干旱绿洲区 3 种典型农田防护林的水分来源

王金强[1,2], 李俊峰[1,2], 王昭阳[1,2], 杨 广[1,2], 何新林[1,2]

(1. 石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000; 2. 现代节水灌溉兵团重点试验室, 新疆 石河子 832000)

摘 要: [目的] 研究对农田有重要防护作用的农田防护林在农田节水灌溉模式下的水分利用机制,为本地区农田和农田防护林的优化灌溉提供参考。[方法] 利用稳定氧同位素($\delta^{18}O$)研究干旱绿洲区常见农田防护林胡杨(*Populus euphratica*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)和榆树(*Ulmus pumila*)在农田节水灌溉模式下的水分利用机制,根据直接判断法、IsoSource 模型和吸水深度模型 3 种方法对结果进行了对比分析。[结果] 不同时间,不同树种防护林水分利用来源不同。其中 4 月胡杨主要使用 10—20 cm 的浅层土壤水,贡献率为 83.3%;沙枣主要使用 80—120 cm 和 120—160 cm 的深层土壤水,其贡献率分别为 50.6% 和 16.9%;榆树主要使用 50—300 cm 的深层土壤水和地下水,累计贡献率为 82.5%;5 月胡杨主要利用浅层 0—30 cm 的土壤水,贡献率为 57.1%;沙枣和榆树转而利用表层 0—10 cm 的土壤水,其贡献率分别为 50.8%和 52.7%;6 月胡杨利用 0—20 cm 浅层土壤水和地下水,贡献率分别为 38.7%和 10.5%;沙枣有 76.9%的水分来源于 10—20 cm 的浅层土壤;榆树主要水分来源中有 49.1%来自于 0—80 cm,另有12.3%来自于地下水。同时研究得出胡杨 4—6 月的平均吸水深度分别为 18,28,25 cm,沙枣的平均吸水深度分别为 118,37,34 cm;榆树的平均吸水深度分别为 95,37,29 cm。[结论] 选择农田防护林树种时,在保证防护林防护效益的同时,应选择搭配以深层土壤水或地下水为主要水分来源的种类,从而更加高效地发挥农田防护林的防护作用。

关键词: 农田防护林; 稳定氧同位素; IsoSource 模型; 吸水深度; 水分来源

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2019)01-0072-06 **中图分类号**: Q945.79

文献参数: 王金强, 李俊峰, 王昭阳, 等. 干旱绿洲区 3 种典型农田防护林的水分来源[J]. 水土保持通报, 2019,39(1):72-77. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.01.012; Wang Jinqiang, Li Junfeng, Wang Zhaoyang, et al. Water sources for three typical farmland shelterbelts in arid oasis[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(1):72-77.

Water Sources for Three Typical Farmland Shelterbelts in Arid Oasis

Wang Jinqiang[1,2], Li Junfeng[1,2], Wang Zhaoyang[1,2], Yang Guang[1,2], He Xinlin[1,2]

(1. *College of Water Resources and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang* 832000, *China*; 2. *Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang* 832000, *China*)

Abstract: [Objective] This paper studied the water use mechanism of farmland shelterbelts with important protection function under the mode of farmland water-saving irrigation, in order to provide a scientific basis for optimizing irrigation of the local farmland and farmland shelterbelt. [Methods] The stable oxygen isotope ($\delta^{18}O$) was used to study the water use mechanism of *Populus euphratica*, *Elaeagnus angustifolia* and *Ulmus pumila* in the arid oasis areas under farmland water-saving irrigation mode. The results were compared and analyzed based on the direct judgment method, IsoSource model and water absorption depth model. [Results] The sources of water use was different for different tree species at vary time. In April, *P. euphratica* mainly used 10—20 cm of shallow soil water, and its contribution rate was 83.3%. *E. angustifolia* mainly used deep soil water at 80—120 cm and 120—160 cm depth with contribution rates of 50.6% and 16.9%, respectively. Whereas, 82.5% water usage of *U. pumila* was from 50—300 cm depth of soil water and groundwater. In

