

断根对冬枣营养生长的影响

杨守军¹, 邢尚军², 杜振宇², 姜伟³, 王海⁴, 刘春生^{1*}

(¹ 山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018; ² 山东省林业科学研究院, 济南 250014; ³ 龙口市农业局, 山东龙口 265701; ⁴ 滨州市林业局, 山东滨州 256600)

摘要: 以 6 年生的冬枣 (*Zizyphus jujuba* Mill.) 为试材, 分别在行间两侧距树干 3 倍、5 倍和 7 倍胸径距离处对其进行断根处理, 研究了断根对冬枣营养生长的影响。结果表明: 3 倍胸径断根与对照相比, 枣头一次枝的长度和数量分别减少了 27.9% 和 12.1%。3 倍和 5 倍胸径断根与对照相比, 35 d 时叶片 N、P、K 含量差异不明显, 而断根 161 d 时差异达显著水平; 叶片光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度及根系玉米素 (ZT) 含量, 35 d 时较对照略有下降, 161 d 时则有所升高; 枣头一次枝顶端生长素 (IAA) 含量和根系 IAA 含量, 35 d 时较对照略有升高, 而 161 d 时有所下降; 枣头一次枝顶端乙烯释放量和根系脱落酸 (ABA) 含量, 断根 35 d 和 161 d 时较对照均有所升高。与 3 倍胸径相比, 5 倍胸径断根对冬枣营养生长的抑制效应有所减弱。冬枣叶片叶绿素含量以 3 倍胸径含量最高, 随断根距离的增加, 含量逐渐减少, 但一直高于对照。断根促进了果实维生素 C 和总糖含量增加, 对总酸含量和产量则无明显影响。综合分析认为, 3 倍胸径断根是控制营养生长的最佳距离。

关键词: 冬枣; 断根; 营养生长; 激素; 调控

中图分类号: S 665.1 文献标识码: A 文章编号: 0513-353X (2009) 05-0625-06

Effect of Root Cutting on Vegetative Growth of *Zizyphus jujuba* Mill. 'Dongzao' Trees

YANG Shou-jun¹, XING Shang-jun², DU Zhen-yu², JIANG Wei³, WANG Hai⁴, and LIU Chun-sheng^{1*}

(¹ College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; ² Shandong Forestry Academy, Jinan 250014, China; ³ Longkou Agricultural Bureau, Longkou, Shandong 265701, China; ⁴ Binzhou Forestry Bureau, Binzhou, Shandong 256600, China)

Abstract: The root system of six-year-old Chinese jujube trees were manually cut with a sharp spade at 3, 5 or 7 times trunk diameter distance along both inter-row sides prior to buds break on April 26th 2008 in Binzhou Chinese jujube orchards, to study the effects of root cutting on the vegetative growth. The results showed that the root cutting of 3 times trunk diameter decreased the length of once branch by 27.9% and the numbers of once branch by 12.1% in contrast to the control. Compared to the control, root cutting of 3 and 5 times trunk diameter had no apparent effects on N, P and K content of leaves after 35 days, but had significant effects after 161 days. Photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r), stomatal rate (G_s), intercellular concentration (C_i) of leaves and zeatin (ZT) content of root were lowered after 35 days and were raised after 161 days as effected by the root cutting treatments of 3 and 5 times trunk diameter. However, Auxin (IAA) concentrations of once branch top and root were increased after 35 days and decreased after 161 days. Also, ethylene release of once branch top and abscisic acid (ABA) content of root were both increased after 35 and 161 days. Compared with root cutting of 3 times trunk diameter, the effect of root cutting on the vegetative growth at the distance of 5 times trunk diameter was weakened to some extent. Leaf chlorophyll content

收稿日期: 2008-12-15; 修回日期: 2009-03-25

基金项目: '十一五' 国家科技支撑计划重大专项项目 (2006BAD03A1505-3)

* 通讯作者 Author for correspondence (E-mail: cslu@sdau.edu.cn; Tel: 0538-8241546)

of Chinese jujube trees was the highest under the treatment of 3 times trunk diameter root cutting, which declined gradually with the increase of root cutting distance. The contents of vitamin C and total sugar in fruits were increased by root cutting, but no effects were found on total acid content of fruit and yield at harvest. It is proposed that 3 times trunk diameter was the best distance for root cutting to regulate the vegetative growth of Chinese jujube trees.

