

半根干旱对成年“富士”苹果树水分运输和稳定同位素的影响

胥生荣¹, 刘富庭², 张永旺², 张林森², 胡景江³, 韩明玉²

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 园艺学院, 陕西 杨凌 712100;

3. 西北农林科技大学 生命学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:以 13 a 生“富士”苹果树为试材,研究了黄土高原地区田间条件下全根干旱(NI)、半根干旱(PRD)与常规灌溉(CI)3 种水分处理对成年苹果树水分运输和稳定同位素的影响。结果表明:随着干旱程度的增加,“富士”苹果的叶片导水率和枝条导水率逐渐下降,PRD 和 NI 处理的叶片导水率与 CI 处理相比分别降低了 13.27%和 42.01%,PRD 和 NI 处理的枝条导水率与 CI 处理相比分别降低了 3.01%和 34.36%;PRD 处理的叶比导水率和枝条叶比导水率出现升高,分别比 CI 与 NI 处理高出 14.33%、14.44%和 41.23%、16.55%。氮和碳稳定同位素测定表明,PRD 的长期水分利用效率均高于 NI 和 CI 处理;水分亏缺使植物对土壤水分的利用偏向于深层,提高了深层土壤水分对树体水分的贡献率。因此在西北半干旱地区分区灌溉能够在不影响苹果树体生理指标的前提下,应调整树体水分利用策略来提高水分利用效率。

关键词:分区灌溉;稳定同位素;“富士”苹果;水力结构

中图分类号:S 661.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2013)22-0014-04

西北黄土高原地区目前已发展成为中国苹果生产的重要产地之一,苹果种植面积为 114 万 hm^2 , 占中国苹

果总产量的 40%。由于该地区自然降水量少,干旱已成为该地区苹果产量和品质的主要限制因子。部分根区干旱(PRD)主要是通过干旱处理根区的一边,使植物一部分根系保持干旱,产生脱落酸等信号调节物质,另一部分维持灌溉,作为一种新的调亏灌溉措施,PRD 已经成功地应用到生产中。PRD 处理下的葡萄、桃等果树作物维持了品质,产量却没有明显下降^[1-3]。

在同位素质量守恒的前提下,利用稳定同位素确定植物的水分来源和水分利用效率的方法已经被广泛应用于各种水分利用研究中。由于水分在被植物根系吸

第一作者简介:胥生荣(1985-),男,甘肃武威人,硕士,研究方向为果树生理。E-mail:xushengrong888@163.com

责任作者:张林森(1964-),男,江苏人,博士,副教授,研究方向为苹果水分生理生态。E-mail:linsenzhang@163.com

基金项目:国家苹果产业技术体系资助项目(CARS-28);农业部公益性行业专项资助项目(Nyhyzx07-024);陕西省科技厅重大攻关资助项目(2011KTZB02-02-05)。

收稿日期:2013-05-17

Abstract: Taking male and female ginkgo before defoliation as materials, the changes of photosynthetic pigment and protective enzymes activity as well as the change regulation of organic and inorganic nutrients were studied, in order to investigate the changing rule of the physiological and biochemical substances in ginkgo leaves on the eve of nutrient transfer and blade. The results showed that during the autumn, before leaves falling down, the chlorophyll content and POD activity reduced gradually in both female and male plants, whereas carotenoid content and SOD activity increased slightly first and then decreased gradually before defoliation. Starch, soluble sugar and soluble protein contents in leaves also reduced significantly, whereas these contents in branches increased significantly. Total nitrogen, phosphorus contents in leaves decreased slightly and the contents in branches rose correspondingly, whereas potassium content in leaves and branches had no significant change. Therefore, before leaves falling down, photosynthetic pigment contents and protective enzyme activities of ginkgo leaves reduced gradually with the senescence process of leaves; organic nutrition, nitrogen content and phosphorus content will transfer from leaves to branches. This ensured to reduce nutrient waste by fallen leaves and reserved more energy for the plant in winter.