收稿日期:2018-08-14 **修回日期**:2018-08-29

资助项目:国家重点研发计划水资源高效利用专项课题"西北内陆区水资源安全保障技术集成与应用"(2017YFC0404304);兵团应用基础研究计划(2016AG003);石河子大学高层次人才科研启动项目(RCZX2015027,RCZX2015028)

第一作者:王金强(1993—),男(汉族),甘肃省定西人,硕士研究生,研究方向为水文学及水资源。E-mail:wangjinqianggs@qq.com。

通讯作者:李俊峰(1977—),男(汉族),新疆维吾尔自治区石河子市人,博士,副教授,主要从事环境与生态的研究。E-mail:ljfshz@126.com。

May, 57.1% of water used by *P. euphratica* was from 0—30 cm shallow soil water. Surface soil water at 0—10 cm soil depth contributed 50.8% and 52.7% for the water usage of *E. angustifolia* and *U. pumila*, respectively. In June, the contribution of water source for *P. euphratica* usage was 38.7% from 0—20 cm shallow soil, while 10.5% from groundwater. And 76.9% of the water content of *E. angustifolia* came from shallow soil of 10—20 cm, 49.1% of water usage for *U. pumila* came from 0—80 cm soil, and another 12.3% from groundwater. The average water absorption depth of *P. euphratica* was 18, 28, 25 cm, respectively in April, May and June. For *E. angustifolia*, it was 118, 37, 34 cm, respectively. At the same time, it was 95,37,29 cm for *U. pumila*, respectively. [Conclusion] When selecting farmland shelterbelt tree species, while ensuring the protection benefit of shelterbelt, we should choose the species with deep soil water or groundwater as the main water source, so as to exert the protective effect of farmland shelterbelt more efficiently.

Keywords: farmland shelterbelt; stable oxygen isotope; IsoSource model; water absorption depth; water sources

水是干旱半干旱地区生态系统的主要限制性因素[1],直接影响着植被的生长和分布状况[2]。氢氧同位素被称为水的“指纹”[3-4],除了部分旱生和排盐植物以外,大多数植物在根系吸收水分后向茎干传输的过程中木质部水分稳定氢氧同位素不会发生分馏[5],因此可以定量揭示出植物的水分来源[6-7]。近年来,诸多国内外学者对植物的水分来源做了大量研究:White 等[8]利用 δD 对北美乔松(*Pinus strobus*)的研究得出夏季地下水越深,北美乔松对降水的利用率越高的结论;Romero 等[9]对亚马逊东部塔帕若斯河植物研究发现在干旱少雨季节,植物水分利用深度逐渐加深;赵良菊等[10]通过对对黑河下游河岸带防护林的研究发现胡杨(*Populus euphratica*)、柽柳(*Tamarix chinensis*)主要利用地下水的结论;朱亚娟等[11]对乌兰布和沙漠白刺(*Nitraria tangutorum*)、黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)、沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)和梭梭(*Haloxylon ammondendron*)的研究发现除白刺使用浅层土壤水外,其余 4 种植物水分利用机制随着季节的变化也相应变化。另外还有其他学者对不同树种[11-12]、不同林龄[13-16]、不同生境[17]和降水[18-19]等因素影响下防护林的水分利用机制做了大量研究。

农田防护林对干旱地区农田有着防风固沙、排盐治碱等重要的防护作用[20],也可改善田间土壤、调节农田温度和田间湿度等[21],可进一步提高农作物产量[22],同时对提高农业经济效益的人工林生态系统也有显著影响[22]。多年以来,西北干旱地区通过种植防护林,逐渐形成了环绕绿洲的防护林体系,膜下滴灌等新型节水灌溉技术的大规模推广与应用,提升农作物水分利用效率的同时,也可改善沙漠边缘的生态环境。