Key words: Chinese jujube; root cutting; vegetative growth; hormone; regulation

在山东黄河三角洲地区冬枣主要产区,冬枣的营养生长非常旺盛,这意味着品质、产量与光线透过率的降低,以及修剪作业量和虫害防治费用的加大 (Miller, 1995)。在实际生产上每年需要大作业量的修剪、环剥及环割,但是这些措施易造成树体衰弱,易患真菌和生理病害,也常发生环剥树死的现象。

断根是盆景艺术的必要组成部分,不但使植株矮化,而且也能刺激新根的发生以维持植株的生长 (Yashiroda, 1960)。从农业生产角度来看,通过断根使果树矮化,能提高光线通过树冠的穿透率,改善果品颜色,减少收获前的落果 (Schupp, 1992)。断根通过破坏树体原有的生长平衡,使其吸收同化能力、水分利用效率、营养分配和激素水平均发生变化 (杨洪强等, 2002)。这些因素的共同作用,可能会对果树地上部的生长发育产生不同的促控效果。虽然断根被认为是降低营养生长的有效选择,但是缺乏规范化的断根技术,加之环境条件的复杂性,使断根的效果千差万别 (Miller & Tworowski, 2003)。在生产上必须针对果树的具体特性,科学地限定和控制断根的程度、深度以及距树干的距离,以期获得最佳的效果 (Schupp & Ferree, 1988)。目前尚未见有这方面的研究报道。

本试验中以冬枣为试材,探讨断根对冬枣形态以及生理生化指标的影响及作用机理,为断根调控营养生长提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2008 年 4 月 26 日冬枣萌芽前在山东省滨州市林业局冬枣园基地进行。试验地土壤类型为潮土,有机质含量 $10.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效氮含量 $38.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $18.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $125.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

试材为生长正常、长势相近的 6 年生冬枣,砧木为酸枣,平均胸径为 7.5 cm,株高为 210 ~ 250 cm,株行距为 300 cm \times 300 cm。

1.2 试验设计及断根处理

试验采用随机区组设计,每小区 10 株树,同行排列。设 4 个处理,重复 3 次。处理 1 为对照 (未断根),处理 2、3、4 分别为 3、5、7 倍胸径 (22.5、37.5、52.5 cm) 断根,断根量约为根量的 2/3、1/3、1/6。

断根时以树干为基准,在其行间两侧一定距离处利用锐器垂直切断根坨直径外的侧根及须根,深度和宽度各为 20 cm,顺行挖沟。长度等于冠径。切口要保证平滑,以利于伤口愈合和须根生长。沟挖好后再用土填满夯实,按大田常规方法管理。

1.3 测定方法

断根后 35 d (5 月 31 日) 调查各处理冬枣的枣头一次枝长度和数量,由于此时新根尚未长出,只对根系切口处激素含量进行取样分析。在不同处理中分别选取 2 ~ 3 株树。每株树采集树冠向阳南侧上中部成熟叶片,混合均匀,带回实验室。

将叶片洗净,置于 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中杀青 15 min,转至 80 $^{\circ}\text{C}$ 下烘至恒重,粉碎后贮藏于玻璃瓶中用

于营养元素分析。取枣头一次枝顶端约 20 g, 装入 100 mL 左右的容器中密封, 室温下存放 15 min, 用于乙烯释放量的测定。同时取叶片、枣头一次枝顶端、根系切口处根鲜样各 2~4 g, 立刻装入液氮罐, 用于其它激素和叶绿素测定。

采用便携式光合蒸腾仪 (CB-1102型, 北京雅欣理仪科技有限公司生产) 同时测定冬枣叶片的光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s) 及细胞间隙 CO_2 浓度 (C_i) 等参数。每株树选取枣头一次枝中部 2~3 片成熟叶, 叶片距地面高度处于 CO_2 气体相对稳定的 1.3~1.4 m, 于上午 9:00—11:00 进行测定, 每处理总计不少于 9 片叶。

植株 N、P、K 含量的测定分别采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ - 扩散法, 钒钼黄比色法, 火焰光度法。叶绿素含量分析采用乙醇浸提, 分光光度法测定。乙烯 (ETH) 释放量的测定采用日本 GC-9A 型气相色谱仪。

