

氢氧稳定同位素技术在土壤水研究上的应用进展

徐英德, 汪景宽, 高晓丹, 张玉龙

(沈阳农业大学土地与环境学院, 国家发改委土壤资源高效利用工程实验室, 沈阳 110866)

摘要: 土壤水是水资源的重要组成部分, 是连接自然界水循环的重要环节; 一个地区的土壤水资源状况与当地作物生产、生态环境质量以及社会经济发展息息相关。应用稳定氢、氧同位素技术可从宏观和微观的结合上把握土壤水循环过程, 阐明其相关机理; 近年来这一技术有了长足进步, 正在逐渐发展成为研究土壤水循环特别是探究土壤水分运移和转化规律的有效手段。在简述土壤水氢、氧同位素基本知识的基础上, 从水的地球化学循环原理出发, 讨论影响土壤水氢、氧同位素富集的因素, 着重介绍了土壤水循环研究中的同位素技术的要点和特点, 并对这一研究领域未来的发展进行了展望。

关键词: 土壤水; 同位素; 地球化学

中图分类号: S151.9; S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)03-0001-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.001

Application of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Techniques on Soil Water Research: A Review

XU Yingde, WANG Jingkuan, GAO Xiaodan, ZHANG Yulong

(College of Land and Environment, National Engineering Laboratory for

Efficient Use of Soil and Fertilizer Resources, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866)

Abstract: Soil water is an important part of water resources and water cycle in nature. Moreover, the soil water condition is closely related to local crop production, eco-environmental quality and social-economic development. The soil water cycle and its mechanism can be explored by the application of stable hydrogen and oxygen isotope techniques from the both the macro and micro view. In recent years, the technology has gradually become an effective method for soil water cycle, especially for water migration and transformation. In this paper, the basic knowledge of hydrogen and oxygen isotopes in soil was systematically introduced. Then, the driving forces of hydrogen and oxygen isotope enrichment were analyzed based on the geochemical cycle of water, and the key points of isotope technique for soil water cycle were discussed. Finally, the future research was prospected.

Keywords: soil water; isotope; geochemistry

水资源问题一直受到国内外的广泛关注^[1]。土壤水作为一个地区水资源的重要组成部分, 是联系大气水、地下水、地表水和生物水(植被)的纽带, 因而成为影响区域水循环的关键一环^[2-5]; 对于农业而言, 它与农田降水和灌溉水分入渗、地表径流和土壤蒸发、土层蓄水与深层渗漏、作物蒸腾与植被覆盖等因素密切相关, 决定着农田生产力的高低, 是重要的农业自然资源。另一方面, 土壤水也是最为重要、最为活跃的土壤肥力因子; 它既直接决定着对植物生长的水分供应, 还左右着土壤中空气和温度以及氧化还原状况、盐分与养分积累与输移过程、养分形态以及生物

活性等多种条件。尽管土壤水如此重要, 但它受降水、蒸发和地形地貌、地面气温和风速、生物吸收利用等多种因素影响而易于发生改变^[2], 使得在不同尺度上及时掌握土壤水数量、空间分布变化一直相当困难。特别是在更加关注生态与环境问题的今天, 人们需要从宏观到微观尺度的结合上把握自然界水循环过程, 如作物吸收利用水的来源及其构成、全球范围内受气候变暖的影响水循环路径的改变等等, 致使深入、全面地掌握土壤水运移规律、把握其本质特征更为重要、迫切。

