

doi: 10.11707/j.1001-7488.20181004

# 黄土丘陵区盛果期苹果树土壤水分利用策略\*

王绍飞<sup>1,2</sup> 赵西宁<sup>1,3,4</sup> 高晓东<sup>1,3,4</sup> 霍高鹏<sup>1,2</sup> 潘燕辉<sup>5</sup>

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院 杨凌 712100;  
3. 西北农林科技大学水土保持研究所 杨凌 712100; 4. 中国科学院水利部水土保持研究所 杨凌 712100;  
5. 兰州大学西部环境教育部重点实验室 兰州 730000)

**摘要:** 【目的】探讨黄土丘陵区不同栽植年限苹果树水分利用策略,为果园水分管理与可持续发展提供参考。【方法】以 10 龄、15 龄、22 龄苹果树为研究对象,利用天然氘同位素与人工氘同位素示踪技术以及 MixSIR 模型分析不同水分来源对果树生长的贡献比例,探明其水分来源的季节变化规律。【结果】3 个树龄苹果树水分利用来源差异较大,10 龄苹果树主要水分来源从开花坐果期的中、深层(88.9%)转变为着色成熟期的浅层(57.9%)。15 龄苹果树在开花坐果期和果实膨大期水分来源均以中层土壤水为主(74.2%、70.2%);而在着色成熟期则主要吸收利用浅层土壤水(59.3%)。整个生育期 22 龄苹果树均主要吸收利用浅、中层土壤水(利用比例分别为 74.34%、86.07%、87.77%),深层土壤水利用比例逐渐降低。苹果树木质部样品中氘同位素的显著增加,表明果树可以通过吸收利用更深层土壤水分以缓解水分胁迫。【结论】3 个树龄苹果树生育期内水分利用来源差异明显,随着树龄增加,水分来源逐渐变浅,用水策略趋于保守。根据不同树龄苹果树水分来源的季节变化对其进行合理的水分管理,有效降低果树非生产性耗水及自身奢侈性耗水,实现苹果园的持续健康发展。

**关键词:** 黄土高原; 苹果; 盛果期; 水分来源

中图分类号: S718.43 文献标识码: A 文章编号: 1001-7488(2018)10-0031-08

## Water Use Source of Apple Trees with Full Productive Age in Loess Hilly Region

Wang Shaofei<sup>1,2</sup> Zhao Xining<sup>1,3,4</sup> Gao Xiaodong<sup>1,3,4</sup> Huo Gaopeng<sup>1,2</sup> Pan Yanhui<sup>5</sup>

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A & F University Yangling 712100; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University Yangling 712100; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University Yangling 712100;  
4. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources Yangling 712100;  
5. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems of Ministry of Education, Lanzhou University Lanzhou 730000)

**Abstract:** 【Objective】The water use strategy of apple trees indifferent planting years in the loess hilly region was discussed in this study, in order to provide a useful reference for water management and sustainable development of apple orchards. 【Method】In this study, 10-, 15- and 22-year-old apple trees were selected as the object and the natural and artificial deuterium isotope tracer techniques and MixSIR model were used to analyze the contribution ratio of different moisture sources to apple trees growth to investigate the seasonal variation of its moisture source. 【Result】The results indicated that the source of moisture utilization varied greatly among the three apple trees of different ages. The main source of moisture of the 10-year-old apple trees changed from the middle and deep layers of flowering and fruit-bearing stage (88.9%) to the shallow layer at the coloring and ripening stage (57.9%). The main source of moisture for the 15-year-old apple trees came from the middle layer during the blossoming and bearing fruits period and fruit expanding stage; but in the coloring and ripening period, the apple tree mainly absorbed the shallow layer soil moisture. During the whole growth period, the 22-year-old apple trees mainly used shallow and middle soil moisture (74.34%, 86.07% and 87.77% respectively) and the ratio of deep soil moisture utilization was decreased gradually. The significant increase in deuterium isotopes in xylem samples of apple trees showed that apple trees could alleviate water stress by absorbing deeper

收稿日期: 2017-09-07; 修回日期: 2018-09-01。

基金项目 “十三五”国家重点研发计划(2016YFC0400204; 2017YFC0403605); 国家自然科学基金项目(41571506, 41771316, 51579212); 陕西省重点科技创新团队计划(2017KCT-15)。

\* 赵西宁为通讯作者。

soil moisture. 【Conclusion】There was an obviously difference in water use source of three stand ages apple trees. The water source was shallower gradually and more conservative with stand age increasing. Reasonable water management measures should be adopted to effectively decrease nonproductive water consumption and extravagant water consumption to realize sustainable and healthy development of orchards on the basis of water source seasonal variations for different stand age apple trees.