Key words: *Ginkgo biloba* L.; defoliation; physiological and biochemical; nutrients; transfer

收和从根向叶提升时并不发生同位素分异,木质部中 δD 值未因蒸发或新陈代谢导致的分馏被认为可以反映植物的水分来源^[4]。Klaudia S 等^[5]在 2010 年研究了河低处的树木生长和雾、洪水、地下水的关系;McCole A A 等^[6]在 2007 年利用水中稳定同位素研究了爱德华兹高原树木季节性水使用模式,发现刺柏属树木在夏季利用土壤水的深度和在冬季利用土壤水的深度不同,但是过渡的时间可能每年会有所不同。

部分根区干旱灌溉技术可以提高作物水分生产力,但是 PRD 条件下的田间木本植株的导水与水分利用关系仍不明确。该试验对不同根区长期干旱下叶片和枝条导水率、碳氢稳定同位素含量进行了分析测定,以期了解苹果的水分利用特性,为苹果抗旱节水栽培与水分高效利用研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验取样测定于 2011 年在陕西省凤翔县的宝鸡市苹果专家大院内进行。果园地处北纬 $34^{\circ}33'$,东经 $107^{\circ}23'$,海拔 829 m,属半干旱半湿润的暖温带气候,年平均气温 11.5°C ,年均降水量 610 mm,无霜期 207 d,供试土壤质地为壤土,土壤肥力均匀,行内种植三叶草。

1.2 试验材料

以 13 a 生矮化密植树势均匀一致的“富士”苹果树 (*Malus pumila* Mill ‘Fuji’) 为供试材料,株行距为 $2.5\text{ m}\times 3\text{ m}$,树形为高纺锤形,株高 3.5 m。

1.3 试验方法

试验设 3 种水分处理模式:常规灌溉(CI)、半根干旱(PRD)和全根干旱(NI),单株小区,每处理随机重复 4 次。

水分处理前,在所有试验处理树四周的行株距中间及半根分区灌溉(PRD)处理沿南北向中间挖掘深 2 m、宽 15 cm 的深沟,沟内填入厚塑料膜后外侧埋土回填,来防止水分的横向移动。半根分区干旱处理(PRD)将苹果根系分为东西 2 个区域,统一固定其中 1 个区域干旱。在全根干旱(NI)和半根分区干旱(PRD)的干旱部分地面上搭 1 个高 20 cm 的防雨棚,防止雨水流入试验树下土壤,以保持土壤水分处理的一致性。常规灌溉(CI)与园内正常树一样灌溉管理。所有试验小区耕作、施肥、病虫害防治处理均相同。

1.4 项目测定

导水率测定采用美国 Dynamax 公司生产的高压流速仪(High pressure flow meter, HPFM)进行田间原位测定。HPFM 测定时对植物组织进行注射持续增压到大约 500 kPa 时,根据流速和压力随时间的变化关系,反应植物内部阻力和导水率随时间的变化,其曲线斜率表示导水率。摘取 1 a 生枝条,用刀片将末端切平,连接

HPFM 测得枝条导水率(K_{shoot});摘取成熟叶片,将叶柄末端切平,测得叶片导水率(K_{leaf});叶比导水率为导水率与叶面积的比值(K_l);叶片和枝条茎比导水率为导水率与相应叶柄和枝条的横截面积的比值。

叶面积测定:试验选取的叶片样品用美国 LICOR 公司生产的 Li3000 叶面积仪进行叶面积的测定,叶柄和枝条直径用精密数字游标卡尺测量。

稳定同位素的测定:在旱季 7 月份取样,在树体四周随机选取 10 个健康的 1 a 生嫩枝,剪取其中长约 5 cm 的一段,剪下剥去韧皮部后迅速装入 8 mL PEA 样品瓶中,密封保存;同时在距树干 1 m 处分别取深度为 0~10、10~20、20~30、30~100 cm 的土壤样品,每株树取 3 个点作为重复,混匀后装入 8 mL 带盖 PEA 样品瓶中,密封保存。样品瓶密封后,立即放到带冰块的便携式冷藏箱中,带回实验室冰箱冷藏保存,稍后送样分析。样品在元素分析仪中高温裂解后生成 H_2 ,质谱仪通过检测 H_2 的 $^2\text{H}(\text{D})$ 与 ^1H 比率,并与国际标准物(SMOW)比对后计算出样品的 $\delta^2\text{H}(\delta\text{D})$ 比率值。选取至少 30 片生长健壮、无病虫害的成熟叶片,烘干粉碎混匀后装入 8 mL PEA 样品瓶中,密封保存。样品在元素分析仪中高温燃烧后生成 CO_2 ,质谱仪通过检测 CO_2 的 ^{13}C 与 ^{12}C 比率,并与国际标准物(PDB)比对后计算出样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 比率值。样品的前处理和分析均在中国林业科学院重点实验室进行。

