

# 基于稳定氢氧同位素的黄土高原不同 生长年限油用牡丹水分来源研究

李盼根, 王震洪, 李赫, 何晓乐, 严婷, 帕提尔·阿米特

(长安大学 环境科学与工程学院 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘要:** [目的] 探究油用牡丹的水分来源与用水策略, 为合理种植、推广发展油用牡丹, 提高牡丹成活率提供科学依据。[方法] 以不同生长年份的 2 种油用牡丹为研究材料, 利用稳定氢氧同位素探究其在春秋 2 个季节的水分来源。[结果] ①由于根系更加发达, 成年期油用牡丹的用水策略比幼年期有更强的自主选择性。春(旱)季, 2 种年龄油用牡丹都主要利用 0—20 cm 表层土壤水, 但成年期(70.7%)比幼年期(61.8%)对水分的利用率更高。秋(雨)季, 表层土壤含水量过高, 成年期油用牡丹较幼年期则更趋向吸收深层土壤水分; ②通过分析土壤含水率、油用牡丹吸收的不同来源水分的贡献率及它们之间的关系, 可知贡献率越高的土层含水量越低。[结论] 在黄土高原春秋 2 个季节, 油用牡丹均倾向于吸收含水量较低土层水分, 证明了其耐旱不耐涝的特性。

**关键词:** 油用牡丹; 黄土高原; 水分来源; 稳定氢氧同位素

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2020)01-0108-08

**中图分类号:** Q948

**文献参数:** 李盼根, 王震洪, 李赫, 等. 基于稳定氢氧同位素的黄土高原不同生长年限油用牡丹水分来源研究[J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 108-115. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2020. 01. 016; Li Pangen, Wang Zhenhong, Li He, et al. Analysis on sources of soil water absorbed by oil peonies of different ages based on stable isotopes of hydrogen and oxygen found on Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(1): 108-115.

## Analysis on Sources of Soil Water Absorbed by Oil Peonies of Different Ages Based on Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen Found on Loess Plateau

Li Pangen, Wang Zhenhong, Li He, He Xiaole, Yan Ting, Patil · Amit

(Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region of the Ministry of Education, School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

**Abstract:** [Objective] The sources and use strategies of soil water absorbed by an oil peony were explored in order to provide a basis for the improvement of the survival rates in rational plantations of the plants and the development of the oil peony industry. [Methods] Two kinds of oil peonies of different ages were used as materials. The ratios of stable hydrogen and oxygen isotopes in the plant and soil water were tested to analyze the sources of soil water absorbed by oil peonies in spring and autumn. [Results] ① Mature individuals of oil peonies developed strong root systems and consequently more optimal strategies of water use than young individuals did. In spring (or dry season), oil peonies with two ages mainly absorbed water from surface soil (0—20 cm). However, mature oil peonies used more water (70.7%) from the surface soil than young ones did (61.8%), comparatively. In autumn (or relatively humid season), there was high water content in the surface soil. Mature oil peonies conversely tended to absorb soil water from deeper layers of soil compared with young peonies. ② On the basis of the analysis of soil water content, the contribution rates of different sources of soil water to the growth of peonies, and their relationships, it was found that the soil layers with high contribution rates of water to the growth of oil peonies had low soil water content. [Conclusion] An oil peony tends to absorb water from soil layers with low water content during spring and autumn. This verifies

收稿日期: 2019-07-01

修回日期: 2019-09-13

资助项目: 中央高校基本科研业务费资助项目“天然河流急流—深潭—河滩系统生态功能研究”(300102299303)。

第一作者: 李盼根(1994—), 男(汉族), 甘肃省庆阳市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email: 1135077940@qq.com。

通讯作者: 王震洪(1966—), 男(汉族), 云南省牟定县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事生态学及水土保持等方面的研究。Email: w\_zhenhong@126.com。

both the tolerance of an oil peony to drought and its intolerance to waterlogging.

**Keywords:** oil peony; Loess Plateau; water utilization sources; stable hydrogen and oxygen isotope

众所周知,牡丹(*Paeonia suffruticosa*)是中国的传统名花,是多年生小灌木<sup>[1]</sup>。油用牡丹是牡丹组植物中产籽出油率高的( $\geq 22\%$ )种的统称,主要有凤丹和紫斑两大品种,具备高产出、高含油率、高品质、低成本,即“三高一低”的特点;除此之外牡丹根即丹皮是中国传统中药材,具有极高药用价值。油用牡丹耐干旱、耐瘠薄、耐高寒,具有蓄水保土等生态效益,是集诸多优点于一身的水土保持树种<sup>[2-4]</sup>。2015年国务院办公厅印发的《关于加快木本油料产业发展的意见》中便提到油用牡丹是黄土高原地区生长的高级油用类植物品种,合理种植,不仅可以治理黄土高原水土流失,促进生态文明建设,而且有利于保障中国的粮油安全<sup>[2]</sup>。为了推广种植,现在针对油用牡丹的研究有很多,但多数集中在种植模式、种质资源,育苗技术等探索<sup>[1,4]</sup>,甚至有关于对土壤环境改善的报道<sup>[3]</sup>。而制约植物生长发育的最主要因素之一就是水分<sup>[5]</sup>,侯小改等<sup>[6]</sup>对不同土壤水分条件下牡丹的生理特性做了研究,试验证明不同水分条件下牡丹生理特性差异明显。

