

氢氧稳定同位素示踪旱区植物水分来源与利用策略

韩磊^{1,2,3,4}, 韩永贵², 黄晓宇², 高阳², 孙兆军^{1,2,3,4}

(1. 宁夏大学环境工程研究院, 银川 750021; 2. 宁夏大学资源环境学院, 银川 750021; 3. 宁夏中阿旱区资源评价与环境调控重点实验室, 银川 750021; 4. 教育部中阿旱区特色资源与环境治理国际合作联合实验室, 银川 750021)

摘要: 植物吸收和利用水分的模式决定了生态系统对环境水分的响应, 示踪不同条件下植物水分来源, 可以为植物水分利用策略研究提供科学依据。在土壤-植被-大气连续体系统水分传输研究中, 传统方法越来越不能满足学者对水分传输机理的了解, 而稳定氢氧同位素示踪技术因其高灵敏度和示踪性等特点已成为研究水分运动机制的重要手段。国内外相关学者已从多时间尺度、不同层次方向来研究, 但对不同区域植物水分来源的定量区分、不同植物的水分利用策略及叶片水同位素分馏机制尚未达成共识。在简述氢氧同位素示踪原理的基础上, 系统阐述了定量区分植物水分来源的方法, 讨论了不同生境、不同季节、不同生长期、降雨前后的植物水分利用策略和植物叶片水同位素动力分馏过程及其影响因素, 旨在为区域生态用水研究提供新的研究手段和理论依据。

关键词: 氢氧同位素; 水分来源; 水分利用策略; 同位素分馏

中图分类号: S157.1; S715.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2020)03-0435-07

Hydrogen and oxygen stable isotope tracer plant water source and water use strategy in arid region

HAN Lei^{1,2,3,4}, HAN Yonggui², HUANG Xiaoyu², GAO Yang², SUN Zhaojun^{1,2,3,4}

(1. Institute of Environmental Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021; 2. School of Recourses and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021; 3. Ningxia China-Arab Key Laboratory of Resource Assessment and Environment Regulation in Arid Region, Yinchuan 750021; 4 Joint International Research Laboratory of China-Arab Featured Resources and Environmental Governance in Arid Region, Yinchuan 750021)

Abstract: The response of ecosystem to environmental water variation is determined by the matters of plant absorbing and using water, and studying and tracing the plant water movement processes under different environmental conditions will provide a scientific basis for plant water use strategy. In the research of soil plant atmosphere continuum (SPAC), traditional methods can not satisfy scholars' understanding of water transport mechanism more and more. Meanwhile, the stable hydrogen and oxygen isotope technology featured in a typical process tracer characteristic and high sensitivity has become an important method to dig further into the underlying mechanism of water movement and transference in SPAC. Scholars in China and overseas have done many researches of water movement and transference tests under different scales or dimensions, however, the researches such as quantitative division of plant water sources, water use strategies and the mechanism of leaf water isotope fractionation adapt to the changing environmental conditions have not reached an agreement. In this paper, the studies of plant water source and stable hydrogen and oxygen isotope fractionation, as well as the effects of plant water use strategies in diverse habitats, different seasons, various plant growth periods and rainfall disturbances, were reviewed systematically. It provides a reference for solving the problem of regional vegetation degradation and a theoretical basis for vegetation restoration, reconstruction and optimal allocation of forest structure.

Key words: hydrogen and oxygen isotope; water source; water use strategy; isotope fractionation

水是干旱和半干旱地区植物生长最主要的限制因子^[1]。随着全球气候变化和水资源日益短缺, 区域降水格局发生了改变^[2], 植物吸收和利用水分的模式在一定程度上决定了生态系统对环境水分改变

收稿日期: 2019-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(31760236, 31460220)和宁夏自然科学基金(AAC03043)共同资助。

作者简介: 韩磊, 博士, 副研究员。E-mail: layhan@163.com

的响应结果^[3],而对植物水分来源的研究,可以为植物水分利用格局和土壤-植物-大气系统水分运动机制提供科学依据。

研究植物水分来源的方法很多,比如通过直接对比法确定水源,利用中子仪、茎流计及染色剂示踪法研究植物-土壤水分运动过程等^[4-6],但这些方法很难量化。此外,植物根系并不一定在其分布的所有层次中表现出吸水能力,稳定同位素的研究结果已经证实了这一点,并且到目前为止,其他方法还难以揭示这一现象^[7]。稳定氢氧同位素技术作为一种精确度高、破坏性小的新的研究方法,因其具有示踪、整合和指示等多项功能,已广泛应用在大气科学、地球化学、地质学、生态学的许多领域^[8-9],为确定植物水分来源提供了一种新的途径。因此,利用氢氧稳定同位素示踪技术研究干旱半干旱地区植物水分来源,可以更好地了解植物之间的竞争关系和对不同水源的水分利用模式,对于了解这些地区生态水文过程、探讨干旱区绿洲化背景下水土资源高效利用都有着重要的实际意义。

