

doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0017

Zeng Qiao, Ma Jianying. Plant water sources of different habitats and its environmental indication in Heihe River basin [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1): 148–155. [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.]

# 黑河流域不同生境植物水分来源及环境指示意义

曾 巧, 马剑英\*

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 选择黑河流域三种典型生境类型(绿洲、绿洲-荒漠过渡带、荒漠), 通过分析其不同植物木质部水分与其土壤潜在水源稳定氢( $\delta D$ )和氧( $\delta^{18}O$ )同位素组成, 研究了不同生境中植物的水分来源情况. 结果表明: 荒漠生境中植物倾向于利用深层土壤水( $>160$  cm); 绿洲-荒漠过渡带中沙蒿和沙拐枣主要利用 20~40 cm 层位的土壤水, 梭梭可能的利用层位是 60~80 cm, 花棒可能利用 100 cm 左右的水分, 柽柳则利用 120 cm 以下的土壤水; 绿洲植物吸水层位多集中在 0~100 cm, 其中, 假苇拂子茅可能水源是 20 cm 左右的土壤水, 玉米则为 20~40 cm, 柽柳和杨树的吸水层位为 60 cm 左右, 棉花则是利用 80 cm 左右的水分. 稳定性同位素估测各生境植物水分来源的结果与其土壤含水量的结果一致, 同一生境中吸水层位相似的植物间存在水分来源竞争. 不同生境中植物水分来源的深浅存在递变, 从深到浅表现为荒漠>过渡带>绿洲, 不同生境同种植物也存在同样变化, 说明植物稳定氢氧同位素组成可以用来指示干旱区绿洲化、荒漠化过程.

**关键词:** 黑河流域; 植物水分来源; 稳定氢氧同位素; 绿洲化; 荒漠化

**中图分类号:** S152.7+5 **文献标识码:** A

## 0 引言

绿洲化、荒漠化是干旱区最突出的陆表过程, 二者反向发展而又相互联系. 荒漠化是干旱、半干旱和亚湿润干旱区由于气候变化、人类活动等多种因素造成的土地退化, 绿洲化是干旱区由于人与自然因素共同作用所导致的由荒漠向绿洲转变的过程. 绿洲对维系干旱区人民的生存、活动和发展有着重要意义<sup>[1]</sup>. 然而, 由于低水平、无序地开发利用绿洲, 使得干旱区遭遇了包括荒漠化在内的一系列生态环境问题, 严重威胁了干旱区人民的生存和社会的发展. 因此, 绿洲化、荒漠化过程的研究在干旱地区的区域经济发展及科学研究中受到越来越多的重视.

水分是决定干旱半干旱区生态系统结构和功能的重要环境因子<sup>[2]</sup>. 在以多风沙、降水少和潜在蒸

发大为基本特点的干旱区, 植物通过改变自身生理特征或繁衍方式以适应环境胁迫, 尤其是在以水分条件为主要限制因子的生态系统中, 能迅速更替利用不同水源的机制对植物的生存、繁育和竞争十分有利<sup>[3-6]</sup>. 因此, 研究干旱区植物水分来源可以更好地了解植物之间的竞争关系和水分利用模式, 对于了解这些地区植物对水分胁迫的响应, 探讨干旱区绿洲化、荒漠化过程的背景下植物与环境相互关系都有着重要的理论意义. 同时, 也为预测和模拟我国西北干旱区生态系统对全球气候变化的响应提供宝贵的基础试验数据, 对干旱区植被恢复和管理, 荒漠化防治也具有重要的科学价值和实践指导意义. 目前, 国内外学者大多利用实地调查、数值模拟<sup>[7-9]</sup>、遥感动态监测<sup>[10-11]</sup>和长期定点观测等方法针对干旱区水文过程<sup>[12-17]</sup>、土地利用变化<sup>[18-19]</sup>、大气循环<sup>[7-9, 20]</sup>及生物过程<sup>[21-24]</sup>等方面

收稿日期: 2012-08-11; 修订日期: 2012-12-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2009CB421306); 国家自然科学基金项目(41071032); 中国科学院“西部之光”人才培养计划项目(2009); 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所人才基金项目(2011)资助

作者简介: 曾巧(1987—), 女, 湖南洪江人, 2009 年毕业于湖北大学, 现为中国科学院寒区旱区环境与工程研究所读硕士研究生, 主要从事植物生理生态及干旱环境变化研究. E-mail: zengqiao712@163.com

\* 通讯作者: 马剑英, E-mail: jyama@lzb.ac.cn

进行了研究。

植物木质部水分的氢( $\delta\text{D}$ )和氧( $\delta^{18}\text{O}$ )同位素组成是各种来源水分氢氧同位素组成的混合值,潜在水源可以是大气降水、地表径流以及地下水等“初始”水源,它们需要转化为土壤水后才能被植物吸收利用<sup>[25-26]</sup>。由于不同来源的水分有着不同的氢氧同位素组成,一般除少数盐生植物在吸收水分时对氢同位素有明显的分馏作用<sup>[27]</sup>,陆地植物吸收水分时,氢氧同位素不会发生分馏<sup>[27-30]</sup>,可利用植物木质部和潜在土壤水分氢氧同位素组成的差异来研究植物的水分来源。植物根和茎内水的 $\delta\text{D}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值取决于土壤中可供植物吸收的水的 $\delta\text{D}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值,因此,可以通过比较不同层次土壤中水分和植物茎木质部水分的 $\delta\text{D}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值,分析水源与植物体内水分同位素组成的关系<sup>[31-33]</sup>。