黄土高原地处典型的干旱与半干旱地区,全年降水量少,气候干旱,水土流失严重<sup>[7-9]</sup>。因此如何因地制宜,兼顾经济与生态的发展,一直是该地区亟待解决的问题。在恶劣环境的胁迫下,植物需要努力对自身的生理习性、形态结构等进行调整,才能够适应并生存下去。随着生境的变化有选择性的将不同水源作为自己生存的保障,就是植物适应环境的一种表现<sup>[10]</sup>。所以,研究植物水分来源有助于了解植物的用水策略,从而针对性地进行适地适树与灌溉。探究植物水分来源的传统方法是首先用全根系挖掘法了解植物根系分布特征,再结合测定同化枝水势、植物导水度以及植物蒸腾速率等来确定,不仅费时、费力、而且严重破坏了植物的生境,常常影响对植物水源的量化<sup>[11]</sup>。稳定同位素技术作为一种方便、有效的研究手段,近年来在生态学领域中得到了广泛应用<sup>[12-17]</sup>,已有很多学者利用稳定同位素技术定量区分植物利用的水分来源<sup>[16-24]</sup>。Eggemeyer等<sup>[21]</sup>在2008年利用氢氧同位素的方法研究了半干旱草原的两种乔木和两种草本水分利用深度的季节变化,得到了在雨季,乔木主要吸收表层和深层土壤混合水的结果。周天河等<sup>[22]</sup>利用稳定同位素研究胡杨与怪柳的水分来源,探究两者水分利用方式的差异,了解两者对于干旱环境的适应机制。张江等<sup>[23]</sup>利用稳定同位素测定了塔里木河下游不同龄级胡杨的水分利用来源。许

浩等<sup>[24]</sup>基于稳定同位素技术探究了河东沙地沙蒿的水分利用,对比了不同月份沙蒿的水分来源等。

因此,本研究选择黄土高原为研究地点,基于稳定氢氧同位素,利用图解法与多源线性模型计算法两种方法,探究油用牡丹的水分来源与用水策略,比较不同季节、不同生长年限油用牡丹吸水来源的异同,并结合不同土层的土壤含水率,了解其用水机制,以期为合理种植、推广发展油用牡丹,提高牡丹成活率提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于芋园村油用牡丹种植基地(108.69°E, 35.09°N),地处陕西省中部铜川市照金镇,陕北黄土高原的南缘。气候属温带大陆性半干旱、半湿润区,年平均降水量560~604 mm,气温的特点是:冬季寒冷,夏季炎热,春季升温较快,秋季降温迅速,气温日较差大,昼夜温差大,年平均气温8.4℃,无霜期206 d。当地地貌结构复杂,整体呈西北高、东南低的倾斜地势,海拔最高1734.2 m,最低536 m,沟壑密度1.27 km<sup>2</sup>/km<sup>2</sup>,境内山峦纵横,峪谷相间,台塬广布,梁峁交错,形成一个不规则的网状结构。主要河流有照金河、兰干川河、雷神河、高尔塬水库等。

### 1.2 采样方法

基于稳定同位素进行的水源划分,需要两种假设<sup>[23]</sup>:①在根区范围内,土壤水同位素在水平方向上没有明显差异;②土样和植物样品的采样时间差与水分在植物体内运输的时间差无明显差异。所以为对比幼年期与成年期两种生长年限油用牡丹主要水分来源,本文使用以下方法采集了2018年9月(秋季)与2019年4月(春季)两个生长季节的土壤、植物、地下水样品,根据所获得的相关数据进行分析。

(1)样地设置。试验地油用牡丹品种为“紫斑”牡丹。油用牡丹按生命周期一般划分为幼年期、成年期和衰老期,通常我们将1~3 a为养根阶段,3~5 a为幼年期,成年期一般从第5 a开始。但在不同品种和环境的影响下也会有所差异。在本试验中,依据所选油用牡丹的两种年限挑选了2块样地(见表1)。通过对比株高,根深等,我们将3~4 a生的油用牡丹作为幼年期样本,将5~6 a生的牡丹作为成年期样本。样地均为坡改梯田,栽植密度均为株行距(50 cm×60 cm)。试验期间管理仅包括除草及秋末剪去退缩枯枝,并没有施肥与浇水的措施。

表 1 黄土高原油用牡丹样地划分

| 时期  | 生长年限  | 栽植密度/<br>(cm×cm) | 扎根深度/<br>cm | 株高/<br>cm | 根系主要分布<br>土层/cm | 样本数/<br>(株) | 样地大小/<br>(m×m) |
|-----|-------|------------------|-------------|-----------|-----------------|-------------|----------------|
| 幼年期 | 3~4 a | 50×60            | 32          | 65        | 0—20            | 3           | 10×10          |
| 成年期 | 5~6 a | 50×60            | 67          | 96        | 0—40            | 3           | 10×10          |

(2) 植物样品采集。在油用牡丹生长季,测定油用牡丹株高、冠幅,最终选择 3 株作为样本植株。油用牡丹具有典型的“退稍枯枝”现象,也就是说其生长季生长量的 60% 均不会发生木质化,会在秋季枯死,所以采样方法一般是:剪取非绿色的栓化小枝(直径 0.3~0.5 cm,长 3~5 cm),迅速去皮后装入采样瓶并用 Parafilm 封口膜密封,然后放入便携式冰箱冷冻保存(2℃),带回实验室冷冻保存。

(3) 土壤样品采集。采集土壤样品时,削去表层 2 cm,用 1 m 长的土钻在样地每株植物下方分别钻取土壤样品,土样分 6 个土层 0—10,10—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm。采集土样,分为两组,将一份土壤样品迅速装入样品瓶,用封口膜密封,并放入携带的便携式冰箱,带回实验室冷冻保存,用于测定氢氧同位素值;另外一份土壤样品装入铝盒,带

