.15±3.92cd	82.33±3.51ab	90.20±3.25abc	91.33±3.64ab
C ₀ B 0.02	31.70±2.15ab	47.57±7.79d	72.40±5.80bc	74.73±6.87bc	75.50±6.99b
C ₀ B 0.03	37.70±8.25ab	70.63±6.75abc	91.47±7.30ab	101.40±5.37ab	102.23±5.49a
C ₀ B 0.04	41.23±6.23a	73.37±3.94ab	96.67±4.77a	105.63±8.09a	109.40±8.82a

表 3 盆施不同剂量的 VB₆、C₀B 对苹果幼树生物量的影响

单位:g

处理	地上部生物量		地下部生物量	
	鲜重	干重	鲜重	干重
CK	14.90±0.51d	8.36±0.01c	33.09±2.28c	13.89±0.27cd
VB ₆ 0.02	17.00±0.07bcd	8.89±0.02bc	27.42±1.22d	12.51±0.58d
VB ₆ 0.03	21.92±1.12a	11.54±0.82a	38.51±1.25ab	16.17±0.80b
VB ₆ 0.04	19.66±1.82ab	9.74±0.74abc	38.28±0.37ab	14.82±0.99bc
C ₀ B 0.02	15.35±0.77cd	8.41±0.07c	30.45±2.40cd	13.75±0.25cd
C ₀ B 0.03	18.99±0.82bc	8.99±0.08bc	34.34±0.64bc	16.24±0.79b
C ₀ B 0.04	19.77±1.22ab	10.83±1.08ab	40.20±0.38a	19.43±0.46a

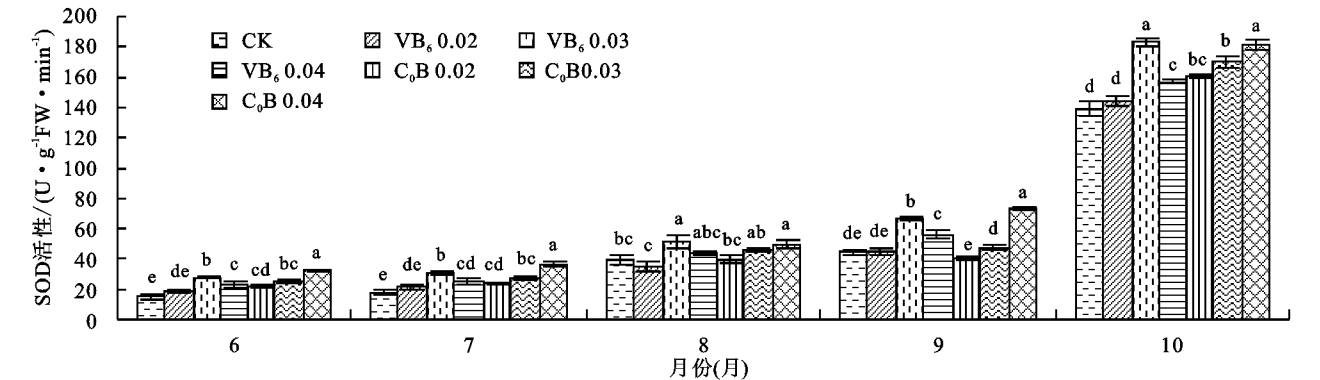


图 1 盆施不同剂量的 VB₆、C₀B 对苹果幼树叶片 SOD 活性的影响

2.3 不同处理对苹果幼树叶片叶面积和叶绿素相对含量的影响

施加 VB₆、C₀B 对苹果幼树叶面积存在不同程度的影响(图 4),其中以 VB₆ 0.03 g 处理叶面积增加较为显

著,相比对照增加了 11%。由图 4 可以看出,施加维生素后,叶面积较对照增加显著,其中以 VB₆ 0.03 g 处理增加最为显著为 22%,VB₆ 0.03 g 和 C₀B 0.04 g 处理间无显著性差异。随着时间的推移,苹果幼树叶

叶片叶绿素相对含量呈现先上升后不同程度降低的变化趋势(表 4),在 9 月达到最高。盆施不同剂量的 VB₆、C₀B 后,苹果幼树叶片叶绿素相对含量相比同期对照均有提高,且差异性显著,其中以 VB₆ 0.03 g 处理对叶绿素相对含量提高最为显著,分别为同期对照的 1.19,1.09,1.15,1.11,1.18 倍;C₀B 0.04 g 处

理自 7 月开始与对照存在显著性差异,分别为同期对照的 1.11,1.12,1.10,1.17 倍。在不同月间,外源维生素条件下叶绿素相对含量的变化范围范围小于 CK,如 VB₆ 0.03 g、C₀B 0.04 g 和 CK 苹果幼树叶片叶绿素含量最高月 9 月分别是最低月 6 月的 1.11,1.17,1.19 倍。