**Key words:** the Loess plateau; apple; full productive age; water source

黄土高原地区光热资源丰富、昼夜温差大,是世界上最大的苹果(*Malus pumila*)连片栽植区,目前仅陕西省苹果栽植面积已超过73.3万 $\text{hm}^2$ ,产量超过1100万t。该区地下水埋藏较深,无法对苹果园土壤水分形成有效补给,灌溉条件差,使得降雨成为果树最主要的水分来源。然而,北部的黄土丘陵区处于半干旱气候区,降雨量少且季节分布不均,干旱成为制约黄土高原苹果产业可持续发展的主要限制因子(Liu *et al.*, 2014)。研究表明,黄土高原正向暖干化趋势发展(张宝庆等, 2012),未来干旱程度可能进一步加剧,因此探明不同树龄苹果树土壤水分利用来源的季节变化规律对该区苹果园的可持续发展具有重要意义。

稳定同位素技术具有灵敏性好、准确度高、破坏性低等优点被广泛应用于农业、生态学等领域研究中(巩国丽等, 2011; 赵西宁等, 2018),成为一种先进的植物水源分析方法。水分从根部吸收到向茎部的运输过程中不会发生同位素分馏作用(盐生和旱生植物除外)(Dawson *et al.*, 1991; Dawson *et al.*, 2002)。因此,通过比较植物茎干分与各潜在水源的同位素组成可推测其主要水分来源(吕婷等, 2017; 朱亚娟等, 2017; 张欢等, 2018),再结合模型可进一步量化植物对各水分来源的利用比例(刘自强等, 2016; 2017; Wu *et al.*, 2018)。但是随着深度增加,蒸发作用影响逐渐减弱,深层土壤水中的同位素值变化较小(程立平等, 2012),利用天然同位素难以准确判断深层土壤水对植物生长的贡献情况,而人工同位素标记技术通过增加深层土壤中的同位素丰度为植物吸收利用深层水分提供直接证据(Beyer *et al.*, 2016)。

黄土丘陵区苹果盛果期可以从10龄持续到25龄左右,剖面土壤水分随树龄增加而逐年降低(Wang *et al.*, 2012),最终导致果树水分利用来源发生变化。本研究将天然氢稳定同位素和氘同位素人工标记技术相结合,研究盛果期不同树龄苹果树土壤水分利用来源的季节变化,探讨其水分利用策略,为黄土丘陵区盛果期苹果园田间水分管理提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于延安市宝塔区河庄坪镇万庄村(36°11′—37°09′N, 109°21′—110°03′E)。该区为典型的黄土丘陵沟壑区,属半干旱区,有显著的暖温带大陆性季风气候,多年平均降水量为536.9 mm,时空分布不均,70%以上集中在6—9月份。试验地光热资源丰富,光照时间长,光能有效辐射大,多年平均日照时数2418 h。土壤质地为黄绵土,土质疏松,入渗能力强;土层深厚,地下水位低,无法被果树吸收利用。

2016年研究区5—10月总降水量421.6 mm,主要集中在6—9月,接近多年平均水平。其中5月、7月和9月降雨量分别为42.5、138.1和74.1 mm。

### 1.2 试验材料和试验设计

在研究区选取具有代表性的10、15、22龄的3个苹果园,供试树种均为红富士苹果。3个果园为同一农户,果树生长健壮,树势整齐,生产管理措施基本一致,树形为自由纺锤形,株行距为4 m×5 m。在3个果园中随机选取8株冠幅、胸径、树高相近的苹果树,试验果树基本情况如表1所示。

表1 试验果树基本信息

Tab.1 Information of the experimental apple trees

树龄 Stand age/a	冠幅直径 Canopy diameter	平均胸径 Average DBH/cm	平均树高 Average height/cm	种植密度 Planting density
22	633 cm×570 cm	19.59	382	4 m×5 m
15	541 cm×487 cm	16.46	380	4 m×5 m
10	550 cm×483 cm	14.46	400	4 m×5 m

### 1.3 试验方法

1.3.1 样品采集 1) 天然同位素样品的采集 按苹果生育期进行采样,分别于 2016 年 5 月 21 日(开花坐果期)、7 月 26 日(果实膨大期)、9 月 25 日(着色成熟期)采样。采用土钻法在距离树干 50 cm 处取土壤样品,取样深度为 3 m(分 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~120、120~160、160~200、200~240、240~280 和 280~300 cm 共 11 层),每层取 3 个重复。所采集土壤样品分为 2 部分,一部分装入塑料瓶,用封口膜双层密封,低温冷冻保存(-20℃);一部分装入铝盒,利用烘干法测其含水量。在苹果树向阳一侧选取叶片较多的栓化枝条 3 段,取其木质部,分别装入 3 个 15 mL 玻璃瓶中,用封口膜双层密封,低温冷冻保存(-20℃)。

2) 人工标记同位素样品的采集 标记试验的前 1 天,采用土钻法在树下钻取 4 m 深的孔洞。采用 4 m 长 PVC 管作为标记液引流管,将引流管插入孔洞,上方高出孔洞 15 cm 防止表层土落入洞内污染标记液,下方保留 15 cm 空隙用于接纳标记液。将事先配好的 150 mL 氘同位素标记液( $\delta D \approx 20000\text{‰}$ )倒入孔洞,取出 PVC 管,密封洞口。

5 月 19 日进行第 1 次标记试验,分别于 5 月 21 日、5 月 23 日、5 月 26 日、7 月 18 日采集标记苹果树木质部样品;7 月 26 日进行第 2 次标记试验,完成后于 7 月 28 日、8 月 2 日、8 月 25 日、9 月 25 日采集木质部样。每个样品取 3 个重复。