位于河西走廊中部的黑河流域,作为河西地区最大的内陆河流域,是西北干旱区最具有代表性的流域<sup>[34]</sup>,也是在流域尺度上研究干旱区绿洲化、荒漠化的典型区域。因此,本文选取黑河流域为研究对象,针对干旱区最为关键的陆表过程,应用稳定氢氧同位素技术分析流域内主要生境类型(绿洲、绿洲-荒漠过渡带、荒漠)的典型植物水分来源状况,为揭示干旱区绿洲化、荒漠化过程的演变和发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省张掖市西北部的高台县,该

地区气候干燥,温差较大,光照充足,降水稀少,蒸发大,多风沙,具有典型的大陆性气候的特点。年平均降水量为103.2 mm,集中在7—8月,约占全年降水量的60.2%,蒸发量为1 923.4 mm,年平均风速为2.5 m·s<sup>-1</sup>。气温年较差为14.9℃,日照时数为3 088.2 h,无霜期149 d,常年多西风、西北风。主要土壤类型为灰棕荒漠土、风沙土、灌淤土等。2012年7月在高台县黑泉乡与合黎乡,选取了具有代表性的荒漠、绿洲及绿洲-荒漠过渡带3个生境类型的样点,生境概况见表1。

1.2 试验方法与样品分析

1.2.1 取样方法

在每个生境中选择5种优势种植物(表1),每种植物选择3~4棵健康成熟的代表性植株,剪下长约3~5 cm的完全木栓化茎秆,用于植物水分的提取以及 $\delta\text{D}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的测定。在所选植物样的附近开挖3个土壤剖面,采集土壤全剖面样品,用于土壤含水量和土壤水 $\delta\text{D}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的测定,土样采集深度为0~20、20~40、40~60、60~80、80~100、100~120、120~160、160~200 cm。在绿洲样点附近采集了黑河水、井水、渠水以备 $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 的测定,并在张掖市甘州区小满镇五星村收集了6月17日、6月26日、7月2日、7月16日和7月20日的降水样品。用于测定 $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 的样品在采集后,现场快速装入8 mL 硼硅酸盐玻璃瓶中,用Parafilm密封。随后,水样在2℃下冷藏,土壤和植物样品在-10℃下冷冻,直至稳定性同位素实验室进行水分提取。用于测定含水量的土样放入铝盒后用密封

表 1 研究区各生境基本情况

Table 1 Description of the habitats in the studied area

| 生境       | 植物名                                         | 科名   | 生活型      | 土壤质地 | 植被覆盖度 |
|----------|---------------------------------------------|------|----------|------|-------|
| 荒漠       | 沙枣 <i>Elaeagnus angustifolia</i>            | 胡颓子科 | 乔木       | 砂土   | 10%   |
|          | 柽柳 <i>Tamarix ramosissima</i>               | 柽柳科  | 多年生灌木    | 砂壤土  |       |
|          | 骆驼刺 <i>Alhagi sparsifolia</i>               | 豆科   | 多年生灌木    |      |       |
|          | 沙拐枣 <i>Calligonum mongolicum</i>            | 蓼科   | 多年生灌木    |      |       |
|          | 沙蒿 <i>Artemisia arenaria</i>                | 菊科   | 多年生灌木    |      |       |
| 绿洲-荒漠过渡带 | 柽柳 <i>Tamarix ramosissima</i>               | 柽柳科  | 多年生灌木    | 粗砂   | 40%   |
|          | 沙拐枣 <i>Calligonum mongolicum</i>            | 蓼科   | 多年生灌木    | 砂土   |       |
|          | 沙蒿 <i>Artemisia arenaria</i>                | 菊科   | 多年生灌木    |      |       |
|          | 花棒 <i>Hedysarum scoparium</i>               | 豆科   | 多年生灌木    |      |       |
|          | 梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i>             | 藜科   | 乔木/多年生灌木 |      |       |
| 绿洲       | 柽柳 <i>Tamarix ramosissima</i>               | 柽柳科  | 多年生灌木    | 砂壤土  | 70%   |
|          | 玉米 <i>Zea mays</i>                          | 禾本科  | 一年生草本    | 砂土   |       |
|          | 棉花 <i>Gossypium hirsutum</i>                | 棉葵科  | 多年生灌木    |      |       |
|          | 杨树 <i>Populus simonii</i>                   | 杨柳科  | 乔木       |      |       |
|          | 假苇拂子茅 <i>Calamagrostis pseudophragmites</i> | 禾本科  | 多年生草本    |      |       |

袋封存.

### 1.2.2 水分提取与样品分析

土壤水和植物水用低温真空蒸馏法(Cryogenic vacuum distillation)提取. 所有水样的 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 都用比率质谱法测定: 由AS3000自动进样器吸取约1.0  $\mu L$ 液体注入Flash1112HT元素分析仪进行高温裂解生成 $CO_2$ 和 $H_2$ , 最终由DELTA V质谱仪测得稳定同位素比值. 测定结果用V-SMOW标准校正, 水分提取和 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 测定全部由中国林业科学研究院稳定同位素实验室完成. 土壤水分选用水分质量百分比指标, 用烘干称重法测定水分的质量分数.