1.5 数据分析

采用 SPSS 17.0 统计分析软件对所得数据进行处理,采用 SigmaPlot 10.0 进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉模式对“富士”苹果水力结构的影响

从表 1 可以看出,不同处理对苹果叶导水率、枝条叶比导水率、叶片茎比导水率、枝条茎比导水率均有显著影响。枝条导水率在 CI 与 PRD 处理之间差异不显著,PRD 与 NI 处理之间差异不显著,而 CI 与 NI 处理之间差异显著。叶比导水率在 CI 与 NI 处理之间差异不显著,PRD 处理与 CI 和 NI 处理之间差异显著。随着水分胁迫的加剧,叶片导水率和枝条导水率逐渐下降,PRD 和 NI 处理的叶片导水率与 CI 处理相比降低了 13.27% 和 42.01%,而枝条导水率与 CI 处理相比降低了 3.01% 和 34.36%。PRD 的叶比导水率和枝条叶比导水率呈现升高趋势,分别比 CI 与 NI 处理高出 14.33%、14.44% 和 41.23%、16.55%。PRD 和 NI 处理下的叶片和枝条的茎比导水率出现下降,PRD 和 NI 处理与 CI 处理相比叶片茎比导水率下降了 30.64% 和 55.07%,枝条茎比导水率与 CI 处理相比分别下降了 22.32% 和 49.11%。

表 1

不同处理对“富士”苹果树水力学结构的影响

Table 1

Effects of different treatments on hydraulic structure of 'Fuji' apple tree

处理 Treatment	叶片导水率 K_{leaf} Leaf hydraulic conductance $/10^{-6} \times \text{kg} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	枝条导水率 K_{shoot} Shoot hydraulic conductance $/10^{-6} \times \text{kg} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	叶比导水率 $K_{l\ leaf}$ Leaf area specific leaf hydraulic conductance $/10^{-4} \times \text{kg} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	枝条叶比导水率 $K_{l\ shoot}$ Leaf area specific shoot hydraulic conductance $/10^{-4} \times \text{kg} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	叶片茎比导水率 $K_{s\ leaf}$ Petiole area specific leaf hydraulic conductance $/10^{-4} \times \text{kg} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	枝条茎比导水率 $K_{s\ shoot}$ Stem area specific shoot hydraulic conductance $/\text{kg} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
CI	4.07a	12.28a	10.26b	3.59c	4.83a	14.56a
PRD	3.53b	11.91ab	11.73a	5.07a	3.35b	11.31b
NI	2.36c	8.06b	10.25b	4.35b	2.17c	7.41c

注:不同英文字母表示同一指标不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different small letters in the same column mean significant difference at 0.05 level among treatments. The same below.

2.2 “富士”苹果树体不同灌溉模式下碳稳定同位素的变化

由表 2 可以看出,3 种灌溉处理方式对成年树体叶片中碳稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 含量积累的影响不同。 $\delta^{13}\text{C}$ 值在不同处理间相比较,CI 明显低于 NI 和 PRD 处理,而 NI 和 PRD 处理之间没有明显的差异。由于 $\delta^{13}\text{C}$ 与 WUE 呈正相关关系在许多研究中已经得到证明,可以看出不同灌溉模式下 PRD 处理的水分利用效率较高,NI 稍次,水分利用效率最低的是 CI。

表 2 不同灌溉模式下“富士”苹果叶片碳稳定同位素变化

Table 2 The changes of carbon stable isotope of 'Fuji' apple leaf under different irrigation modes

处理 Treatments	正常灌水(CI) Conventional irrigation	半根干旱(PRD) Half root zone drying	全根干旱(NI) Whole root zone drying
碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ Carbon isotope/ ‰	-26.55 \pm 0.13	-26.31 \pm 0.09	-26.43 \pm 0.18