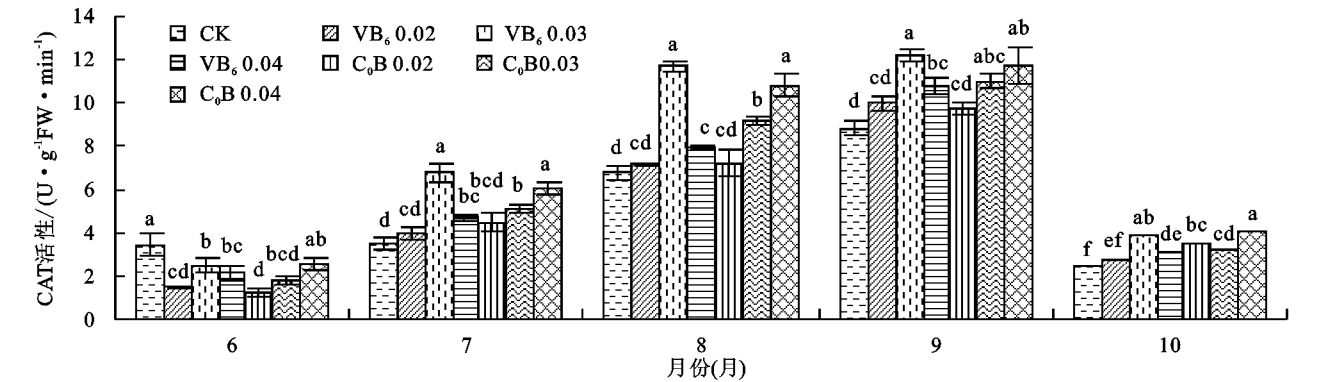


图 2 盆施不同剂量 VB₆、C₀B 对苹果幼树叶片 CAT 活性的影响

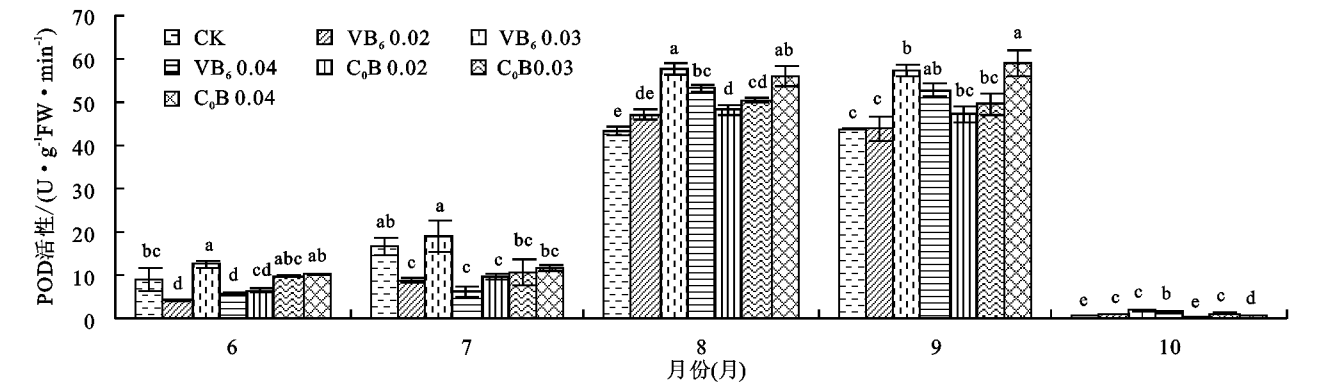


图 3 盆施不同剂量 VB₆、C₀B 对苹果幼树叶片 POD 活性的影响

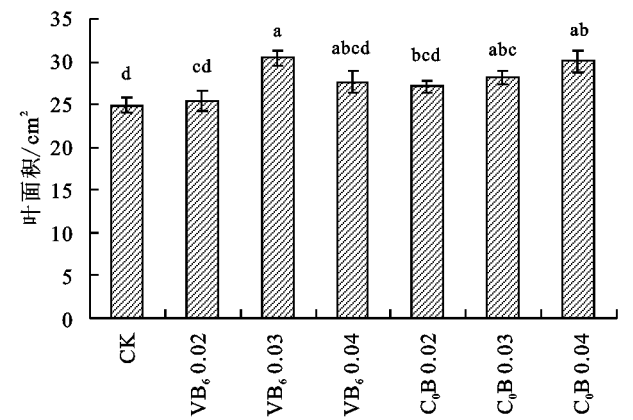


图 4 盆施不同剂量 VB₆、C₀B 对苹果幼树叶面积的影响

2.4 不同处理对苹果幼树叶片叶绿素含量和净光合速率 P_n 的影响

在整个生长季内,苹果幼树叶片的净光合速率呈现先升高后降低的变化趋势(表 5),在 8 月达到最高。盆施不同剂量的 VB₆、C₀B 后,植株叶片的净光合速率得到不同程度的提高,6,7 月以 VB₆ 0.03 g 和 C₀B 0.04 g 提高较为显著且处理之间无显著性差异,其中 VB₆ 0.03 g 提高最高,分别为同期对照的 1.48,1.67 倍。8 月,9 月和 10 月,以 C₀B 0.03 g 和 C₀B 0.04 g 处理净光合速率提高最显著,分别为同期对照的 1.82,1.61,1.58 倍和 1.94,1.69,1.72 倍。