### 1.2.3 数据分析

使用Origin8.0软件进行绘图及线性分析.

## 2 研究结果分析

### 2.1 不同生境土壤剖面水分含量分布情况

不同生境土壤水分含量随土壤剖面深度的变化而变化(图1):

(1) 所选荒漠生境植被稀少, 土壤质地为细砂, 土壤通气性较好, 蒸发作用明显, 80 cm以上土壤含水量较小且变化不大. 在其中一个剖面的80~120 cm处挖到黏土层, 由于黏土层的持水性较细砂层好, 可能由于采样前期的降水作用而持有水分, 其蒸发和渗漏都不显著. 该层水分含量明显高于其他两个剖面同一层位的细砂层, 因此, 该层面土壤含水量因土壤质地的不同而产生显著差异.

(2) 在120 cm以上, 绿洲-荒漠过渡带土壤质地为粗砂, 持水能力较荒漠土壤差. 另外, 由于植物根系在土壤剖面上的分布以及植物对水分的利用

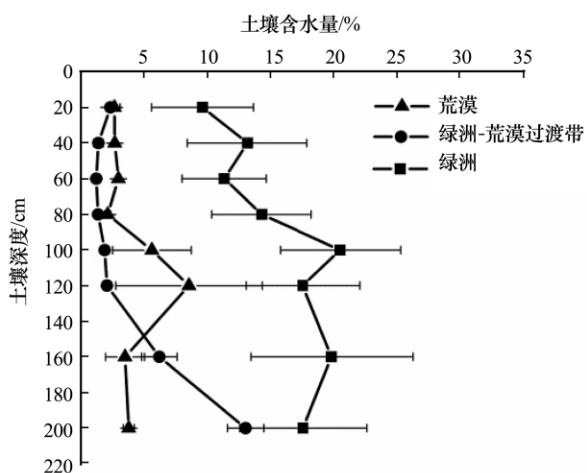


图1 不同生境土壤剖面含水量变化

Fig. 1 Variations of soil water contents with soil depths in the three studied habitats

等因素, 导致其在此范围的土壤含水量较荒漠生境低; 120 cm以下, 由于地势及地下水补给等因素使得过渡带土壤水分含量高于荒漠.

(3) 开挖剖面时, 绿洲的地下水位在190 cm左右. 在0~120 cm土层, 绿洲为砂壤土质地, 保水效果好, 由于受到黑河水的灌溉及地下水补给, 其土壤水分含量明显较高. 在120~200 cm土层范围, 绿洲的土壤质地为砂土, 其中一个剖面还出现了粗砂和砾石, 但是因为已经到了饱和层, 因此水分含量较高, 该处出现的显著差异可能与土壤质地有关.

### 2.2 不同生境土壤水 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 垂向分布特征

从垂向分布来看, 荒漠和过渡带生境中土壤水 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值大体上随土壤深度的增加而减小(图2a, b). 其中, 荒漠土壤水 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值在40~120 cm显著变小, 可能由于荒漠生境土壤质地疏松, 土壤颗粒孔隙度大, 有利于土壤水蒸发扩散, 而蒸发导致重同位素富集, 因此, 越接近土壤表层, 氢氧同位素组成越偏正; 在160 cm以下可能由于存在同位素值较低的水源补给而使得土壤水氢氧同位素值再次变小; 过渡带土壤质地为粗砂, 土壤水蒸发富集重同位素更为明显, 尤其是在40 cm以上接近土壤表层的部分, 氢氧同位素组成显著偏正, 在120 cm以下由于受到稳定的水源补给而使得氢氧同位素组成较为稳定. 绿洲由于离黑河较近, 采样点也是在农田及其周围进行的, 黑河水灌溉与地下水补给明显, 出现的偏差可能是由于河水在补给过程中蒸发而导致的重同位素富集. 除接近土壤表层(40 cm以上)受到强烈的蒸发使得 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值偏正较为明显, 在80~100 cm土壤层出现的显著变化与前人的研究相似<sup>[25, 35]</sup>.

### 2.3 不同生境植物吸水层位分析

将3种生境中的优势种植物茎秆水 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 与各生境土壤水 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值进行比较发现, 在荒漠生境中(图3a), 骆驼刺、沙蒿和沙拐枣茎秆水的 $\delta D$ 接近160~200 cm土壤层位的 $\delta D$ , 说明它们主要利用该深度范围内的土壤水; 而柽柳与沙枣的 $\delta D$ 比160~200 cm深度处土壤水 $\delta D$ 还要偏负, 从土壤水 $\delta D$ 的变化趋势来看, 它们倾向于利用更深层的土壤水. 将荒漠植物茎秆水 $\delta^{18}O$ 与土壤水 $\delta^{18}O$ (图3b)相比较也得出相似结论.