1.3.2 水分抽提和同位素分析 土壤和植物样水分抽提采用低温真空抽提法(Li-2000,土壤-植物水分真空抽提系统)进行抽提,加热温度设定为 95℃,土壤样和植物样分别抽提 105 和 140 min。提取的水分装入玻璃瓶,用封口膜双层密封,低温(4℃)保存。植物水和土壤水同位素分析分别在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室和兰州大学西部环境教育部重点实验室进行, $\delta D$  的测量精度为  $\pm 0.1\text{‰}$ , $\delta^{18}\text{O}$  的测量精度为  $\pm 0.025\text{‰}$ 。

### 1.4 数据分析

利用基于质量平衡的贝叶斯模型(MixSIR 1.0.4)计算分析植物对不同水源的利用比例,该模型集合了多种不确定来源(同位素特征的变异性、同位素分馏等),使模型估计结果更科学准确(Moore *et al.*, 2008)。为了方便模型计算,将剖面土壤水划分为浅层(0~40 cm)、中层(40~160 cm)和深层(160~300 cm) 3 个潜在水分来源,代入贝叶斯模型来计算植物对 3 个潜在水源的利用比例。

采用 Excel 2010 和 SPSS 22.0 对数据进行整理分析,利用 Origin 2016 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤含水量和土壤水 $\delta D$ 特征

土壤水分的时间和空间异质性不仅与降水入渗和地表蒸发有关,还与植物根系吸水密切相关(王军等, 2002)。3 个树龄苹果园土壤水分随时间和深度变化明显(图 1A、1B、1C)。3 个树龄在 5 月 21 日和 9 月 25 日土壤水分均表现出垂直变化,波动较小;受降水入渗及地表强烈蒸发的共同影响,7 月 26 日 3 个树龄苹果树土壤水分均表现为浅层低、中层高、深层低的分布特征。受降水同位素值和蒸发富集的双重影响(图 1D、1E、1F),3 个树龄苹果树浅层(0~40 cm)土壤水  $\delta D$  值高度变化,尤其在比较干旱的 5 月 21 日, $\delta D$  值分别高达  $-17.47\text{‰}$ 、 $-17.59\text{‰}$ 、 $-20.27\text{‰}$ ;不同生育期之间差异显著,均表现为开花坐果期 > 着色成熟期 > 果实膨大期;40 cm 土层以下,3 个树龄苹果树土壤水  $\delta D$  值呈现相似的变化趋势,随采样深度的增加逐渐降低,最终分别保持在  $-67.85\text{‰} \sim -67.59\text{‰}$ 、 $-71.32\text{‰} \sim -67.36\text{‰}$ 、 $-72.30\text{‰} \sim -69.43\text{‰}$  范围内,生育期之间无显著差异。

### 2.2 苹果树木质部氢同位素与土壤水分来源

对比分析苹果树木质部水与各潜在水分来源  $\delta D$  值(表 2),可以发现 3 个树龄苹果树生育期内木质部水  $\delta D$  值波动明显,表明生育期内 3 个树龄苹果树的主要水分来源不断变化。生育期内苹果树木质部  $\delta D$  值在浅层(0~40 cm)、中层(40~160 cm)、深层(160~300 cm) 3 个土层之间变化,表明果树根系可以从 3 个土层吸收利用土壤水分,不同生育期利用比例有所不同。木质部水  $\delta D$  值随采样时间而变化,3 个树龄苹果树木质部水  $\delta D$  值均呈现先减后增的特点。

利用 MixSIR 模型计算 3 个土层土壤水潜在水源对苹果树木质部水的贡献度。从 MixSIR 分析结果(图 2)可以看出:10 龄苹果树根系吸水模式具有较强的可塑性,生育期内主要水分来源为 5 月 21 日的中层(40~160 cm)、深层(160~300 cm)土壤水(利用比例高达 88.9%),7 月 26 日的转为深层土壤水(66.3%),至 9 月 25 日水分来源以浅层(0~40 cm)土壤水为主(57.9%)。15 龄苹果树在 5 月 21 日、7 月 26 日主要水分来源均以中层土壤水为主(74.2%、70.2%);而在 9 月 25 日则主要吸收利用浅层土壤水(59.3%)。22 龄苹果树整个生育期均

