

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201504034

王卓娟, 宋维峰, 吴锦奎, 等. 元阳梯田水源区旱冬瓜水分来源[J]. 广西植物, 2016, 36(6):713-719

WANG ZJ, SONG WF, WU JK, et al. Water utilization sources of *Alnus nepalensis* in the water source area of Yuanyang terrace[J]. Guihaia, 2016, 36(6):713-719

元阳梯田水源区旱冬瓜水分来源

王卓娟¹, 宋维峰^{1*}, 吴锦奎², 张小娟¹

(1. 西南林业大学 环境科学与工程学院, 昆明 650224; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘要: 旱冬瓜(*Alnus nepalensis*)是元阳梯田水源区的优势树种之一,其作为一种速生树种被发展为当地居民重要的薪炭林和经济林,树种的生长发育和地理分布受到水分制约,其吸收水分和水分利用的变化将会直接影响森林生态系统的水循环。该研究于2014年5-11月间进行,研究时段内累计降雨1 262 mm,地下水 δD 值在 -71‰ ~ -53‰ 范围, $\delta^{18}O$ 在 -10.6‰ ~ -7.0‰ 范围,受环境因子的影响很小,基本上保持常年稳定。土壤水是可供树种直接吸收利用的水源,基于氢氧稳定同位素技术,对比元阳梯田水源区旱冬瓜树种茎干水 δD 和其林地不同深度土壤水 δD 的同位素组成情况,结合不同深度土壤含水量,定性分析判断旱冬瓜对土壤水的利用,结果表明旱冬瓜旱季利用的土壤水主要分布在40 cm土层附近,而雨季利用的土壤水范围较广,分布在0~60 cm的土层。利用多元线性混合模型 IsoSource 软件定量分析旱冬瓜对土壤水和地下水的利用,结果表明:旱冬瓜水分来源分布较广,各土层土壤水和地下水均有贡献,雨季旱冬瓜主要利用0~60 cm深土壤水,其中雨后旱冬瓜绝大部分水分来源于0~10 cm的土壤水分,利用比例为66%~73%;其它时间主要利用40~60 cm的土壤水,贡献率高达73%;旱季旱冬瓜的绝大部分水分来源于地下水,对地下水的利用比例为18%~68%,同时,40~60 cm的土壤水也是其重要的水源。从不同时间尺度考察旱冬瓜对土壤水和浅层地下水的需求,更加准确地认识元阳梯田水源区不同森林类型优势树种的水分来源,为梯田森林生态系统经营与维护以及梯田的可持续发展提供了理论依据。

关键词: 元阳梯田, 旱冬瓜, 稳定氢氧同位素, 土壤水, 水分来源

中图分类号: Q945 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2016)06-0713-07

Water utilization sources of *Alnus nepalensis* in the water source area of Yuanyang terrace

WANG Zhuo-Juan¹, SONG Wei-Feng^{1*}, WU Jin-Kui², ZHANG Xiao-Juan¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: *Alnus nepalensis* is one of dominant tree species in the water source area of Yuanyang terrace. As a fast-growing tree species, it has been the important firewood forests and economic forests to local residents. Water constrains its vegetation growth and geographic distribution. In SPAC system, forest vegetation as the main body of forest ecological system and dominate the redistribution of water resources, its absorption of moisture and water utilization change will directly affect the water cycle of forest ecosystem. We conducted this study from May to November of 2014, with accumulative rainfall 1 262 mm. The groundwater in the study area of δD values ranged from -71‰ to -53‰ , $\delta^{18}O$ values ranged

收稿日期: 2014-04-24 修回日期: 2015-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(41371066) [Supported by the National Natural Science Foundation of China(41371066)]。

