

土壤水稳定同位素研究进展^①

马雪宁, 张明军*, 李亚举, 马潜, 李小飞

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要: 本文从影响土壤水稳定同位素变化的因素、时空变化规律以及“土壤-植物-大气”界面水分转化和循环过程等方面综述了国内外土壤水同位素研究的主要成果, 认为同位素方法在研究土壤水运移、降水入渗及土壤蒸发问题上优势比较明显, 并且有助于从宏观和微观上阐明土壤水的特征及其运动规律; 指出了当前土壤水分同位素研究存在的问题和今后研究的重点, 并对同位素技术与方法在土壤水中应用前景进行了展望。

关键词: 土壤水; 稳定同位素; 影响因素; 时空变化

中图分类号: S153.5; S153.1; X142

土壤水是农业和自然植被所需水的主要来源^[1-2], 维持着全球初级生产力形成的能量平衡和物质传输^[3]。研究土壤水稳定同位素特征对于土壤水补给机理、水分的再分配机制^[4]、养分及污染物^[5]在土壤中的运移等都具有重要的意义^[6-7]; 且土壤水和地下水在调节稳定同位素的季节变化、维持一个地区水体稳定同位素平衡中起着重要的作用, 这都充分说明开展土壤水研究的必要性。自 1953 年 Dansgaard 对大气降水中的 ¹⁸O 进行研究以来^[8-9], 到 20 世纪 60 年代同位素示踪法研究水流运动问题得到了发展。尤其在最近 20 年里, 稳定同位素技术作为一项新的比较成熟的技术在水文地质的各个领域得到了广泛的应用, 在土壤水分的利用和运移研究中也应用了同位素方法, 并取得了良好的效果。

土壤水稳定同位素变化受大气降水中稳定同位素、地表蒸发、水分在土壤中的水平迁移和垂直运动、植被类型以及人类活动等多种因素的影响。因此, 水中稳定同位素可以作为一种天然的示踪剂来追踪降水-土壤水-地下水之间的转化乃至“土壤-植物-大气”界面的输送和循环过程。利用土壤水中稳定同位素的变化提取有关水在土壤中的迁移信息^[7], 并从微观上对土壤水分的性质、成因、植物对土壤水分的利用及其土壤水分的运移规律进行研究。现今, 土壤水同位素研究虽然取得了一定的进展, 但受到土壤水提取技术、取样量和测试手段的限制, 土壤水稳定同位素研

究的进展还是相当缓慢。以前都是针对某一特定地区从相对小的尺度范围进行研究, 很难从本质上揭示土壤水稳定同位素时空变化规律。因此, 加强土壤水稳定同位素变化特征研究对掌握土壤水运移机制、地下水污染过程、“土壤-植物-大气”界面水循环原理、正确评价水资源和合理利用水资源以及为解决实际的水资源问题特别是干旱区植物用水机制、生态需水、植被恢复等关键性问题具有重要的意义, 在生态环境功能优化中也起着重要的指导作用。

1 研究方法

随着科学的发展和各国对土壤水同位素研究的陆续展开, 对土壤水同位素研究的途径和方法也逐渐得到了完善和多样化, 相应的土壤水提取装置和土壤水同位素测定仪器也得到了快速的发展。

1.1 土壤水分提取方法

土壤水的提取是土壤水同位素研究的前提条件, 为获得有效的结果并从土壤中提取尽可能多的水分, 选择合适的土壤水提取技术显得特别重要。目前关于土壤水提取方法研究已相对成熟, 王涛和包为民等^[10]对各种原有提取方法的优缺点作了很详细的描述。虽然原有的提取方法仍是可取的, 但近几年国内外也大量开展了提取土壤水分的方法和仪器的研制。通过广泛选材、多次测验, 于 2010 年成功研制出 LI-2000 液态水真空抽提设备, LI-2000 使用更为方便, 提取率亦

①基金项目: 国家自然科学基金项目(40701035)和教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0019)资助。

* 通讯作者(mjzhang2004@163.com)

作者简介: 马雪宁(1987-), 女, 甘肃镇原县人, 硕士研究生, 主要从事同位素地球化学方面的研究。E-mail: mxn1987.good@163.com

高，是一种很有前途的提取土壤水分的设备。

1.2 同位素测定方法

自然界中的氢氧稳定性同位素是内陆水循环的有效示踪剂，并能在水文学、气象学以及生态学过程研究中，提供不同尺度（地点尺度、区域尺度和大陆尺度）的独特视角。19 世纪 40 年代，同位素质谱仪的发明为在地球科学中应用稳定同位素数据带来了可能^[11]。但相对高昂的价格和操作技巧的严格要求限制了同位素质谱仪在一般研究者中更广泛的应用。后来出现的相对便宜和简易操作的激光光谱同位素分析仪，但在非常多的研究中，还不能提供足够的精度（尤其是 $\delta^{18}\text{O}$ ）。近来 Los Gatos Research Inc 研究开发了一