新疆作为中国最大的高效节水区,胡杨、沙枣和榆树等是当地的主要农田防护林树种[23]。随着当地膜下滴灌等新型节水灌溉技术的大规模应用推广,原有的依靠渠灌、漫灌等地表水为主要水分来源的农田防护林的水分利用方式正发生变化[24],地下水的过度开采导致地下水水位下降过快[25-26],以深层土壤水为主要水分来源的农田防护林等植被的根系生长速度小于地下水的下降速度,这样农田防护林既不能从表层获取水分,又无法获取地下水,导致此类农田防护林出现“顶梢枯死”的退化现象,严重影响农田防护林的防护效益。目前国内外对防护林水分来源的研究对象多为荒漠地区的防护林,但对于农田节水灌溉模式下农田防护林的水分利用来源研究较少。因此本文选取石河子大学现代节水灌溉兵团重点试验站胡杨、沙枣和榆树为代表的农田防护林为研究对象,拟研究其在农田灌水时期的水分利用机制,旨在为农田节水灌溉模式下农田防护林的需水机制提供科学依据,进一步为农田和农田防护林的优化灌溉提供参考。

1　研究区概况及研究方法

1.1　研究区概况

于 2018 年 4—6 月在现代节水灌溉兵团重点实验室暨新疆石河子大学节水灌溉试验站(85°59′E,44°19′N,海拔 417 m)开展试验。试验站位于石河子市西郊石河子大学农试验场二连,研究区降水量年际变化较大,多年平均降水量 207 mm,年均最大降水量为 291.6 mm(1987 年),年均最小降水量为 107.0 mm(1967 年),平均蒸发量 1 660 mm;季节分布特征方面,春季降水最多,其次是夏季,降水通常集中在 4—8 月,这段时间降水占全年降水总量的 47.5%左右,其中又以 4 月、5 月降水最多。年均日照数为 2 865 h,年均温 7.7 ℃,其中>10 ℃积温为 3 463.5 ℃,无霜期 170 d。平均地面坡度为 6‰,地下水埋深大于 10 m,土壤质地主要以中壤土为主。

1.2 试验方法

试验站农作物以棉花为主,农田防护林为胡杨,沙枣和榆树的混种林,本次试验选取样地一为胡杨,样地二为沙枣和榆树的混种林;由于氢同位素比氧同位素更容易受外界因素的影响,因此以氧同位素为主来研究农田节水灌溉模式下农田防护林的水分利用机制。

(1) 采样时间。2018 年 4 月 23 日、5 月 23 日和 6 月 21 日。由于棉花于 4 月 26 日播种,因此于 4 月 23 日采集样品用以确定农田防护林在农田节水灌溉之前的水分利用来源;其余样品在农田的灌溉期内采集农田防护林(胡杨、沙枣和榆树)的土壤和木质部样品。

(2) 土壤样品的采集。钻取深度为 300 cm,其中 0—100 cm 深度间每 10 cm 为一层,100—200 cm 深度间每 20 cm 为一层和 200—300 cm 深度间每 50 cm 为一层,每个深度采集两个平行样品,对土样进行密封并装入随身携带的冰盒,带回实验室 -20 ℃冷藏,直至开始测定样品中的同位素。

(3) 植物茎木质部的采集。分别选取 3 棵具有代表性的胡杨、沙枣和榆树,分别采集 3～4 根长 3～5 cm,直径 3～5 mm 的木栓化茎干,并立即去除外皮和韧皮部,密封并装入随身携带的冰盒,带回实验室 -20 ℃冷藏,用于植物水的 $\delta^{18}O$ 测定。

(4) 地下水的采集。灌溉水源为地下水,因此采集灌溉水作为地下水测定 $\delta^{18}O$。

(5) 数据的测定。土壤含水量,土壤水、降水、植物木质部水分以及地下水的 $\delta^{18}O$ 值于石河子大学现代节水灌溉兵团重点实验室测定,其中土壤水抽提为 LI-2 000 低温真空抽提系统,土壤含水量采用烘干法测定,各样品 $\delta^{18}O$ 采用 LGR 水同位素分析仪(IWA-45 EP,美国)测定,输出的 $\delta^{18}O$ 是以相对于标准平均海洋水(V-SMOW)的千分率(‰)形式,表示为:

$$\delta‰ = \left(\frac{R_{sample}}{R_{standard}} - 1\right) \times 1000 \quad (1)$$