由于土壤水问题的复杂性和限于研究手段的不

足,以往研究绝大多数都集中在土壤水的数量,或者基于土壤水的物理性质而进行,如土壤水分的含量增减、区域土壤水资源储量盈亏、土壤持水能力的改变、土壤水分与盐分运移、土壤水量平衡与农田水分利用效率的计算乃至土壤水动力学及数学模拟模型建立与应用等^[6]。相应的研究方法主要是测定土壤中水分的数量及其能量状态,如田间土壤含水量监测、土壤水分通量计算、蒸渗仪法观测水分收支、数值模拟法求算水分剖面分布等,都是测定土壤水分数量的宏观变化而不能把握其具体来源与去向^[4],难于追踪土壤中水分的某一“质点”。自 1953 年 Dansgaard^[7] 研究大气降水的¹⁸O 特征后,基于氢、氧稳定同位素的地球化学方法被逐步引入到土壤水的研究,为深入认识土壤水分的运移、转化机理敞开了新的大门^[8]。该方法利用水分子中氢、氧稳定同位素的指示作用^[6,9],通过追踪稳定性同位素运动“轨迹”掌握土壤水的迁移信息,进而可以研究不同空间尺度土壤水运移规律^[10]。然而,由于土壤组成复杂以及非均质性存在^[11],致使这一方法在土壤水研究中的应用受到限制。近年来,随着同位素理论与技术发展,稳定同位素方法在土壤水或陆地水文学上的应用逐渐增加,国内也陆续有一些关于运用氢、氧同位素研究土壤水循环方面的文献综述发表,内容包括同位素示踪的原理及方法^[12]、影响土壤水同位素丰度的因素^[13]、植物水分利用^[14-15]、生态水文过程^[16]以及水碳耦合效应^[17]等。但就土壤水分运移、水量平衡、水循环过程而言,无论是原理、还是方法乃至具体技术要点,其介绍与讨论都不够全面。

基于此,本文广泛收集文献资料,对近年来稳定氢、氧同位素在土壤水分方面的应用研究情况进行梳理,在简要说明氢氧同位素概念及其在土壤水地球化学循环上应用原理的基础上,介绍了相关研究进展,重点讨论了影响土壤水氢、氧同位素富集的因素及应用情况,并对这一技术的发展趋势进行了展望。

1 用于土壤水研究的同位素技术原理

1.1 氢、氧同位素

同位素是指具有相同原子序数(即质子数相同)而质量不同(中子数不同)的同一化学元素,这样的质量不同的化学元素互为同位素。同位素又有稳定同位素和放射性同位素之分;稳定同位素不具有放射性、性质稳定而不会产生放射性污染^[14],如目前被广泛应用于土壤科学研究的¹³C、¹⁵N 等。放射性同位素的原子核则很不稳定,会不间断地、自发地放射出射线,直至变成另一种稳定同位素。自然界水(H₂O)中氢(H)和氧(O)具有同位素。氢元素主要有¹H(H)、²H(D)和³H(T)3 种同位

素,其中¹H 和²H 为稳定同位素,³H 为放射性同位素;氧元素主要有¹⁶O、¹⁷O 和¹⁸O 3 种同位素,均为稳定同位素。自然界中氢、氧稳定同位素的平均丰度¹H 和²H 为 99.984% 和 0.0156%,而¹⁶O、¹⁷O 和¹⁸O 则分别为 99.759%,0.037%,0.204%(VSMOW)^[18]。

1.2 利用氢、氧同位素研究土壤水地球化学循环的基本原理

不同时间、不同空间自然界土壤水的氢、氧同位素丰度可能不同,而这种差异产生于同位素效应^[19]。所谓同位素效应是指同一元素、不同同位素原子(或分子)之间由于其质量或自旋等核性质不同而造成的物理和化学性质相异的现象;同位素分馏特征值,即某一元素的同位素在不同物质(物相)间的分配比例是表达该同位素效应的重要参数之一^[12]。正是由于自然界水体同位素丰度时空变异存在,才使得通过测定水体中氢、氧同位素丰度来定量地区分水体来源成为可能^[20]。