种新的激光光谱仪器，降低了测量成本和操作技巧的要求，在土壤水稳定同位素研究中得到了广泛的使用。

20 世纪 90 年代后期，随着对土壤剖面和土壤水运移规律研究的深入，利用数值模型研究土壤水同位素变化有了很大的进展，但受到土壤水取样方法的限制和研究所需水样量的不足，进而导致土壤水全面而系统的地球化学研究无法开展。所以，加强土壤水取样方法的探讨及土壤水同位素特征的研究，采用多种研究途径和方法，以期全面地揭示土壤水的本质特征及运移规律。表 1 列出了研究土壤水同位素变化（降水入渗方式、土壤水停留时间）的部分常用模型。

表 1 土壤水同位素变化的常用模型

Table 1 Common models of soil water stable isotope changes

模型名称	公式	参数说明
活塞流模型 (PFM)	$C_{out}(t) = C_{in}(t - \tau)\exp(-\lambda\tau)$	
指数模型 (EM)	$g(t') = t_i^{-1} \exp(-t'/t_i)$	t_i 为示踪剂的传输时间
指数活塞模型 (EPM)	$g(t') = \begin{cases} \eta/t_i \exp(-\eta t'/t_i + \eta - 1) & \text{for } t' \geq t_i(1 - \eta^{-1}) \\ 0 & \text{for } t' \leq t_i(1 - \eta^{-1}) \end{cases}$	η 是流动系统总体积与传输时间按指数分布的水体积之比
弥散模型 (DM)	$g(t') = (4\pi t'^3 / pe t_i)^{-1/2} \exp[-(1 - t'/t_i)^2 t_i pe / t']$	Pe 为 Peclet 数, $Pe^1 = D/vx$; D 为弥散系数, v 是沿水流方向的稳定平均流速; x 为含水介质的某种特征长度
线性模型 (LM)	$g(t') = \begin{cases} 1 & \text{for } t' \leq 2t_i \\ 2t_i & \text{for } t' \geq 2t_i \\ 0 & \text{for } t' \geq 2t_i \end{cases}$	
线性活塞流模型 (LPM)	$g(t') = \begin{cases} \eta/2t_i & \text{for } t_i(1 - \eta^{-1}) \leq t' \leq t_i(1 + \eta^{-1}) \\ 0 & \text{for } \text{other } t' \end{cases}$	

最近许多学者利用集中参数模型^[12-13]、正弦曲线模型^[14]研究了土壤水的停蓄机制并估计了土壤水平均的停留时间或运移次数。在数学模型的应用方面，出现了多个模型的联合或耦合运用，获得了对土壤水系统特征更全面的认识，模型联合或耦合运用的潜力，是未来土壤水乃至“五水转化”研究中应该受到重视的内容。

2 影响土壤水氢氧稳定同位素变化的因素

2.1 自然因素

2.1.1 大气降水 由于不同区域范围内降水中稳定同位素特征与影响因子之间的关系存在差异，使得降水中稳定同位素组成随时空发生变化，并产生同位素浓度随纬度、高度、大陆的增加而减少的系列效应^[15]。土壤水最初来自大气降水，降水过程中组成水分

子的氢、氧同位素丰度产生变化，重的稳定同位素成分优先降落，使得表层土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 受降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响，表现出和降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 比较一致的变化趋势，而随深度的增加土壤水受降水的影响减弱，以至土壤水同位素变化与降水同位素没有明显的相关性。这一现象在国内外许多学者^[16-17]的研究中得到了证明，但是不同的研究区域由于地表特征、地质条件等因素的不同，土壤水对大气降水效应的差异可能得出截然不同的结果，如 Tang 等^[18-19]通过研究不同季节降水对土壤水稳定同位素组成的影响，发现土壤水没有降水同位素变化明显。

2.1.2 降水入渗 利用环境同位素可研究降水入渗中土壤水分运动，探索土壤对水文规律的影响。降雨入渗土壤水稳定同位素变化国外研究较多^[7,20-21]，而国内研究相对较少。对于土壤水研究中应用最多的是

碳、氮、氢、氧等环境同位素,国内外的一些学者用重水 (D_2O 、 T_2O)^[22]、氘 (3H)、氘 (2H) 作为追踪剂对土壤水的入渗规律及真实速度进行了实验研究。降水入渗到土壤中与原有土壤水发生混合,并受蒸发的影响使得土壤水同位素含量不断地富集,土壤的垂直剖面会形成 δD 和 $\delta^{18}O$ 的峰值逐渐向下推进的情况^[23-25]。Gazis 等^[7,18,26],通过研究土壤水和降水中的 δD 和 $\delta^{18}O$ 变化,发现表层土壤由于受到蒸发的影响使得浅层土壤水 (<50 cm 土壤水) 富集 ^{18}O ,同时也根据深部土壤水稳定同位素数据发现降水通过优势流方式入渗到土壤深部。随着季节的变化降水中稳定同位素含量发生变化,并且连续性的降水事件会使土壤水呈现出不同的同位素含量变化值^[27]。目前,国内已有学者^[28]通过实验研究了降水入渗过程中土壤水同位素的变化,并用传递函数理论探讨了出流氢、氧稳定同位素组成随时间的变化规律。