生长素 (IA) 脱落酸 (ABA) 玉米素 (ZT) 含量的测定采用美国 Agilent HP 1100 series 型液相色谱仪, 乙腈浸提, 减压浓缩, 过 C_{18} 柱。

断根后 161 d (10月4日) 为冬枣收获期, 进行第 2 次调查, 取新生根用于激素测定, 同时分别测定冬枣叶片的光合指标和 N、P、K 含量, 取枣头一次枝顶端用于生长素和乙烯测定。对各处理冬枣测产的同时取果实鲜样 100 g, 贮于液氮罐用于果实品质分析。果实中维生素 C 含量的测定采用 2, 6-二氯靛酚滴定法, 总糖的测定采用蒽酮比色法, 总酸的测定采用酸碱滴定法。

2 结果与分析

2.1 断根对枣头一次枝长度和数量的影响

树木的高度、枝条的长度和数量以及根量和叶面积大小等都是表征树体竞争力的重要指标 (Donld & Hamblin, 1983)。

由表 1 可见, 断根后处理 2 的一次枝长度和数量分别比对照减少了 27.9% 和 12.1%, 均达到了显著水平。

随着断根距离的增加, 抑制效应逐渐减弱, 处理 4 的测定结果与对照接近, 无明显差异。调查结果表明, 对冬枣进行适度断根对其营养生长产生了明显的抑制作用。

2.2 断根对冬枣叶片 N、P、K 及叶绿素含量的影响

树木吸收水肥能力直接受根系的强烈影响 (Kramer, 1969)。由表 2 可以看出, 接受断根处理 35 d 时, 处理 2、3 的叶片 N、P、K 含量较对照均有明显下降, 以处理 2 降低幅度最大, 分别减少了 5.6%、10.9% 和 10.3%, 但两个处理之间差异不显著。同处理 2 和 3 的结果相反, 处理 4 冬枣叶片的 N、P、K 含量分别比对照增加了 13.5%、16.6% 和 2.7%。断根 161 d 时, 处理 2、3 与对照相比, 叶片 N、P、K 含量差异达到显著水平。可见不同强度的断根措施会对冬枣的树体营养产生迥然不同的影响。

处理 2 和处理 3 由于断根处距树干较近, 去除的根量较大, 较大幅度地减少了吸收根对养分离子的吸收, 从而降低了叶片营养元素含量 (Ma, 2008)。

各断根处理 35 和 161 d 时, 叶绿素含量均高于对照, 以处理 2 含量最高, 与对照相比差异达到了显著水平。随着断根距离的增加, 叶绿素含量有逐渐减少的趋势。

表 1 断根对枣头一次枝长度和数量的影响

Table 1 The effects of root cutting on the length and number of once branch

处理 Treatment	长度 /cm Length	数量 Number
1	31.22 a	98.50 a
2	22.50 b	86.56 b
3	25.51 ab	89.29 b
4	29.33 ab	96.12 a

注: 处理 1、2、3、4 分别代表对照和 3、5、7 倍胸径距离断根。不同字母表示差异达 5% 显著水平。

Note: Treatment 1, 2, 3 and 4 stand for the control and root cutting at 3, 5, 7 times trunk diameter distance from stem, respectively. Different letter in same column means significant difference at 5% level

表 2 断根对冬枣叶片 N、P、K 及叶绿素含量的影响

Table 2 The effects of root cutting on N, P, K and chlorophyll contents in jujube leaves

处理 Treatment	N/(g·kg ⁻¹)		P/(g·kg ⁻¹)		K/(g·kg ⁻¹)		叶绿素/(mg·g ⁻¹) Chlorophyll	
	35 d	161 d	35 d	161 d	35 d	161 d	35 d	161 d
1	33.630 ab	21.863 a	4.024 b	10.730 c	11.932 a	12.839 a	0.570 c	0.659 c
2	31.754 b	9.332 d	3.353 c	11.035 b	10.704 a	12.033 b	0.728 a	0.976 a
3	32.180 b	14.271 c	3.583 bc	11.786 a	11.497 a	11.957 b	0.635 b	0.707 b
4	38.197 a	19.280 b	4.693 a	9.848 d	12.267 a	12.839 a	0.630 b	0.683 c

注：处理 1、2、3、4 分别代表对照和 3、5、7 倍胸径距离断根。不同字母表示差异达 5% 显著水平。

Note: Treatment 1, 2, 3 and 4 stand for the control and root cutting at 3, 5, 7 times trunk diameter distance from stem, respectively. Different letter in same column means significant difference at 5% level.