由于自然界水体中氢、氧同位素的质量不同,蒸发、降落和渗透等水循环环节都会有同位素分馏发生^[21-22]。通常表层土壤中的水分接触大气的可能性大,受大气降水及蒸发的影响也就更强烈,而土壤中的水循环又受土壤本身性质(粒径、孔隙度等)的强烈影响,这就使土壤中水体同位素的分馏效应不同,从而导致土壤水中氢、氧同位素分布表现出时空差异(图 1)。因此,通过获得各种水体及其溶解物质中的有关氢、氧同位素的信息,就可以对该水体的来源、赋存条件及循环机理等进行深入探讨^[23],并能够对大气降水—土壤水—地下水相互转化以及土壤—植物—大气界面间的水循环过程做系统研究^[13]。由于自然界中水的氢氧稳定性同位素在常态下较其放射性同位素性质稳定,且测定操作方便,故将²H 和¹⁸O 作为示踪剂用于土壤圈水循环过程研究是十分适宜的^[24]。

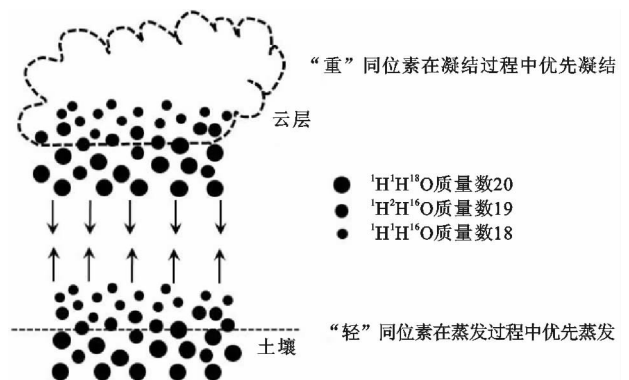


图 1 自然界水体中氢氧稳定同位素的分馏过程

自然界中某一元素 2 种同位素丰度差异用 R 值表示; R 值被定义为该元素重同位素丰度与轻同位素丰度之比,如¹⁸O/¹⁶O、²H/¹H 等。由于轻同位素的相对丰度很高,往往远大于重同位素的相对丰度,这

使得 R 值数值很小,使用不方便,故在实际工作中常常采用 δ 值来表示样品中同位素数量的多寡; δ 值是同一同位素在样品中的 R 值与在标准物质中的 R 值之差相对于该同位素在标准物质中的 R 值的千分比,其表达式为^[18,25]:

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

式中: R_{sample} 和 R_{standard} 分别为样品和国际通用标准物质中某元素 2 种同位素的丰度比。

测定自然界水体氢、氧稳定同位素丰度,比较不同时间、空间位置水体的稳定同位素丰度值,可以对该时空范围内水体的运动方向、速度、数量等做出判断。

1.3 用于土壤水研究的氢、氧稳定同位素方法的类别

用于土壤水研究的稳定同位素方法大体可以分为 2 类:一类是基于地球化学原理的自然丰度法;另一类则是将经过富集后的同位素制剂作为示踪剂添加到土壤中的人工添加法。自然丰度法是基于自然界水体同位素自然丰度的时空差异而建立起来的,该类方法简单、便捷、可操作性强,是目前人们用稳定同位素研究自然界水循环、土壤水地球化学过程的主要方法。人工添加法是向土壤水中添加经过人工富集的氢、氧同位素示踪剂,通过观测示踪剂行踪掌握该水体的运移轨迹^[26],进而明确水体运移过程、去向,并可以探讨水分运移发生机理。该类方法目的性强,试验条件可控,得到的结果精确,但由于试验材料较难获得、试验成本较高等方面的因素,致使该方法的应用受到限制。