1 氢氧同位素示踪植物水分来源的原理及方法

1.1 氢氧同位素示踪原理

同位素是指具有相同质子数,而中子数不同的同一化学元素。氢、氧稳定同位素作为性质稳定、无污染且不具破坏性的示踪物,在研究植物对全球气候变化的响应机制中具有重要的意义。由于同一元素、不同同位素原子之间质量不同造成物理化学性质相异,因此不同时空自然界水体的氢、氧同位素丰度存在一定变化,使得氢氧同位素定量区分水分来源成为可能^[10]。在植物-土壤-大气连续体(Soil plant atmosphere continuum, SPAC)中,植物获取的水分来源主要有降水、凝结水、土壤水和地下水^[11];土壤水、地下水以及凝结水最初也由降水形成,但因外界条件的影响,不同水源氢氧同位素值会呈现显著性差异^[12]。而同位素示踪技术主要利用水分子中氢、氧稳定同位素的指示作用,植物根系在吸收水分过程中没有发生同位素分馏,通过比较植物茎(木质部)的水氢同位素(δD)、氧同位素($\delta^{18}O$)值与各潜在水源的 δD ($\delta^{18}O$)值,分析植物与各潜在水源同位素组成关系,从而确定植物水分来源,判断植物对不同水分来源的利用策略^[13]。利用稳定氢氧同位素技术确定植物水分来源需要满足两个前提条件:(1)植物吸收水分过程中不发生分馏现象;(2)植物吸收利用不同水源之间的同位素值存在显

著性差异^[14]。

叶片水参与了植物-大气系统的水分运动,了解叶片水稳定同位素与各潜在水源的稳定同位素的相互关系,有助于揭示其在区域水体稳定同位素循环中的分配与贡献。植物吸收利用水分的模式决定了生态系统对环境水分的响应^[15],在土壤-植物-大气系统水分传输机制中,植物蒸腾作用使得土壤水从根部通过茎秆向叶片迁移,植物中H和O这两种元素主要来自于其吸收的水分,而植物中的水分通过土壤和植物蒸腾过程进入大气,这种水分运动机制产生不同同位素分馏过程^[16-17]。利用氢氧稳定同位素示踪技术研究植物体中水的分馏过程,将有助于进一步阐明植物与各潜在水分之间联系,为区域植物水分利用策略提供科学依据。

1.2 利用氢氧同位素技术定量区分植物水分来源的方法

植物体内水分的同位素组成是各潜在水源同位素组成的结果,因此分析植物木质部水分与各潜在水源的同位素组成,可以明确植物水分来源以及各水源对植物水分贡献率大小。国内外学者提出不同方法来研究不同水源对植物水分贡献率,其中常用方法有二源或三源混合模型、多源线性混合模型、吸水深度模型、贝叶斯混合模型以及动态模型(表1)。

在遵守同位素质量守恒的前提下,植物水分来源超过3个时,二源或三源混合模型可以简化或合并水分来源,而多源线性混合模型可以同时比较多种水分对植物的贡献率^[25];另一方面,多源线性混合模型在土壤剖面同位素特征单调变化的条件下,能更清晰判断出水分来源贡献随时间的变化。吸水深度模型只适用于分析根系吸水的平均深度,不能分析其他潜在水源的影响^[26],因此多源线性混合模型与吸水深度模型的结合,能更好地明确植物水分利用策略。此外,贝叶斯混合模型在研究植物水分来源的运算时融合了大量的参数因子,考虑到重复样品的变化幅度,具有较高的准确性^[27-28]。Parnell等^[22]指出MixSIR模型不能准确地估计各水源的贡献率,主要是因为运行模型没有附加残差并在运行前执行了限制条件的beta分布,因此提出了与MixSIR模型相似的SIAR模型。SIAR模型考虑了同位素的时空变异性和分馏作用,源的数量不受限制,并且通过定义混合物水样同位素的数学期望和标准偏差,减少了各源同位素的不确定性,所以基于贝叶斯混合模型的SIAR模型是一种更加合理的水源解析方法^[27]。MixSIAR模型综合考虑了每一个源同位素等信息的不确定性并结合部分先验信息,模型

不仅能得出各水源的贡献比例, 而且能预测所得比例的不确定程度, 目前已被广泛运用于生态水文学研究领域, 如植物水源分割^[29-30]、碳源分割^[31-33]等众多研究。植物水分来源受地形、水文以及气象等因