在绿洲-荒漠过渡带中(图4a), 沙蒿与沙拐枣茎秆水的 $\delta D$ 与20~40 cm土壤层位的 $\delta D$ 接近, 说明它们主要利用该层位的土壤水; 梭梭茎秆水的 $\delta D$ 与

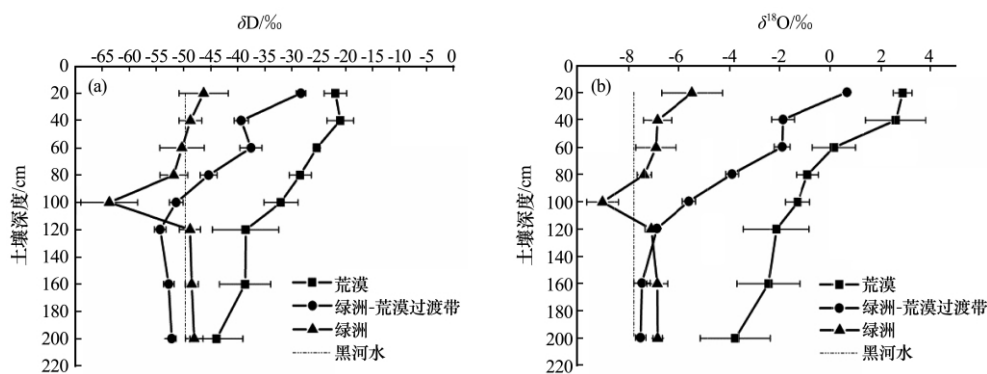
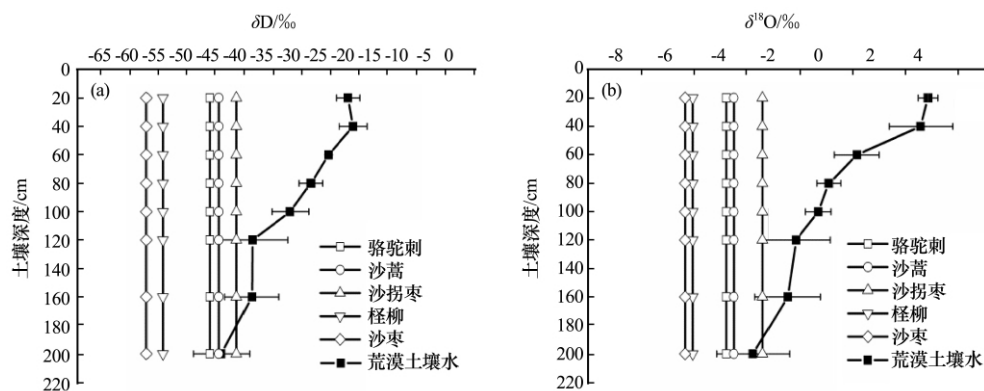
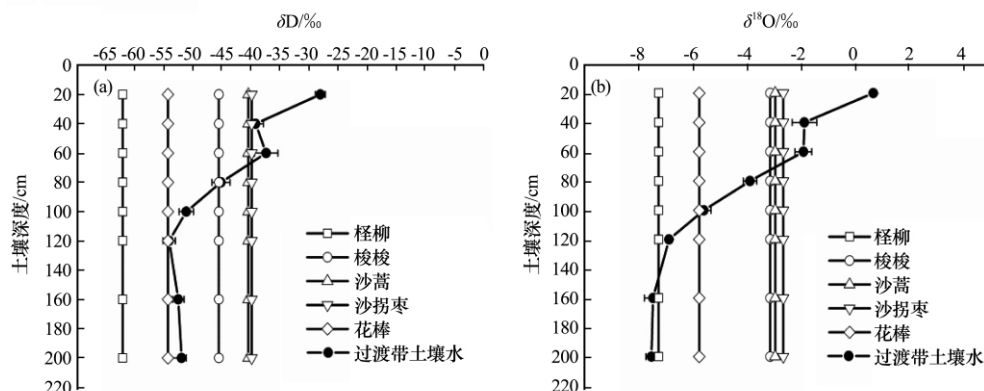


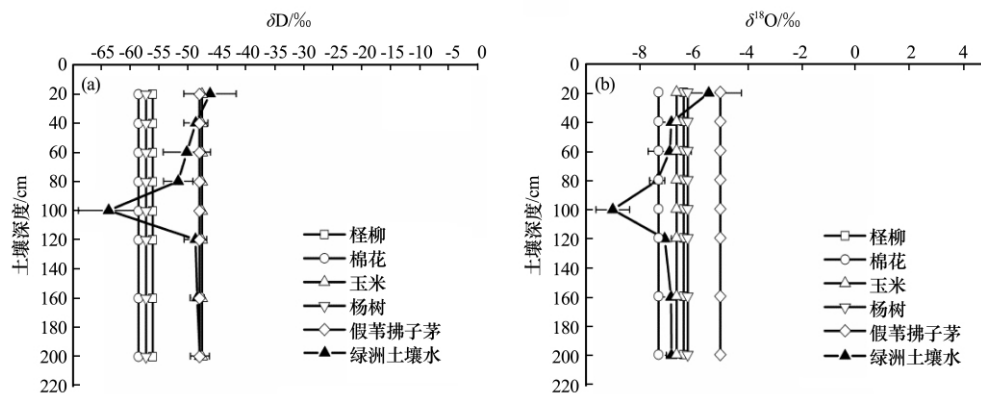
图 2 不同生境土壤剖面氢氧同位素特征

Fig. 2  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  value profiles of soil water in the three studied habitats, together with that of river water图 3 荒漠生境中植物茎秆水与土壤水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  比较Fig. 3  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  value profiles of soil water and stem water of different plant species in the desert habitat