2.3 “富士”苹果树体不同灌溉模式下氘稳定同位素的变化

由表 3 可以看出,在正常灌溉(CI)区和半根干旱处理的灌溉区的根系区域取样发现,在深度 30~100 cm 范

表 3 不同灌溉模式下“富士”苹果树枝条与土壤氘稳定同位素含量的变化

Table 3 The changes of deuterium stable isotope of shoot and soil of 'Fuji' apple trees under different irrigation modes

处理 Treatment	不同样品氘比值 $\delta\text{D}/\text{‰}$, SMOW				苹果枝条 Branches
	不同深度土壤 0~10	Different depth soil layer/cm 10~20	20~30	30~100	
正常灌水 Conventional irrigation(CI)	-15.34a	-23.64a	-64.9c	-81.1c	-70.76a
半根干旱-灌溉区 Half root zone drying (irrigation side)	-26.22b	-38.85b	-57.36b	-86.32c	-75.02b
半根干旱-干旱区 Half root zone drying (drought side)	-31.33c	-44.06c	-54.95b	-61.61b	
全根干旱 Whole root zone drying(NI)	-31.56c	-37.87b	-48.16a	-54.83a	-69.62a

围内氘同位素含量均大于枝条,而在进行干旱处理的区域取样发现在深度 100 cm 范围内氘同位素含量均小于枝条。由于干旱地区降雨量小,地下水位低,对土壤中同位素累积的影响较小,从而出现土壤中氘同位素含量随着土壤深度的增加而逐渐变小的趋势。根系在受到干旱胁迫后,深层土壤水分对植物体水分利用的贡献率提高。

3 讨论

水分亏缺情况下植物根系能够产生根源信号,引起地上部分生长的物质重新分配,其水分利用效率得到加强,从而使植物能够抵御逆境环境^[7-8]。有研究表明,干旱的根区部分产生根源信号,使 PRD 和 NI 处理叶片导水率和枝条导水率减小,即水分运输能力在干旱下变弱。与 CI 和 NI 处理相比,PRD 处理的叶比导水率和枝条叶比导水率相对较高,这表明分区处理 PRD 在单位叶面积下,叶片和枝条的输水能力最大。但是各处理在茎比导水率比较为:CI>PRD>NI,表明单位茎截面积下,正常灌溉处理的叶片、枝条输水效率比较占据优势,这可能与分区干旱和全根干旱下枝条容易有木质部栓塞的情况发生有关。在干旱逆境下,植物自身的输水能力受到限制,但是单位有效叶面积的输水能力却得到了增强。

当植株受干旱胁迫时,迫使叶片气孔关闭,木质部导水阻力变大,从而提高了水分利用效率。由于 $\delta^{13}\text{C}$ 与 WUE 呈正相关关系在许多研究中已经得到证明^[9-13], $\delta^{13}\text{C}$ 值在不同处理间相比较,PRD 处理大于 NI 和 CI 处理,所以在一定土壤水分含量范围内,水分利用效率在分根干旱处理条件下最高。

White 等^[14]研究了树木 *Taxodium distichum* 的水分来源,发现木质部溶液中的 δD 不受降雨的影响,原因是树木的根在浅水层之下,降水不能影响它所利用地下水的 δD 。Dawson^[15]通过测定植物木质部水分、土壤水及地下水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$,运用混合模型确定了植物对提升水分的利用比例,该研究发现在干旱半干旱条件下植物存在提水作用,在相对湿润地区具有水分间歇式亏缺的地区也同样存在。在西北干旱半干旱地区,地下水位