式中:R_{sample}——待测样品中 $\delta^{18}O$;$R_{standard}$——标准平均海洋水。

不同日期土壤含水量及土壤水 $\delta^{18}O$ 的差异用 SPSS 19.0 统计软件进行分析,使用 Origin 2018 绘图。

1.3 数据处理

1.3.1 *直接判断法* 除了部分旱生和排盐植物外,绝大多数植物根部吸收水分后由木质部向茎干部分运输的过程中不会发生氧同位素的分馏现象,因此可利用直接判断法将植物木质部水分的 $\delta^{18}O$ 与各潜在水分来源相互比较,当植物木质部水分 $\delta^{18}O$ 值与各潜在来源水分的 $\delta^{18}O$ 值相接近或者相同时,则判定该水源为植物的主要水分来源。

1.3.2 *IsoSource 模型* 利用多元线性混合模型(IsoSource)确定植物的水分来源的贡献率和贡献范围,将不同防护林的木质部水分、灌溉水(地下水)、不同层位的土壤水的 $\delta^{18}O$ 分别输入至 IsoSource 软件,Increment(增量)设为 1%,Tolerance(容差)设为 0.01。由于测定了 17 个土壤层位用以分析农田防护林的水分来源,但该模型只能计算最多 10 个水分来源,因此根据土壤水的 $\delta^{18}O$ 特征,将 0—300 cm 的土壤划分为 0—10,10—20,20—50,50—80,80—120,120—160,160—200 cm 和 200—300 cm 共 8 个土壤层位;$\delta^{18}O$ 取平均值,8 个土壤层位含水量同时结合地下水共 9 个水分来源来计算。

1.3.3 *吸水深度模型* 吸水深度模型以同位素质量守恒为前提,假设植物在任何时间都可以吸收 50 cm 的土壤水且在不同深度植物吸收的水分服从正态分布(公式 2),结合 Matlab 软件,分别将不同土壤层位和植物木质部水分 $\delta^{18}O$ 输入模型,植物吸收土壤水的标准方差设为 8.33 cm,模型则计算从 1 cm 处开始的每 cm 处的土壤水,直至土层深度 300 cm 处。

$$n_i = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(Y-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (2)$$

式中:n_i——植物根在土层深度 Y 处所吸收的水分的比例,n_i 的总和为 1;μ——植物根在土壤中所吸收水分的平均深度,50 cm 的土壤 σ 标准偏差值 8.33 cm。

2 结果与分析

2.1 土壤含水量

分析图 1 可得出,样地一中胡杨土壤含水量从 4—6 月份林地土壤表层含水量呈下降趋势,林地土壤含水量在 90—180 cm 处到达谷值,该范围内土壤为沙土;其中 4 月份土壤含水量最低;5—6 月份土壤含水量有所增加。样地二为沙枣和榆树样地的土壤含水量,其表层土壤含水量(0—60 cm)4—6 月依次降低;60—160 cm 深度土壤含水量较高且比较稳定;160—300 cm 深度土壤含水量小幅度下降。

2.2 直接判断法

两个样地不同取样时间土壤水氧同位素,胡杨、沙枣和榆树的木质部水氧同位素特征见图 2。

分析图 2 可知,两个样地不同时间和不同深度土壤的氧同位素特征差异显著($p<0.05$),但呈规律性

变化;4—6 月由于地表蒸发较深层强烈,因此越接近地表,氧同位素值越偏正;其中 4 月表层土壤水氧同位素值较 5 月和 6 月偏负;随着土层深度的增加,氧同位素值逐渐偏负,70—300 cm 深度土壤氧同位素都稳定在某个范围之内,差异不显著;不同时间各农田防护林的水分来源见表 1。