2.1.3 蒸发 土壤蒸发和植物蒸腾是大陆水文循环的一个重要环节^[29]。稳定同位素如 ^{18}O 作为一种天然的示踪剂,为更好地理解土壤水运移和土壤蒸发提供了有用的信息^[30-31]。干旱环境条件下水同位素蒸发富集尤为关注^[32]。并且国内外,关于土壤蒸发与土壤水分中 δD 和 $\delta^{18}O$ 关系的研究也比较多^[9,26,33-36],并建立了有关模型^[37],根据理论计算和实际测定,发现地表蒸发是导致土壤水稳定氢、氧同位素在土壤浅层富集的主要原因,但富集的过程并非仅由蒸发引起,是众多过程综合而成,如蒸发强度、旧水和新水的混合等。蒸发主要发生在土壤的表层,蒸发时伴随着同位素的分馏轻的同位素分子优先蒸发,致使重同位素 ^{18}O 和 2H 在土壤表层附近明显地富集^[7,38-41],蒸发过程中促使重同位素在土壤中运移的机制是对流和分子扩散^[18],并在扩散作用下同位素浓度随深度呈现指数减少趋势。前人的研究也表明^[42-44],蒸发作用强度随着土壤深度的增加呈指数下降趋势,其影响作用一般都在数厘米范围内,尤其是对于像空气相对湿度较大 ($77.5\% \pm 3.2\%$)、植被茂密的地区,地表蒸发作用很弱^[2,44]。

2.1.4 植被类型 土壤水分是植物最重要和直接的水分来源。植物的蒸散作用和根系的水力提升现象^[45-48],使土壤水稳定同位素在土壤剖面上发生动态变化。水分被植物根系吸收并从根向叶移动时一般不发生同位素分馏^[15,49],但土壤水中稳定同位素浓度发生变化,主要表现为土壤剖面上的垂直变化、季节变化和年际变化。由于不同地表类型下地表蒸发条件和根系深入土壤中深浅程度的不同,导致土壤水垂向空间

变化和不同层次土壤水季节变化具有不同特征,对降水中的 δD 和 $\delta^{18}O$ 有一定的响应关系,深层土壤水稳定同位素变化则有一定滞后且变化幅度相对较小。特别是干旱、半干旱地区,植物的蒸腾作用更可能导致土壤水分中氢、氧稳定同位素的富集^[50]。关于不同植被类型条件下,土壤水稳定同位素变化研究,揭示土壤水运移机制和不同植被条件下土壤水迁移的季节变化特征的研究,国内外已有成功的事例^[6,51-55],但还是不足以解决干旱、半干旱区生态需水;植被恢复等实际性水资源问题,因此还需加强此方面的研究。

2.2 人类活动

除大气降水、地表蒸发、不同植被类型等自然因素外人类活动也对土壤水稳定同位素组成产生影响。如高密度的人口活动和高强度生产活动会造成土地硬化面增多、建筑物密度增大等引起土壤压实度发生变化。土壤压实度的增大会导致土壤大孔隙度减少,小孔隙增加,结果使土壤水分蒸发增加,土温上升,土壤的含水量随之下降,同位素分馏增大从而使同位素在表层土壤水分中富集。梁亮^[56]通过对土壤水分 $\delta^{18}O$ 变化对城市热岛指示的研究得出土壤压实度的季节变化比较平稳,在热岛地区,土壤压实度的变化和土壤水分同位素 $\delta^{18}O$ 值的变化呈负相关性;而在冷岛地区,土壤水分同位素 $\delta^{18}O$ 值的变化和土壤压实度的变化一致。

概括来讲,土壤水中稳定同位素浓度变化可能是以下原因引起的:①土壤水被大气降水稀释;②不同浓度的土壤水的混合;③大气温度、土壤温度的变化引起地表的强烈蒸发;④不同植被对土壤水的利用及植物根系的水力提升;⑤高强度生产活动和高密度的人口活动引起土壤压实度的改变等。土壤水中稳定同位素的时空变化是这些因素相互作用、综合影响的结果。所以可以用土壤水稳定同位素的变化来间接地反映气候的变化及人类活动的状况。

3 土壤水稳定同位素时空变化特征

深入了解土壤水稳定同位素的时空变化规律,有助于从时空范围分析大气降水、降水入渗、植被类型等与土壤水同位素变化的关系。土壤水稳定同位素时间变化特征,主要表现在大气降水、植被生长、蒸发强弱等引起的土壤水同位素季节性变化上;而其空间变化特征则表现在土壤垂直剖面上,有关这方面的研究也比较丰富。