作者简介: 王卓娟(1988-),女,甘肃会宁人,硕士研究生,主要从事森林水文方面的研究,(E-mail)wzhuojuan0228@163.com。

*通讯作者: 宋维峰,博士,教授,主要从事生态环境工程和森林水文学教学和研究工作,(E-mail) songwf85@126.com。

from $-10.6‰$ to $-7.0‰$, less affected by environmental factors, basically remained stable; In this paper, *A. nepalensis* roots absorbed water from all the water sources and transport in the xylem water did not occur isotopic fractionation characteristic. We combined with the soil moisture content, the water utilization sources of *A. nepalensis* mainly came from 40 cm soil layer in dry season and 0–60 cm in rainy season to analyze the *A. nepalensis* water utilization strategies by comparison with the δD values of xylem water and soil water, with hydrogen and oxygen stable isotope techniques. The results of quantify analysis its water sources with multivariate linear mixed model of Isosource software showed that *A. nepalensis* had a wide distribution of water source, both the soil water and groundwater had contribution, 0–60 cm soil water was important water sources in the rainy season, and after raining most of the water source from 0–10 cm soil moisture, the proportion was 66%–73%; Other main water source from 40–60 cm soil water, contribution rate was as high as 73%; In the dry season, *A. nepalensis* utilize groundwater proportion was higher, the proportion was 18%–68%. Water constrained vegetation growth and geographic distribution. In SPAC system, forest vegetation as the main body of forest ecological system and dominate the redistribution of water resources, its absorption of moisture and water utilization change would directly affect the water cycle of forest ecosystem. This analysis on *A. nepalensis* water utilization sources from soil water and shallow ground water in different time scales, provides a basic model water utilization of dominant tree species in Yuanyang terrace, more accurated understanding of the water source of dominant tree species in different forest types, and necessary theoretical basis for management the terrace forest ecosystem and develop sustainable terrace in Yuanyang.

Key words: Yuanyang terrace, *Alnus nepalensis*, hydrogen and oxygen isotope, soil water, water utilization sources

植被的生长发育和地理分布受水分的制约,在 SPAC 系统中,森林主导着水资源的重新分配,植被作为森林生态系统的主体,其吸收水分和水分利用的变化,将会直接影响森林生态系统的水循环。植物稳定同位素能够反映植物所生长的环境因子,如温度、湿度、降水量、大气成分、水源同位素组成等(吴绍洪等, 2006)。不同来源的水分有着不同的氢氧同位素组成(钱云平等, 2008),陆地植物在根系吸收水分以及随后水分在木质部的运输过程,氢和氧同位素的分馏不会发生(Wershaw et al, 1966; White et al, 1985; Dawson & Ehleringer, 1991),植物的根和茎内的水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 值与土壤中可供植物吸收的水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值接近。因此,可以通过比较不同层次土壤中的水源和植物茎(木质部)水分的 δD 和 $\delta^{18}O$ 的值,分析水源与植物水中的同位素组成的关系,从而确定植物吸收利用哪一层的土壤水分,以及判断植物对不同水分来源的相对利用,例如对土壤水、雨水、地下水的不同利用方式(Dawson et al, 1991; Zimmermann et al, 1966; Walker et al, 1988)。Jackson et al (1995) 研究发现落叶树种比常绿树种中的 δD 含量高,认为常绿树种可以利用更深层次的土壤水源;赵良菊等(2008)通过分析黑河下游极端干旱区荒漠河岸林植物木质部水及其不同潜在水源稳定氧同位素组成,应用“同位素质量守恒多元”分析方法初步研究了不同潜在水源对河岸林植物的贡献,结果表明在黑河下游荒漠河岸林生态系

统,乔木和灌木较多的利用地下水,而草本植物以地表水为主。Liu et al (2010) 研究了西双版纳季节性雨林冠层树种在两个连续干季的水分利用状况,发现常绿种白颜树(*Gironniera subaequalis*) 优先利用 50 cm 以上的土壤水,落叶种绒毛番龙眼(*Pometia tomentosa*) 吸收 60 cm 以下土壤水及浅层地下水,其幼苗可以利用雾水。邓文平等(2013) 利用直接相关法、二源或三源线型混合模型以及多元线性混合模型分别对华北土石山区栓皮栎旱季水分来源进行分析研究,发现栓皮栎春季主要利用表层土壤水分,秋季利用水分主要集中在 >40 cm 的深层土壤。

旱冬瓜(*Alnus nepalensis*) 生活习性偏向于阴性(陈伟等, 2012),对土壤要求不高,常以小片纯林或针阔混交林出现,被视为云南省的重要资源之一。哈尼梯田地处云南省红河州哀牢山南段海拔 700 ~ 1 800 m 的山岭间,至今已有 1300 多年的历史,拥有世界级的自然景观和文化景观,是中国乃至世界古梯田的典型代表之一。作为哈尼梯田核心分布区的元阳梯田,其分布在坡度 $15^\circ \sim 75^\circ$ 的坡面上,上方是具有重要水文功能的森林植被。旱冬瓜是一种速生的次生植被,因元阳地区的气候条件适宜旱冬瓜的生长,是当地的优势树种之一,也是当地居民重要的薪炭林和经济林。本文利用树种根系在吸收水分以及水分在木质部运输过程中不发生同位素分馏现象的特征,通过氢氧稳定同位素技术定量分析元阳梯

田水源区旱冬瓜对土壤水和浅层地下水的利用,定量区分不同土层对旱冬瓜生长所需水分的相对贡献,旨在构建元阳梯田水源区优势树种对土壤水分利用的基本模式,为当地梯田的可持续发展、水分利用和水循环提供理论依据。