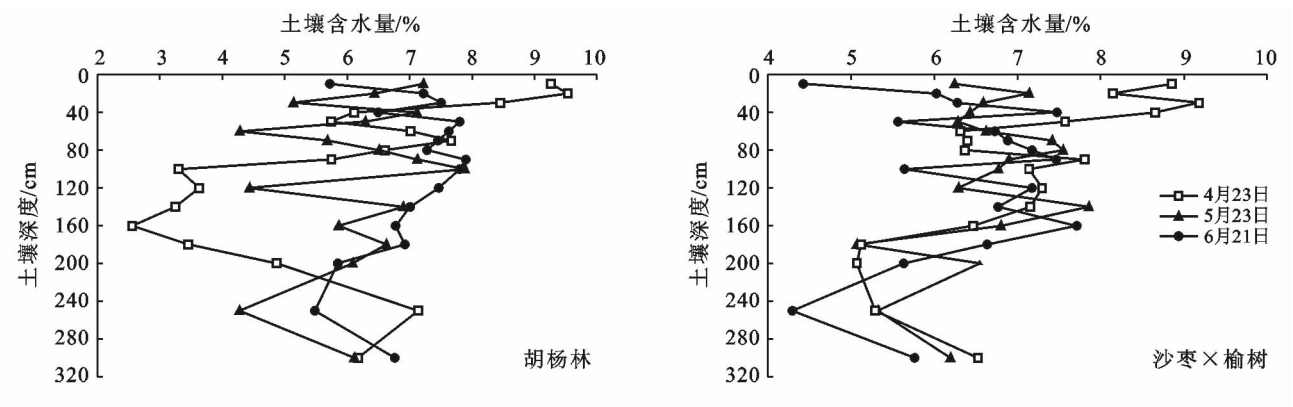


图 1　干旱绿州区胡杨林和沙枣与榆树混种林土壤含水量变化

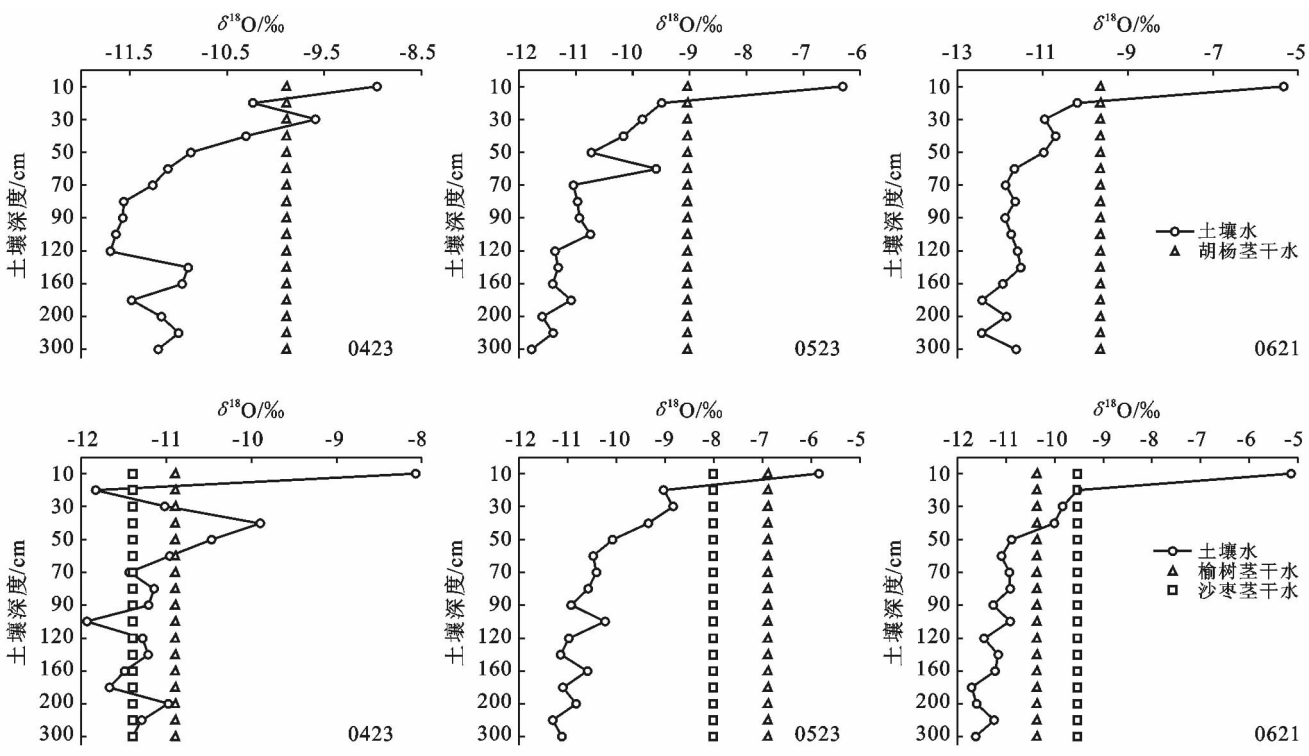


图 2　干旱绿州区不同时间胡杨林和沙枣与榆树混种林土壤水和各植物木质部水 $\delta^{18}O$ 值比较

表 1　直接判断法得到的干旱绿州区水分不同来源深度　　cm

时　间	水分来源		
	胡杨	沙枣	榆树
4 月 23 日	20—40	10—20,60—120 160—180,200—300	20—30,50—60, 180—200
5 月 23 日	20—30	0—20	0—20
6 月 21 日	10—20	10—20	30—50

根据直接判断法可以判断出胡杨在 4—6 月份主要利用 0—40 cm 的浅层土壤水,沙枣和榆树在 4 月利用浅层、中间层和深层土壤水;5—6 月沙枣和榆树都转而利用 0—50 cm 的浅层土壤水;但是直接判断法无法判断出各水源对植物的贡献率。

2.3　IsoSource 多元线性混合模型

将不同时间的各潜在水分来源与不同树种的木质部水分氧同位素值输入 IsoSource 软件计算,计算结果得出:4 月胡杨主要利用水分来源为 10—20 cm 的浅层土壤水,其贡献率达到了 83.3%;沙枣主要利用 80—120 cm 和 120—160 cm 的深层土壤水,其贡献率分别为 50.6%和 16.9%;榆树对 0—50 cm 的土