回实验室用于分析各层土壤质地。

(4) 潜在水源样品采集。收集试验期间地下水样品。在样地附近 80 m 范围内有一水井,水位在试验期间均距地表 5 m 以下,其井水可用于测定地下水  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$ 。将所取样品迅速装入样品瓶、用封口膜密封,并放入便携式冰箱,带回实验室 2℃ 冷藏,每组 3 个重复。

### 1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤质地 土壤粒级分布使用马尔文 2000 进行测定,土壤质地采用国际制土壤质地分级。试验结果如表 2 所示。通过比对,两块样地土壤为壤质黏土,且两块样地土壤粒径差异不显著( $p>0.05$ ),介于黏土与沙土之间的土壤最适合油用牡丹生长,试验地土壤保水、保肥性好,土温较稳定,适于植物生长,但通气性、透水性差,不利于好气性微生物活动。

表 2 黄土高原区域土壤粒径分布比例

| 土层/cm  | 黏粒(<0.002 mm) |       | 粉粒(0.002~0.02 mm) |       | 细砂粒(0.02~0.2 mm) |       |
|--------|---------------|-------|-------------------|-------|------------------|-------|
|        | 样地 1          | 样地 2  | 样地 1              | 样地 2  | 样地 1             | 样地 2  |
| 0—10   | 30.19         | 30.09 | 38.51             | 35.38 | 31.29            | 34.53 |
| 10—20  | 32.83         | 28.79 | 38.46             | 34.52 | 28.71            | 36.68 |
| 20—40  | 32.82         | 31.07 | 39.85             | 36.49 | 27.33            | 32.45 |
| 40—60  | 31.37         | 30.63 | 37.47             | 37.17 | 31.16            | 32.21 |
| 60—80  | 31.06         | 29.17 | 37.82             | 37.44 | 31.12            | 33.38 |
| 80—100 | 30.01         | 29.90 | 36.96             | 37.31 | 33.03            | 32.79 |
| 均值     | 31.38         | 29.94 | 38.18             | 36.38 | 30.44            | 33.67 |

1.3.2 植物及土壤水分提取 样品的抽提使用全自动真空冷凝抽提系统 LI-2100(北京理加联合科技有限公司),单次抽提率达到 98% 以上为合格样品。抽提的水分与地下水采用 LGR 液态水同位素分析仪(美国 Los Gatos Research 公司)测定,其精度  $\delta^{18}O<0.03\%$ , $\delta D<0.2\%$ ;测得的水样中氢氧同位素含量为“标准平均大洋水(SMOW)”的千分差,表示为:

$$\delta\% = \frac{R_{\text{Sample}} - R_{\text{Standard}}}{R_{\text{Standard}}} \times 1000$$

式中: $R_{\text{Sample}}$ ——样品中的 D/H 或  $^{18}O/^{16}O$  的摩尔比;  
 $R_{\text{Standard}}$ ——SMOW 中的 D/H 或  $^{18}O/^{16}O$  的摩尔比。

1.3.3 土壤含水量 土壤体积含水量由 TDR300 便携式水分测定仪测量。采用上密下疏的方法,在表层 20 cm 内的土层使用 10 cm 探头,40—60 cm 土层使用 20 cm 探头,分别测定土壤含水率。试验地土壤属于壤质黏土,各层土壤黏土含量均大于 25%,所以

TDR300 选择高黏土模式(黏土含量大于 22%)。因为试验需要比较不同生长年限油用牡丹吸水来源的差异,所以我们在两块样地样本植株附近分别记录各剖面土壤含水率。

### 1.4 数据分析

采用 Excle 2016 和 Spass Statistics 对数据进行整理统计分析,线性相关法分析样品中  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  的相关性,最后利用 Origin Pro 9.1 软件进行作图。利用 IsoSource 模型计算水源贡献率,模型运行时资源增量参数(source increment)设置为 1%,质量平衡忍受差参数(mass balance tolerance)设置为 0.01%。