1 研究区概况

1.1 自然概况

元阳县位于云南省红河哈尼族彝族自治州西南部,地理位置为 $102^{\circ}27' \sim 103^{\circ}13'E$, $22^{\circ}49' \sim 23^{\circ}19'N$;元阳梯田在元阳县境内面积约有 $1.32 \times 10^4 \text{ hm}^2$,分布于海拔 700~1 800 m 之间,是哈尼族人民在长期的生产实践中创造的世界水土保持系统工程的奇迹。元阳梯田以“森林、村庄、梯田、河谷”为要素构成其独特的垂直梯田景观。

研究地点设在梯田核心区上方水源林区全福庄小寨小流域。研究区属中低山丘陵地貌,海拔 1 584~2 030 m,常年被浓雾笼罩。气候属亚热带山地季风气候,年平均气温为 20.5°C ,年最高气温 37.5°C ,年最低气温 0.6°C ;年降水量为 1 500~2 000 mm;年蒸发量为 1 184.1 mm;年均日照时数 1 820.8 h。土壤多为黄棕壤、黄壤,土壤剖面完整,土层厚度约 1 m。该区森林茂密,植被种类繁多(段兴凤等,2011)。

1.2 群落特点

旱冬瓜样地设置在 $102^{\circ}46'16'' E$ 、 $23^{\circ}5'51'' N$,海拔 1 922 m 处,林地土壤为黄壤,林冠较整齐,分布在阴坡及半阴坡的水湿条件较好处,呈小块状分布,森林群落的物种多样性各植被层表现不一致(和弦等,2012)。乔木层高 14~17 m,冠层盖度 60%,胸径 22~36 cm,群落结构简单,乔木主要为旱冬瓜,混有滇常山(*Clerodendrum yunnanense*)、尖子木(*Oxyspora paniculata*)、黑檀(*Dalbergia melanoxy-lon*)等,灌木主要为旱冬瓜幼树,草本层稀疏,主要有鳞毛蕨(*Dryopteris filix-mas*)、紫茎泽兰(*Eupatorium adenophorum*)、荩草(*Arthraxon hispidus*)等。

2 材料与方方法

2.1 样品采集与分析

在全福庄小流域设置固定采样观测样地,标记

固定取样植株,于 2014 年 5 月 16 日、7 月 12 日、8 月 11 日、11 月 14 日采集树种已栓化、成熟的枝条(直径约 3 cm),去除枝条外皮,迅速将样品放入 50 mL 的塑料离心管中,用 Parafilm 膜密封;在靠近树种的位置,利用土钻按 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 的层次取土,将样品放入 50 mL 的塑料离心管中,用 Parafilm 膜密封;地下水的采集点为山上泉水出露处,样品采集时间为每次主体实验的开始前后分别采集一次。采集后迅速将样品放入 50 mL 的塑料离心管中,用 Parafilm 膜密封。各样品带回实验室后迅速冷冻到 -20°C ,直至同位素测定。在采样过程中为尽可能避免发生同位素分馏现象,样品采集在早上太阳升起前完成。土壤水分使用土壤水分测量仪(ML2X 型)分别测量不同深度(10、20、30、40、60、100 cm)土壤容积含水量。

采用真空抽提装置来抽取植物和土壤中的水分,所有水样 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 测定在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所同位素实验室使用液态同位素激光分析仪 DLT100(LGR 公司,美国)完成。同位素分析结果用分析水样与 V-SMOW 的千分差来表示, δD 的精度为 $\pm 1\%$, $\delta^{18}\text{O}$ 的精度为 $\pm 0.2\%$ 。

2.2 数据处理

利用二元/三元线性模型可以计算不同水分来源对植物水分的相对贡献量。如当植物有三种水分来源时:

$$\delta D = x_1 \delta D_1 + x_2 \delta D_2 + x_3 \delta D_3$$

$$\delta^{18}\text{O} = x_1 \delta^{18}\text{O}_1 + x_2 \delta^{18}\text{O}_2 + x_3 \delta^{18}\text{O}_3$$

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1$$

式中, δD_1 、 δD_2 、 δD_3 和 $\delta^{18}\text{O}_1$ 、 $\delta^{18}\text{O}_2$ 、 $\delta^{18}\text{O}_3$ 为不同来源水分中的相应的氢氧稳定同位素值, x_1 、 x_2 、 x_3 为不同水分来源对植物水分的相对贡献量(%)。

当植物所利用的水分来源超过 3 个时,采用多元线性混合模型定量分析不同潜在水源如不同土层的土壤水和地下水对植物的贡献比例,通过专门的配套集成软件 IsoSource(免费获取地址 <http://www.epa.gov/wed/pages/models/stableIsotopes/isosource/isosource.htm>; Phillips & gregg,2003)计算分析,模型计算的结果是可能的解决方法的分布图,而不是唯一解,但会有唯一解的体现,如可能结果的平均值。合理的解的总数取决于水分来源的同位素组成、水分来源的数量、混合值、增量的设定以及容差值(Querejeta et al,2007)。