壤水利用率较少，而对 50—300 cm 以及地下水的水分利用较为均匀，每层的贡献率大约在 10%左右，累计达到 82.5%，进一步说明榆树主要利用深层土壤水。5 月胡杨主要利用浅层 0—30 cm 的土壤水，贡献率为 57.1%，较 4 月有所下降；沙枣和榆树转而利用表层 0—10 cm 的土壤水，其贡献率分别为 50.8%和 52.7%。6 月胡杨利用 0—20 cm 浅层土壤水和地下水，贡献率分别为 38.7%和 10.5%；沙枣有 76.9%的水分来源于 10—20 cm 的浅层土壤；榆树主要水分来源中有 49.1%来自于 0—80 cm，另有 12.3%来自于地下水。利用 IsoSource 模型可以计算出植物主要水分来源及其贡献率，但是具体深度无法计算得出。

2.4 吸水深度模型

将不同时间、不同树种的农田防护林土壤样品和木质部样品的氧同位素值输入吸水深度模型计算，计算结果如表 2 所示。

表 2 不同时间胡杨、沙枣和榆树的平均吸水深度($\delta^{18}O$) cm

时 间	植物类型		
	胡杨	沙枣	榆树
4 月 23 日	18	118	95
5 月 23 日	28	37	37
6 月 21 日	25	34	29

根据表 2 可得出，胡杨在 4—6 月主要利用浅层土壤水；沙枣和榆树在 4 月主要利用 118 cm 和 95 cm 的中间层位土壤水，5—6 月由于农田开始灌溉，浅层土壤来水量增加，但地下水下降，且随着农田防护林的生长以及气温的上升，沙枣和榆树转而使用浅层土壤水，这与 IsoSource 模型计算出的结果相一致。