3.1 土壤水稳定同位素季节变化与年际变化

土壤水稳定同位素的季节变化可以反映土壤水的

混合和迁移过程等信息，土壤水稳定同位素季节变化主要由大气降水、大气温度以及植物生长的季节变化引起。大气温度对土壤深层的温度变化影响不大，主要是引起土壤表层的温度和土壤含水量变化，最终导致同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化。随着季节的变化大气温度下降，同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈现下降的趋势，但其下降的幅度要小于气温的变化。浅层 30 cm 土壤水氢、氧同位素存在季节变化并随着季节变化呈现下降的趋势，而 60 cm 和 80 cm 处土壤水氢、氧同位素存在季节变化但季节变化平缓^[57]。Robertson 等^[58]研究了华盛顿州两个地点土壤中氧同位素的季节变化。结果表明，从夏季到冬季期间，浅层土壤水比深层土壤水同位素值高；而在春季雪融化期间浅层和深层土壤水同位素值大体相似。罗维均和王世杰^[43]对贵州荔波凉风洞大气降水、土壤水、土壤气、洞穴滴水氢、氧同位素组成进行了监测，发现土壤水与大气降水、洞穴滴水氧同位素值之间存在着大致协调同步的季节变化规律：雨季偏轻、旱季偏重；并指出这种现象可能是不同期次水混合所致，即均质化（homogenization）过程，但这种均质化过程并不完全^[59-60]，即土壤水和滴水氧同位素值的季节变化都没有消失。Hsieh 等^[61]研究也得到相似的结论。Robertson 等^[58]测定了降雨和土壤水的氧同位素组成，证实了 ^{18}O 值的差异与季节性的水文变化有关。但章新平等^[62]研究土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量的季节变化关系却发现表层土壤水不仅受下渗水的影响，而且还受根区的水量交换作用以及表面蒸发作用的共同影响，使得土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化已不清楚。

3.2 土壤水稳定同位素的空间特征

土壤水分受降水入渗补给、蒸腾蒸发消耗等影响，处于不断变化的状态。由于土壤水分补给和消耗的季节变化、地表土壤蒸发以及土壤水和地下水之间的同位素差异，使土壤水分在垂直剖面上产生同位素组成梯度（isotope composition gradients）^[63-64]。我们可以利用分层土壤水分中氢、氧稳定性同位素的分析，来研究与评价人类活动、植被变化对土壤水分时空变化的影响。

土壤剖面稳定同位素的分布特征较多地被用于研究地下水的补给机制^[64-69]。我国许多研究者^[16,51-52,70]对不同地区不同深度土壤水的稳定性同位素的变化规律进行了研究。土壤水稳定同位素变化除在土壤垂直剖面上随土壤深度增加发生有规律的变化外，处于生长期的植物根系也对其有重要的影响。徐庆等^[51]对卧龙亚高山暗针叶林中土壤剖面各层次土壤水氢稳定同位素变化进行示踪研究，结果表明土壤剖面不同层位

土壤水 δD 在表层变化最大，向下变化幅度越来越小，60 cm 以下土壤水 δD 趋于稳定，并逐渐接近地下水 δD 值；Yano 等^[71]揭示了黏土层中 ^2H 值的异质性， ^2H 值变化受降雨的影响，同时在黏土层的上下层之间发现 ^2H 值有一个显著的差异。不同深度土壤剖面水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间变化可以用来记录降水从地表向地下逐渐入渗的过程，以及受外界因素的作用地下水或深层土壤水向上运移的过程。表层土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 受降水的影响最为明显，而向下土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 受地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响增强，显示出地下水在土壤水活动中起着活跃的作用。在一些地区的研究中，表层土壤水和深层非饱和带水的 δD 值极其相近^[72-74]。后来有学者^[75-79]研究处于生长、干旱期植被的土壤水稳定同位素垂直分布时发现植物根系对土壤水分有提升现象，植物根系在潜水势梯度的作用下对水分进行了重新分配，造成同位素成分不同的水分混合所致。根据土壤含水量和土壤水分中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的时空格局，我们可以更好地了解土壤水分变化规律以及土壤水分的动力学特性，同时也为评价植被、人类活动对土壤水分的影响提供了一个有效工具。

4 “土壤-植物-大气”界面水循环过程研究

在自然界中，“五水”在不断的运动和相互转化。土壤水与大气降水、地表水、地下水以及植物水之间有着重要的联系，在物质循环和水分循环过程中发挥着重要的作用。“土壤-植物-大气”的循环模型代表了大气圈、土壤圈和生物圈之间复杂的相互作用^[30]。因此，一些研究开始关注“土壤-植物-大气”界面水循环过程^[80]。

目前，国际上已经开展了草原土壤水-植物水-植物化石中氧同位素的示踪研究^[81]，为研究土壤水氧同位素空间分布和古气候提供了理论依据^[82-83]，表明当前有关稳定氢、氧同位素的应用已不局限于“土壤-植物-大气”界面水循环过程的“五水”中某一单一方面，而是要把五水循环过程完全作为一个统一的系统进行研究。利用稳定同位素技术对“土壤-植物”、“土壤-大气”及“土-根”界面研究的报道相对较多^[84-87]，如通过测定植物木质部水分和不同层次土壤水分的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 特征来确定植物水分来源以及植物生长季节根系对水分的提升等，但是在“土-根”界面复杂的相互作用中，仅仅有少量的参数起到重要的作用^[88]。

5 存在问题和研究展望

就目前的土壤水同位素研究来看，已取得了快速

的发展。但是, 由于土壤采样和土壤水提取技术的限制, 致使土壤水同位素的研究还存在许多不足, 有待于进一步完善。存在的问题和今后的研究重点主要体现在以下几个方面:

(1) 在相当长的时期内, 土壤水同位素研究主要局限于相对小的空间尺度, 在某特定区域从点上开展, 对于大尺度、大范围的土壤水稳定同位素的时空变化规律无从解释, 不具有代表性。所以, 在不同地区、不同尺度下, 由点到面、微观到宏观地开展土壤水同位素研究是今后的重点之一, 进而揭示土壤水同位素随时空的变化规律。