2.3 断根对冬枣叶片光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO₂ 浓度的影响

从表 3 看出，冬枣叶片光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO₂ 浓度在断根处理 35 d 时较对照均有显著降低，以处理 2 下降幅度最大，依次为处理 3 和处理 4；断根处理 161 d 时较对照均有显著增加，以处理 2 增加幅度最大。可见冬枣断根处理会对叶片的光合和蒸腾产生显著影响，其影响作用取决于断根强度的大小。

表 3 断根对叶片光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO₂ 浓度的影响

Table 3 The effects of root cutting on P_n, T_r, G_s and C_i of jujube leaves

处理 Treatment	光合速率 / (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹) P _n		蒸腾速率 / (mmol·m ⁻² ·s ⁻¹) T _r		气孔导度 / (mmol·m ⁻² ·s ⁻¹) G _s		胞间 CO ₂ 浓度 / (μmol·mol ⁻¹) C _i	
	35 d	161 d	35 d	161 d	35 d	161 d	35 d	161 d
1	8.470 a	4.711 c	2.523 a	1.307 b	136.800 a	73.800 c	487.667 a	190.231 c
2	6.920 c	17.980 a	1.250 b	1.863 a	93.667 c	120.145 a	444.253 b	306.837 a
3	7.397 b	11.162 b	1.307 b	1.793 a	95.467 bc	110.160 b	466.000 ab	227.782 b
4	7.673 b	5.613 c	1.513 b	1.780 a	101.700 b	102.367 b	471.468 a	220.633 b

注：处理 1、2、3、4 分别代表对照和 3、5、7 倍胸径距离断根。不同字母表示差异达 5% 显著水平。

Note: Treatment 1, 2, 3 and 4 stand for the control and root cutting at 3, 5, 7 times trunk diameter distance from stem, respectively. Different letter in same column means significant difference at 5% level.

2.4 断根对枣头一次枝顶端生长素含量和乙烯释放量的影响

抑制冬枣顶端优势能达到控制营养生长的目的，枣头一次枝顶端 IAA 含量和乙烯释放量的变化可以反映出冬枣的顶端优势状况。

由表 4 得知，各断根处理 35 d 时，IAA 含量和乙烯释放量均高于对照，说明断根促进了 IAA 含量和乙烯释放量的增加；断根处理 161 d 时，IAA 含量继续增加，而乙烯释放量有所降低，说明抑制效应随时间延长逐渐减弱。

表 4 断根对枣头一次枝顶端生长素含量和乙烯释放量的影响

Table 4 The effects of root cutting on IAA content and ethylene release in once branch top

处理 Treatment	生长素/(μg·g ⁻¹) IAA		乙烯/(μL·h ⁻¹ ·g ⁻¹ FW) Ethylene	
	35 d	161 d	35 d	161 d
1	0.0106 c	0.5890 a	0.0212 d	0.0025 d
2	0.1276 a	0.2749 d	0.2598 a	0.0649 a
3	0.1135 a	0.3414 c	0.2202 b	0.0421 b
4	0.0342 b	0.4127 b	0.1451 c	0.0362 c

注：处理 1、2、3、4 分别代表对照和 3、5、7 倍胸径距离断根。不同字母表示差异达 5% 显著水平。

Note: Treatment 1, 2, 3 and 4 stand for the control and root cutting at 3, 5, 7 times trunk diameter distance from stem, respectively. Different letter in same column means significant difference at 5% level.