素影响, 不同气候区域变异较大, 所以在定量区分植物水分来源及其贡献率时, 需要比较各模型的限制条件, 以确保研究结果科学准确。

表 1 植物水分来源模型
Table 1 Models of plant water source

| 方法 Method | 模型 Model | 特点 Feature |
|--|---|---|
| 二源或三源混合模型 ^[18] | $\delta D = X_1 \delta D_1 + X_2 \delta D_2 + X_3 \delta D_3$ $\delta^{18}O = X_1 \delta^{18}O_1 + X_2 \delta^{18}O_2 + X_3 \delta^{18}O_3$ $X_1 + X_2 + X_3 = 1$ | 可分析各水分贡献率, 但不能超过 3 个水源, 但计算过程中忽略了各可能水源同位素之间的差异对结果的影响 |
| 多源线性混合模型 IsoSource ^[19] | $\delta D_p = \sum f_i \delta D_i, \quad \delta^{18}O_p = \sum f_i \delta^{18}O_i, \quad \sum f_i = 1$ | 可分析多种水源对植物水分贡献率, 并且可以比较各水源对植物贡献范围, 但不能提供植物吸收水分深度 |
| 吸水深度模型 ^[20] | $N_i = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Y-\mu)^2}{2\sigma^2}}$ | 可自行设定土壤垂直间隔, 可得出植物平均吸水深度, 但模型不能算出除土壤水之外的水源对植物贡献率 |
| 贝叶斯混合模型 (如 MixSIR ^[21] , SIRA ^[22] , MixSIAR ^[23]) | $\delta D = \sum_{i=1}^n f_i \delta D_i$ $\delta^{18}O = \sum_{i=1}^n f_i \delta^{18}O_i$ $\sum_{i=1}^n f_i = 1$ | 充分考虑了实验过程中源存在的测量误差、时空变异性, 耦合了各源的基本数值与不确定性, 其模型计算结果更具有代表性和准确性; 贝叶斯混合模型不受源的数量限制, 实现了多源跟踪进行源分析的跨越, 在计算水源贡献比例中占据很大的优势 |
| 动态模型 ^[24] | $Y_1 = [X_n \times \delta^{18}O_q + (1 - X_n) \times \delta^{18}O_{(n)}]$ $Y_2 = (1 - t_n / d) + t_n / d \times \delta^{18}O_{n-1}$ $\delta^{18}O = Y_1 \times Y_2$ | 考虑到水源的动态变化, 可以把每一次降水作为一个独立的水源, 但模型的使用具有局限性, 需考虑植物体内水分衰减期 |

注: $\delta D(\delta^{18}O)$: 植物木质部水分的稳定氢或氧同位素组成; X_1 、 X_2 和 X_3 : 水源在植物所利用的水分总量中所占的百分数; $\delta D_i(\delta^{18}O_i)$: 各水源氢氧同位素值; $\delta D_p(\delta^{18}O_p)$: 植物水中氢氧同位素丰度; f_i : 水源 i 对植物水分贡献率; N_i : 植物根在 Y 深度处所吸收的水分比例; μ : 根在土壤中所吸收水分的平均深度; n : 水源数量; X_n : 第 n 次降雨后的其余水源在总水源量中所占比例; $\delta^{18}O_{(n)}$: 第 n 次降水的同位素值; t_n : 第 n 次降水后的时间; $\delta^{18}O_{n-1}$: 第 $n-1$ 次降水后得到的植物茎秆水中的同位素值

Note: $\delta D(\delta^{18}O)$: stable hydrogen or oxygen isotope composition of plant xylem moisture; X_1 , X_2 and X_3 : percentage of water in the total amount of water used by plants; $\delta D_i(\delta^{18}O_i)$: water source hydrogen and oxygen isotope values; $\delta D_p(\delta^{18}O_p)$: hydrogen and oxygen isotope abundance in plant water; f_i : water source of i contribution rate to plant water; N_i : proportion of water absorbed by plant roots at Y depth; μ : the average depth of water absorbed by the roots in the soil; n : number of water sources; X_n : proportion of the remaining water source after the n rainfall in the total water source; $\delta^{18}O_{(n)}$: isotope value of the n precipitation; t_n : time after the n precipitation; $\delta^{18}O_{n-1}$: isotope values in xylem water of plant stems after $n-1$ precipitation

2 基于氢氧同位素技术的植物水分利用策略研究

2.1 不同季节的植物水分利用策略

利用氢氧稳定同位素技术能有效地研究植物水分来源状况, 比较不同水源对植物的贡献率, 能更好地探究区域植物水分利用策略^[34]。植物对季节性水分利用的响应方式不同, 如栓皮栎 (*Quercus variabilis*)、欧美杨 (*Populus euramericanacv*) 等环孔材树种在不同季节中水分利用策略有显著变化, 春季对表层土壤水分利用率增加^[35-36]; 而在秋季, 对 0~20 cm 土层水分吸收相对较少, 主要利用 140 cm 以下的深层土壤水分^[37]。此外, 夏季地下水位的深度也会影响植物对雨水的利用率, 地下水位越深, 植物对雨水的利用率越高^[18]。还有研究认为, 植物在早雨两季对水源利用比例也存在一定的转换^[38], 植物可以通过

转变利用不同深度水源的策略以避免干旱胁迫, 如侧柏 (*Platycladus orientalis*) 在旱季主要利用深层土壤水分, 而在雨季, 植物对 0~30 cm 土壤水分的利用比例增加, 对 30~80 cm 土壤水分的利用比例均减少^[39]。以上研究表明, 不同季节水分环境的变化势必会导致季节性干旱地区植物的水分利用策略发生改变, 有些物种通过水分利用的季节性变化来避免竞争, 而植物水分利用策略的改变在一定程度上也反映了生态系统对环境水分状况改变时的响应机制, 因此研究不同季节的植物水分利用策略对植物适应季节性干旱机制具有现实意义。

2.2 不同生长期的植物水分利用策略

Li 等^[40]研究表明, 在干旱区, 60 cm 以下土壤水分通常表现出夏季低、冬季高的特点, 与降水趋势相反, 而且生长期蒸散耗水经常高出同期降水的补给量。因植物生长发育受到降水、气候条件以及