3 讨 论

4 月表层土壤含水量最高，5 月和 6 月表层土壤含水量较 4 月份降低，这是由于 4 月气温较低且存在冻土，表层土壤蒸发较少，冬季融雪可补给一部分水分，因此浅层土壤水有一定的储存量，本文研究结果表明：胡杨主要利用浅层土壤水，沙枣和榆树除了利用浅层土壤水外，还较多的利用更为稳定的深层土壤水和地下水。在 5 月份，随着气温回升和农田开始灌溉等因素影响下，表层土壤含水量较 4 月份增加，研究发现胡杨仍主要使用浅层土壤水，沙枣和榆树由原来的利用深层土壤水和地下水转而利用浅层土壤水。在 6 月份，农田防护林的生长旺盛，胡杨、沙枣和榆树主要利用浅层土壤水，但胡杨和榆树对地下水的利用增多，同时 6 月份气温较 4—5 月高，农田防护林蒸散量和土壤蒸发量较大，使得植物耗水量增加，表层土壤含水量降低，进一步导致植株吸收地下水。

本试验中利用 3 种方法计算出试验期间不同树种农田防护林的水分来源结果一致。直接判断法较为直观，但主观影响较大，且无法判断出各来源水分的贡献率；邓文平等[27]通过对栓皮栎(*Quercus variabilis*)旱季水分来源研究得出，直接判断法能够解释大约 70%的水分来源，IsoSource 能较直接判断法更精确地判断出各水分来源及贡献率，基于 Matlab 软件的吸水深度模型则可以将植物吸收的水分具体到某一数值，但是无法计算出地下水的贡献率；巩国丽等[28]通过对白刺水分利用来源的研究得出：可利用 IsoSource 多元线性混合模型计算出各水源对植物的贡献率，进一步利用吸水深度模型计算出植物吸收水分的平均深度。

刘树宝等[15]在黑河下游不同林龄的胡杨吸水深度研究发现：随着树龄的增加，胡杨所吸收的深度加深；周天河等[29]对塔里木河上游胡杨的水分来源研究发现：靠近河岸地带的胡杨主要利用 0—100 cm 的浅层土壤水，同时河水对该深度土壤水分有补充作用，这与本文对农田灌溉期间农田防护林的研究结果相一致；褚建民[30]对沙枣的研究发现沙枣主要利用深层土壤水，本文研究得出在农田灌水前沙枣使用深层土壤水，农田灌水期使用浅层土壤水的结论；对于榆树水分来源的研究较少，本文通过试验研究进一步得出榆树在农田灌水前使用深层土壤水和农田灌溉期间转而使用浅层土壤水的结论。

4 结 论

(1) 4—6 月表层土壤水含水量由于蒸发作用呈下降趋势，其同位素值较大，随着土层深度的增加土壤中同位素值呈下降趋势；

(2) 胡杨在农田灌溉前后主要利用 0—40 cm 的浅层土壤水，6 月又增加对地下水的利用；沙枣和榆树在 4 月份农田灌水前使用深层土壤水和地下水，但 5—6 月农田灌水期转变为利用浅层土壤水。

试验区为典型的干旱半干旱地区，胡杨、沙枣和榆树在农田灌溉期内主要利用浅层土壤水，会与农作物之间产生竞水现象，且胡杨、沙枣和榆树之间互相有竞争现象，因此选择农田防护林树种时，在保证防护林防护效益的同时应选择搭配以深层土壤水或地下水为主要水分来源的种类，从而更加高效的发挥农田防护林的防护作用。

[参 考 文 献]

[1] 周天河,赵成义,吴桂林,等.塔里木河上游胡杨(*Populus euphratica*)、柽柳(*Tamarix ramosissima*)水分来源的稳定同位素示踪[J].中国沙漠,2017,37(1):124-131.