表 4 盆施不同剂量 VB₆、C₀B 对苹果幼树叶片叶绿素相对含量的影响

处理	叶绿素相对含量(SPAD)				
	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
CK	43.17±0.70c	48.10±0.23d	48.93±1.17c	51.17±0.15c	47.87±0.43d
VB ₆ 0.02	48.97±0.44b	50.20±0.42c	53.30±0.67ab	51.80±0.15bc	50.80±1.53cd
VB ₆ 0.03	51.17±0.58a	52.27±0.54ab	56.03±0.85a	56.73±0.09a	56.37±0.33a
VB ₆ 0.04	48.10±0.76b	49.43±0.03cd	51.97±0.41b	53.10±0.67b	54.23±1.84abc
C ₀ B 0.02	49.20±0.15b	49.70±0.10c	52.33±1.56b	52.50±0.96bc	53.70±1.53abc
C ₀ B 0.03	48.87±0.10b	51.90±0.29b	53.60±1.36ab	52.83±0.12b	52.57±0.84bc
C ₀ B 0.04	48.07±0.27b	53.50±0.95a	54.80±0.15ab	56.47±0.20a	55.83±0.65ab

表 5 盆施不同剂量 VB₆、C₀B 对苹果幼树叶片净光合速率 P_n 的影响

处理	净光合速率 $P_n/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$				
	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
CK	11.47±0.18 f	12.57±0.18d	12.37±0.41e	10.23±0.26e	9.03±0.44d
VB ₆ 0.02	12.00±0.87ef	12.67±0.58d	14.20±0.34d	11.37±0.44de	10.20±0.51cd
VB ₆ 0.03	16.71±0.46a	21.04±1.12a	22.20±0.51b	15.47±0.43b	13.63±0.64b
VB ₆ 0.04	13.67±0.23cd	17.11±0.48b	17.11±0.48c	12.80±0.59c	11.03±0.62c
C ₀ B 0.02	13.11±0.48de	14.67±0.54 c	16.33±0.43c	12.03±0.46cd	10.93±0.38 c
C ₀ B 0.03	15.00±0.46bc	20.33±0.43a	22.53±0.56ab	16.47±0.34ab	14.27±0.38ab
C ₀ B 0.04	15.90±0.42ab	20.93±0.73a	23.97±0.70a	17.27±0.38a	15.53±0.38a

2.5 不同处理对苹果幼树叶片 $\Phi\text{PS II}$ 、 qP 、 NPQ 、 F_v'/F_m' 和 ETR 的影响

叶绿素荧光参数经常用来评价光合器官的功能和环境胁迫的影响^[20],PS II 实际光化学效率($\Phi\text{PS II}$)表示电子在 PS II 和 PS I 间的传递情况,可显示植物光和电子的传递效率,由图 5A 可以看出, $\Phi\text{PS II}$ 在 6—9 月趋于稳定,10 月迅速降低,盆施 VB₆、C₀B 后,除 C₀B 0.02 g 处理差异不显著,其他各处理相比对照均有显著性提高,其中以 VB₆ 0.03 g 和 C₀B 0.04 g 处理效果最显著,分别为同期对照的 1.14,1.20,1.15,1.12,1.06 倍和 1.09,1.17,1.15,1.10,1.04 倍,两处理间无显著性差异。

(F_v'/F_m')为 PS II 反应中心有效光化学量子产量转化效率,可反映开放的 PS II 反应中心的原初光能捕获效率^[21]。图 5B 显示 6—10 月, F_v'/F_m' 呈逐渐增加的变化趋势,各处理相比对照均有所提高,且差异性显著,其中以 VB₆ 0.03 g 和 C₀B 0.04 g 处理效果最显著,分别为同期对照的 1.17,1.25,1.03,1.10,1.07 倍和 1.18,1.25,1.04,1.10,1.09 倍。

NPQ 为非光化学猝灭系数,是 PSII 天线色素吸收的不能用于光合电子传递而以热能的形式耗散掉的光能部分,反映光系统对过剩光能的耗散能力光化学猝灭系数。图 5C 显示 10 月之前,NPQ 无明显变化,在 10 月迅速升高。各处理相比同期对照均有所降低,且存在显著性差异,其中以 VB₆ 0.03 g 和 C₀B 0.04 g 处理降低最显著(10 月外,二者无显著性差异),C₀B 0.04 g 处理分别为同期对照的 33%,40%,53.0%,55%和 69%。

qP 通常用于反映 PS II 原初电子受体 QA 的氧化还原状态和 PS II 开放中心的数目, qP 越大,说明 PS II 的电子传递活性越大。图 5D 显示 qP 在 9 月之前趋于稳定,9 月开始降低,各处理相比对照都有不同程度的提高,且各处理相比对照差异性显著,其中以 C₀B 0.04 g 处理提高最显著,分别为同期对照的 1.24,1.23,1.25,1.11,1.27 倍。

电子传递效率(ETR)可以定量反映出从 $\varphi\text{PS II}$ 到 $\varphi\text{PS I}$ 的电子传递。图 5E 显示 ETR 呈现先升高后降低的变化趋势,7 月达到最高,除 VB₆ 0.02 g 和 C₀B 0.02 g 处理,各处理相比对照均有显著性提高,其中以 C₀B 0.04 g 处理提高最显著,分别为同期对