土壤水分等因素影响,植物在不同生长期的水分利用策略也存在显著差异。树木生长初期植物水分来源主要是浅层土壤水,当土壤干旱缺水时,植物主要利用地下水,而且土壤越干燥植物对地下水的利用比例越高^[41]。半附生植物根据其不同生育阶段会采取不同的水分利用策略,即在生长初期吸收利用雾水和附生苔藓层中的水分,生长后期吸收利用土壤水^[42]。有研究表明,干旱区人工杨树的主要吸水层随植物生长期而变深,在生长末期土壤水分含量较少时,也受地下水的补给^[43]。尽管大部分研究表明,随着生长期的变化,植物对土壤水利用变深,但朱建佳等^[44]在研究合头草(*Sympegma regelii*)等荒漠植物时发现,植物在生长初期以河水和地下水为主要吸水来源,而在生长中后期,浅层土壤水贡献率相对较高。尽管不同生长期植物主要利用土壤水和地下水,但当发生干旱胁迫,浅层土壤水无法向深层补给时,深根性植物如何改变水分利用策略,值得进一步深入探讨。

2.3 降雨前后的植物水分利用策略

降水时空变化将对陆地生态系统产生重要影响^[45]。在降雨发生变化后,植物能否有效利用水分,降雨对植物水分贡献的大小,这些问题一直是众多学者关注的重点。降雨作为水分来源的关键因素,对植物的生长发育有重要意义,而降雨前后土壤水分含量的变化在一定程度上改变了植物水分利用策略。降雨前近地面表层蒸发强烈,地表水分含量相对较小,同位素富集,其测定的表层土壤水分的氢氧同位素值相对偏大,植物吸收的水源相对较深;降雨过后,雨水的入渗对土壤水分一定补给,表层土壤水分含量较高,其表层土壤水对于植被的水分贡献率较大。在小降水事件(<10 mm)中,荒漠植物半日花(*Helianthemum songaricum*)主要利用浅层土壤水,霸王(*Sarcozygium xanthoxylum*)主要利用20~80 cm 深层土壤水^[46-47],而在发生较大降雨后,沙生灌木会通过调整水分利用策略来积极适应干旱环境,如降雨后巴丹吉林沙漠东南缘白刺(*Nitraria tangutorum*)灌丛对地表浅层土壤水分利用比例增加,对地下水的利用比例减少^[48]。王艳莉等^[49]的研究也表明,在发生较大降雨后,柠条(*Caragana korshinskii*)和油蒿(*Artemisia ordosica*)会通过调整水分利用策略来积极适应干旱环境。同样地,部分乔木树种如栓皮栎和毛白杨(*Populus tomentosa*),降雨前主要的吸水层集中在40~90 cm 土壤深度,水分贡献率高达60%以上,其吸水层范围变化不大;而雨后乔木树种的水分来源总体上较浅,中

上层土壤含水率增大,但随着雨水蒸发、水分入渗以及植物自身需求,植物吸水层逐渐变深^[35, 43]。由于不同区域的降雨事件发生不均衡,所以降水事件频率增加或减少对植物水分利用策略的影响并未形成较为统一的结论。

2.4 不同生境的植物水分利用策略

植物在不同生境中对土壤水分利用存在由深到浅的变化规律表现为:荒漠>过渡带>绿洲,不同生境同种植物也存在同样现象,说明植物可以利用氢氧稳定同位素来研究区域性绿洲化、荒漠化过程^[50]。荒漠植物如一年生植物和肉质植物只利用夏季降水,多年生植物利用夏季降水和深层土壤水;深根系多年生植物利用地下水和冬季残留的土壤水分^[51]。而对于受干旱胁迫影响大的荒漠地区,降雨量不同的两个地区的荒漠植物都以土壤水为主要吸水来源,而在吸收水分的土壤深度有所差异^[52],如合头草在降雨量多的地区主要利用浅层土壤水,在降雨相对匮乏的地区则对各层土壤水均有利用。在过渡带地区,如桂西北石灰岩地区次生林群落的典型乔木林、灌木林主要水分来源以浅层裂隙存储雨水和降雨储存为主^[53]。对于干旱、半干旱喀斯特地区,植物对多样化水源的利用,能够有效地将不同储水单元的水文调蓄能力衔接起来,从而最大化整个植被-土壤-岩石系统的水文生态功能^[54]。有研究发现干旱区和山地河岸树木并不利用河水,长期储存在土壤中的降水才是河岸树木的稳定水源^[55-56],如河岸灌木多枝怪柳(*Tamarix ramosissima*)随干旱不断加剧,其利用的水源由地下水转为土壤水^[57];而高海拔地区生长在河岸边的具鳞水柏枝(*Myricaria squamosa*)则对地下水和河水的依赖程度较高,距离河岸约100 m 时则对土壤水的利用量较多,反映出生长在不同生境中的植物对特定水分条件的特殊适应结果^[58]。此外,降水充足时,植物不仅有更为长久有效的水分利用策略,也为该区域地下水提供水分补给^[59]。新近的研究结果表明,植物根系还可以将表层土壤水分运输到深层土壤,为深层根系提供水分供应^[60]。研究土壤-地下水系统中的水资源变化过程将有助于进一步明晰植物-土壤水循环机理,可以实现区域降水资源的高效利用。