(2) 用稳定同位素技术和模型模拟对土壤水的运移规律、动力学特征等研究涉及面广, 它的发展和提高将有助于对土壤水资源属性的认识、土壤水分的有效利用等方面实际问题的解决。但受土壤水取样的制约, 土壤水同位素研究进展缓慢。基于此, 土壤水取样方法的研究还须加强, 并不断提高现有模型的时空精度。

(3) 加强五水同位素组成的研究, 认识植物水分来源及水分之间的运移和转化关系, 力求揭示各界面水分转化关系及其循环机理是当前研究的热点和难点。今后, 土壤水同位素研究要从土壤水提取、模型等入手, 对各方面(土壤入渗、土壤蒸发、水分利用等)进行研究, 促使土壤水同位素研究朝着多学科、综合性、应用性的方向发展。

参考文献:

- [1] 肖德安, 王世杰. 土壤水研究进展与方向评述. 生态环境学报, 2009, 18(3): 1 182-1 188
- [2] Robock A, Vinnikov KY, Srinivasan G, Entin JK, Hollinger SE, Speranskaya NA, Liu S, Namkhai A. The global soil moisture data bank. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(6): 1 281-1 299
- [3] Gerten D, Hoff H, Bondeau A, Lucht W, Smith PC, Zaehle S. Contemporary "green" water flows: Simulations with a dynamic global vegetation and water balance model. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2005, 30(6/7): 334-338
- [4] Brooks JR, Meitner FC, Coulombe R, Gregg J. Hydraulic redistribution of soil water during summer drought in two contrasting Pacific Northwest coniferous forests. *Tree Physiology*, 2002, 22(3): 1 107-1 117
- [5] Koeniger P, Leibundgut C, Link T, Marshall JD. Stable isotope applied as water tracers in column and field studies. *Organic Geochemistry*, 2010, 41(1): 31-40
- [6] 田日昌, 陈洪松, 宋献方, 王克林, 杨青青, 孟薇. 湘西北红壤丘陵区土壤水运移的稳定性同位素特征. *环境科学*, 2009, 30(9): 2 747-2 754
- [7] Gazis C, Feng XH. A stable isotope study of soil water: evidence for mixing and preferential flow paths. *Geoderma*, 2004, 119(1/2): 97-111
- [8] Dansgaard W. The abundance of ^{18}O in atmospheric water and water vapor. *Tellus*, 1953, 5(4): 461-469
- [9] 李晖, 周宏飞. 稳定性同位素在干旱区生态水文过程中的应用特征及机理研究. *干旱区地理*, 2006, 29(6): 800-816
- [10] 王涛, 包为民, 陈翔, 施征, 胡海英, 瞿思敏. 真空蒸馏技术提取土壤水实验研究. *河海大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(6): 660-664
- [11] Nier AO. A mass spectrometer for isotope and gas analysis, *Review of Scientific Instruments*, 1947, 18(6): 398-411
- [12] Stumpp C, Stichler W, Maloszewski P. Application of the environmental isotope $\delta^{18}\text{O}$ to study water flow in unsaturated soils planted with different crops: Case study of a weighable lysimeter from the research field in Neuherberg, Germany. *Journal of Hydrology*, 2009, 368(1/4): 68-78
- [13] Maloszewski P, Maciejewski S, Stumpp C, Stichler W, Trimborn P, Klotz D. Modelling of water flow through typical Bavarian soils based on lysimeter experiments: 2. Environmental deuterium transport. *Hydrological Sciences Journal*, 2006, 51(2): 298-313
- [14] Königer P. Tracerhydrologische Ansätze zur Bestimmung der Grundwasserneubildung, *Freiburger Schriften zur Hydrologie, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg I Br*, 2003: 89
- [15] Ruppenthal M, Oelmann Y, Wilcke W. Isotope ratios of nonexchangeable hydrogen in soils from different climate zones. *Geoderma*, 2010, 155(3/4): 231-241
- [16] 田立德, 姚檀栋, Tsujimura M, 孙维贞. 青藏高原中部土壤中稳定同位素变化. *土壤学报*, 2002, 39(3): 289-294
- [17] 李晖, 蒋忠诚, 周宏飞, 王月, 崔天顺, 李艺, 罗为群. 准噶尔盆地降水、土壤水和地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 变化特征——以中国生态系统研究网络阜康站为例. *水土保持研究*, 2008, 15(5): 105-108
- [18] 王永森, 陈建生. 蒸发过程中饱和土壤水稳定同位素运移规律浅析. *四川大学学报(工程科学版)*, 2010, 42(1): 10-13
- [19] Tang K. The effect of soil hydrology on the oxygen and hydrogen isotopic compositions of plants source water. *Earth and Plane Tary Science Letters*, 2001, 185(3/4): 355-367
- [20] Phillips DL, Gregg JW. Source partitioning using stable isotopes coping with too many sources. *Oecologia*, 2003, 136(2): 261-269
- [21] Marfia AMM, Krishamurthy RV, Atekwana EA, Panton WF.