照的 1.18,1.15,1.19,1.10,1.18 倍。

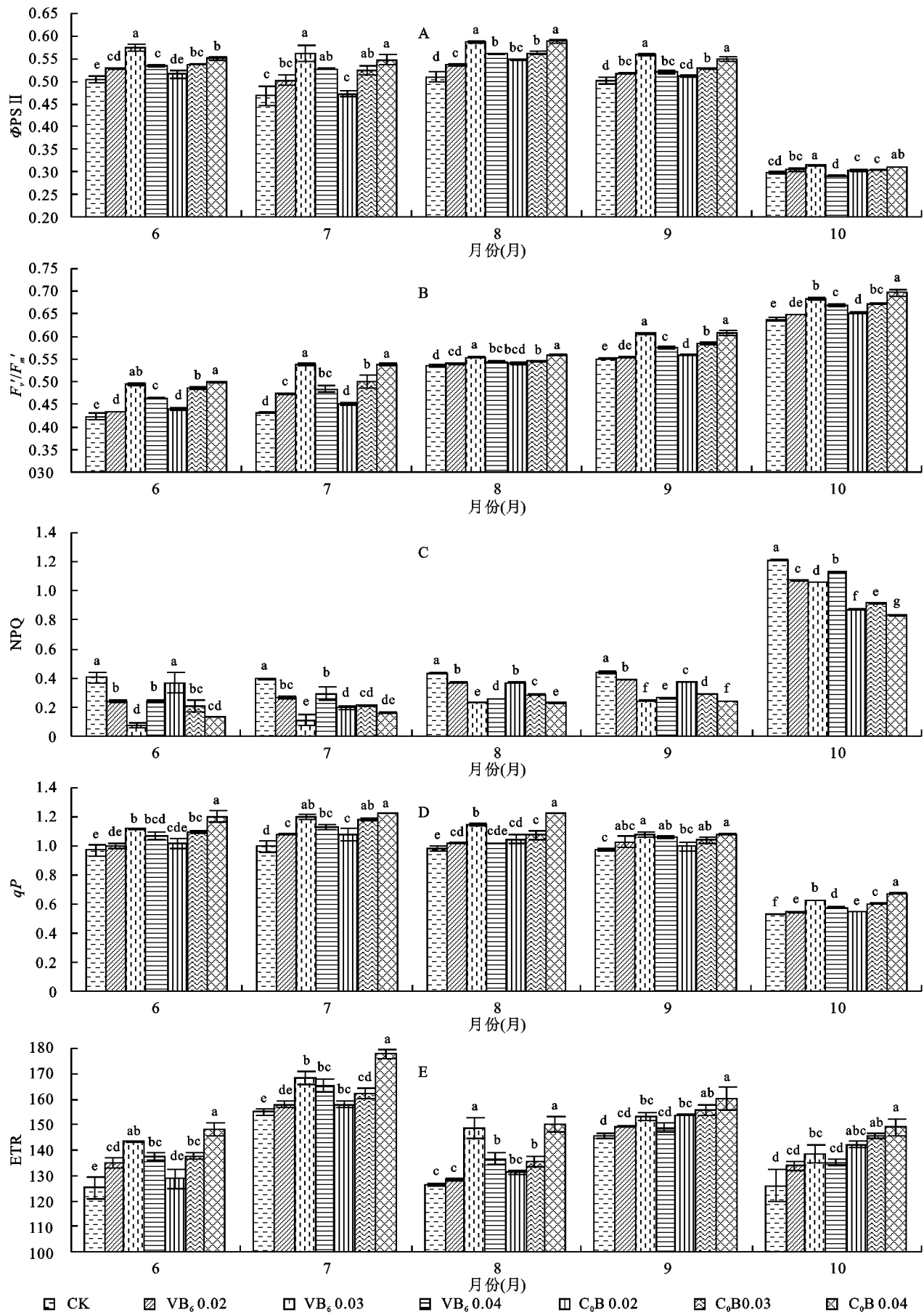
2.6 不同处理对苹果幼树根系的影响

果树根系是植株的水肥资源捕获器,与树体水分、养分的吸收息息相关,其行为特征直接关系到地上部植株的生长^[22]。不同剂量的 VB₆、C₀B 对植株根系作用效果不同,低剂量的维生素发根作用不明显,如图 6,VB₆ 0.02 g 和 C₀B 0.02 g 处理作用效果与对照无显著性差异,其他处理苹果幼树根系总长、总面积、总体积、根尖数和根系分叉数相比对照均有显著性增加。VB₆ 0.03 g 和 C₀B 0.04 g 处理对发根总量如根系总长和总面积作用显著,分别为对照的 1.24,1.27 倍和 1.32,1.31 倍。VB₆ 0.03 g、C₀B 0.03 g 和 C₀B 0.04 g 处理对根系总体积提高显著,分别为对照的 1.41,1.37,1.43 倍,且处理之间无显著性差异。根尖数以 C₀B 0.04 g 处理效果最显著,为对照的 1.52 倍,VB₆ 0.03 g 和 C₀B 0.04 g 对植株根系分叉数有显著性提高,分别为对照的 1.34,1.36 倍。