2.5 断根对根系生长素 IAA、脱落酸和玉米素含量的影响

从表 5 看出, 各断根处理 35 d 时, 根系切口处生长素 (IAA) 含量是对照的 2~5 倍, 差异达到显著水平。脱落酸与生长素含量的变化规律相似。玉米素的主要合成部位是根尖分生组织 (武维华, 2004)。由于断根切除了根系分生组织, 并且新根尚未生出, 玉米素含量低于对照, 含量与距离呈正比例关系。断根处理 161 d 时, 玉米素和脱落酸含量较对照均有不同程度的上升, 而生长素含量有所下降。

表 5 断根对根系生长素 IAA、脱落酸和玉米素含量的影响

Table 5 The effects of root cutting on IAA, ABA and ZT contents in roots

处理 Treatment	玉米素 / ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) ZT		生长素 / ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) IAA		脱落酸 / ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) ABA	
	35 d	161 d	35 d	161 d	35 d	161 d
1	0.0111 a	0.0205 d	0.0110 d	0.2089 a	0.0058 c	0.0025 c
2	0.0018 d	0.0769 a	0.0644 a	0.0664 d	0.0118 a	0.0048 a
3	0.0053 c	0.0293 b	0.0341 b	0.0945 b	0.0096 b	0.0031 b
4	0.0075 b	0.0229 c	0.0241 c	0.0687 c	0.0080 b	0.0026 c

注: 处理 1、2、3、4 分别代表对照和 3、5、7 倍胸径距离断根。不同字母表示差异达 5% 显著水平。

Note: Treatment 1, 2, 3 and 4 stand for the control and root cutting at 3, 5, 7 times trunk diameter distance from stem, respectively. Different letter in same column means significant difference at 5% level.

2.6 断根对果实品质及产量的影响

从表 6 看出, 断根后处理 2 和处理 3 的果实维生素 C 含量和总糖含量与对照相比差异达到显著水平, 且维生素 C 含量和总糖含量均高于对照, 而各断根处理的果实总酸含量和单株产量与对照相比差异不明显。

表 6 断根对果实品质及产量的影响

Table 6 The effects of root cutting on fruit quality and yield

处理 Treatment	维生素 C / ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Vitamin C	总糖 / % Total sugar	总酸 / ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Total acid	产量 / ($\text{kg} \cdot \text{plant}^{-1}$) Yield
1	1.5532 c	14.012 d	0.0048 a	13.860 a
2	2.3339 a	16.394 a	0.0046 a	12.970 a
3	2.2486 b	15.475 b	0.0046 a	14.050 a
4	1.5812 c	14.886 c	0.0050 a	14.320 a

注: 处理 1、2、3、4 分别代表对照和 3、5、7 倍胸径距离断根。不同字母表示差异达 5% 显著水平。

Note: Treatment 1, 2, 3 and 4 stand for the control and root cutting at 3, 5, 7 times trunk diameter distance from stem, respectively. Different letter in same column means significant difference at 5% level.

3 讨论

本试验断根的时间是在冬枣萌芽前, 其原因有二。其一, 萌芽前断根可降低根系对地上部的养分输送, 减少地上部有机物质向根系的回流, 在营养生长表征尚未出现之前, 能够有效调节营养生长与生殖生长之间的平衡。其二, 萌芽前根系处于伸长期, 此间新根不会出现, 可以较长时间保持较低的根/枝比, 延长控制时间 (Thomas & Ravindra, 1997)。断根的距离对断根的效果起到关键性作用, 只有重强度的断根才能对营养生长起到控制作用, 中等强度断根其营养生长优于重强度断根, 而轻微断根对营养生长只能产生暂时的、非永久性的影响, 不同的品种有时会出现促进营养生长的现象。

本研究结果表明, 3 倍胸径的断根距离对冬枣根系的破坏程度较大, 有效地抑制了枣头一次枝的生长和数量, 这与人研究结论“根系的严重切除能降低营养生长” (Ferree, 1992) 相一致。断根降低了根系对养分的吸收, 根系不可能在同一时间既支持根的发展又保持枝条的生长, 而是储备更多的资源用于根的发展, 因此造成了枝条量和长度的减少 (Famer & Pezeshki, 2004)。随着时间的延长, 抑制效应有所减弱。本试验单纯从冬枣断根角度调控营养生长, 通过分析认为 3 倍胸径断根是调

控营养生长的最佳距离, 但此结论只限定于冬枣断根当年, 而断根的次年影响, 有待于继续研究。

断根能降低叶片的光合作用 (Pezeshki & Chambers, 1998)。断根后植株在一定时间内不能吸收足够的水分和养分, 主要是由于断根造成根表面积下降, 随着断根程度的加重, 光合速率相应降低 (Famer & Pezeshki, 2004)。这与本试验结果相吻合。断根在一定时间内造成蒸腾速率的降低, 减少了 CO_2 的固定量是导致光合速率降低的直接原因 (Kozłowski & Pallardy, 1997)。可以断定, 光合速率升高与否取决于新根的出现。