由于 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的相关性较强,本研究计算旱

冬瓜水分来源时只采用 δD , 同时来源增量设为 1%, 质量平衡公差设为 0.1%。利用 Excel 2007 软件对数据进行分析处理。

3 结果与分析

3.1 研究区降水及降水同位素组成

图 1 是元阳梯田水源区 2014 年 5 月 11 日至 11 月 7 日的降水及降水 δD 、 $\delta^{18}O$ 稳定同位素组成变化。由图 1 可知, 研究时段内日降水量为 5 ~ 57 mm, 累积降雨量 1 262 mm, 研究区主要降水集中在 6-10 月份。

降水 δD 值的变化范围在 $-97\text{‰} \sim -47\text{‰}$ 之间, 算术平均值为 -70‰ , $\delta^{18}O$ 介于 $-6.5\text{‰} \sim -13.2\text{‰}$ 之间, 算术平均值 -9.4‰ ; 降水可以补给土壤水, 同时降水可以混合和稀释土壤水分的氢氧同位素。可以看出, 研究区大气降水中的氢氧稳定同位素值总体上呈现出一定的波动性, 但可能由于研究区特殊的地理位置和环境气候等因子的影响, 降水过程中氢氧稳定同位素组成随着降雨量的增大而减小的趋势并不十分明显。

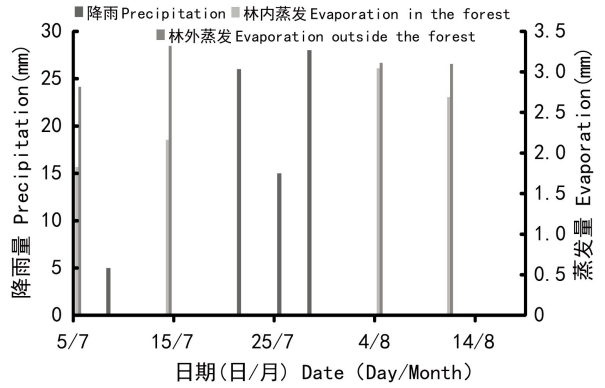


图 2 蒸发量变化
Fig. 2 Variation of evaporation

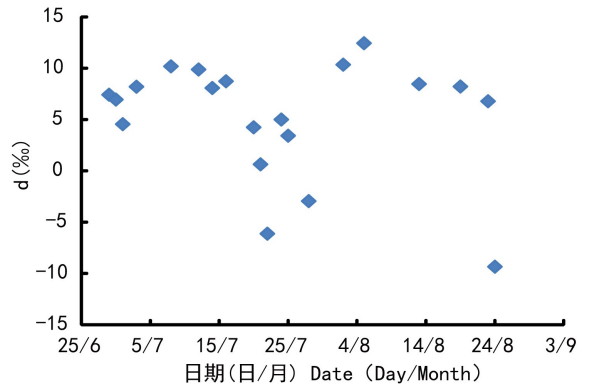


图 3 大气降水氘盈余变化
Fig. 3 Variation of d-excess in the precipitation

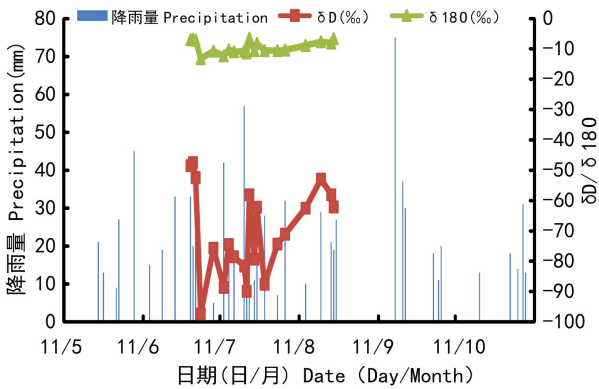


图 1 研究区降雨量变化及降水过程中氢氧稳定同位素值的变化特征
Fig. 1 Variation precipitation in Yuanyang terrace and characteristics of $\delta^{18}O$ and δD during the rainfall