3 讨论

维生素参加催化涉及氨基酸的各种代谢反应,在各种合成和代谢的反应中发挥重要的作用^[23]。研究表明,外源维生素在促进作物、蔬菜、果树等的生长都起到了显著作用^[8-9,14]。其中 B 族维生素几乎全部参与重要的酶促反应的辅酶或者辅酶、辅基的组成,是动植物生长和发育重要的营养元素及生长调节剂,对植物生长具有显著的促进作用。维生素 B₆ 是转氨作用中的辅酶,具有脱羧作用,泛酸是辅酶 A 的组成成分,具有酰基转移作用^[24]。因此,B 族维生素在植物体内是不可或缺的物质,对植物生长起到至关重要的作用。

B 族维生素不仅参与植物内在生理反应,也可外源添加促进植物的生长。Innocenti 等^[25]发现 VC 能促进葱根系分生组织和中柱鞘细胞从 G1 期到 S 期的分裂,并使不活动中心细胞数量减少。外源 VB₆ 能调节拟南芥突变体内 Na⁺ 和 K⁺ 平衡,促进植株根系生长^[26]。显著提高小麦根系的总吸收面积和活跃吸收面积,根系分叉数增多,发根作用明显^[8]。王本昌等^[27]发现对缺镁的玉米喷施一定浓度的 VB₆、VB₂ 可一定程度恢复玉米正常生长。植株的地上部分和地下部分相互影响、相互联系,营养物质相互供应,保持相对的动态平衡^[28]。



注: $\Phi PS II$ 为 PS II 实际光化学效率; F_v'/F_m' 为 PS II 反应中心光能捕获效率; NPQ 为非光化学猝灭系数; qP 为 PS II 的光化学猝灭系数; ETR 为电子传递速率。