低,对植物可利用土壤层次水分影响很小,当分根灌溉使部分根系处于干旱胁迫状态时,其对水分的吸收趋向于土壤深层次,从而补给浅层土壤水分供给的不足。

参考文献

- [1] Dry P R, Loveys B R, During H. Partial drying of the rootzone of grape. II. Changes in the pattern of root development[J]. Vitis, 2000, 39: 9-12.
- [2] Loveys B R, Dry P R, During H. Root signals affect water use efficiency and shoot growth[J]. Acta Horticulturae, 1997, 427: 1-14.
- [3] Zhang J, Davies W J, Tardieu F. What information is conveyed by an ABA signal from maize roots in drying field soil? [J]. Plant, Cell & Environment, 1992, 15(2): 185-191.
- [4] Dawson T E. Hydraulic lift and water use by plants; implications for water balance, performance and plant-plant interactions[J]. Oecologia, 1993, 95: 565-574.
- [5] Schachtschneider K, February E C. The relationship between fog, floods, groundwater and tree growth along the lower Kuiseb River in the hyperarid Namib[J]. Journal of Arid Environments, 2010, 74(12): 1632-1637.
- [6] McCole A A, Libby A, Stern. Seasonal water use patterns of Juniperus ashei on the Edwards Plateau, Texas, based on stable isotopes in water[J]. Journal of Hydrology, 2007, 342(3-4): 238-248.
- [7] 梁宗锁, 康绍忠, 高俊凤. 植物对土壤干旱信号的感知、传递及其水分利用的控制[J]. 干旱地区农业研究, 1999, 17(2): 72-78.
- [8] Kudoyarova G R, Vysotskaya L B, Cherkozyanova A, et al. Effect of partial rootzone drying on the concentration of zeatin-type cytokinins in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) xylem sap and leaves[J]. Journal of Experimental Botany, 2006, 58(2): 161-168.
- [9] Marshall J D, Zhang J W. Carbon isotope discrimination and water-use efficiency in native plants of the North-central Rockies[J]. Ecology, 1994, 75: 1887-1895.
- [10] Warren C R, Mcgrath J F, Adams M A. Water availability and carbon isotope discrimination in conifers[J]. Oecologia, 2001, 127: 476-486.
- [11] Golluscio R A, Oesterheld M. Water use efficiency of twenty-five co-existing Patagonian species growing under different soil water availability[J]. Oecologia, 2007, 154: 207-217.
- [12] Saur M, Sigenthaler U. The climate-carbon isotope relationship in tree rings and the significance of site conditions[J]. Plant Physiol, 1995, 40: 320-330.
- [13] 韩兴国, 严昌荣, 陈灵芝. 暖温带地区几种木本植物碳稳定同位素的特点[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 497-500.
- [14] White J W C, Cook E R, Lawrence J R, et al. The D/H ratios of sap in trees; implications for water sources and tree ring D/H ratios[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1985, 49(1): 237-246.
- [15] Dawson T E. Hydraulic lift and water use by plants; implications for water balance, performance and plant-plant interactions[J]. Oecologia, 1993, 95: 565-574.

Effects of Half-root Zone Drying on Water Transportation and Stable Isotope of Mature ‘Fuji’ Apple Trees

XU Sheng-rong¹, LIU Fu-ting², ZHANG Yong-wang², ZHANG Lin-sen², HU Jing-jiang³, HAN Ming-yu²

(1. College of Forestry, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. College of Horticulture, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100; 3. College of Life Science, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Taking thirteen-year-old ‘Fuji’ apple tree as material, the effects of whole root zone drying (NI), half-root zone drying (PRD) and conventional irrigation (CI) on the water transportation and stable isotope of apple trees in the field conditions of the Loess Plateau were studied. The results showed that, the leaf and shoot hydraulic conductance had gradually declined as the degree of drought increased, leaf hydraulic conductance of PRD and NI reduced 13.27% and 42.01%, shoot hydraulic conductance of PRD and NI reduced 3.01% and 34.36% compared with that of CI. But compared with CI and NI, leaf area specific leaf hydraulic conductance and leaf area specific shoot hydraulic conductance of PRD were enhanced by 14.33% and 14.44%, 41.23% and 16.55% respectively. By deuterium and carbon stable isotopes analysis, the WUE of PRD was higher than that of NI and CI; water deficit increased utilization rate of deep soil moisture for plant, increased the rate of contribution of deep soil moisture to tree body moisture. This showed that PRD treatment can change the water use strategy and improve water use efficiency without influencing the apple tree normal physiological indices in the semiarid areas of Northwest China.

Key words: partial root zone irrigation; stable isotope; ‘Fuji’ apple; hydraulic structure