1.4 土壤水样品的采集和氢、氧稳定同位素的测定

事实上自然界土壤水中的氢、氧稳定同位素丰度对环境变化极其敏感,测定过程还要避免水分蒸发和防止水样受到污染,因此,用于同位素地球化学循环研究的土壤水样品采集、测试都有严格要求^[4]。土壤水分样品采集目前有田间直接采集(非破坏性采样)和实验室提取 2 种方法。现场直接采集适用于土壤含水量较高的情况;实验室提取又有挤榨法、离心法、真空干燥法和蒸馏法等多种^[27]。挤榨法和离心法对水同位素的组成影响较小,而真空干燥法和蒸馏法则水分提取充分,能将大部分游离的水分全都提取出来。王涛等^[28]分析比较多种提取方法后发现,真空蒸馏法的土壤水提取效率接近 100%,且可避免受到其他物质污染的影响。此外,最近发明并开始使用的 LI-2000 液态水真空抽提泵等设备也使土壤水样品采集变得更为便利^[12]。

目前,土壤水氢、氧同位素的测定主要使用同位素质谱仪或激光同位素分析仪进行^[13,17]。刘文茹等^[29]比对了激光同位素分析仪和质谱仪的测定效

果,结果表明在土壤水未受到有机物污染条件下,激光同位素分析仪可以代替质谱仪用于水稳定性同位素的测定,可以获得满意的测定结果。

2 影响土壤水同位素自然丰度的因素

2.1 降水及入渗

大气降水及降水后的入渗过程导致水分在土壤中运移,进而使土壤水中的氢、氧同位素丰度产生差异。首先,地区不同影响降水中氢、氧同位素丰度的因素各异,导致土壤水中氢、氧同位素丰度空间分布不同;其总体规律是纬度和海拔越高、越偏向内陆,降水中²H、¹⁸O 同位素丰度越低^[30]。降水中同位素的空间变化规律直接影响土壤中氢、氧同位素在不同空间尺度上的富集差异。其次,就降水过程而言,由于同位素在空中被分馏,使得重氢、重氧同位素优先在土壤表层被富集,而随着土层加深其受到降水及入渗因素影响的富集效应越来越小^[31-32]。然而,不同研究位点地质条件及土壤特征不同,土壤水氢、氧同位素对大气降水的响应亦明显不同,Tang 等^[33]在研究中并未发现土壤水同位素丰度随降水地点不同发生有规律的变化。再次,降水入渗进入土壤的水分与原有土壤水发生混合,使得氘和¹⁸O 值土壤剖面分布出现峰值并逐渐向下推进是降水同位素进入土壤后运移变化的又一特征^[34]。

2.2 蒸发

地面水分蒸发过程同样是造成土壤水氢、氧稳定同位素剖面分布分异的重要原因^[32,35]。地面水分蒸发主要发生在表层土壤数厘米范围内^[36],其强度随土层深度增加而迅速降低。已有学者^[13,24]通过理论计算和实际监测研究认为,在影响表层土壤水的重同位素富集过程的众多因素中(入渗、新水与旧水混合、蒸发等),地表蒸发是主导因素。土壤性质不同,由蒸发引起的水分同位素分馏的机制也会有所不同;在砂土上氢、氧同位素分馏遵循瑞利规律,而在黄土上水分蒸发速率随着土壤含水率降低而降低,土壤水中氢、氧同位素分馏数据点离瑞利分馏曲线越来越远^[37]。此外,蒸发还会促使重同位素通过对流和分子扩散机制在土壤中运移^[38],这是因为受扩散作用影响,重氢、重氧同位素丰度随土层深度增加而呈指数函数形式减少所致。程立平等^[39]归纳了不同利用类型土地土壤水的同位素特征,发现浅层土壤水同位素受降水和蒸发等因素的综合作用随时间推移而发生剧烈变化。

2.3 植被

植被覆盖条件通过影响地表水分蒸发和降水入渗而影响土壤水的同位素数量。已有研究^[40]发现,荒草地较刺槐、侧柏林地更有利于水中重氢、重氧同位素在土壤中富集,说明地面覆盖率越低越有利于土