- Isotopic and geochemical evolution of ground and surface waters in a karst-dominated geological setting: A case study from Belize, Central America. *Applied Geochemistry*, 2004, 19(6): 937-946
- [22] Mali N, Urbanc J, Leis A. Tracing of water movement through the unsaturated zone of a coarse gravel aquifer by means of dye and deuterated water. *Environmental Geology*, 2007, 51(8): 1401-1412
- [23] Bengtsson L, Saxena RK, Dressie Z. Soil water movement estimated from isotope tracers. *Hydrological Sciences Journal*, 1987, 32(4): 497-520
- [24] Barnes CJ, Allison GB. The distribution of deuterium and ^{18}O in dry soils: 1. Theory. *Journal of Hydrology*, 1983, 60(1/4): 141-156
- [25] 崔军, 安树青, 徐振, 徐庆, 王中生, 刘世荣. 卧龙巴郎山高山灌丛降雨和穿透水稳定性氢氧同位素特征研究. *自然资源学报*, 2005, 20(4): 660-668
- [26] Buttle JM, Sami K. Recharge processes during snowmelt: an isotopic and hydrometric investigation. *Hydrological Processes*, 1990, 4(4): 343-360
- [27] Stumpp C, Maloszewski P, Stichler W, Fank J. Environmental isotope ($\delta^{18}\text{O}$) and hydrological data to assess water flow in unsaturated soils planted with different crops: Case study lysimeter station "Wagna" (Austria). *Journal of Hydrology*, 2009, 369(1-2): 198-208
- [28] 包为民, 王涛, 胡海英, 瞿思敏. 降雨入渗条件下土壤水同位素变化实验. *中山大学学报 (自然科学版)*, 2009, 48(6): 132-137
- [29] Zangvil A, Portis DH, Lamb PJ. Investigation of the large scale atmospheric moisture field over the Midwestern United States in relation to summer precipitation. Part II: Recycling of local evapotranspiration and association with soil moisture and crop yields. *Journal of Climate*, 2004, 17: 3283-3301
- [30] Braud I, Biron P, Bariac T, Richard P, Canale L, Gaudet JP, Vauclin M. Isotopic composition of bare soil evaporated water vapor. Part I: RUBIC IV experimental setup and results. *Journal of Hydrology*, 2009, 369(1/2): 1-16
- [31] Braud I, Bariac T, Biron P, Vauclin M. Isotope composition of bare soil evaporated water vapor. Part II: Modeling of RUBIC IV experimental results. *Journal of Hydrology*, 2009, 369(1/2): 17-29
- [32] English NB, Dettman DL, Sandquist DR, Williams DG. Past climate changes and ecophysiological responses recorded in the isotope ratios of saguaro cactus spines. *Oecologia*, 2007, 154(2): 247-258
- [33] Braud I, Bariac T, Gaudet JP, Vauclin M. SiSPAT-Isotope, a coupled heat water and stable isotope (H_2O and H_2^{18}O) transport model for bare soil. Part I. Model description and first verifications. *Journal of Hydrology*, 2005a, 309(1/4): 277-300
- [34] 刘文杰, 李红梅, 张一平, 刘玉洪, 段文平. 热带季节雨林土壤蒸发的稳定性同位素分析//中国气象学会 2005 年年会论文集. 北京: 中国气象学会, 2005
- [35] 王涛, 包为民, 胡海英, 瞿思敏, 黄琳煜. 氢氧稳定同位素在土壤蒸发规律研究中的应用. *中国农村水利水电*, 2008(4): 21-25
- [36] Marc V, Didon-Lescot JF, Michael C. Investigation of the hydrological processes using chemical and isotopic tracers in a small Mediterranean forested catchment during autumn recharge. *Journal of Hydrology*, 2001, 247(3/4): 215-229
- [37] Haverd V, Cuntz M, Griffith D, Keitel C, Tardos C, Twining J. Measured deuterium in water vapour concentration does not improve the constraint on the partitioning of evapotranspiration in a tall forest canopy, as estimated using a soil vegetation atmosphere transfer model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(6): 645-654
- [38] McCole AA, Stern LA. Seasonal water use patterns of *Juniperus ashei* on the Edwards Plateau, Texas, based on stable isotopes in water. *Journal of Hydrology*, 2007, 342(3/4): 238-248
- [39] Wenniger J, Beza DT, Uhlenbrook S. Experimental investigations of water fluxes within the soil-vegetation-atmosphere system: Stable isotope mass-balance approach to partition evaporation and transpiration. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2010, 35(13/14): 565-570
- [40] Depaolo DJ, Conrad ME, Maher K, Gee GW. Evaporation effects on oxygen and hydrogen isotope in deep vadose zone pore fluids at Hanford, Washington. Published in *Vadose Zone Journal*, 2004, 3: 220-232
- [41] Mook WG. Introduction to Isotope Hydrology: stable and radioactive isotopes of hydrogen, oxygen and carbon. Taylor & Francis Group, 2005: 226
- [42] Gowing JW, Konukcu F, Rose DA. Evaporative flux from a shallow watertable: The influence of a vapour-liquid phase transition. *Hydrology*, 2006, 321(1/4): 77-89
- [43] 罗维均, 王世杰. 贵州凉风洞大气降水-土壤水-滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 信号传递及其意义. *科学通报*, 2008, 53(17): 2071-2076
- [44] Yamanaka T, Inoue M, Kaihotsu I. Effects of gravel mulch on water vapor transfer above and below the soil surface. *Agricultural Water Management*, 2004, 67(2): 145-155
- [45] Wang P, Song XF, Han DM, Zhang YH, Liu X. A study of root