60~80 cm处土壤水 $\delta D$ 相近,说明梭梭可能利用该层位的土壤水;花棒茎秆水的 $\delta D$ 与100~120 cm处土壤水 $\delta D$ 接近,说明其主要利用该层位的土壤水;柽柳茎秆水的 $\delta D$ 比160~200 cm层位的土壤水 $\delta D$ 偏负,说明其可能利用更深层土壤水。将过渡带植物茎秆水 $\delta^{18}O$ 与土壤水 $\delta^{18}O$ 对比(图4b),发现梭梭可能利用60~80 cm土壤水;沙蒿和沙拐枣倾向于利用20~40 cm土壤层位的水分;花棒茎秆水 $\delta^{18}O$ 与80~100 cm层位的土壤水 $\delta^{18}O$ 接近;柽柳茎秆水 $\delta^{18}O$ 与120~200 cm土层的土壤水 $\delta^{18}O$ 相似。

在绿洲生境中(图5a),玉米与假苇拂子茅茎秆水 $\delta D$ 与20~40 cm、100~200 cm深度土层土壤水 $\delta D$ 相近;棉花茎秆水 $\delta D$ 与80~100 cm土壤水 $\delta D$ 接近;柽柳和杨树的茎秆水与60~80 cm处土壤水 $\delta D$ 接近,由于绿洲土壤水分含量较高,且根据植物根系及生长阶段等<sup>[36-40]</sup>进行推断,玉米与假苇拂子茅更倾向于吸收20~40 cm土壤层位的水分,而棉花可能利用80~100 cm土壤水,柽柳和杨树则可能利用60~80 cm土壤水。将绿洲植物茎秆水 $\delta^{18}O$ 与土壤水 $\delta^{18}O$ 对比(图5b),假苇拂子茅茎秆水 $\delta^{18}O$

图 4 绿洲-荒漠过渡带中植物茎秆水与土壤水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  比较Fig. 4  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  value profiles of soil water and stem water of different plant species in the oasis-desert transitional zone

图 5 绿洲生境中植物茎秆水与土壤水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  比较Fig. 5  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  value profiles of soil water and stem water of different plant species in the oasis habitat

与 0~20 cm 处土壤水  $\delta^{18}O$  接近, 玉米茎秆水接近 20~40 cm 土层土壤水  $\delta^{18}O$ 、柽柳和杨树的茎秆水与 40~60 cm 处土壤水  $\delta^{18}O$  相近, 棉花茎秆水与 60~80 cm 处土壤水  $\delta^{18}O$  相似, 结合  $\delta D$  的分析、植物生长的环境条件、生长期及植物根系等判断, 假苇拂子茅可能利用 20 cm 左右土层范围内的浅层土壤水; 玉米可能利用 20~40 cm 范围内的土壤水; 柽柳和杨树可能利用 60 cm 左右范围内的土壤水; 棉花可能利用 80 cm 左右范围内的土壤水。

#### 2.4 不同生境植物茎秆水和潜在水源的 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 特征

对采样前后半个月左右时间里收集的研究区降水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值的一元线性回归分析, 得到研究区在降水收集期间的地方大气降水线 (LMWL) (图 6):

$$\delta D = 7.784\delta^{18}O + 4.61\text{‰} (R^2 = 0.972) \quad (1)$$

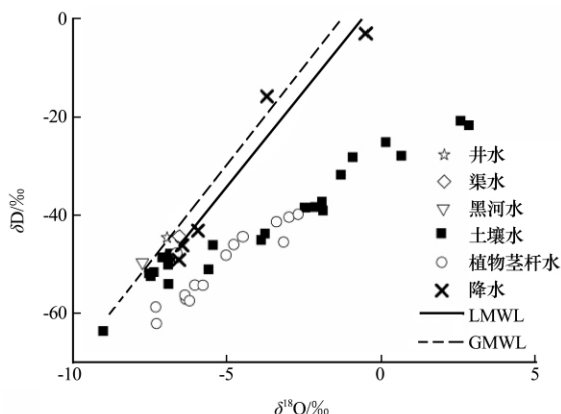
图 6 中降水样大部分位于全球大气降水线 (GMWL) 下方, 地方大气降水线与全球大气降水线的斜率相近, 说明研究区降水的二次蒸发不太明

显。井水、渠水和黑河水都接近全球大气降水线, 而土壤水和植物茎秆水则明显偏离全球大气降水线, 位于其右下方, 说明各“初始”水源转化为土壤水的过程中以及水分在土壤剖面再次分配的过程中都发生了强烈同位素分馏, 使得土壤水氢氧重同位素富集。

### 3 结论

(1) 不同生境土壤水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值随土壤剖面的变化有所差异, 荒漠由于植被稀少、蒸发较强, 其土壤水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值整体上明显较其他两个生境偏正; 绿洲-荒漠过渡带由于土壤质地等因素导致土壤水在垂直剖面上受到显著的连续蒸发, 越靠近土壤表层土壤水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值越偏正, 160 cm 以下受稳定水源补给而趋于稳定; 绿洲由于受到黑河水灌溉及潜水补给作用, 土壤水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值整体接近黑河水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值, 40 cm 以上由于蒸发而富集氢氧同位素。