壤水中重同位素富集。此外,不同种类植物根系在土壤中分布不同,也会导致土壤水中氢、氧同位素的垂直分布不同,乃至季节变化相异^[13]。尤其在干旱、半干旱地区,植被蒸腾作用越强烈,对土壤水中重氢、重氧稳定同位素富集的影响也越明显^[11]。

2.4 其他因素

除降水入渗、蒸发和植被的影响外,土壤质地及其时间变化以及人为活动等也是影响土壤水同位素丰度变化的重要因素。首先,质地的层次性对土壤水同位素丰度产生影响。Yano 等^[41]对异质性土壤中²H 分布特点进行研究,发现在黏土层之上和之下土壤水中²H 存在明显差异;孙晓旭等^[37]研究认为质地不同,土壤颗粒对降水入渗响应程度不同,只有入渗量达到一定数量时降水的同位素值才能在深层土壤中得到反映;Meißner 等^[42]的研究则得出了随土壤黏粒含量增加,水中重氢、重氧同位素丰度下降的结论。其次,土壤水同位素丰度变化也具有时间规律可循。程立平等^[39]研究发现黄土塬地区土壤水中的同位素组分主要得到夏、秋两季降雨补给。此外,梁亮^[43]研究表明城市热岛区的¹⁸O 值一般要大于其他地区、其他土壤含水量低的区域,说明人为因素对土壤水同位素的影响也是重要的。

3 氢、氧同位素方法在土壤水循环及其利用研究中的应用

自然界水循环土壤—植被—大气连续体 (SPAC) 界面过程一直是近年来土壤学和水文学研究的热点^[4,44]。SPAC 要表达的是土壤圈与大气圈和生物圈之间的复杂作用关系^[17]。土壤水在 SPAC 模型中居中心地位,但其运移过程复杂,是各界面水相互转化研究中的薄弱环节。正因为如此,氢、氧同位素作为水的“指纹”对其观测,一方面可以灵敏、准确地揭示自然界中不同界面水的运移及转化过程,另一方面也可以进一步用于研究各生态系统中植物对土壤水分的吸收利用机理。

3.1 土壤水的运移与转化

目前以传统研究手段精准研究和把握自然界中水分运移和循环过程是比较困难的^[45]。而稳定同位素的示踪、指示等功能^[17]可以用来精确地揭示降水在土体中的迁移路径、驻留时间以及降水对土壤水分、浅层地下水的补给等过程。

3.1.1 土壤—大气界面 土壤水明显地受到发生在土壤—大气界面的降水、蒸发过程的影响而处于不断的变化之中。针对这一水循环过程,通过测定土壤—大气系统中水的氢、氧同位素丰度变化即可探究降雨、蒸发等过程影响下的土壤水、大气水的相互转化关系。

随着对土壤水运移规律研究的深入,利用概念模型和数值模拟模型研究土壤水同位素变化有了很大的进展。早在 1967 年 Zimmermann 等^[46]就率先开展了利用水同位素掌握土壤水分蒸发规律的研究,建立了同位素水分移动模型。此后,应用同位素技术探索土壤—大气界面水循环规律的研究迅速开展,并得出了一系列土壤水分及同位素运移模型^[47-48]。这些模型为模拟土壤水同位素运移、分析环境变化条件下的土壤蒸发水分的同位素组成奠定了基础。此后,一些学者进一步利用同位素质量守恒原理量化了土壤水分蒸发规律。例如,王永森等^[38]根据 Fick 定律和质量守恒定律得出了表达饱和土壤水蒸发过程的稳定同位素微分方程模型,Robertson 等^[49]在华盛顿喀斯喀特山利用同位素质量守恒模型计算了当地的蒸发量,这些工作推动了这一领域研究的深入。