主要吸收利用浅、中层土壤水(利用比例分别为 74.34%、86.07%、87.77%),深层土壤水利用比例逐渐降低。

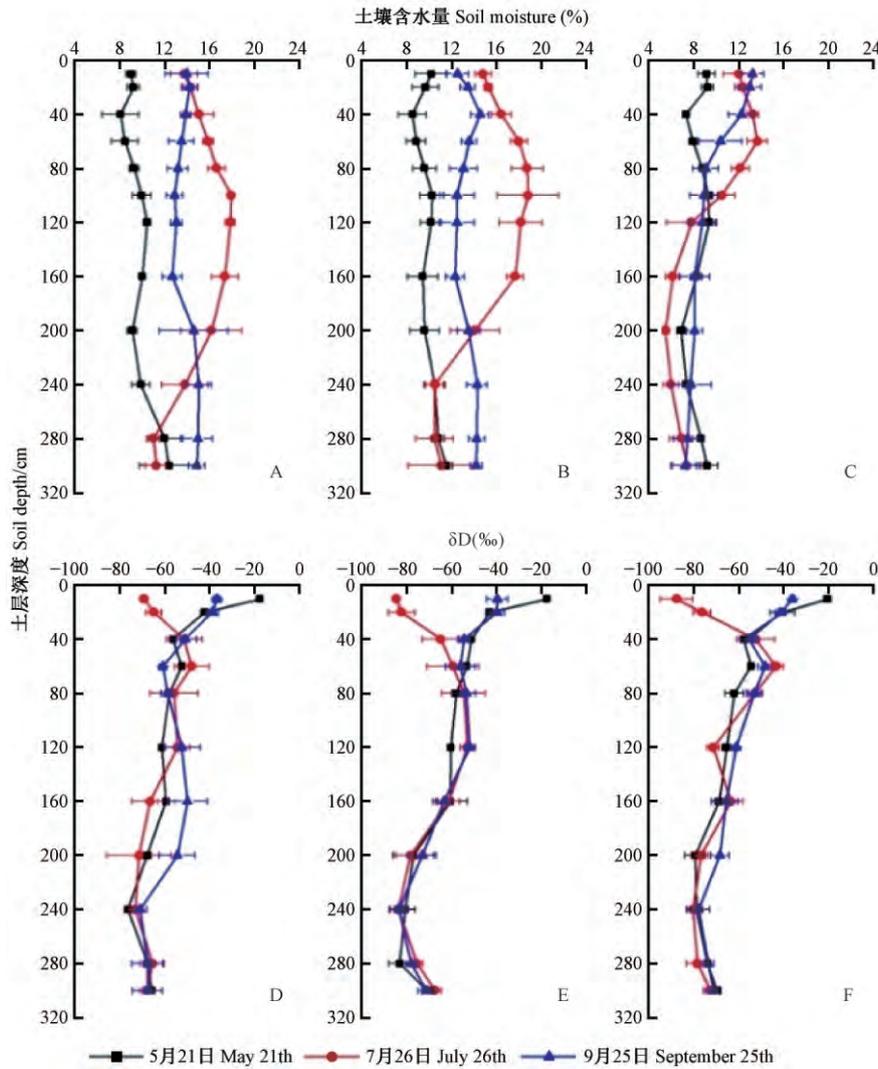


图 1 3 个树龄苹果树剖面土壤含水量和土壤水氢同位素的季节变化(δD)

Fig. 1 The seasonal variation of soil profile water content and stable hydrogen rate (δD) for three ages apple trees

A, D: 10 龄苹果树; B, E: 15 龄苹果树; C, F: 22 龄苹果树。 A ,D :10-year-old apple; B ,E :15-years-old apple; C ,F :22-year-old apple.

表 2 3 个树龄苹果树各生育期木质部水和各土壤水分来源稳定同位素比率(δD)

Tab.2 Stable isotope ratio (δD) of xylemwaterand soil water source atgrowth stage for apple trees with three ages

树龄 Age/a	采样时间 Date	土壤水分来源 Soil moisture source			木质部同位素比率 Xylem isotope rate(‰)
		0 ~ 40 cm	40 ~ 160 cm	160 ~ 300 cm	
22	05-21	-43.88	-63.88	-76.06	-60.61
	07-26	-67.04	-60.78	-77.42	-65.32
	09-25	-46.81	-58.86	-75.69	-54.71
15	05-21	-41.95	-59.55	-83.35	-60.20
	07-26	-82.97	-57.16	-78.64	-63.96
	09-25	-47.16	-56.76	-78.32	-54.48
10	05-21	-42.97	-58.51	-69.82	-62.20
	07-26	-59.02	-57.49	-69.62	-66.74
	09-25	-44.19	-57.27	-69.92	-50.09

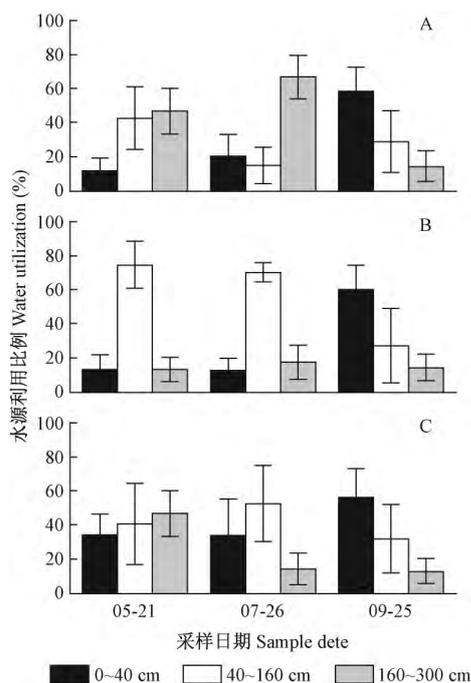


图 2 3 个潜在水源对苹果树生长贡献度的季节变化

Fig. 2 Seasonal variations of contribution proportion of 3 potential water sources to the growth of apple trees

A: 10 龄苹果; B: 15 龄苹果; C: 22 龄苹果。A: 10-year-old apple; B: 15-year-old apple; C: 22-year-old apple.