图 5 盆施不同剂量 VB₆、C₀B 对苹果幼树叶片荧光参数 $\Phi PS II$ 、 F_v'/F_m' 、NPQ、 qP 和 ETR 的影响

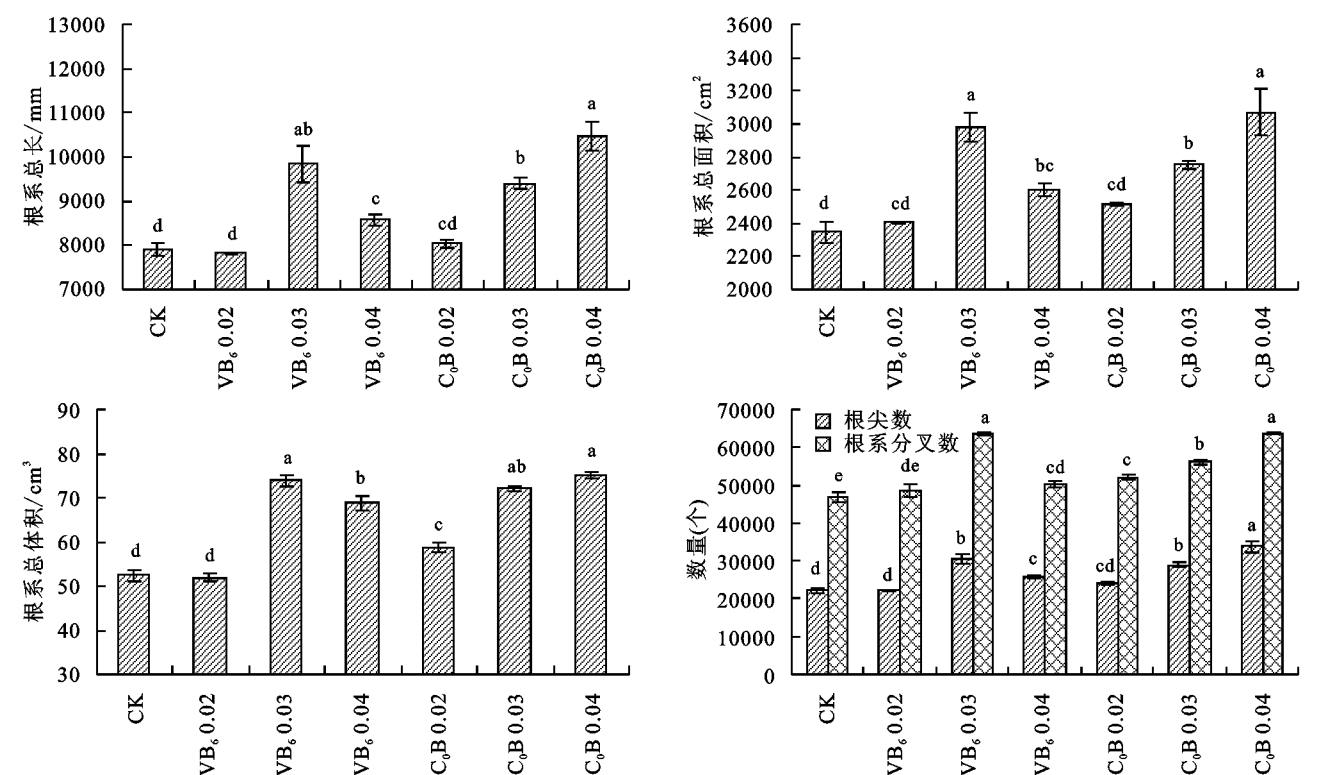


图 6 盆施不同剂量 VB₆、C₀B 对苹果幼树根系总长、根系总面积、根系总体积、根尖数及根系分叉数的影响

本研究在盆栽条件下施加不同浓度的 VB₆ 和 C₀B 后,显著增加了苹果幼树根系,鲜重、总长度、总体积、总表面积、根尖数和根系分叉数,其中 C₀B 0.04 g 增加最显著,分别为对照的 1.21,1.32,1.31,1.43,1.52,1.36 倍。与此同时,株高、径粗新梢生长量也得到显著性提高,同样以 C₀B 0.04 g 提高最显著,在 10 月分别为对照的 1.22,1.34,1.45 倍,VB₆ 0.03 g 和 C₀B 0.04 g 两处理间无显著性差异,与前人研究结果一致。外源维生素作为可被植物根系选择性吸收的小分子物质,进入根系后,在电子传递等方面起作用,影响了根系细胞分裂,增加植株根系总量,扩大根系吸收面积,进而提供地上部分更多的养分,使得植株株高、径粗和新梢生长量都得到显著性增加。但植株生长量并没有随维生素施加剂量的增多而增加,这可能是植物自身存在的调节机制如拮抗作用,使得维生素的吸收抑制了植物对其他元素的吸收,从而一定程度上影响了植株生长,导致植株的生长不与施加剂量呈线性关系。

抗氧化酶一定程度上反应逆境胁迫对植株伤害的大小,植物通过抗氧化酶系统活性的变化及膜脂过氧化作用来应对逆境。POD 可催化过氧化物和某些酚类物质的分解,使活性氧的产生和消除处于平衡状态;SOD 可清除产氧化物阴离子自由基,产生对植物体有害的 H₂O₂;CAT 则清除过量的 H₂O₂,与 SOD、POD 和 CAT 一起保护膜系统免受自由基的侵害。裴斌等^[29]研究发现,在干旱相对较轻时,沙棘叶片的抗氧化酶系统启动,SOD、POD 和 CAT 等抗氧化酶

活性显著升高,自由基清除能力增强,活性氧的产生在植株清除自由基的能力范围内,从而起到保护光合作用机构的作用。VB₆ 是一种很强的生物抗氧化剂,可有效猝灭单线态氧分子和超氧化物负离子,在植物体内发挥抗逆作用^[30]。维生素 B₆ 增加了拟南芥突变幼苗膜脂质的过氧化作用,维生素 B₆ 可能代表植物中新类抗氧化剂^[12],本试验在施加 VB₆、C₀B 后,苹果幼树叶片抗氧化酶活性显著高于同期对照,且 VB₆ 0.03 g 和 C₀B 0.04 g 处理下提高最显著。表明外源 VB₆、C₀B 条件下,植物抗氧化酶活性提高,清除自由基能力增强,植株自我保护能力增强,能更好的抵御逆境。由此可见,VB₆、C₀B 在一定程度上增加了植株的抗性,使植物体更好的应对逆境条件,可进一步开展外源维生素 VB₆、C₀B 条件下植物抗旱性、抗涝性和抗冻性等方面的研究。

叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,叶绿素的合成与氮代谢过程有着密切的联系,影响着光合产物和生物产量的形成。叶绿素的含量在一定程度上能表现植物光合作用的强弱,也反映了树体生长发育的情况^[31]。SPAD 即叶片叶绿素的相对含量,与叶绿素含量正相关,可以作为叶绿素含量的另一种反应^[32]。光合作用是植物将光能转化为化学能的重要功能,是决定苗木生长质量的重要生理过程。倪蔚茹等^[33]研究发现,叶绿素含量的动态研究可作为识别果树抗性的技术指标,重茬土环境中,“富士 2001”和“宫崎”两个抗性较好的品种叶绿素含量和叶片净光合速率与对照均无显著性差异。光系统中叶绿素吸

收的光能主要用于 3 种途径:光合电子传递、叶绿素荧光发射和热耗散,植物叶片的 PS II 作为光能捕获和传递的活性中心,其活性的正常与否直接影响着光合原初反应的进行^[34]。PS II 光能转化和活性氧代谢协同作用稳定光合作用机构。因此抗氧化酶活性、叶绿素含量和光合荧光性能密切相关。研究表明,VB₆ 0.03 g 和 C₀B 0.04 g 处理相比同期对照抗氧化酶活性、叶绿素含量和叶片净光合速率均有显著性提高,相应的荧光参数(除 NPQ 外)也随叶绿素含量的增高而增高。盆施适宜剂量的 VB₆、C₀B 有助于叶片叶绿素的合成,进而提高 PS II 反应中心的光化学活性,使得 PS II 的实际电子传递效率升高,影响到植物叶片的光合作用,过高剂量的 VB₆ 则不利于叶片光合荧光参数的改变,导致光合速率下降。综上,VB₆、C₀B 由于用量较少,对土壤环境的改善作用较小,主要应是作为植物生长重要的小分子物质被植物脂膜选择性吸收,一方面用于合成构成一些酶的辅酶或辅基参加酶促反应,促进植物的新陈代谢;另一方面对电子传递起重要作用,影响植物细胞的分裂,增强光合作用,制造更多的有机营养,从而促进植株的生长,与此同时,植株体内存在某种调节机制,较高浓度的施加剂量可能会抑制植物对其他元素的吸收,致使植物生长不与施加剂量呈正相关。