3 植物水分运动中叶片水同位素分馏研究

3.1 植物叶片蒸腾氢氧同位素分馏

植物叶片水同位素富集与分馏是影响大气中的水汽、氧气、二氧化碳以及植物有机物氢氧同位素组成的重要过程^[61],叶片水同位素分馏与富集程度

与大气水汽同位素比值密切相关^[62] (图 1)。以往研究由于大气水汽同位素实测数量少, 缺乏基于野外试验条件的富集的控制机制研究, 导致叶片氢氧稳定同位素富集机制研究多集中于模型研究。模型研究表明, 大气水汽氢氧同位素受植物蒸腾影响, 而大气相对湿度和气温则通过影响叶片气孔导度和叶温来调控叶片水同位素动力分馏过程^[62-63]。试验研究表明, 在植物蒸腾过程中, 叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 受动力分馏影响, 叶片水稳定同位素动力分馏的强弱程度可以由不同植物叶片水蒸腾线斜率的大小来指示^[64], 在半干旱地区, 多数植物叶片蒸腾线斜率介于 1.5~3.2 之间^[65-66], 斜率越低, 蒸腾过程中动力分馏越明显, 而且斜率较小的植物叶片水稳定同位素与当地的气温和相对湿度的相关性更显著。也有学者研究表明, 落叶松 (*Larix sibirica*) 叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 与空气水汽压亏缺之间存在显著的正相关^[67], 常绿植物侧柏和落叶植物连翘 (*Forsythia suspensa*) 叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 与风速呈显著负相关^[68]。落叶植物更容易受到外界环境的影响, 相对于常绿植物, 落叶植物中叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化幅度更大, 并更富集^[69]。此外, Yu 等^[70]研究青藏高原川滇高山栎 (*Quercus aquifolioides*) 时, 发现叶片水 δD 相比 $\delta^{18}\text{O}$ 更能反映降水特征, 并且叶片水 δD 对印度季风活动更敏感。目前, 如何定量描述植物叶片水同位素富集过程, 阐明植物叶片蒸腾氢氧同位素分馏机制, 是全球气候变化背景下大气水循环研究的前沿问题。

3.2 植物叶片水同位素富集的模拟

植物叶片水同位素通过 ^{18}O 的富集信号传递光合作用释放 O_2 和 CO_2 , 因此植物叶片水 H_2^{18}O 富集对大气中 O_2 和 CO_2 的 ^{18}O 收支有着重要的影响^[71]。为提高对植物叶片水 H_2^{18}O 富集的模拟, 目前常用的估算模型有 Craig-Gordon 模型、Dongmann 模型以及 Farquhar-Cernusak 模型。部分学者利用稳态假设, 对植物叶片水 H_2^{18}O 富集过程进行了预测, 设定叶片蒸腾水的氧同位素与植物茎水的氧同位素值相等, 叶片水含量为常数, 得到植物蒸腾 Craig-Gordon 模型^[72]。Lee 等^[73]在研究中发现, 因叶片蒸腾水的氧同位素随时间的变化存在差异, 只有正午时植物叶片蒸腾同位素值与植物木质部水同位素值接近于稳定状态, 所以 Craig-Gordon 模型的假设条件并不能完全得到满足。Lai 等^[74]利用同位素稳态假设 Craig-Gordon 模型研究太平洋西北地区针叶林叶片水的同位素值时发现, 稳态模型会高估叶片蒸腾稳定同位素值通量。Dongmann 模型则探讨了植物蒸腾的非稳态效应, Lee 等^[73]在研究偏离稳态假设状态的

关系时发现, 只有在大气相对湿度不饱和时, 才能确保偏离稳态状态的实现。Farquhar-Cernusak 模型在模拟同位素富集时没有做稳态假设, 并认为同位素在叶片富集较高, 离木质部越近富集程度越低, 叶片同位素的组成并不均衡^[75]。Farquhar-Cernusak 模型将 Péclet 效应考虑其中, 并通过质量守恒方程测得模型未知量, 克服了稳态假设模型的闭合难题。由于大气水汽取样的数量和仪器设备等限制, 所有研究都局限于短期试验和较粗的时间尺度下, 这使得植物叶片水 H_2^{18}O 富集过程和机制方面还有许多问题亟待研究。

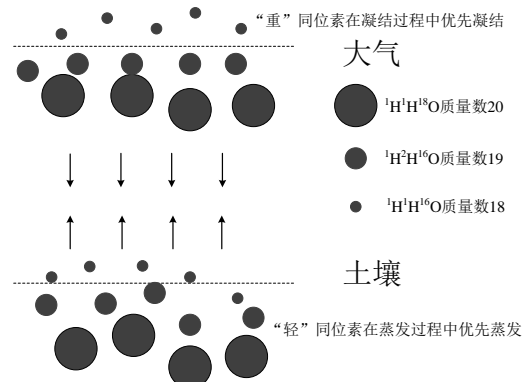


图 1 氢氧同位素分馏过程

Figure 1 Hydrogen and oxygen isotope fractionation process

4 研究展望

土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 水分传输过程研究是阐明干旱区植物水分利用策略以及植物对干旱环境适应机制的基础。将氢、氧稳定同位素理论与方法引入到植物水分来源、SPAC 系统水分运动、循环过程研究中来, 可以分析出植物水分的输入也可通过分馏现象掌握植物水分输出过程, 解决了传统试验方法不能直接、有效研究水循环过程的难题。