### 2.3 标记苹果树木质部水汽同位素

标记苹果树木质部水汽同位素浓度变化过程, 可以反映出苹果树对标记土层土壤水的利用情况。由表 3 可知 5 月 21 日 22 龄标记苹果树木质部样品中  $\delta D$  值显著升高, 表明该时期苹果树可以立即使用 4 m 土层土壤水。之后苹果树进一步吸收该土层土壤水  $\delta D$  值于 5 月 26 日达到峰值(  $-45.2‰$  )。相比之下 5 月 21 日和 5 月 23 日 10 龄、15 龄标记

苹果树木质部样品中均未发现人工标记物存在, 而 5 月 26 日木质部  $\delta D$  值显著增加, 表明苹果树吸收利用了该土层土壤水。7 月 26 日 3 个树龄苹果树木质部  $\delta D$  值均恢复到背景值, 与未标记苹果树  $\delta D$  值无显著差异(  $P > 0.05$  )。土壤中水分运移可能导致标记土层  $\delta D$  值降低, 因此 7 月 26 日对标记苹果树进行二次标记。标记完成后 1 周, 3 个树龄标记苹果树  $\delta D$  值均无显著变化, 最终在 9 月 25 日再次发现人工标记物存在, 3 个树龄标记苹果树木质部  $\delta D$  值均显著高于未标记苹果树(  $P < 0.05$  )。

### 3 讨论

土壤水分是黄土丘陵区苹果树生长所需水分的最主要来源, 受降水入渗和地表蒸发的影响, 剖面土壤水  $\delta D$  值存在较为明显的梯度, 因此可以通过各土层土壤水稳定同位素信息来反映木质部水稳定同位素组成。3 个树龄苹果树木质部  $\delta D$  值存在明显的季节波动, 表明生育期内苹果树从不同深度土层吸收水分, 其主要水分来源不断变化。

10 龄苹果树开花坐果期水分来源以中、深层( 40 ~ 300 cm ) 土壤水为主, 这可能是因为研究区春季降水较少, 蒸发强烈, 浅层土壤水有效性降低, 果树只能从中、深层获取水分; 果实膨大期 10 龄苹果树显著增加了深层( 160 ~ 300 cm ) 土壤水分利用比例。尽管由于降雨 7 月 26 日研究区浅层( 0 ~ 40 cm )、中层土壤含水量显著增加, 植物并没有改变其主要水源, 这是由于在经历了长期的干旱环境后, 表层根系可能会发生不可逆栓塞甚至死亡而失去吸水能力, 而深层根系可以立即吸收传导水分( Grossiord *et al.*, 2017)。此外, 孙守家等( 2011) 对

表 3 3 个树龄苹果树在不同采样期内木质部氢稳定同位素比率(  $\delta D$  )<sup>①</sup>

Tab. 3 Stable hydrogen isotope(  $\delta D$  ) of xylem water for apple trees with three ages in different sampling date

时间 Date	植株类型 Plant kind	树龄 Stand age		
		22a	15a	10a
2016-05-21	未标记 Unlabeled plant	-63.30 ± 4.85a	-58.81 ± 1.29ab	-62.20 ± 2.47a
	标记 Labeled plant	-54.83 ± 3.38b	-60.28 ± 3.35a	-61.45 ± 2.80a
2016-05-23	标记 Labeled plant	-50.30 ± 1.13bc	-58.50 ± 1.93ab	-61.38 ± 1.78a
2016-05-26	标记 Labeled plant	-45.20 ± 3.87c	-45.91 ± 2.03c	-50.75 ± 3.89b
2016-07-18	标记 Labeled plant	-50.82 ± 5.14bc	-55.79 ± 3.31b	-51.25 ± 8.62b
2016-07-26	未标记 Unlabeled plant	-65.82 ± 1.21a	-64.49 ± 1.12a	-62.98 ± 4.33a
	标记 Labeled plant	-64.83 ± 2.04a	-64.14 ± 2.54a	-60.89 ± 1.35a
2016-07-28	标记 Labeled plant	-65.78 ± 2.25a	-63.08 ± 1.24a	-63.74 ± 3.89a
2016-08-02	标记 Labeled plant	-66.03 ± 1.67a	-63.04 ± 0.36a	-63.90 ± 1.67a
2016-08-25	标记 Labeled plant	-63.73 ± 1.23a	-64.02 ± 2.12a	-61.84 ± 2.85a
2016-09-25	未标记 Unlabeled plant	-53.40 ± 4.68a	-54.48 ± 5.42a	-53.32 ± 2.51a
	标记 Labeled plant	-45.02 ± 4.74b	-48.28 ± 1.42b	-46.31 ± 0.92b

①不同小写字母代表同一树龄标记苹果树木质部氢稳定同位素比率在采样日期间存在显著性差异。Different lowercase letters represent significant level of the same age apples trees xylem hydrogen isotope rate among the different sampling date.