## 2 结果与分析

### 2.1 油用牡丹水分来源

2.1.1 图解法判断油用牡丹水分来源 成年期油用牡丹的样地与幼年期样地对比结果如图 1 所示。

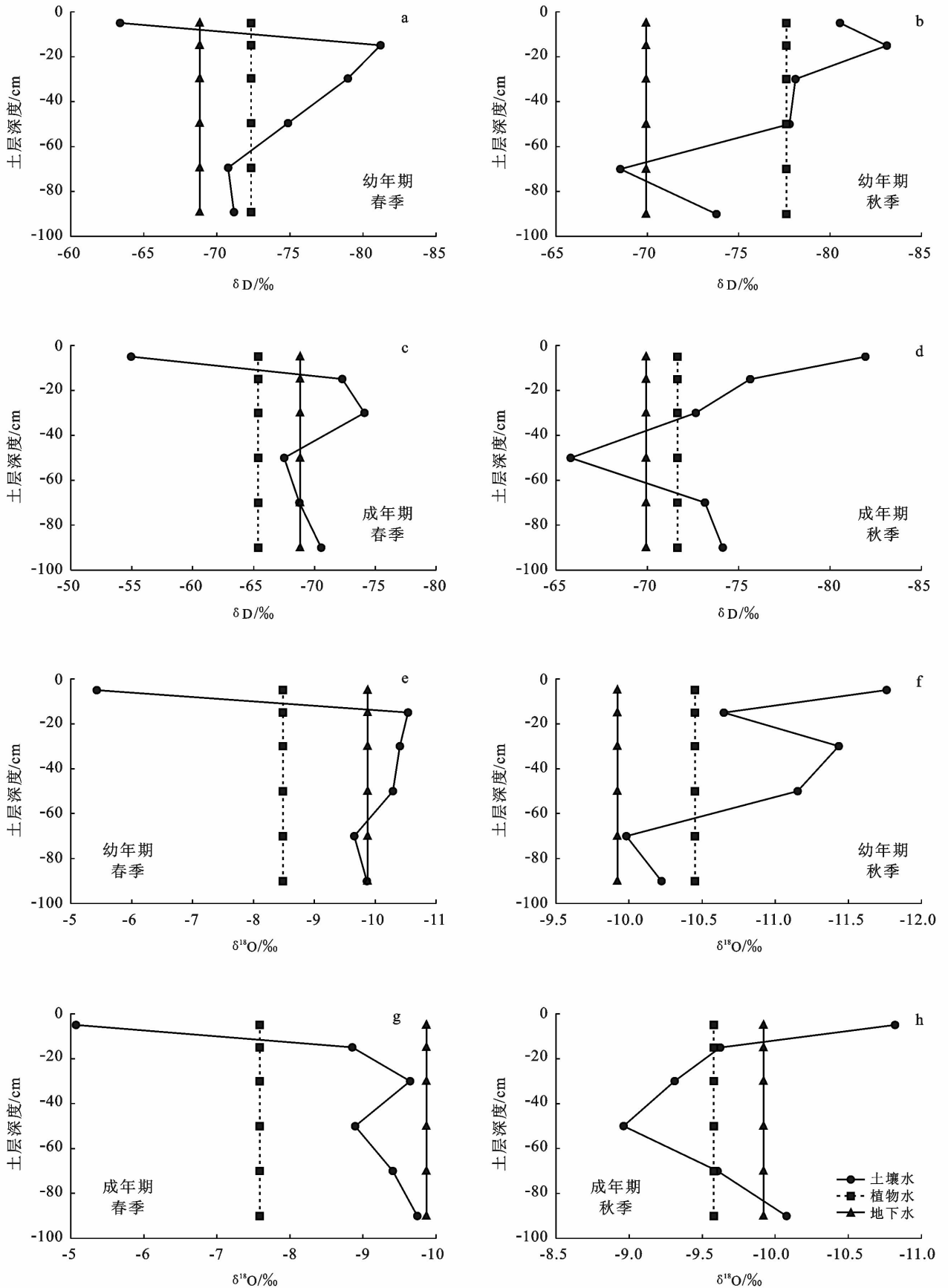


图 1 图解法确定油用牡丹水分来源

由图 1 可知越靠近表层土壤,成年期油用牡丹样地的  $\delta D, \delta^{18}O$  值较幼年期油用牡丹样地更加富集。并且,两个季节,春季较秋季重同位素更加富集,而地下水的氢氧同位素值则基本一致。在春季,幼年期油用牡丹  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  最大值都出现在 0—10 cm 土层,并在该土层土壤水和木质部水、地下水分别相交,另外,木质部  $\delta D$  与 60—80 cm 土层相交(图 1a, 1e);成年期油用牡丹  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  最大值则都出现在 0—10 cm 土层,植物水与 0—20 cm 土壤水相交,且该土层  $\delta D$  与地下水相交(图 1c, 1g)。在秋季,幼年期油用牡丹  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  最大值均出现在 60—80 cm 土层,  $\delta D$  与 40—60 cm 土壤水相交,  $\delta^{18}O$  与 60—80 cm 土壤水相交(图 1b, 1f);成年期油用牡丹  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  最大值均出现在 40—60 cm 土层,木质部与地下水  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  的值同时与

60—80 cm 土壤水有交点,  $\delta D$  值与 20—40 cm 土壤水,  $\delta^{18}O$  与 0—20 cm 土壤水分别相交(图 1d, 1h)。通过对比我们发现;在春季,幼年期与成年期油用牡丹均主要吸收 0—20 cm 土壤水分;在秋季,幼年期吸收 40—80 cm 土层水分,成年期油用牡丹主要吸收 60—80 cm 土壤水分,并且都利用地下水。

2.1.2 利用多源线性混合模型确定油用牡丹水分来源和贡献范围 依据  $\delta D, \delta^{18}O$  分别利用图解法进行分析会有不同的结果,精确性不够。因此,本文利用 IsoSource 软件根据多源线性模型计算油用牡丹的水分来源。因为 60—80 cm 和 80—100 cm 土层  $\delta D, \delta^{18}O$  的差异性均不显著( $p > 0.05$ ),所以合并土层为 60—100 cm。表 3 汇总了各个水源的平均、最小以及最大贡献率。

表 3 多源线性混合模型确定油用牡丹各水分来源的贡献比例

%

| 土层深度/cm | 幼年期 春季 |       |       | 幼年期 秋季 |       |       | 成年期 春季 |       |       | 成年期 秋季 |       |       |
|---------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
|         | 最小贡献率  | 平均贡献率 | 最大贡献率 | 最小贡献率  | 平均贡献率 | 最大贡献率 | 最小贡献率  | 平均贡献率 | 最大贡献率 | 最小贡献率  | 平均贡献率 | 最大贡献率 |
| 0—10    | 32.0   | 36.7  | 38.0  | 0      | 24.7  | 69.0  | 34.0   | 38.6  | 45.0  | 0      | 8.6   | 31.0  |
| 10—20   | 0      | 25.1  | 64.0  | 0      | 11.3  | 24.0  | 0      | 32.1  | 49.0  | 0      | 12.3  | 46.0  |
| 20—40   | 0      | 21.3  | 51.0  | 0      | 23.6  | 79.0  | 0      | 15.6  | 53.0  | 0      | 16.3  | 57.0  |
| 40—60   | 0      | 9.7   | 24.0  | 0      | 18.9  | 58.0  | 0      | 5.7   | 22.0  | 0      | 27.8  | 59.0  |
| 60—100  | 0      | 6.8   | 21.0  | 0      | 11.2  | 31.0  | 0      | 4.7   | 19.0  | 0      | 18.5  | 67.0  |
| 地下水     | 0      | 0.4   | 2.0   | 0      | 10.3  | 29.0  | 0      | 3.3   | 13.0  | 0      | 16.5  | 42.0  |