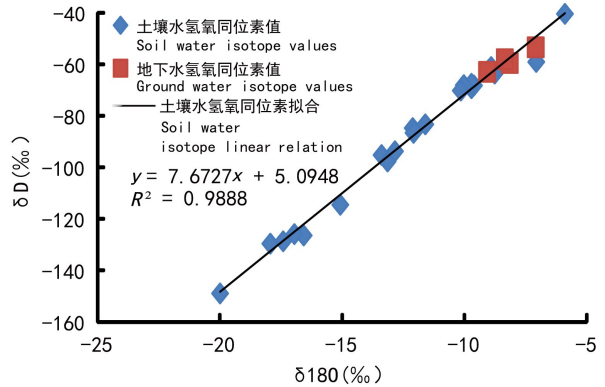


图 4 土壤水和地下水水样中 δD 和 $\delta^{18}O$ 的关系
Fig. 4 Relationship of δD - $\delta^{18}O$ of soil water and ground water samples

3.2 大气降水氘盈余的变化

图 2 表示研究区的蒸发量变化情况, 由于 7-8 月研究区降雨较为集中, 受降雨影响, 加之研究区常年受浓雾笼罩, 研究时段内蒸发量变幅不是太大。

氘盈余(d)是指 $d = \delta D - 8\delta^{18}O$, 是表征蒸发的一个参数, 其值越大表示研究区的蒸发速率越大, 图

3 是研究区研究时段内氘盈余的变化, d 值在 $-9.3\text{‰} \sim 12.4\text{‰}$ 之间, 反映出该地区研究时段降水

多湿度大,蒸发相对缓慢。

3.3 土壤水和茎干水氢氧稳定同位素特征

3.3.1 土壤水氢氧稳定同位素特征 将采集的48个土壤水样品和10个地下水样品的氢氧稳定同位素水样进行分析(图4),土壤水 δD 值的变化范围在 $-149‰ \sim -44‰$ 之间, $\delta^{18}O$ 值的变化范围在 $-20.2‰ \sim -5.8‰$ 之间;地下水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值随时间变化很小,说明地下水受环境因子的影响很小,基本上保持常年稳定。

3.3.2 旱冬瓜茎干水氢氧同位素特征 旱冬瓜茎干水样品采集频率与土壤水样同步,共收集8个茎干水样,其 δD 和 $\delta^{18}O$ 值分别在 $-113‰ \sim -70‰$ 和 $-15.2‰ \sim -9.2‰$ 的范围,算术平均值为 $-95‰$ 和 $-12.2‰$,标准差为14.336和2.005。旱冬瓜茎干水氢氧稳定同位素值 $\delta D(y)$ 与 $\delta^{18}O(x)$ 进行线性回归分析(图5)得 $\delta D(y) \sim \delta^{18}O(x)$ 关系式为 $y = 6.8x - 7.7(R^2 = 0.916, n = 16)$ 。

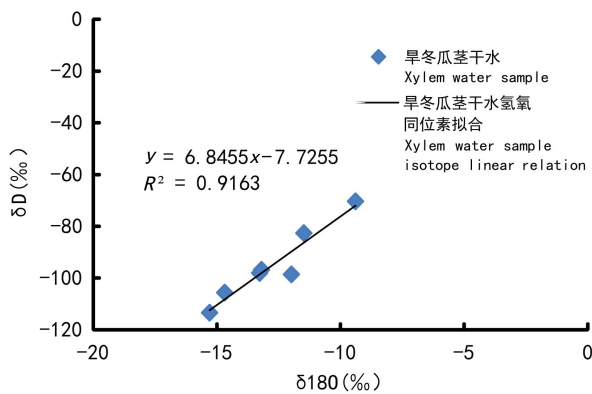


图5 旱冬瓜茎干水 δD 和 $\delta^{18}O$ 关系

Fig. 5 Relationship of δD - $\delta^{18}O$ of the xylem water sample

3.4 旱冬瓜的根系分布情况

在临近旱冬瓜处按照0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm的层次挖取30 cm × 30 cm × 10 cm的土壤,用土壤筛手工择选出根系,并按 >5 mm、2~5 mm和 <2 mm的分类体系进行分类(王成等,1999),放入烘箱中烘干至恒重,并称量根系的干重。

研究区旱冬瓜根系垂直分布情况如图6所示, <2 mm和2~5 mm的根系在所挖取的0~100 cm的土层均有分布,其中, <2 mm的根系在各层的分布相对比较均匀,2~5 mm的根系随着土层深度的增加呈现增加的趋势; >5 mm的根系分布在0~80 cm

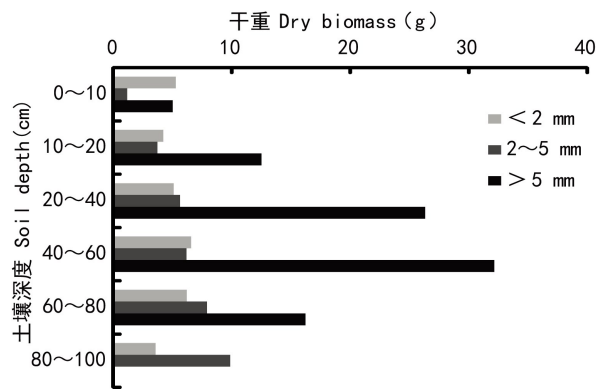


图6 旱冬瓜根系分布情况

Fig. 6 Root dry biomass of *Alnus nepalensis*

的土层,从上向下呈现先增加后减少的趋势,其中在40~60 cm的土层分布最多,且 >5 mm的根系在每一层土壤中的分布占主导,可见其对旱冬瓜的支撑和稳定具有重要作用。由此可见,研究区旱冬瓜的根系较浅且侧根较为发达。