稳定同位素技术的应用将极大地推进陆地生态水循环研究进展, 为区域水资源高效利用提供新的研究手段, 并将更好地促进生态水文学、水土保持学、农业资源与环境等相关学科的发展。现阶段广大的研究学者对植物水分来源方面的研究比较广泛, 但大多限于一些基础性、探索性的工作, 涉及面窄、研究深度不足, 加上天然氢氧同位素的组成对环境信息极其敏感, 尤其采样、预处理、测定等环节易受到蒸发和污染, 导致试验数据误差大, 观测到的现象无法进行深入挖掘和阐释。未来该领域研究的重点主要如下:

(1) 叶片水的氢氧同位素分馏模型主要单一地建立在叶片尺度上, 叶片水同位素富集在冠层尺度的研究还很少见, 所以通过氢氧同位素示踪技术研

究植物叶片分馏仍需要深入探索。此外,结合土壤-植物系统养分循环、大气水循环过程等方面的研究,可以进一步阐明植物水分利用效率、水肥耦合机制。

(2)研究植物水分利用策略还需要结合不同生境土壤养分条件以及植物水分生理特征进行综合分析,以期揭示水分转化、养分循环与植物水分利用的关系。此外,结合微气象环境、同位素水汽输送过程以及水汽来源等方面的研究,可以更加准确地分析大气水同位素的时空变化及大气降水对植物-土壤系统水分运动规律的影响。

(3)为避免天然稳定同位素试验误差大的弊端,未来还可以通过人工添加如富集氘的重水来追踪不同来源水分在土壤水入渗、蒸发以及植物吸收利用、蒸腾耗水过程中的变化,为区域生态用水提供参考。

参考文献:

- [1] GU G J, ADLER R F. Spatial patterns of global precipitation change and variability during 1901–2010[J]. *J Climate*, 2015, 28(11): 4431–4453.
- [2] 周海, 郑新军, 唐立松, 等. 准噶尔盆地东南缘多枝桉柳、白刺和红砂水分来源的异同[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(7): 665–673.
- [3] 徐庆, 冀春雷, 王海英, 等. 氢氧碳稳定同位素在植物水分利用策略研究中的应用[J]. *世界林业研究*, 2009, 22(4): 41–46.
- [4] 穆文彬. 华北平原农田层状土壤水分运动试验及数值模拟[D]. 郑州: 华北水利水电学院, 2012.
- [5] 李瑞娟. 土壤—春小麦系统水分运移过程的实验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [6] 吕刚, 金兆梁, 凌帅, 等. 浑河源头水源涵养林土壤优先流特征[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(4): 287–292.
- [7] 林光辉. 稳定同位素生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [8] 余武生, 马耀明, 孙维贞, 等. 青藏高原西部降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其气候意义[J]. *科学通报*, 2009, 54(15): 2131–2139.
- [9] 蒲俊兵. 重庆岩溶地下水氢氧稳定同位素地球化学特征[J]. *地球学报*, 2013, 34(6): 713–722.
- [10] 徐英德, 汪景宽, 高晓丹, 等. 氢氧稳定同位素技术在土壤水研究上的应用进展[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 1–9, 15.
- [11] 程立平, 刘文兆. 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[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(3): 651–658.
- [12] WENNINGER J, BEZA D T, UHLENBROOK S. Experimental investigations of water fluxes within the soil-vegetation-atmosphere system: Stable isotope mass-balance approach to partition evaporation and transpiration[J]. *Phys Chem Earth Parts A/B/C*, 2010, 35(13/14): 565–570.
- [13] 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.
- [14] 寿文凯, 胡飞龙, 阿拉木萨, 等. 基于 SPAC 系统干旱区水分循环和水分来源研究方法综述[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(8): 2194–2202.
- [15] PEÑUELAS J, CANADELL J G, OGAYA R. Increased water-use efficiency during the 20th century did not translate into enhanced tree growth[J]. *Glob Ecol Biogeogr*, 2011, 20(4): 597–608.
- [16] GALEWSKY J, STEEN-LARSEN H C, FIELD R D, et al. Stable isotopes in atmospheric water vapor and applications to the hydrologic cycle[J]. *Rev Geophys*, 2016, 54(4): 809–865.
- [17] 王帆, 江洪, 牛晓栋. 大气水汽稳定同位素组成在生态系统水循环中的应用[J]. *浙江农林大学学报*, 2016, 33(1): 156–165.
- [18] PHILLIPS D L, GREGG J W. Uncertainty in source partitioning using stable isotopes[J]. *Oecologia*, 2001, 127(2): 171–179.
- [19] SNYDER K A, WILLIAMS D G. Water sources used by riparian trees varies among stream types on the San Pedro River, Arizona[J]. *Agric For Meteorol*, 2000, 105(1/2/3): 227–240.
- [20] ROMERO-SALTOS H, STERNBERG L S L, MOREIRA M Z, et al. Rainfall exclusion in an Eastern Amazonian forest alters soil water movement and depth of water uptake[J]. *Am J Bot*, 2005, 92(3): 443–455.
- [21] MOORE J W, SEMMENS B X. Incorporating uncertainty and prior information into stable isotope mixing models[J]. *Ecol Letters*, 2008, 11(5): 470–480.
- [22] PARNELL A C, INGER R, BEARHOP S, et al. Source partitioning using stable isotopes: Coping with too much variation[J]. *PLoS One*, 2010, 5(3): e9672.
- [23] STOCK B C, SEMMENS B X. MixSIAR GUI User Manual, Version 3.1. <https://github.com/brianstock/MixSIAR/> doi:10.5281/zenodo.47719, 2013.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 郭飞, 马娟娟, 郑利剑, 等. 基于氢氧同位素的植物水源区分方法比较[J]. *节水灌溉*, 2015(11): 59–63.
- [27] 李楠. 基于稳定氧同位素的黄土丘陵区不同树龄枣树土壤水分利用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [28] 卢森堡. 黄土丘陵区油松和沙棘水分来源及其对降雨的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [29] ERHARDT E B, BEDRICK E J. A Bayesian framework for stable isotope mixing models[J]. *Environ Ecol Stat*, 2013, 20(3): 377–397.
- [30] 杜俊杉, 马英, 胡晓农, 等. 基于双稳定同位素和 MixSIAR 模型的冬小麦根系吸水来源研究[J]. *生态学报*, 2018, 38(18): 6611–6622.
- [31] YANES Y, ASTA M P, IBÁÑEZ M, et al. Paleoenvironmental implications of carbon stable isotope composition of land snail tissues[J]. *Quat Res*, 2013, 80(3): 596–605.
- [32] 肖洋. 基于稳定同位素的湿地植被—土壤体系水、碳、氮素变化特征研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [33] BCHIR A, ESCALONA J M, GALLÉ A, et al. Carbon isotope discrimination ($\delta^{13}\text{C}$) as an indicator of vine water status and water use efficiency (WUE): Looking for the most representative sample and sampling time[J]. *Agric Water Manag*, 2016, 167: 11–20.
- [34] 郝玥. 基于稳定同位素的北京山区典型树种水分利用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [35] 邓文平. 北京山区典型树种水分利用机制研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [36] 贾国栋, 余新晓, 邓文平, 等. 北京山区典型树种土壤水分利用特征[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2013,