[2] 朱雅娟,赵雪彬,刘艳书,等.青海共和盆地沙柳(*Salix psammophila*)和乌柳(*Salix cheilophila*)的水分利用过程[J].中国沙漠,2017,37(2):281-287.

[3] 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.

[4] 汪集旸,陈建生,陆宝宏,等.同位素水文学的若干回顾与展望[J].河海大学学报:自然科学版,2015,43(5):406-413.

[5] 龙翔,孙自永,周爱国,等.黑河中游河岸带柽柳水分来源的 $\delta^{18}O$ 同位素示踪研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(7):150-155.

[6] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: Perspectives from stable isotope composition[J]. Plant Cell & Environment, 2010,15(9):1073-1082.

[7] 段德玉,欧阳华.稳定氢氧同位素在定量区分植物水分利用来源中的应用[J].生态环境学报,2007,16(2):655-660.

[8] 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.

[9] Romero-saltos H, Sternberg L da S L, Moreira M Z, et al. Rainfall exclusion in an eastern amazonian forest alters soil water movement and depth of water uptake[J]. American Journal of Botany, 2005,92(3):443-455.

[10] 赵良菊,肖洪浪,程国栋,等.黑河下游河岸林植物水分来源初步研究[J].地球学报,2008,29(6):709-718.

[11] 朱雅娟,贾志清,卢琦,等.乌兰布和沙漠 5 种灌木的水分利用策略[J].林业科学,2010,46(4):15-21.

[12] 邢星,陈辉,朱建佳,等.柴达木盆地诺木洪地区 5 种优势荒漠植物水分来源[J].生态学报,2014,34(21):6277-6286.

[13] 邓文平,余新晓,贾国栋,等.雨季北京山区 3 种典型植物的水分来源[J].干旱区研究,2014,31(4):649-657.

[14] 陈启民,罗青红,宁虎森,等.古尔班通古特沙漠南缘不同林龄人工梭梭林主林层和更新层特征[J].应用生态学报,2017,28(3):1-10.

[15] 刘树宝,陈亚宁,陈亚鹏,等.基于稳定同位素技术的黑河下游不同林龄胡杨的吸水深度研究[J].生态学报,2016,36(3):729-739.

[16] 朱雅娟,贾志清,刘丽颖,等.民勤绿洲外围不同林龄人工梭梭林的土壤水分特征[J].中国沙漠,2011,31(2):442-446.

[17] 刘丽颖,贾志清,朱雅娟,等.高寒沙地不同林龄中间锦鸡儿的水分利用策略[J].干旱区资源与环境,2012,26(5):119-125.

[18] 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):148-115.

[19] 刘凤芹,陈波,高琛,等.降水对沙地杨树人工林水分利用的影响[J].干旱区资源与环境,2016,30(10):165-170.

[20] 周雅聃,陈世苹,宋维民,等.不同降水条件下两种荒漠植物的水分利用策略[J].植物生态学报,2011,35(8):789-800.

[21] 于颖,杨曦光,范文义.农田防护林防风效能的遥感评价[J].农业工程学报,2016,32(24):177-182.

[22] 付亚星,王乐,彭帅,等.河北坝上农田防护林防风效能及类型配置研究:以河北省康保县为例[J].水土保持研究,2014,21(3):279-283.

[23] 郑晓,朱教君,闫妍.三北地区农田防护林面积的多尺度遥感估算[J].生态学杂志,2013,32(5):1355-1363.

[24] 胡荣梅,程乐文,赵康强,等.新疆农田防护林营造技术与气象条件分析[J].农业与技术,2006,26(3):115-119.

[25] 王玉阳,陈亚鹏,李卫红,等.塔里木河下游典型荒漠河岸植物水分来源[J].中国沙漠,2017(6):1150-1157.

[26] 徐海量,樊自立,禹朴家,等.新疆玛纳斯河流域生态补偿研究[J].干旱区地理,2010,33(5):775-783.

[27] 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.

[28] 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.

[29] 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.

[30] 褚建民.干旱区植物的水分选择性利用研究[D].北京:中国林业科学研究院,2007.