4 结 论

(1)低剂量的 VB₆ 和 C₀B 对苹果幼树各项指标无显著性促进作用,VB₆ 的施加效果不与施加剂量成正相关。

(2)VB₆ 0.03 g 和 C₀B 0.04 g 处理,对促进果树生根、提高果树生长势效果较佳,苹果幼树叶片光合荧光参数等相比对照也都有显著性提高,但是从经济角度出发,在达到同样效果的前提下,施加 C₀B 的有效剂量和投入成本都要高于 VB₆,因此推荐施加 VB₆。

(3)研究表明外源维生素 B₆ 作为有机营养小分子物质,能起到增强苹果树体的生长势,促进叶片光合作用,同时,适宜剂量的 C₀B 也可以起到相同的作用,但外源维生素 VB₆、C₀B 对树体产生作用的内在机理需要进一步的试验进行验证。

参考文献:

- [1] 陈学森,韩明玉,苏桂林,等. 当今世界苹果产业发展趋势及我国苹果产业优质高效发展意见[J]. 果树学报, 2010,27(4):598-604.
- [2] 刘军弟,霍学喜,韩明玉,等. 中国苹果产业发展现状及趋势分析[J]. 北方园艺,2012(20):164-168.
- [3] 夏燕飞,张文会,王荣,等. 土壤有机营养对“红富士”苹果果实产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013,1(4):868-877.
- [4] Khan A, Ashraf M. Exogenously applied ascorbic acid alleviates salt-induced oxidative stress in wheat[J]. Environmental

- and Experimental Botany,2008,63(1):224-231.
- [5] 孙西丽,赵方贵,张英昊,等. 外源维生素对盐胁迫下玉米种子萌发和某些生理指标的影响[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版),2009,26(4):313-317.
- [6] 任秀艳,张一名,乔洁,等. 外源维生素对盐胁迫下红小豆幼苗脂质过氧化的影响[J]. 西南农业学报,2012,25(5):1625-1628.
- [7] 李振轮,李鑫强,朱培. 维生素浸种和电场处理对菜豆生长发育初期的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013,35(5):145-151.
- [8] 唐瑞,吴瑜. 维生素对小麦生长及生理功能的调节作用研究进展[J]. 应用与环境生物学报,2006,12(6):869-873.
- [9] 杨萍,罗庆熙,张珂珂,等. 外源维生素对盐胁迫下黄瓜种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 长江蔬菜,2010(7):41-42.
- [10] 任秀艳,张一名,乔洁,等. 外源维生素对盐胁迫下红小豆幼苗脂质过氧化的影响[J]. 西南农业学报,2012,25(5):1625-1628.
- [11] 阮元,马进川,薛元,等. 维生素 B₁、B₆ 和生长激素 2, 4-D 对蛹虫草液体发酵虫草素产量的影响[J]. 菌物学报,2014,33(2):477-482.
- [12] Chen H, Xiong L. Pyridoxine is required for post-embryonic root development and tolerance to osmotic and oxidative stresses[J]. The Plant Journal,2005,44(3): 396-408.
- [13] 李洋,李春雷,路明,等. 植物激素,维生素引发老化玉米种子的研究[J]. 作物杂志,2015(6):150-154.
- [14] 陈清西. 维生素 B 对若干常绿果树生长和光合作用的影响[J]. 福建农业大学学报,1995,24(4):410-413.
- [15] 王安然,倪蔚茹,贺锡燕,等. 维生素 B₆ 施用时间和剂量对富士苹果品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016,22(5):1348-1355.
- [16] 师生波,尚艳霞,朱鹏锦,等. 不同天气类型下 UV-B 辐射对高山植物美丽风毛菊叶片 PSII 光化学效率的影响分析[J]. 植物生态学报,2011,35(7):741-750.
- [17] 颜建明,郁继华,黄高宝,等. 低温弱光下辣椒叶片 PSII 光能吸收和转换变化及与品种耐性的关系[J]. 中国农业科学,2011,44(9):1855-1862.
- [18] 魏鑫,魏永祥,郭丹,等. 不同打破休眠方式对‘密斯梯’越橘叶片光合特性及保护酶活性的影响[J]. 中国农业科学,2015,48(22):4517-4528.
- [19] 程瑞梅,王瑞丽,肖文发,等. 三峡库区马尾松根系生物量的空间分布[J]. 生态学报,2012,32(3):823-832.
- [20] Lin Y C, Hu Y G, Ren C Z, et al. Effects of nitrogen application on chlorophyll fluorescence parameters and leaf gas exchange in naked oat[J]. Journal of Integrative Agriculture,2013,12(12):2164-2171.
- [21] 付春霞,张元珍,王衍安,等. 缺锌胁迫对苹果叶片光合速率及叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国农业科学, 2013,46(18):3826-3833.
- [22] 韩甜甜,胡艳丽,毛志泉,等. 土壤不同介质界面对苹果根系构型和土壤特性的影响[J]. 中国农业科学,2012, 45(17):3639-3645.
- [23] 曾海彬,张剑韵,黄龙全. 采用高效液相色谱技术分析