研究结果发现, 枣头一次枝顶端生长素含量和乙烯释放量的高低明显受到断根的影响。断根后 35 d, 由于根系严重切除, 导致生长素含量和乙烯释放量的增加, 而乙烯能抑制细胞的伸长生长 (武维华, 2004), 这可能是冬枣断根措施抑制枝条伸长的主要原因。断根后 161 d, 虽然生长素含量有所增加, 但是乙烯释放量却有所下降, 这因为此时枣头一次枝的生长已经停止, 导致了乙烯释放量的大幅下降。断根后冬枣枝条与根系平衡关系被打破, 为了保持二者之间的平衡, 根系量的减少势必造成枝条量的减少, 这是断根控冠的另一原因。本试验结果则为此提供了直接的证据。

冬枣在人为断根的条件下, 在一定时间内诱导细胞发生水分状态的变化, 导致脱落酸合成的增加, 有效地促进气孔关闭或部分关闭, 使蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度较对照有所降低, 随着时间的延长, 脱落酸含量有所降低, 使蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度较对照有所增加。玉米素的主要合成部位是根尖分生组织, 断根后由于根体积的减少, 导致玉米素含量的降低, 随着根系的恢复, 玉米素含量逐渐增加。

References

- Donald C, Hamblin M J. 1983. The convergent evolution of annual seed crops in agriculture. *Advances in Agronomy*, 36: 97 - 1436.
- Ferree D C. 1992. Time of root pruning influence growth, fruit size, biennial bearing and yield of Jonathan apple. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117: 198 - 202.
- Famer J W, Pezeshki S R. 2004. Effect of periodic flooding and root pruning on *Quercus nuttalli* seedling. *Wetlands Ecology and Management*, 12: 205 - 214.
- Kozłowski T T, Pallardy S G. 1997. *Physiology of woody plants*. San Diego, CA, USA: Academic Press.
- Kramer J I. 1969. *Plant and soil water relationship: A modern synthesis*. New York: McGraw Hill.
- Ma Shou-chen. 2008. Effect of root pruning on competitive ability and water use efficiency in winter wheat. *Field Crops Research*, 105: 56 - 63.
- Miller S S. 1995. Root pruning and trunk scoring have limited effect on young bearing apple trees. *Horticultural Science*, 30: 981 - 984.
- Miller S S, Tworkoski T. 2003. Regulating vegetative growth in deciduous fruit trees. *Plant growth regulation society of America quarterly*, 31 (1): 8 - 46.
- Pezeshki S R, Chambers J L. 1998. Relationship among oxygen deficiency, root restriction, photosynthesis, and growth in baldcypress seedlings. *Photosynthetica*, 35: 381 - 390.
- Schupp J R. 1992. Effect of root pruning and summer on growth, yield, quality, and fruit maturity of McIntosh apple trees. *Horticultural Science*, 22: 387 - 390.
- Schupp J R, Ferree D C. 1988. Effect of root pruning at four levels of severity on growth and yield of Melrose/M, 26 apple trees. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 113 (2): 194 - 198.
- Thomas P, Ravindra M B. 1997. Effect of pruning or removal of in vitro formed roots regeneration and growth in micropropagated grapes. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 51: 177 - 180.
- Wu Wei-hua. 2004. *Plant physiology*. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- 武维华. 2004. *植物生理学*. 北京: 科学出版社.
- Yang Hong-qiang, Jie Yu-ling, Zhang Lian-zhong, Cui Ming-gang, Luo Xin-shu. 2002. Effects of root pruning and shoot pruning on water use efficiency of apple leaves. *Acta Horticulturae Sinica*, 29 (3): 197 - 202. (in Chinese)
- 杨洪强, 接玉玲, 张连忠, 崔明刚, 罗新书. 2002. 断根和剪枝对盆栽苹果叶片光合蒸腾及 WUE 的影响. *园艺学报*, 29 (3): 197 - 202.
- Yashinoda K. 1960. *Japanese miniature trees: Their style, cultivation, and training*. London: Faber & Faber Ltd.