太行山南麓山区栓皮栎 (*Quercus variabilis*) 根系研究发现,当降水达到一定阈值时,表层根系开始形成并吸收土壤水分。着色成熟期 10 龄苹果树主要水分来源由深变浅,显著增加了浅层土壤水(0~40 cm)的利用比例,可能有 2 个原因:一是降水入渗增加了浅层土壤水的有效性(孙守家等,2014);二是土壤水分恢复促进根系的形成,果树吸水能力增强。在开花坐果期和果实膨大期,15 龄苹果树主要依赖中层(40~160 cm)土壤水,而着色成熟期转而吸收利用浅层(0~40 cm)土壤水,这可能与根系分布及果树生理特性有关,而根系的分布直接影响植物的吸水过程(Lin *et al.*, 1996)。已有研究表明,盛果期苹果树超过 90% 根系集中分布在 0~2.0 m 土层(孟秦倩等,2012)。22 龄苹果树整个生育期内均主要吸收利用浅、中层(0~160 cm)土壤水,且深层(160~300 cm)土壤水贡献比例逐渐降低。Wang 等(2012)研究发现,苹果园土壤水分随树龄增加而逐年降低;本研究中 22 年苹果园深层土壤含水量极低,接近凋萎湿度,难以被果树吸收利用。不同树龄苹果树生育期内主要水分来源不同,证明其根系吸水模式可塑性较强,表明苹果树具有较强的水分适应能力。

深层土壤水同位素整体呈现近似垂直分布(图 1) 利用天然同位素难以准确识别植物对于深层土壤水分的利用情况,而人工同位素示踪技术可以为植物吸收利用深层土壤水提供直接证据。氘化水与水极其相似,与<sup>18</sup>O 水相比,其自然丰度小,价格更为经济;而相对氘化水,氘化水的优势在于性质稳定且无辐射,被广泛应用于生态水文学研究中(Beyer *et al.*, 2016)。本试验中,5 月 26 日和 9 月 25 日标记苹果树木质部样品中  $\delta D$  值均显著高于未标记植株,明确含有人工标记物。可能的原因有 2 种:1) 氘化水倒入的土层(即 4 m 土层)后被根系吸收并向上运输至木质部。山地苹果树土壤水分的最大利用深度可达 5.17 m(孟秦倩等,2012),深层根系吸水效率很高(Canadell *et al.*, 1996)。2) 苹果树具有功能性二态根系,将含有标记液的深层土壤水提升到上层进行重新分配,被上层根系吸收。标记植株木质部样品中氘同位素的显著增加,表明果树可以通过吸收利用更深层土壤水分以缓解水分胁迫。

土壤水分是制约黄土高原苹果产业可持续发展的最主要限制因子。朱德兰等(2004)研究发现,田间持水量的 60%~80% 为苹果树的最适宜土壤含水量。因此,只有当果园土壤含水量处于田间持水

量的 60%(即 10.11%) 以上时,才能满足果树的正常生长需求。本研究中,10 龄和 15 龄苹果树只有开花坐果期土壤含水量低于 10.11%,存在水分亏缺,而 22 龄苹果 1 m 以下土层土壤含水量在整个生育期内均处于亏缺状态,会影响果实的产量和质量。因此,有必要采取科学合理的水管理措施进行田间水分管理。例如,10 龄苹果树开花坐果期对中、深层(40~300 cm)土壤水利用比例高达 88.9%,可以对其进行适当的补充灌溉,缓解水分亏缺;15 龄苹果树在开花坐果期和果实膨大期主要吸收利用中层(40~160 cm)土壤水,利用比例均高于 70%,可以引入雨水集聚入渗技术,拦蓄集聚雨水,提高中层土壤含水量(Song *et al.*, 2017);也可引入树枝和秸秆覆盖等技术,提高土壤保蓄水能力(张义等,2011;李虹辰等,2014)。22 龄苹果树整个生育期内水分主要来源于浅层(0~40 cm)和 中层(40~160 cm),可以采用更新修剪方法,减少树木蒸腾耗水,提高土壤水分(李明霞等,2012);还可采用更替等措施,减少果园水分消耗,缓解土壤干燥化,促进深层水分恢复。目前,在生产实践中常采用减少自身奢侈性耗水的修剪措施和减少非生产性耗水的覆盖和耕作措施(李陆生等,2016)。如何科学有效地组合各种技术措施来保证黄土高原苹果园的持续健康发展,还有待进一步研究。另外,果树冠层结构不均匀将导致穿透降雨在冠层下方分布不均匀,可能引起土壤中水同位素在水平方向存在异质性;同时,由于果树根系在水平方向上呈显著非均匀分布(李陆生等,2015),果树在水平方向上的用水来源也存在明显差异。

#### 4 结 论

本研究通过氢稳定同位素及其示踪技术,结合 MixSIR 模型来探讨黄土丘陵区不同树龄苹果树水分来源,揭示其不同土壤水分条件下的水分利用策略。3 个树龄苹果树生育期内水分利用来源不同,根系吸水功能可塑性较强;随着树龄增加,苹果树水分来源逐渐变浅,用水策略趋于保守。此外,3 个树龄标记苹果树木质部氘同位素的显著增加,表明果树可以通过利用更深层土壤水分缓解水分胁迫。

不同树龄苹果树通过不断调整其水分利用策略来适应黄土丘陵区恶劣的生态环境。研究黄土丘陵区盛果期苹果树土壤水分利用来源的季节性变化,可以针对不同树龄苹果园科学合理地增加水分管理措施,有效降低果树非生产性耗水及自身奢侈型耗水,实现黄土丘陵区苹果园的持续健康发展。