- 21(3): 403-411.
- [37] 高琛, 杨新兵, 鲁绍伟, 等. 北京沙地杨树人工林生态系统水分利用策略[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(1): 80-85.
- [38] ZHU Y J, WANG G J, LI R Q. Seasonal dynamics of water use strategy of two *Salix* shrubs in alpine sandy land, Tibetan Plateau[J]. PLoS One, 2016, 11(5): e0156586.
- [39] 苗博, 孟平, 张劲松, 等. 基于稳定同位素和热扩散技术的张北杨树水分关系差异[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2111-2118.
- [40] LI X R, XIAO H L, ZHANG J G, et al. Long-term ecosystem effects of sand-binding vegetation in the tengger desert, northern China[J]. Restor Ecology, 2004, 12(3): 376-390.
- [41] SMITH S D, WELLINGTON A B, NACHLINGER J L, et al. Functional responses of riparian vegetation to stream-flow diversion in the Eastern sierra Nevada[J]. Ecol Appl, 1991, 1(1): 89-97.
- [42] FIELD T S, DAWSON T E. Water sources used by *Didymopanax pittieri* at different life stages in a tropical cloud forest[J]. Ecology, 1998, 79(4): 1448-1452.
- [43] 钱龙娇. 基于氢氧稳定同位素浑善达克沙地人工种植杨树吸水来源和耗水耦合研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- [44] 朱建佳, 陈辉, 邢星, 等. 柴达木盆地荒漠植物水分来源定量研究——以格尔木样区为例[J]. 地理研究, 2015, 34(2): 285-292.
- [45] VANDANDORJ S, MUNKHJARGAL E, BOLDGIV B, et al. Changes in event number and duration of rain types over Mongolia from 1981 to 2014[J]. Environ Earth Sci, 2017, 76(2): 70-82.
- [46] 陈婕, 徐庆, 高德强, 等. 西鄂尔多斯半日花及霸王的水分利用[J]. 林业科学, 2016, 52(2): 47-56.
- [47] CHEN J, XU Q, GAO D Q, et al. Differential water use strategies among selected rare and endangered species in West ordos desert of China[J]. J Plant Ecol, 2017, 10: 660-669.
- [48] 朱雅娟, 卢琦, 吴波, 等. 增雨对巴丹吉林沙漠东南缘白刺水分利用的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 41-48.
- [49] 王艳莉, 刘立超, 高艳红, 等. 基于较大降水事件的人工固沙植被区植物水分来源分析[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1053-1060.
- [50] 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.
- [51] 尹力, 赵良菊, 阮云峰, 等. 黑河下游典型生态系统水分补给源及优势植物水分来源研究[J]. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1478-1486.
- [52] 朱建佳. 柴达木盆地东部荒漠植物水分来源[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2013.
- [53] 聂云鹏, 陈洪松, 王克林. 石灰岩地区连片出露石丛生境植物水分来源的季节性差异[J]. 植物生态学报, 2011, 35(10): 1029-1037.
- [54] 聂云鹏, 陈洪松, 王克林, 等. 采用稳定同位素技术判定喀斯特地区植物水分来源的挑战与可能应对方案[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2361-2368.
- [55] COSTELLOE J F, PAYNE E, WOODROW I E, et al. Water sources accessed by arid zone riparian trees in highly saline environments, Australia[J]. Oecologia, 2008, 156(1): 43-52.
- [56] RENÉE BROOKS J, BARNARD H R, COULOMBE R, et al. Ecohydrologic separation of water between trees and streams in a Mediterranean climate[J]. Nature Geosci, 2010, 3(2): 100-104.