由表 3 可知,在春季,幼年期与成年期的油用牡丹对 0—20 cm 表层土壤水的利用效率分别为 61.8% 和 70.7%,二者主要利用 0—20 cm 表层土壤水,且随着土层深度的增加,对水分的利用也随之减少。在秋季,0—40 cm 土层幼年期油用牡丹的水分利用率(59.6%)远大于成年期油用牡丹(37.2%),在 40—100 cm 土层及地下水的利用率,成年期油用牡丹(46.3%, 16.5%)则要大于幼年期(30.1%, 10.3%)。综合两个季节来看,成年期与幼年期油用牡丹对水分的利用策略存在明显差异。幼年期油用牡丹在春秋两季都倾向利用较浅层水分,而且对 20—40 cm 土层的水分利用较为稳定;成年期油用牡丹春秋两季则都可以利用较深土层的水分。

## 2.2 土壤剖面含水率与水分来源

2.2.1 土壤剖面含水率与  $\delta D$  的关系 除个别泌盐与旱生植物,植物吸收土壤水分并不存在同位素分馏现象,并且由于降水、表层蒸发、地下水补给、植物蒸腾等作用的影响,土壤各个剖面的含水率有着明显的不同,通过分析研究土壤剖面含水率与氢氧同位素值的变化有助于分析土壤水的补给、损失等各种水力活

动。不同生长年限的油用牡丹木质部的  $\delta D$  有显著差异( $p = 0.016$ ),而  $\delta^{18}O$  则差异不显著( $p = 0.25$ )。因此,本文着重关注土壤各个剖面  $\delta D$  值的变化。在本次试验中,土壤剖面含水率与  $\delta D$  值存在明显的线性关系(见图 2)。通过相关性分析,土壤含水率与  $\delta D$  值呈显著负相关( $r = -0.492, P = 0.014, n = 24$ )。意味着在含水率越高,  $\delta D$  值愈小,反之亦然。春季表层因为长时间的蒸发,含水量较低,重同位素富集,所以  $\delta D$  值较大;秋季表层土壤含水率较大,  $\delta D$  值则较小。可以判断采样之前由于研究区接受了降雨补给土壤水分,表层土壤含水量增加,而  $\delta D$  值降低。

2.2.2 土壤剖面含水率与不同来源水分贡献率的关系 植物吸收水分与土壤含水量密切相关,土壤剖面含水率与油用牡丹吸收不同来源水分贡献率的关系如图 3 所示。

由图 3 可知,除了幼年期秋季( $r = 0.509, p = 0.381, n = 5$ )以外,油用牡丹吸收的不同土层水分的贡献率与含水率均呈负相关关系;幼年期春季( $r = -0.031, p = 0.960, n = 5$ ),成年期春季( $r = -0.837, p = 0.077, n = 5$ ),成年期秋季( $r = -0.968, p = 0.007,$

$n=5$ )。这意味着为油用牡丹贡献水分越高的土层,其含水率越低。另外,通过两块样地不同土层土壤含水率的单因素方差分析,秋季 0—20 cm 及 60—100 cm 土层含水量差异不显著( $p>0.05$ ),但整体依旧显示,成年期牡丹样地表层含水率低于幼年期样地。20—

60 cm 土层含水量差异极显著( $p<0.01$ )。春季 0—10 cm 及 80—100 cm 土层含水量差异不显著( $p>0.05$ ),在 10—80 cm 差异显著( $p<0.05$ )。两个季节表层土壤由于气候等影响的剧烈水力活动,导致植物对土壤水分的影响并不明显。