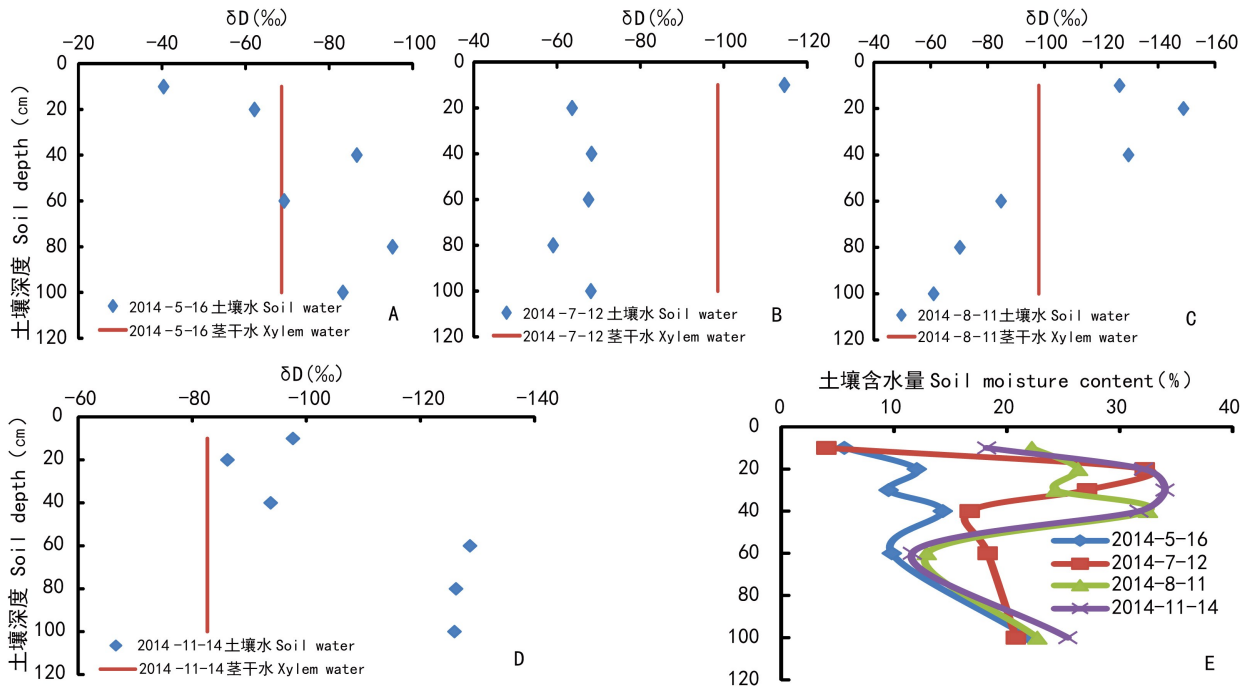
3.5 旱冬瓜茎干水与土壤水间的关系

图7是旱冬瓜茎干水 δD 同位素和枝条取样时不同深度土壤水分 δD 同位素组成。5月16日土壤水分 δD 值变化范围为 $-95‰ \sim -41‰$,其中靠近表层的土壤水分相对富集;不同深度土壤含水量整体最低,变化范围为5.6%~22%,旱冬瓜茎干水 δD 值与60 cm土层附近的 δD 值相近,说明旱冬瓜可能利用的是60 cm附近的土壤水分。

7月12日土壤水分 δD 值变化范围为 $-59‰ \sim -115‰$,土壤水分 δD 值呈现随土壤深度增加而增加的趋势,0~10 cm处的 δD 值相比较5月16日“右移”(降低),说明浅层土壤水由于降雨的稀释和混合作用而受影响。由于有较多降雨补给,土壤含水量明显增加,10~20 cm的土壤含水量达32.2%,10 cm附近的 δD 值接近旱冬瓜的 δD 值,说明旱冬瓜此时利用的水分可能是来自最近的降雨。