## 参 考 文 献

- 程立平, 刘文兆. 2012. 黄土塬区几种典型土地利用类型的土壤水稳定同位素特征. 应用生态学报, 23 (3): 651 - 658.
- (Cheng L P, Liu W Z. 2012. Characteristics of stable isotopes in soil water under several typical land use patterns on Loess Tableland. Chinese Journal of Applied Ecology, 23 (3): 651 - 658. [in Chinese])
- 巩国丽, 陈 辉, 段德玉. 2011. 利用稳定氢氧同位素定量区分白刺水分来源的方法比较. 生态学报, 31(24): 7533 - 7541.
- (Gong G L, Chen H, Duan D Y. 2011. Comparison of the methods using stable hydrogen and oxygen isotope to distinguish the water source of *Nitraria Tangutorum*. Acta Ecologica Sinica, 31 (24): 7533 - 7541. [in Chinese])
- 刘自强, 余新晓, 贾国栋, 等. 2016. 北京山区侧柏和栓皮栎的水分利用特征. 林业科学, 52(9): 22 - 30.
- (Liu Z Q, Yu X X, Jia G D et al. 2016. Water use characteristics of *Platycladus orientalis* and *Quercus variabilis* in Beijing Mountain Area. Scientia Silvae Sinicae 52(9): 22 - 30. [in Chinese])
- 刘自强, 余新晓, 姜源海, 等. 2017. 北京山区侧柏水分利用策略. 生态学报, 37(11): 3697 - 3705.
- (Liu Z Q, Yu X X, Lou Y H, et al. 2017. Water use strategy of *Platycladus orientalis* in Beijing mountainous area. Acta Ecologica Sinica, 37(11): 3697 - 3705. [in Chinese])
- 李虹辰, 赵西宁, 高晓东, 等. 2014. 鱼鳞坑与覆盖组合措施对陕北旱作枣园土壤水分的影响. 应用生态学报, 25 (8): 2297 - 2303.
- Li H C, Zhao X N, Gao X D et al. 2014. Effects of scale-like pit and mulching measures on soil moisture of dryland jujube orchard in North Shaanxi Province, China. Chinese Journal of Applied Ecology, 25(8): 2297 - 2303.
- 李陆生, 赵西宁, 高晓东, 等. 2015. 黄土丘陵区不同树龄旱作枣园细根空间分布特征. 农业工程学报, 31(20): 140 - 146.
- (Li L S, Zhao X N, Gao X D, et al. 2015. Influences of stand age on root patterns in a rain-fed jujube (*Ziziphus jujube*) plantation of Loess Plateau in China, 31(20): 140 - 146. [in Chinese])
- 李陆生, 赵西宁, 高晓东, 等. 2016. 黄土丘陵区不同树龄旱作枣园土壤水分动态. 农业工程学报, 32(14): 145 - 152.
- (Li L S, Zhao X N, Gao X D, et al. 2016. Soil water dynamic of rain-fed jujube (*Ziziphus jujube*) with stand age on Loess Plateau. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 32(14): 145 - 152. [in Chinese])
- 李明霞, 杜社妮, 白岗栓, 等. 2012. 苹果树更新修剪对土壤水分及树木生长的影响. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 38(4): 467 - 476.
- (Li M X, Du S N, Bai G S, et al. 2012. Effects of renewal pruning on soil moisture and growth of apple tree. Journal of Zhejiang University Agriculture and Life Sciences, 38(4): 467 - 476. [in Chinese])
- 吕 婷, 赵西宁, 高晓东, 等. 2017. 黄土丘陵区典型天然灌丛和人工灌丛优势植物土壤水分利用策略. 植物生态学报, 41 (2): 175 - 185.
- (Lü T, Zhao X N, Gao X D, et al. 2017. Soil water use strategy of dominant species in typical natural and planted shrubs in loess hillyregion. Chinese Journal of Plant Ecology, 41(2): 175 - 185. [in Chinese])
- 孟秦倩, 王 健, 吴发启, 等. 2012. 黄土山地苹果园土壤水分最大利用深度分析. 农业工程学报, 28(15): 65 - 71.
- (Meng Q Q, Wang J, Wu F Q, et al. 2012. Soil moisture utilization depth of apple orchard in Loess Plateau. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 28(15): 65 - 71. [in Chinese])
- 孙守家, 孟 平, 张劲松, 等. 2011. 利用氘同位素研究太行山南麓枣树水分利用的季节性变化. 林业科学, 47(5): 46 - 53.
- (Sun S J, Meng P, Zhang J S, et al. 2011. Seasonal variation in Water Use of *Ziziphus jujuba* in the south aspect of Taihang Mountains with deuterium isotope signature. Scientia Silvae Sinicae, 47(5): 46 - 53. [in Chinese])
- 孙守家, 孟 平, 张劲松, 等. 2014. 太行山南麓山区栓皮栎-扁担杆生态系统水分利用策略. 生态学报, 34(21): 6317 - 6325.
- (Sun S J, Meng P, Zhang J S, et al. 2014. Ecosystems water use patterns of *Quercus variabilis* and *Grewia biloba* based on stable hydrogen and oxygen isotopes in the south aspect of Taihang Mountains. Acta Ecologica Sinica, 34 (21): 6317 - 6325. [in Chinese])
- 王 军, 傅伯杰, 蒋小平. 2002. 土壤水分异质性的研究综述. 水土保持研究, 9(1): 1 - 5.
- (Wang J, Fu B J, Jiang X P. 2002. Review on research of soil moisture heterogeneity. Research of Soil and Water Conservation, 9 (1): 1 - 5. [in Chinese])
- 张宝庆, 吴普特, 赵西宁, 等. 2012. 基于可变下渗容量模型和Palmer干旱指数的区域干旱化评价研究. 水利学报, 43(8): 926 - 934.
- (Zhang B Q, Wu P T, Zhao Z N, et al. 2012. Study on regional drought assessment based on variable infiltration capacity model and Palmer drought severity index. Journal of Hydraulic Engineering, 43(8): 926 - 934. [in Chinese])
- 张 欢, 曹 俊, 王化冰, 等. 2018. 张北地区退化杨树防护林的水分利用特征. 应用生态学报, 29(5): 1381 - 1388.
- (Zhang H, Cao J, Wang H B, et al. 2018. Water utilization characteristics of the degraded poplar shelterbelts in Zhangbei, Hebei, China. Chinese Journal of Applied Ecology, 29(5): 1381 - 1388. [in Chinese])
- 赵西宁, 李 楠, 高晓东, 等. 2018. 基于<sup>18</sup>O示踪的不同树龄枣树土壤水分利用特征分析. 农业工程学报, 34(3): 135 - 142.
- (Zhao X N, Li N, Gao X D, et al. 2018. Characteristics of soil water utilization for different stand ages of jujube trees based on <sup>18</sup>O tracking. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 34(3): 135 - 142. [in Chinese])
- 张 义, 谢永生. 2011. 不同覆盖措施下苹果园土壤水文差异. 草业学报, 20(2): 85 - 92.
- (Zhang Y, Xie Y S. 2011. Effects of different patterns of surface mulching on soil hydrology in an apple orchard. Acta Prataculturae Sinica, 20(2): 85 - 92. [in Chinese])
- 朱德兰, 吴发启. 2004. 黄土高原旱地果园土壤水分管理研究. 水土保持研究, 11(1): 40 - 42.
- (Zhu D L, Wu F Q. 2004. Study on water management in dry orchard in

- Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 11(1): 40-42. [in Chinese ]
- 朱雅娟, 赵雪彬, 刘艳书, 等. 2017. 青海共和盆地沙柳(*Salix psammophila*)和乌柳(*Salix cheilophila*)的水分利用过程. *中国沙漠*, 37(2): 281-287.
- (Zhu Y J, Zhao X B, Liu Y S, et al. 2017. Water use process of *Salix psammophila* and *Salix cheilophila* in Gonghe Basin, Qinghai Province. *Journal of Desert research*, 37(2): 281-287. [in Chinese ])
- Beyer M, Koeniger P, Gaj M, et al. 2016. A deuterium-based labeling technique for the investigation of rooting depths, water uptake dynamics and unsaturated zone water transport in semiarid environments. *Journal of Hydrology*, 533: 627-643.
- Canadell J, Jackson R B, Ehleringer J B, et al. 1996. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia*, 108(4): 583-595.
- Dawson T E, Ehleringer J R. 1991. Streamside trees that do not use stream water. *Nature*, 350(6316): 335-337.
- Dawson T E, Mambelli S, Plamboeck A H, et al. 2002. Stable isotopes in plant ecology. *Annual review of Ecology and Systematics*, 33(1): 507-559.
- Grossiord C, Sevanto S, Dawson T E, et al. 2017. Warming combined with more extreme precipitation regimes modifies the water sources used by trees. *New Phytologist*, 213(2): 584-596.
- Lin G H, Phillips S L, Ehleringer J R. 1996. Monosoonal precipitation responses of shrubs in a cold desert community on the Colorado Plateau. *Oecologia*, 106(1): 8-17.
- Liu S Z, Zhang Q, Liu J, et al. 2014. Effect of partial root-zone irrigating deuterium oxide on the properties of water transportation and distribution in young apple trees. *Journal of Integrative Agriculture*, 13(6): 1268-1275.
- Moore J W, Semmens B X. 2008. Incorporating uncertainty and prior information into stable isotope mixing models. *Ecology Letters*, 11(5): 470-480.
- Song X, Gao X, Zhao X, et al. 2017. Spatial distribution of soil moisture and fine roots in rain-fed apple orchards employing a Rainwater Collection and Infiltration (RWCI) system on the Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 184: 170-177.
- Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P, et al. 2012. Changes of deep soil desiccation with plant growth age in the Chinese Loess Plateau. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 9(10): 12029-12060.
- Wu H, Li J, Zhang C, et al. 2018. Determining root water uptake of two alpine crops in a rainfed cropland in the Qinghai Lake watershed: first assessment using stable isotopes analysis. *Field Crops Research*, 215: 113-121.

(责任编辑 王艳娜)