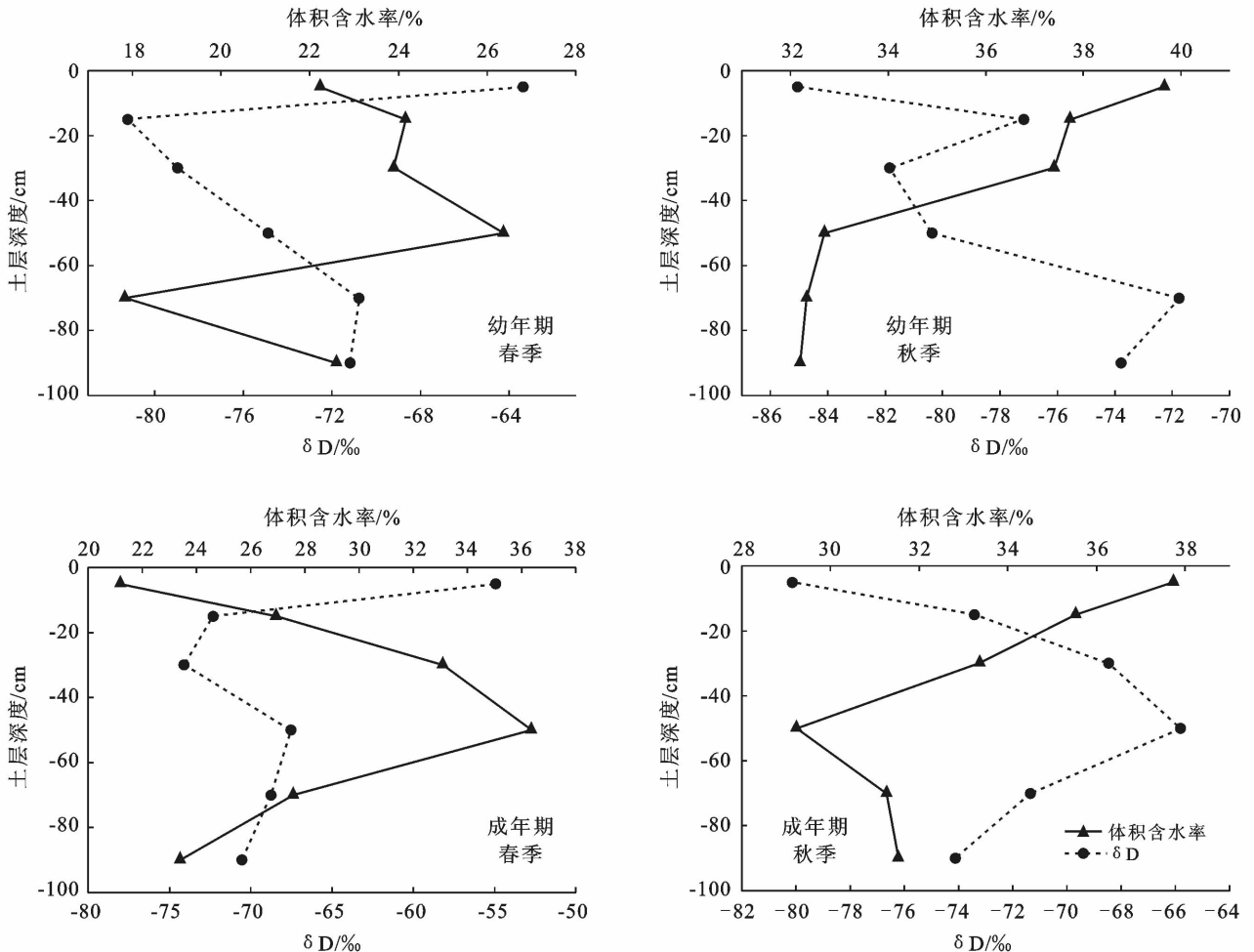


图 2 油用牡丹土壤含水率与  $\delta D$  值

## 3 讨论

### 3.1 不同生长年限油用牡丹的水分来源

不同类型的植物具有不同的水分利用来源,植物在水分利用来源上存在着较大的时空变异,尤其在干旱半干旱地区。即便同种植物,不同年龄阶段所利用的水分来源也有差异<sup>[25]</sup>。植物根系在土壤中吸收水分的过程中,稳定氢氧同位素一般不会发生分馏,因此木质部水分的同位素信息能够较好地反映出植物利用不同水源稳定同位素的组成信息<sup>[12-13,16-17,19]</sup>。

图解法有一定指示作用,但因依据  $\delta D, \delta^{18}O$  分别进行分析会有不同的结果,精确性不够,所以我们利用图解法与多源线性模型两种方法区分两种年份油用牡丹的水分来源。结果表明,两种年限油用牡丹的

水分来源有所差异,由不同土层土壤水对油用牡丹的贡献率可以得出,在黄土高原地区,春季两种年份油用牡丹均倾向吸收浅层土壤水分,这与其根系分布及土壤含水量密切相关,当水源较为充足时,植物倾向优先发展表层根系,优先吸收利用储存在浅层土壤中的水分,有利于节省能量<sup>[26-30]</sup>。差异是在浅层土壤中,成年期的油用牡丹较幼年期在相同土层的水分利用率更高,这种策略使得成年期油用牡丹在整个吸水土层能更持久的利用水分。秋季,在油用牡丹生长周期的末期,两种年份的油用牡丹吸收各土层水分,并利用地下水。差异是成年期油用牡丹主要吸收 40—60 cm 土层水分,并且对 40 cm 土层以下及地下水的利用率均高于幼年期的油用牡丹。这与成年期油用牡丹平均最大扎根深度可达 70 cm,而幼年期平均只