- water uptake of crops indicated by hydrogen and oxygen stable isotopes: A case in Shanxi Province, China. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(3): 475-482
- [46] Sekiya N, Yano K. Water acquisition from rainfall and groundwater by legume crops developing deep rooting systems determined with stable hydrogen isotope compositions of xylem waters. *Field Crops Research*, 2002b, 78(2/3): 133-139
- [47] Sekiya N, Yano K. Do pigeon pea and sesbania supply groundwater to intercropped maize through hydraulic lift? Hydrogen stable isotope investigation of xylem waters. *Field Crops Research*, 2004, 86(2/3): 167-173
- [48] Yano K, Sekiya N, Samson BK, Mazid MA, Yamauchi A, Kono Y, Wade LJ. Hydrogen isotope composition of soil water above and below the hardpan in a rainfed lowland rice field. *Field Crops Research*, 2006, 96(2/3): 477-480
- [49] Fischer MJ. Ichasm, a flexible land-surface model that incorporates stable water isotopes. *Global and Planetary Change*, 2006, 51(1/2): 121-130
- [50] 严昌荣, 白涛, 蔡绍平, 叶鸣. 稳定同位素技术在植特水分研究中的应用. *湖北林业科技*, 1998(4): 29-33
- [51] 徐庆, 刘世荣, 安树青, 蒋有绪, 林光辉. 四川卧龙亚高山暗针叶林土壤水的氢稳定同位素特征. *林业科学*, 2007, 43(1): 8-14
- [52] 侯士彬, 宋献方, 于静洁, 刘鑫, 张广英. 太行山区典型植被下降水入渗的稳定同位素特征分析. *资源科学*, 2008, 30(1): 86-92
- [53] Kowaljow E, Fernández RJ. Differential utilization of a shallow-water pulse by six shrub species in the Patagonian steppe. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(2): 211-214
- [54] Gehrels JC, Peeters JEM, De Vries JJ, Dekkers M. The mechanism of soil water movement as inferred from O-18 stable isotope studies. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 1998, 43(4): 579-594
- [55] McCole AA, Stern LA. Seasonal water use patterns of *Juniperus ashei* on the Edwards Plateau, Texas, based on stable isotopes in water. *Journal of Hydrology*, 2007, 342(3/4): 238-248
- [56] 梁亮. 土壤水分 $\delta^{18}\text{O}$ 变化对城市热岛的指示研究(硕士学位论文). 武汉: 华中农业大学, 2007
- [57] Lee KS, Kim JM, Lee DR, Kim YJ, Lee DH. Analysis of water movement through an unsaturated soil zone in Jeju Island, Korea using stable oxygen and hydrogen isotopes. *Journal of Hydrology*, 2007, 345(3/4): 199-211
- [58] Robertson JA, Gaziz CA. An oxygen isotope study of seasonal trends in soil water fluxes at two sites along a climate gradient in Washington state(USA). *Journal of Hydrology*, 2006, 328(1/2): 375-387
- [59] Cruz Jr FW, Karmann I, Jr OV, Burns SJ, Ferrari JA, Vuille M, Sial AN, Moreira MZ. Stable isotope study of cave percolation waters in subtropical Brazil: Implications for paleoclimate inferences from speleothems. *Chemistry Geology*, 2005, 220(3/4): 245-262
- [60] Beynen PV, Febroriello P. Seasonal isotopic variability of precipitation and cave drip water at Indian Oven Cave, New York. *Hydrological Processes*, 2006, 20(8): 1793-1803
- [61] Hsieh JCC, Chadwick OA, Kelly EF, Sain SM. Oxygen isotopic composition of soil water: Quantifying evaporation and transpiration. *Geoderma*, 1998b, 82: 269-293
- [62] 章新平, 王晓云, 杨宗良, 牛国跃, 谢自楚. 利用 CLM 模拟陆面过程中稳定水同位素季节变化. *科学通报*, 2009, 54(15): 2233-2239
- [63] Cook PG, Grady APO. Determining soil and ground water use of vegetation from heat pulse water potential and stable isotope data. *Oecologia*, 2006, 148(1): 97-107
- [64] Yakir D, Sternberg LSL. The use of stable isotopes to study ecosystem gas exchange. *Oecologia*, 2000, 123(3): 297-311
- [65] 章新平, 姚檀栋, 田立德, 刘晶淼. 乌鲁木齐河流域不同水体中的氧稳定同位素. *水科学进展*, 2003, 14(1): 50-56
- [66] Burger HM, Seiler KP. Evaporation from soil-water under humid climate conditions and its impact on deuterium and oxygen-18 concentrations in groundwater. *Isotope Techniques in Water Resources Development*. Vienna: The International Atomic Energy Agency, 1992: 647-678
- [67] 张应华, 仵彦卿, 温小虎, 苏建平. 环境同位素在水循环研究中的应用. *水科学进展*, 2006, 17(15): 738-747
- [68] 刘苏峡, 张士锋, 刘昌明. 黄河流域水循环研究的进展和展望. *地理研究*, 2001, 20(3): 257-263
- [69] 徐学选, 张北赢, 田均良. 黄土丘陵区降水-土壤水-地下水转化实验研究. *水科学进展*, 2010, 21(1): 17-22
- [70] 许士国, 刘盈斐, 孙万光. 扎龙湿地包气带土壤水分垂直运移的稳定同位素研究. *水文*, 2006, 26(5): 1-6
- [71] Yano K, Sekiya N, Samson BK, Mazid MA, Yamauchi A, Kono Y, Len JW. Hydrogen isotope composition of soil water above and below the hardpan in a rainfed lowland rice field. *Field Crops Research*, 2006, 96(2/3): 477-480
- [72] 李嘉竹, 刘贤赵. 氢氧稳定同位素在 SPAC 水分循环中的应用研究进展. *中国沙漠*, 2008, 28(4): 787-794
- [73] Turner JV, Arad A, Johnston CD. Environmental isotope hydrology of salinized experimental catchments. *Hydrology*, 1987,