- 烟草体内的维生素 B₆ 化合物[J]. 广西植物, 2011, 31(5): 695-698.
- [24] Baghizadeh A, Ranjbar S, Gupta V K, et al. Green synthesis of silver nanoparticles using seed extract of *Calendula officinalis* in liquid phase[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2015, 207: 159-163.
- [25] Innocenti A M, Bitonti M B, Arrigoni O, et al. The size of the quiescent center in roots *Allium cepa* L. grown with ascorbic acid[J]. *New Phytol* 1990, 114: 507-509.
- [26] Shi H, Xiong L, Stevenson B, et al. The Arabidopsis salt overly sensitive 4 mutants uncover a critical role for vitamin B₆ in plant salt tolerance[J]. *The Plant Cell*, 2002, 14(3): 575-588.
- [27] 王本昌, 刘云龙. 外源维生素对植物的调节作用[J]. 生物学教学, 1995(11): 6-7.
- [28] 冯远娇, 王建武, 骆世明. 植物地上部与地下部的诱导防御反应研究综述[J]. 生态科学, 2010, 29(3): 292-297.
- [29] 裴斌, 张光灿, 张淑勇, 等. 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1386-1396.
- [30] 王灵红, 黄龙全, 张剑韵. 逆境条件下烟草维生素 B₆ 存在形态的变化[J]. 热带作物学报, 2013, 34(6): 1050-1053.
- [31] 艾立山. 注射施肥对红富士苹果叶片营养和果实产量及品质的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [32] 李敏夏, 张林森, 李丙智, 等. 苹果叶片高光谱特性与叶绿素含量和 SPAD 值的关系[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(2): 35-39.
- [33] 倪蔚茹, 王安然, 贺锡燕, 等. 重茬土对相同砧木不同苹果品种生理指标及叶片抗氧化酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(18): 3597-3607.
- [34] 吕三三, 杜国栋, 刘志琨, 等. 覆草对苹果叶片显微结构及光系统功能的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(1): 130-139.

(上接第 248 页)

- [13] Harter R D, Naidu R. Role of metal-organic complexation in metal sorption by soils[J]. *Advances in Agronomy*, 1995, 55(8): 219-263.
- [14] 周东美, 郑春荣, 陈怀满. 镉与柠檬酸、EDTA 在几种典型土壤中交互作用的研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 29-36.
- [15] Kizito S, Wu S, Kirui W K, et al. Evaluation of slow pyrolyzed wood and rice husks biochar for adsorption of ammonium nitrogen from piggery manure anaerobic digestate slurry[J]. *Science of The Total Environment*, 2015, 505(2): 102-112.
- [16] 李楠, 单保庆, 唐文忠, 等. 稻壳活性炭制备及其对磷的吸附[J]. 环境工程学报, 2013, 7(3): 1024-1028.
- [17] Gundale M J, DeLuca T H. Charcoal effects on soil solution chemistry and growth of *Koeleria macrantha* in the ponderosa pine/Douglas-fir ecosystem[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 43(3): 303-311.
- [18] 周建斌, 陈竹君, 李生秀. 土壤微生物量氮含量、矿化特性及其供氮作用[J]. 生态学报, 2001, 21(10): 1718-1725.
- [19] 潘能, 陈卫平, 焦文涛, 等. 绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析[J]. 环境科学, 2012, 33(12): 4088-4093.
- [20] 杨林林, 杨培岭, 任树梅, 等. 再生水灌溉对土壤理化性质影响的试验研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 82-85.
- [21] 王宁, 南忠仁, 王胜利, 等. Cd/Pb 胁迫下油菜中重金属的分布、富集及迁移特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2012, 48(3): 18-22.
- [22] 王兵, 周琴, 南忠仁, 等. 干旱区绿洲受污染土壤中 Cd 和 Pb 在油菜中的累积与迁移[J]. 西北农业学报, 2011, 20(3): 62-66.
- [23] 李中阳, 齐学斌, 樊向阳, 等. 不同钝化材料对污灌农田镉污染土壤修复效果研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(3): 42-44.

(上接第 261 页)

- [23] 周劲松, 闫平, 张伟明, 等. 生物炭对水稻苗期生长、养分吸收及土壤矿质元素含量的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(11): 2952-2959.
- [24] Liang Y, Leonard J J, Feddes J J R, et al. Influence of carbon and buffer amendment on ammonia volatilization in composting[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(5): 748-761.
- [25] Steiner C, Slaser B, Teixeira W S, et al. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferrasol amended with compost and charcoal[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(6): 893-899.
- [26] Fan F L, Yin C, Tang Y J, et al. Probing potential microbial coupling of carbon and nitrogen cycling during decomposition of maize residue by ¹³C-DNA-SIP[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 70(3): 12-21.
- [27] 朱霞, 韩晓增, 乔云发, 等. 外加可溶性碳、氮对不同热量带土壤氮挥发的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(12): 3465-3470.
- [28] Lin D X, Fan X H, Hu F, et al. Ammonia volatilization and nitrogen utilization efficiency in response to urea application in rice fields of the Taihu Lake region, China[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(5): 639-645.