有 30 cm 有关。此外成年期油用牡丹根系主要分布在 0—40 cm 土层,这与秋季成年期油用牡丹主要吸

水土层并不一致,证明了过去利用根系结构进行植物水分来源判断的方法确实存在一定的局限性<sup>[23]</sup>。

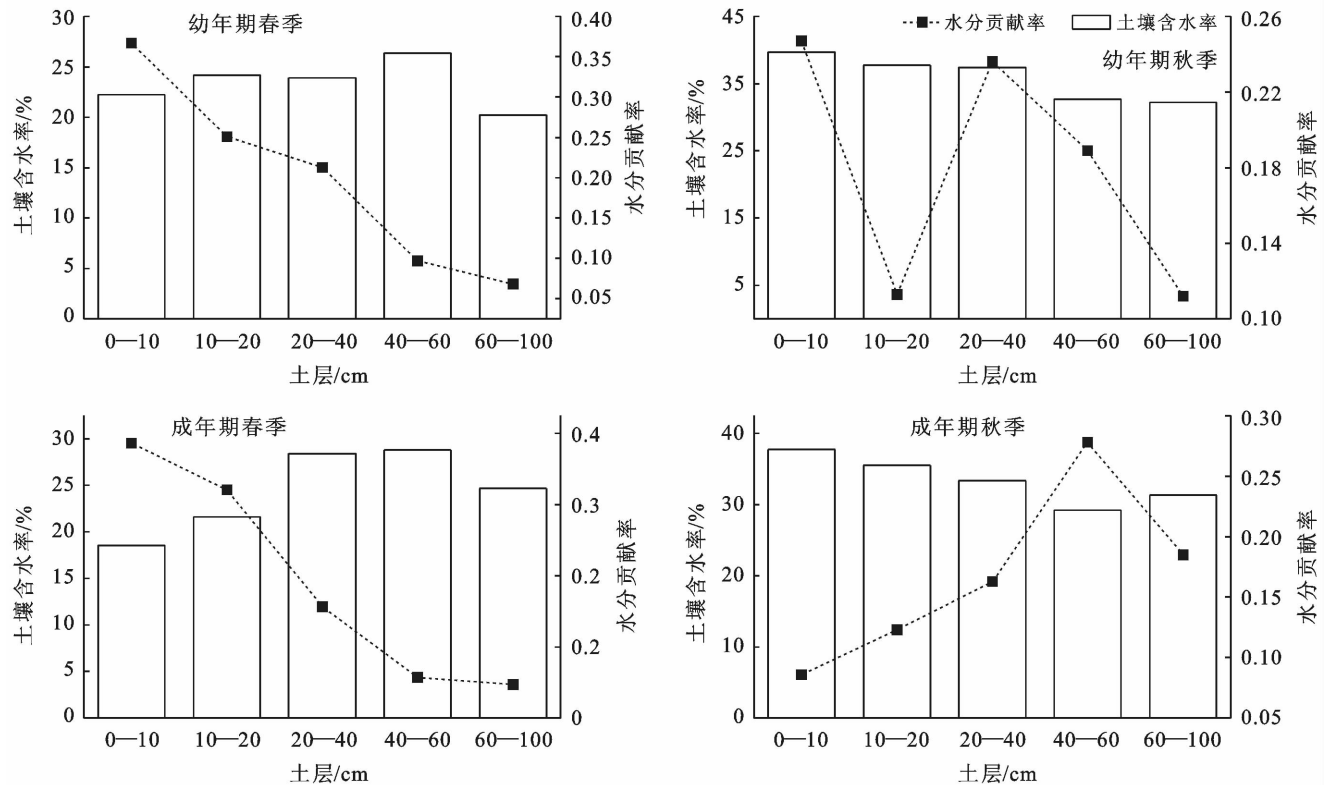


图 3 土壤剖面含水率与水源水分贡献率的关系

### 3.2 油用牡丹吸水来源与土壤含水率

牡丹生长忌涝,土壤水分过多,会造成烂根、烂叶,易滋长病虫害;水分不足,又会影响植株的正常生长和发育<sup>[6]</sup>。通过分析两个季节、两种生长年限油用牡丹土壤剖面含水率与水源水分贡献率的关系,发现土层含水率与该土层对油用牡丹的水分贡献率呈负相关,土层含水率越低,水分贡献率则越高。一般来说,大部分的植物在旱季主要吸收深层的土壤水和地下水,而到雨季水量充足时会转而吸收浅层的土壤水<sup>[31-32]</sup>。但本研究中,油用牡丹秋(雨)季土壤含水率远远高于春(旱)季,表层土壤这种差距更为显著。且油用牡丹在春季倾向吸收表层水分,而在秋天则倾向利用较深层的水分,这些结果与前人的研究不相符合。通过分析春季土层  $\delta D$  值的变化,表明表层土壤含水量较少的主要原因是因为蒸发而不是蒸腾。野外调查实测得到成年期油用牡丹最大扎根深度可达 70 cm,根系主要分布在 0—40 cm;幼年期油用牡丹最大扎根深度为 32 cm,且根系主要分布在 0—20 cm,成年期油用牡丹在秋季反而利用含水量较表层低且根系分布量较少的深层土壤水分。

## 4 结论

油用牡丹更倾向于吸收含水率较低土层的水分。而秋季幼年期的油用牡丹不符合这一规律则是因为表层土壤含水量差异不显著且根系分布较浅。除此之外,两次采样期间的土壤含水量均没有达到干旱胁迫的程度,反而土壤含水率都较高。油用牡丹如果田间排水不畅,长时间积水,则很容易发生根腐病,常造成整株甚至成片死亡<sup>[33]</sup>,试验得出的用水策略也与它耐旱不耐涝的特性相关。

黄土高原是中国土壤侵蚀最严重的地区,雨季多暴雨,水蚀面积占整个区域的 45%<sup>[34]</sup>。生物措施是目前比较有效且有利的方法之一,油用牡丹耐干旱瘠薄,能够较好地控制水土流失。但幼年期与成年期油用牡丹相比,根系的生长相对不够成熟,所以其用水策略选择的自主性,弱于成年期。因此选择推广种植油用牡丹时,尤其在其幼年期,注意排涝至关重要。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 周逢旭,闫小满. 油用牡丹的应用和研究现状及发展对策[J]. 山东农业工程学院学报,2018,35(6):3-4.