- 94(1/2): 89-108
- [74] Burgess SSO, Adams MA, Turner NC, Ong CK. The redistribution of soil water by tree root systems. *Oecologia*, 1998, 115(3): 306-311
- [75] Caldwell MM, Richards JE. Hydraulic lift: Water efflux from upper roots improves effectiveness of water uptake by deep roots. *Oecologia*, 1989, 79(1): 1-5
- [76] Dawson TE. Hydraulic lift and water use by plants: implications for water balance, performance and plant-plant interactions. *Oecologia*, 1993, 95(4): 565-574
- [77] Ludwig F, Dawson TE, Kroom HD, Berendse F, Prins HHT. Hydraulic lift in *Acacia tortulifera* on an East African savanna. *Oecologia*, 2003, 134(3): 293-300
- [78] Brandes E, Wenninger J, Koeniger P, Schindler D, Rennenberg H, Leibundgut C, Mayer H, Gessler A. Assessing environmental and physiological controls over water relations in a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stand through analyses of stable isotope composition of water and organic matter. *Plant Cell Environment*, 2007, 30(1): 113-127
- [79] Maricle BR, Zwenger SR, Lee RW. Carbon, nitrogen, and hydrogen isotope ratios in creekside trees in western Kansas. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, 71(1): 1-9
- [80] Petropoulos G, Wooster MJ, Carlsson TN, Kennedy MC, Scholze M. A global Bayesian sensitivity analysis of the 1d SimSphere soil-vegetation-atmospheric transfer (SVAT) model using Gaussian model emulation. *Ecological Modelling*, 2009, 220(19): 427-440
- [81] Webb EA, Longstaffe FJ. The relationship between phytolith and plant-water $\delta^{18}\text{O}$ values in grasses. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(8): 1437-1449
- [82] Webb EA, Longstaffe FJ. Climatic influences on the oxygen isotopic composition of biogenic silica in prairie grass. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(11): 1897-1904
- [83] 隋玉柱. 黄土不同指标的古气候环境意义探讨. *中国沙漠*, 2006, 26(1): 1-19
- [84] Li SG, Tsujimura M, Sugimoto A, Sasaki L, Yamanaka T, Davaa G, Oyunbaatar D, Sugita M. Seasonal variation in oxygen isotope composition of waters for a montane larch forest in Mongolia. *Trees - Structure and Function*, 2006, 20(1): 122-130
- [85] Romero-Saltos H, Sternberg LSL, Moreira MZ, Nepstad DC. Rainfall exclusion in an eastern Amazonian forest alters soil water movement and depth of water uptake. *American Journal of Botany*, 2005, 92(3): 443-455
- [86] Durand JL, Bariac T, Ghesquiere M, Biron P, Richard P, Humphreys M, Zwierzykowski Z. Ranking of the depth of water extraction by individual grass plants, using natural ^{18}O isotope abundance. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 60(1): 137-144
- [87] West AG, Patrickson SJ, Ehleringer JR. Water extraction times for plant and soil materials used in stable isotope analyses. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2006, 20(8): 1317-1321
- [88] Bruckler L, Lafolie F, Doussan C, Bussièrès F. Modeling soil-root water transport with non-uniform water supply and heterogeneous root distribution. *Plant Soil*, 2004, 260(1/2): 205-224

Research Advances on Stable Isotopes in Soil Water

MA Xue-ning, ZHANG Ming-jun, LI Ya-ju, MA Qian, LI Xiao-fei

(College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: This paper summarized the main advances in soil water isotopes by reviewing the influential factors on the changes in soil water stable isotopes, spatial and temporal variation and water transformation and cycle processes at the "soil - plant - atmosphere" interface. Isotopes had obvious advantages in the investigation of soil water movement, rainfall infiltration and soil evaporation and could clarify the macro and micro characteristics and movement of soil water. This paper also indicated the current problems and the future focus in soil water isotope study and prospected the application of the isotope technology or method in the soil water.

Key words: Soil water, Stable isotopes, Influential factors, Temporal-spatial variation