(2) 3 个生境中植物水分来源情况与其土壤含水量分布格局相一致, 即荒漠中土壤含水量总体偏低, 其植物倾向于利用 160 cm 以下的深层土壤水; 绿洲-荒漠过渡带中沙蒿和沙拐枣利用相同层位的浅层土壤水 (20~40 cm), 可能存在对水源的竞争, 梭梭可能利用 60~80 cm 土壤水, 花棒可能利用 100 cm 左右的水分, 柽柳则相对利用 120 cm 以下的土壤水。从植物水分来源情况可以看出, 过渡带土壤剖面 120 cm 以上土壤含水量较低的原因可能与植物分布及土壤质地有关; 绿洲土壤含水量丰富, 根据植物根系分布及生长期等结合判断, 植物吸水层位多集中在 100 cm 以上, 其中假苇拂子茅可能水源是 20 cm 左右的土壤水, 玉米则利用 20~40 cm 土壤水, 柽柳和杨树的吸水层位相似, 为 60

图 6 植物茎秆水和潜在水源的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  组成Fig. 6 Relations between  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  values of plant stem water and different water sources, together with LMWL and GMWL

cm 左右, 因此, 存在对水源的竞争, 棉花则是利用 80 cm 左右的水分。

(3) 研究区在采样时段的降水没有发生明显的二次蒸发, 而土壤水和植物茎秆水则明显偏离地方大气降水线, 说明降水、地下水等“初始”水源在转化为土壤水过程中因强烈蒸发引起同位素分馏, 从而使土壤水富集重同位素。

(4) 利用稳定氢氧同位素组成能够有效地研究植物水分来源情况, 并且不同生境中植物水分来源的深浅存在递变, 从深到浅表现为: 荒漠 > 过渡带 > 绿洲, 不同生境同种植物也存在同样变化, 说明植物稳定氢氧同位素组成可以用来指示干旱区绿洲化、荒漠化过程。

#### 参考文献 (References):

- [1] Wang Tao. Review and prospect of research on oasisification and desertification in arid regions [J]. *Journal of Desert Research*, 2009, **29**(1): 1—9. [王涛. 干旱区绿洲化、荒漠化研究的进展与趋势[J]. *中国沙漠*, 2009, **29**(1): 1—9.]
- [2] Huxman T E, Smith M D, Fay P A, *et al.* Convergence across biomes to a common rain-use efficiency [J]. *Nature*, 2004, **429**(6992): 651—654.
- [3] Ehleringer J R, Phillips S L, Schuster W F, *et al.* Differential utilization of summer rains by desert plants [J]. *Oecologia*, 1991, **88**(3): 430—434.
- [4] Dawson T E, Ehleringer J R. Streamside trees that do not use stream water [J]. *Nature*, 1991, **350**(6316): 335—337.
- [5] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition [J]. *Plant Cell Environment*, 1992, **15**: 1073—1082.
- [6] 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.
- [7] Lü Shihua, Chen Yuchun. The numerical simulation of the features of the planetary boundary layer of the oasis and the Gobi desert in the arid region [J]. *Journal of Desert Research*, 1995, **15**(2): 116—123. [吕世华, 陈玉春. 绿洲和沙漠下垫面状态对大气边界层特征影响的数值模拟[J]. *中国沙漠*, 1995, **15**(2): 116—123.]
- [8] Fan Guangzhou, Lü Shihua. The influence of the NW China afforestation on regional climate in East and South Asia [J]. *Plateau Meteorology*, 1998, **17**(3): 300—309. [范广州, 吕世华. 西北地区绿化对该区及东亚、南亚区域气候影响的数值模拟[J]. *高原气象*, 1998, **17**(3): 300—309.]
- [9] Lü Shihua, Chen Yuchun. The influence of Northwest China afforestation on regional climate in China [J]. *Plateau Meteorology*, 1999, **18**(3): 416—424. [吕世华, 陈玉春. 西北植被覆盖对我国区域气候变化影响的数值模拟[J]. *高原气象*, 1999, **18**(3): 416—424.]
- [10] Lu ling, Cheng Guodong, Li Xin. Landscape change in middle Heihe River Basin [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, **12**(1): 68—74. [卢玲, 程国栋, 李新. 黑河流域中游地区景观变化研究[J]. *应用生态学报*, 2001, **12**(1): 68—74.]
- [11] Ding Jianli, Zhang Ying, Tashoplat Tiyp. Study on the change of spatial—temporal LUCC in oasis—desert ecotone [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, **19**(6): 100—105. [丁建丽, 张滢, 塔西甫拉提·特依拜. 绿洲-荒漠交错带土地利用/覆盖时空变化研究[J]. *环境科学研究*, 2007, **19**(6): 100—105.]
- [12] Zhao Wenzhi, Cheng Guodong. Review of several problems on the study of eco-hydrological processes in arid zone [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, **46**(22): 1851—1857. [赵文智, 程国栋. 干旱区生态水文过程研究若干问题评述[J]. *科学通报*, 2001, **46**(22): 1851—1857.]
- [13] Wang Genxu, Zhang Yu, Liu Guimin, *et al.* Impact of land-use change on hydrological processes in the Maying River basin, China [J]. *Science in China (Series D)*, 2005, **35**(7): 671—681. [王根绪, 张钰, 刘桂民, 等. 马营河流域 1967—2000 年土地利用变化对河流径流的影响[J]. *中国科学 (D 辑)*, 2005, **35**(7): 671—681.]
- [14] Zhang Zhanyu, Su Litan, Zhang Guohua. Computer simulation of water movement and heat transfer in groundwater—soil-vegetation-atmosphere continuum at oasis-desert ecotone [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, **28**(6): 88—92. [张展羽, 苏里坦, 张国华. 绿洲-荒漠交错带潜水-土壤-植被-大气连续体水热传输模型研究[J]. *北京林业大学学报*, 2006, **28**(6): 88—92.]
- [15] Feng Si, Huang Yun, Xu Youpeng. Impact of global warming on the water cycle in Xinjiang region [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, **28**(4): 523—532. [冯思, 黄云, 许有鹏. 全球变暖对新疆水循环影响分析[J]. *冰川冻土*, 2006, **28**(4): 523—532.]
- [16] Zhang Jiutian, He Xiaojia, Shangguan Donghui, *et al.* Impact of intensive glacier ablation on arid regions of Northwest China and its Countermeasure [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(4): 848—854. [张九天, 何霄嘉, 上官冬辉, 等. 冰川加剧消融对我国西北干旱区的影响及其适应对策[J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(4): 848—854.]
- [17] Hu Xinglin, Xiao Honglang, Lan Yongchao, *et al.* Experimental study of calculating method of river seepage in middle and upper reaches of the Heihe River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(2): 460—468. [胡兴林, 肖洪浪, 蓝永超, 等. 黑河中上游段河道渗漏量计算方法的试验研究[J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(2): 460—468.]
- [18] Yin Changying, Luo Geping, Lu Lei, *et al.* Characteristics of landscape patterns of land use change in arid areas [J]. *Arid Land Geography*, 2008, **31**(1): 67—74. [尹昌应, 罗格平, 鲁蕾, 等. 内陆干旱区土地利用变化的景观格局特征分析——以新疆白杨河流域为例[J]. *干旱区地理*, 2008, **31**(1): 67—74.]
- [19] Wang Shengxia, Ding Yongjian, Ye Baisheng, *et al.* A land use analysis based on the influences of climate change and human activities——A case study in the Aksu River basin oasis [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(4): 828—835. [王生霞, 丁永建, 叶柏生, 等. 基于气候变化和人类活动影响的土地利用分析——以新疆阿克苏河流域绿洲为例[J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(4): 828—835.]
- [20] Li Yanying, Zhang Qiang, Hu Xingcai, *et al.* Atmosphere boundary layer characteristics and their responses to wetness