8月11日土壤水分 δD 值与7月12日的相似,呈现随土壤深度增加而增加的趋势,变化范围为 $-149‰ \sim -61‰$,0~10 cm土层的土壤水分相对富集;土壤含水量变化范围分别为12.9%~32.5%,旱冬瓜 δD 值与40~60 cm处土壤水分 δD 值接近,同时40~60 cm土壤水分含量高,更可能被旱冬瓜吸收利用。

11月14日0~60 cm波动较大,变化范围为

图7 旱冬瓜茎干水 δD 和土壤水 δD 的垂直分布Fig. 7 Variations of δD values of xylem water and δD values of soil water

-129‰~-86‰,在60~100 cm处,随土壤深度的增加土壤水 δD 值变化不大。土壤含水量变化范围为11.6%~34%;旱冬瓜茎干水 δD 值与20~40 cm土壤水 δD 值接近,但高于20~40 cm土壤水 δD 值,说明旱冬瓜可能利用了一部分20~40 cm土壤水外,还有其他的水分来源,如地下水。

3.6 旱冬瓜对各水分来源的利用比例

表1是旱冬瓜对各水源的利用比例范围及平均值。树种吸收利用水分的能力受外界环境因素(如降雨、蒸发等)和自身的生长发育周期影响,因此,树种对不同时期的水源利用率亦不同。5月16日和11月14日,旱冬瓜对地下水的利用比例占主导,为0~69%;而7月12日和8月11日,旱冬瓜对土壤水的利用比例占主导,为0~73%。由表1可知,5月16日旱冬瓜对40~60 cm土壤水和地下水的利用率较高,40 cm以上土壤仅贡献较少的一部分水分,同时40~100 cm土壤水贡献比例平均值之和为48%,因此可以认为旱冬瓜此时主要利用地下水,但40~100 cm土壤水也是其重要水源。

7月12日旱冬瓜水分来源各层均有贡献,但绝大部分水分来源于0~10 cm的土壤水分,对地下水的利用率较低,此外,也利用深层土壤水分,说明由

表1 旱冬瓜对各水源的利用率

Table 1 Proportions of feasible water sources (%)

水分来源 Water source	各潜在水源的利用比例 Water uptake proportions of potential sources				
	2014-05-16	2017-07-12	2014-08-11	2014-11-14	
土壤水 Soil water	0~10 cm	0.5 (0~46)	66 (66~73)	0.1 (0~58)	0.1 (0~49)
	10~20 cm	0.5 (0~76)	2.9 (0~26)	3.1 (0~42)	0.3 (0~74)
	20~40 cm	1.1 (0~55)	7.1 (0~31)	35.5 (0~54)	2.6 (0~60)
	40~60 cm	27.4 (0~80)	7.2 (0~29)	37.5 (0~73)	20.7 (0~57)
	60~80 cm	7.3 (0~42)	0.9 (0~24)	10.1 (0~59)	9.6 (0~27)
	80~100 cm	12.4 (0~54)	15.6 (0~32)	9.9 (0~53)	9.9 (0~28)
地下水 Ground water	50.8 (0~69)	0.3 (0~22)	3.8 (0~51)	56.8 (18~68)	

注:数值为平均值(最小值~最大值)。

Note: Values were mean (min~max).

于有较强降水的补给使土壤水分条件得到改善,旱冬瓜对降水有所响应,不仅利用已有的土壤水分,同时也利用近期的降雨。

8月11日旱冬瓜水分来源分布较广,各层均有分布,其中40~60 cm的贡献率高达73%,40~100

cm 土壤水贡献比例平均值之和达 93%,说明降水较多时,旱冬瓜的水分来源多样化,在上层土壤含水量较高的情况下,旱冬瓜依赖深层土壤水。

11 月 14 日旱冬瓜水分来源较为集中于地下水,但各层土壤均对其有贡献,其中 10~60 cm 处土壤贡献较大,说明在前期降雨较少时,旱冬瓜不仅仅依赖于土壤水,地下水也是其重要水源。

4 讨论与结论

(1)降水中氢和氧同位素的时空差异会导致土壤水、地表水、地下水以及植物水的时空差异,分析这些差异可以获取研究区大气降水水汽来源及相应的气象气候信息,量化植物对潜在水源的利用等(徐庆等,2008)。通过对比旱冬瓜茎干水氢氧同位素和不同深度土壤水氢氧同位素的组成情况,结合不同深度土壤含水量,可以判断植物的水分利用情况(方杰等,2011)。本研究判断出旱冬瓜 5 月 16 日可能利用 60 cm 附近的土壤水;7 月 12 日利用的水分可能是近期的降雨补给的表层土壤水;8 月 11 日利用的水分可能是 40~60 cm 处的土壤水;11 月 14 日可能利用了一部分 20~40 cm 土壤水外,还有其他的水分来源,如地下水。