- [57] NIPPERT J B, BUTLER J J, KLUITENBERG G J, et al. Patterns of *Tamarix* water use during a record drought[J]. Oecologia, 2010, 162(2): 283-292.
- [58] 赵国琴, 李小雁, 吴华武, 等. 青海湖流域具鳞水柏枝植物水分利用氢同位素示踪研究[J]. 植物生态学报, 2013, 37(12): 1091-1100.
- [59] 李菊鹏, 刘文杰, 王平元, 等. 西双版纳石灰山热带季节性湿润林内几种植物的水分利用策略[J]. 云南植物研究, 2008, 30(4): 496-504.
- [60] OLIVEIRA R S, BEZERRA L, DAVIDSON E A, et al. Deep root function in soil water dynamics in cerrado savannas of central Brazil[J]. Funct Ecology, 2005, 19(4): 574-581.
- [61] FARQUHAR G D, CERNUSAK L A, BARNES B. Heavy water fractionation during transpiration[J]. Plant Physiol, 2007, 143(1): 11-18.
- [62] 王小婷, 温学发. 黑河中游春玉米叶片水 δD 和 $\delta^{18}O$ 的富集过程和影响因素[J]. 植物生态学报, 2016, 40(9): 912-924.
- [63] 娄源海, 余新晓, 邓文平, 等. 北京山区三种植物叶片水 $\delta^{18}O$ 特征及影响因子[J]. 生态学杂志, 2016, 35(5): 1240-1247.
- [64] KIM K, LEE X. Isotopic enrichment of liquid water during evaporation from water surfaces[J]. J Hydrol, 2011, 399(3/4): 364-375.
- [65] 朱珊娟, 肖薇, 张弥, 等. 加拿大温带落叶林生态系统氢氧同位素组成研究[J]. 生态学报, 2017, 37(22): 7539-7551.
- [66] GAT J R, YAKIR D, GOODFRIEND G, et al. Stable isotope composition of water in desert plants[J]. Plant Soil, 2007, 298(1/2): 31-45.
- [67] LI S G, TSUJIMURA M, SUGIMOTO A, et al. Seasonal variation in oxygen isotope composition of waters for a montane larch forest in Mongolia[J]. Trees: Structure and Function, 2006, 20(1): 122-130.
- [68] 周盼盼, 张明军, 王圣杰, 等. 兰州城区绿化植物稳定氢氧同位素特征[J]. 生态学杂志, 2016, 35(11): 2942-2951.
- [69] 赵培培. 兰州市植物水稳定氢氧同位素特征及常见植物吸水深度研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2017.
- [70] YU W S, XU B Q, LAI C T, et al. Influences of relative humidity and Indian monsoon precipitation on leaf water stable isotopes from the southeastern Tibetan Plateau[J]. Geophys Res Lett, 2014, 41(21): 7746-7753.
- [71] HOFFMANN G, CUNTZ M, WEBER C, et al. A model of the earth's dole effect[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2004, 18(1), doi: 10.1029/2003GB002059.
- [72] GAO L, ZHENG M, FRASER M, et al. Comparable hydrogen isotopic fractionation of plant leaf wax *n*-alkanoic acids in arid and humid subtropical ecosystems[J]. Geochim, Geophys, Geosyst, 2014, 15(2): 361-373.
- [73] LEE X, SMITH R, WILLIAMS J. Water vapor $^{18}O/^{16}O$ isotope ratio in surface air in New England, USA[J]. Tellus B, Chem Phys Meteorol, 2006, 58(4): 293-304.
- [74] LAI C T, EHLERINGER J R, BOND B J, et al. Contributions of evaporation, isotopic non-steady state transpiration and atmospheric mixing on the $\delta^{18}O$ of water vapour in Pacific Northwest coniferous forests[J]. Plant Cell Environ, 2006, 29(1): 77-94.
- [75] FARQUHAR G D, CERNUSAK L A. On the isotopic composition of leaf water in the non-steady state[J]. Funct Plant Biol, 2005, 32(4): 293-303.