- change over arid regions and Loess Plateau in Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, **34**(5): 1047—1058. [李岩瑛, 张强, 胡兴才, 等. 西北干旱区和黄土高原大气边界层特征对比及其对气候干湿变化的响应[J]. 冰川冻土, 2012, **34**(5): 1047—1058.]
- [21] Schlesinger W H, Reynolds J F, Cunningham G L, *et al.* Biological feedbacks in global desert? cation [J]. Science, 1990, **247**(4946): 1043—1048.
- [22] Ma Jianying, Chen Kang, Xia Dunsheng, *et al.* Variation in foliar stable Carbon isotope among populations of a desert plant, *Reaumuria soongorica* (Pall.) Maxim. in different environments[J]. Journal of Arid Environments, 2007, **69**(3): 365—374.
- [23] Ma Jianying, Sun Wei, Liu Xiaoning, *et al.* Variation in the stable carbon and nitrogen isotope composition of plants and soil along a precipitation gradient in Northern China [J]. PLoS ONE, 2012, **7**(12): e51894. doi: 10.1371/journal.pone.0051894.
- [24] Ma Jianying, Chen Fahu, Xia Dunsheng, *et al.* Stable carbon isotope compositions of desert plant and surface soil in the Tarim Basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, **29**(1): 144—148. [马剑英, 陈发虎, 夏敦胜, 等. 塔里木盆地荒漠植物与表土碳同位素组成研究[J]. 冰川冻土, 2007, **29**(1): 144—148.]
- [25] Zhao Liangju, Xiao Honglang, Cheng Guodong, *et al.* A preliminary study of water sources of riparian plants in the lower reaches of the Heihe Basin [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008, **29**(6): 709—718. [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.]
- [26] Yu Shaowen, Sun Ziyong, Zhou Aiguo, *et al.* Determination of water sources of Gobi plants by D and  $^{18}\text{O}$  stable isotopes in middle reaches of the Heihe River[J]. Journal of Desert Research, 2012, **32**(3): 717—723. [余绍文, 孙自永, 周爱国, 等. 用 D、 $^{18}\text{O}$  同位素确定黑河中游戈壁地区植物水分来源[J]. 中国沙漠, 2012, **32**(3): 717—723.]
- [27] Lin G H, Sternberg L, Ehleringer J R, *et al.* Hydrogen isotopic fractionation by plant roots during water uptake in coastal wetland plants [M]//Ehleringer J R, Farquhar G. Stable Isotopes and Plant Carbon/Water Relation. Boston: Academic Press Inc, 1993: 497—510.
- [28] Zimmermann U, Ehler D, Münnich K O. Soil water movement and evapotranspiration: Changes in isotopic composition of the water [C]//Proceedings of IAEA Symposium on Isotope Hydrology. Vienna: In At. Energy Agency, 1967: 567—584.
- [29] Wershaw R L, Friedman I, Heller S J, *et al.* Hydrogen isotopic fractionation of water passing through trees [M]//Advances in Organic Geochemistry. New York, USA: Pergamon, 1966: 55—67.
- [30] White J 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**: 237—246.
- [31] Cao Yanli, Lu Qi, Lin Guanghui. Review and perspective on hydrogen stable isotopes technique in tracing plant water sources researches [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, **22**(1): 111—117. [曹燕丽, 卢琦, 林光辉. 氢稳定性同位素确定植物水源的应用与前景[J]. 生态学报, 2002, **22**(1): 111—117.]
- [32] Shi Hui, Liu Shirong, Zhao Xiaoguang. Application of stable hydrogen and oxygen isotope in water circulation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, **17**(2): 163—166. [石辉, 刘世荣, 赵晓广. 稳定性氢氧同位素在水分循环中的应用[J]. 水土保持学报, 2003, **17**(2): 163—166.]
- [33] Duan Deyu, Ouyang Hua. Application of stable hydrogen and oxygen isotope in analyzing plant water use sources [J]. Ecology and Environment, 2007, **16**(2): 655—660. [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, 2007, **16**(2): 655—660.]
- [34] Wang Genxu, Cheng Guodong. Changes of hydrology and ecological environment during late 50 years in Heihe River basin [J]. Journal of Desert Research, 1998, **18**(3): 233—238. [王根绪, 程国栋. 近 50 年来黑河流域水文及生态环境的变化[J]. 中国沙漠, 1998, **18**(3): 233—238.]
- [35] Asbjornsen H, Mora G, Helmers M J. Variation in water uptake dynamics among contrasting agricultural and native plant communities in the Midwestern US [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2007, **121**(4): 343—356.
- [36] Liu Jingmiao, An Shunqing, Liao Rongwei, *et al.* Temporal variation and spatial distribution of the root system of corn in a soil profile [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, **17**(3): 517—521. [刘晶淼, 安顺清, 廖荣伟, 等. 玉米根系在土壤剖面中的分布研究[J]. 中国生态农业学报, 2009, **17**(3): 517—521.]
- [37] Zhu Zhicheng, Jia Donglin. A preliminary study on the biomass of *Calamagrostis pseudophragmites* community [J]. Acta Ecologica Sinica, 1996, **16**(1): 40—49. [朱志诚, 贾东林. 假苇拂子茅群落生物量初步研究[J]. 生态学报, 1996, **16**(1): 40—49.]
- [38] Li Yaoyao, Liu Haihe, Chen Jinxiang, *et al.* Study progress of cotton root system [J]. Crop Research, 2008, **22**(5): 449—452. [李焱焱, 刘海荷, 陈金湘, 等. 棉花根系研究进展[J]. 作物研究, 2008, **22**(5): 449—452.]
- [39] Liu Xin, Man Xiuling. Distribution patterns of root systems of *Populus simonii* Carr. in highland of Mu Us Sandland [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, **6**(4): 48—53. [刘鑫, 满秀玲. 毛乌素沙地梁地上小叶杨根系分布特征[J]. 中国水土保持科学, 2008, **6**(4): 48—53.]
- [40] Yang Xiaolin, Zhang Ximing, Shan Lishan, *et al.* Analysis on root structure of *Tamarix taklamakanensis* in the hinterland of the Taklimakan Desert [J]. Arid Zone Research, 2008, **25**(5): 659—667. [杨小林, 张希明, 单立山, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地塔克拉玛干柽柳根系构型研究[J]. 干旱区研究, 2008, **25**(5): 659—667.]