(2)利用多元混合模型定量分析旱冬瓜水分来源,结果表明,旱冬瓜水分来源分布较广,各土层土壤水均有贡献,5 月 16 日旱冬瓜对 40~60 cm 土壤水和地下水的利用率较高;7 月 12 日旱冬瓜绝大部分水分来源于 0~10 cm 的土壤水分,利用比例 66%~73%;8 月 11 日 40~60 cm 的贡献率高达 73%;11 月 14 日旱冬瓜对地下水的利用率较高,利用比例 18%~68%。

(3)元阳梯田水源区的森林对于维持区域小气候、涵养水源和水土保持等具有十分重要的意义;近年来云南省遭遇百年不遇的大旱,但元阳梯田依赖森林涵养水源保证了其四季常流水而未受到影响。森林植被与水的关系是定量研究森林生态系统水分平衡状况的基础,基于氢氧稳定同位素技术,从不同时间尺度考察森林植被对各层水分需求差异,更加准确地认识元阳梯田水源区不同森林类型优势树种的水分来源,探讨元阳梯田水源区的水分在土壤-植物-大气连续体中的运移、转化及利用,构建元阳梯田水源区优势树种对土壤水分利用的基本模式,从而更加全面地揭示元阳梯田森林生态系统的生态

水文过程,反映不同时空尺度上植物水分关系和生态系统功能,为梯田森林生态系统经营与维护、为梯田可持续发展提供必要的理论依据。

本研究仅对旱冬瓜自身的水分利用进行分析研究,而没有考虑与旱冬瓜伴生的乔木树种以及林下灌木及草本,忽略了它们之间的水分、养分竞争关系;研究区常年在浓雾的笼罩中,雾对当地森林植被的影响尚不可知;以上这些都是今后有待进一步深入的研究工作。

参考文献:

- CHEN W, CHEN HW, YANG B, et al, 2012. Study on stand characteristics of *Alnus nepalensis* Natural Forest in Southwest Yunnan [J]. *J West Chin For Sci*, 41(5):63-67. [陈伟, 陈宏伟, 杨斌, 等, 2012. 滇西南旱冬瓜天然林的林分特征研究 [J]. *西部林业科学*, 41(5):63-67.]
- DAWSON TE, EHLERINGER JR, 1991. Streamside trees that do not use stream water [J]. *Nature*, 350:335-337.
- DENG WP, YU XX, JIA GD, et al, 2013. Comparison of the methods using stable hydrogen and oxygen isotope to distinguish the water source of *quercus variabilis* in dry season [J]. *J Basic Sci Eng*, 21(3):412-422. [邓文平, 余新晓, 贾国栋, 等, 2013. 利用氢氧稳定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*, 21(3):412-422.]
- YAO M, CUI BS, 2006. The vertical characteristics of ecosystem of Hani's terrace paddyfield in Yun nan, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 26(7):2115-2124. [姚敏, 崔保山, 2006. 哈尼梯田湿地生态系统的垂直特征 [J]. *生态学报*, 26(7):2115-2124.]
- DUAN XF, SONG WF, LI J, et al, 2011. Soil infiltration characteristics in water conservation forest of terrace in Yuanyang County of Yunnan Province [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 31(4):47-52. [段兴凤, 宋维峰, 李健, 等, 2011. 云南省元阳梯田水源区森林土壤入渗特性研究 [J]. *水土保持通报*, 31(4):47-52.]
- FANG J, WEI YF, LIU S, et al, 2011. Stable isotopic analysis on water utilization sources of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in inter-dune lowland in Horqin Sandy Land [J]. *Chin J Ecol*, 30(9):1894-1900. [方杰, 魏雅芬, 刘帅, 等, 2011. 科尔沁沙地丘间低地樟子松人工林水分利用来源的稳定同位素解析 [J]. *生态学杂志*, 30(9):1894-1900.]
- HE X, SONG WF, PENG YG, et al, 2012. Analysis on plant diversity of water-holding forest in Quanfu village basin of Yuanyang terrace [J]. *Res Soil Water Conserv*, 19(5):1-6. [和弦, 宋维峰, 彭永刚, 等, 2012. 元阳梯田全福庄流域水源涵养林的植物多样性分析 [J]. *水土保持研究*, 19(5):1-6.]
- LIU WJ, LIU WY, LI PJ, et al, 2010. Dry season water uptake by two dominant canopy tree species in a tropical seasonal rainforest of Xishuangbanna, SW China [J]. *Agric For Meteorol*, 150:380-388.
- JACKSON RC, CAVELIER J, GOLDSTEIN G, 1995. Partitioning of water resources among plants of a lowland tropical forest [J]. *Oecologia*, 101:197-203.
- PHILLIPS DL, GREGG JW, 2003. Source partitioning using stable (下转第 734 页 Continue on page 734)