- [2] 胡建忠. 黄土高原高级油用类水土保持植物资源[J]. 中国水土保持, 2019, 443(2): 3-4, 77-78.
- [3] 刘嘉. 油用牡丹改善云南山区土壤环境质量及其前景[J]. 环境科学导刊, 2018, 37(S1): 85-87, 141.
- [4] 吴敬需, 张冰冰. 油用牡丹的育苗[J]. 花木盆景: 花卉园艺, 2015(10): 31.
- [5] 柳艳. 植物抗旱理论技术及其在旱区植被恢复中的应用[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [6] 侯小改, 段春燕, 刘素云, 等. 不同土壤水分条件下牡丹的生理特性研究[J]. 华北农学报, 2007, 22(3): 80-83.
- [7] 王超花. 半干旱黄土区不同土地利用方式对土壤生态水文性质的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [8] 吴冬秀, 王根轩, 赵松岭. 黄土高原半干旱区水土保持植被类型选择的生态经济学思考[J]. 科技导报, 1998, 16(10): 54-56.
- [9] 袁晓波, 尚振艳, 牛得草, 等. 黄土高原生态退化与恢复[J]. 草业科学, 2015, 32(3): 363-371.
- [10] 曾巧, 马剑英. 黑河流域不同生境植物水分来源及环境指示意义[J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 148-155.
- [11] 巩国丽, 陈辉, 段德玉. 利用稳定氢氧同位素定量区分白刺水分来源的方法比较[J]. 生态学报, 2011, 31(24): 7533-7541.
- [12] Burgess S S O, Adams M A, Turner N C, et al. Characterisation of hydrogen isotope profiles in an agroforestry system: implications for tracing water sources of trees[J]. Agricultural Water Management, 2000, 45(3): 229-241.
- [13] 邓文平, 余新晓, 贾国栋, 等. 利用稳定氢氧同位素定量区分栓皮栎旱季水分来源的方法比较[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(3): 412-422.
- [14] 孙双峰, 黄建辉, 林光辉, 等. 稳定同位素技术在植物水分利用研究中的应用[J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2362-2371.
- [15] Brunel J P, Walker G R, Kennett-Smith A K. Field validation of isotopic procedures for determining sources of water used by plants in a semi-arid environment[J]. Journal of Hydrology, 1995, 167(1/2/3/4): 351-368.
- [16] Dawson T E, Mambelli S, Plamboeck A H, et al. Stable Isotopes in Plant Ecology[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 2002, 33(1): 507-559.
- [17] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition [J]. Plant, Cell and Environment, 1992, 15(9): 1073-1082.
- [18] Meinzer F C, Andrade J L, Goldstein G, et al. Partitioning of soil water among canopy trees in a seasonally dry tropical forest[J]. Oecologia, 1999, 121(3): 293.
- [19] Nie Yunpeng, Chen Hongsong, Wang Kelin, et al. Seasonal water use patterns of woody species growing on the continuous dolostone outcrops and nearby thin soils in subtropical China[J]. Plant and Soil, 2011, 341(1/2): 399-412.
- [20] Schwinning S, Starr B I, Ehleringer J R. Dominant cold desert plants do not partition warm season precipitation by event size[J]. Oecologia, 2003, 136(2): 252-260.
- [21] Eggemeyer K D, Awada T, Harvey F E, et al. Seasonal changes in depth of water uptake for encroaching trees *Juniperus virginiana* and *Pinus ponderosa* and two dominant C<sub>4</sub> grasses in a semiarid grassland[J]. Tree Physiology, 2008, 29(2): 157-169.
- [22] 周天河, 赵成义, 俞永祥, 等. 基于稳定氢氧同位素的胡杨与柽柳幼苗水分来源研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 241-246.
- [23] 张江, 李桂芳, 贺亚玲, 等. 基于稳定同位素技术的塔里木河下游不同林龄胡杨的水分利用来源[J]. 生物多样性, 2018, 26(6): 564-571.
- [24] 许浩, 何建龙, 王占军, 等. 基于稳定同位素技术的河东沙地沙蒿水分利用研究[J]. 宁夏农林科技, 2018, 59(2): 7-9, 37.
- [25] Wang Jian, Fu Bojie, Lu Nan, et al. Seasonal variation in water uptake patterns of three plant species based on stable isotopes in the semi-arid Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 27-37.
- [26] Nie Yunpeng, Chen Hongsong, Wang Kelin, et al. Water source utilization by woody plants growing on dolomite outcrops and nearby soils during dry seasons in Karst region of Southwest China[J]. Journal of Hydrology, 2012, 420/421: 264-274.
- [27] 侯士彬, 宋献方, 于静洁, 等. 太行山区典型植被下降水入渗的稳定同位素特征分析[J]. 资源科学, 2008, 30(1): 86-92.
- [28] 贾国栋. 基于稳定氢氧同位素技术的植被—土壤系统水分运动机制研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [29] 李雪松, 贾德彬, 钱龙娇, 等. 基于同位素技术分析不同生长季节杨树水分利用[J]. 生态学杂志, 2018, 37(3): 840-846.
- [30] 王恩群, 余雪标, 林培群, 等. 超大宽行桉农间作模式下桉树人工林根系的研究[J]. 广东农业科学, 2010, 37(3): 72-75, 79.
- [31] Dawson T E, Pate J S. Seasonal water uptake and movement in root systems of Australian phraeatophytic plants of dimorphic root morphology: A stable isotope investigation[J]. Oecologia, 1996, 107(1): 13-20.
- [32] McCole A A, Stern L A. 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.
- [33] 李玉生, 申长顺. 油用牡丹根腐病发生规律及防治[J]. 特种经济动植物, 2017, 20(12): 48.
- [34] 任柯蒙, 卫伟, 赵西宁, 等. 基于水蚀预报模型的黄土高原水平阶减流阻蚀效应模拟[J]. 生态学报, 2018, 38(14): 5067-5077.