## Plant Water Sources of Different Habitats and Its Environmental Indication in Heihe River Basin

ZENG Qiao, MA Jian-ying

(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China)

**Abstract:** Stable hydrogen and oxygen isotopes ( $\delta D$  and  $\delta^{18}O$ ) of plant stem water and potential water sources were analyzed to investigate the water sources of different plant species in three typical habitats (oasis, oasis-desert transitional zone and desert) in the Heihe River basin. It is found that plants in the desert habitat absorb water mostly from deeper soil ( $>160$  cm). In the oasis-desert transitional zone, *Artemisia arenaria* and *Calligonum mongolicum* are likely absorb water mainly from the soil about 20~40 cm in depth, *Haloxylon ammodendron* absorbs water primarily from 60~80 cm in depth, *Hedysarum scoparium* may absorb water from soil about 100 cm in depth and *Tamarix ramosissima* obtain water from deeper soil ( $>120$  cm). Plants in the oasis habitat absorb soil water mainly from 0 to 100 cm deep. *Calamagrostis pseudophragmites* absorbs water about 20

cm in depth, *Zea mays* extracts soil water from the depth of 20~40 cm, *Tamarix ramosissima* and *Populus simonii* absorb soil water about 60 cm deep and *Gossypium hirsutum* absorbs water from soil about 80 cm in depth. Plant water sources in the three studied habitats are coincidence with soil water content. It is believed that water competition may exist among plant species which absorb water from similar soil depth. The depth of plant water sources of different habitats is gradually changed in the order from deep to shallow: desert, oasis-desert transitional zone and oasis. This order also exists in different habitats for the same plant species. It is illustrated that plant stable hydrogen and oxygen isotope composition can be used to indicate the processes of oasisization and desertification in arid regions.

**Key words:** Heihe River basin; plant water sources; stable hydrogen and oxygen isotopes; oasisization; desertification