在了解土壤水蒸发量的基础上,部分学者深入探讨了土壤—大气系统中不同“库”之间的水量变化及其相互间联系。Allison 等^[50]通过分析土壤蒸发与土壤水同位素组成变化过程后,认为可将一定深度土层分为以气态水为主的干燥区 (<20 mm) 和以液态水为主的非饱和区 2 个层次;徐学选等^[51]发现黄土丘陵区土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 在剖面 200 cm 深处有低值区出现,推断这是由于降水补给和水分蒸发共同作用且这一作用随深度增加而逐渐减弱的结果;Gazis 等^[52]通过对比降水和土壤水中的氢、氧同位素值,发现浅层土壤水富集¹⁸O 的主要原因是地表的强烈蒸发,而深部土壤水稳定同位素数据则表明降水通过优势流方式入渗到土壤深部;然而 Lee 等^[53]通过分析 1 年内降水和不同深度土层土壤水的稳定同位素值,却得出了当地土壤水数量主要受降水补给的影响而蒸发作用很弱、可忽略的结论。

3.1.2 土壤—地下水界面 土壤水与地下水交换过程十分复杂,受到诸如气候条件、土壤结构、土壤含水量以及植被覆盖等多种因素的影响^[54],这使得传统研究方法的使用受到限制。天然水同位素记录着水体周转过程的历史,因而稳定同位素方法在研究地表水与地下水相互作用及转换数量方面有其独到之处^[45,55],这也是目前这一方法被广泛应用于该领域研究的原因。近年来,人们针对土壤水分入渗及其与地下水的相互补给问题,在试验观测、定量模拟乃至建立模型方面做了大量研究。一般来说,降雨雨水中氢、氧同位素丰度变化最大,土壤水次之,而地下水变化最小;且水中重同位素丰度沿着大气降水—土壤水—地下水这一水循环路径呈下降趋势变化^[54],说明地下水有较为一致、稳定的水源供应。刘君等^[32]也认为表层土壤水主要受降雨的影响,而深层次土壤

水分与地下水的交换则比较活跃。

在此基础上,一些研究对土壤中不同水体的具体运移形式及其特征做了更为详细的阐述。(1)土壤水向地下水的运移。徐学选等^[51]通过比较地表水、土壤水和地下水的同位素信息探索不同水体间的转化,得出了土壤中大孔隙优先流可能是降水补充地下水的主要形式,同时稳定入渗也是重要的地下水补给来源。Gazis等^[52]同样发现雨水在土壤表层以活塞式入渗且以受土壤质地制约的优先流的方式到达深层土壤,但只有在降水时间充足的情况下深层土壤水才会得到补给。然而, Lee等^[53]则发现在有着较细纹理的上界面和较粗纹理的下界面的土层间,土壤水分更偏向于通过微孔而不是大孔隙运移。此外,陈建生等^[56]通过分析我国河西走廊地区的降水与地下水的同位素组成,认为该地区地下水的主要补给源不是当地降水,或许存在着一种外源补给方式。(2)地下水对土壤水的补充。靳宇蓉等^[1]对地下水运动特征开展研究,表明地下水以活塞流方式自下而上缓慢向上迁移,并且地下水较降水更易保存在土壤中而损失相对较少。张兵等^[57]研究了第二松花江流域地表水和地下水的转换关系,并运用端元法定量计算两者间相互转换比例,结果表明上游山区深层地下水是江水和浅层地下水的补给来源,而下游平原的浅层地下水则会对江水进行补给。综上可以看出,研究土壤—地下水系统中的水资源变化过程有助于进一步明晰土壤水循环机理,实现水资源的科学管理与高效利用。

3.2 植物对土壤水的利用

对于某一具体区域而言,水分条件往往是直接影响当地植物生长及农作物产量高低的主要限制因子^[58],那么植物对水的利用过程就成了探讨“土壤—植物—大气”循环模型和农业节水的关键点^[59-60]。氢氧稳定同位素正逐渐被用于区分作物吸收利用水分的来源的研究中;近年来无论是在确定植物水分来源、探究根系对水分的提升机理方面,还是在灌溉节水机理研究上均有了一些进展。

3.2.1 确定植物水分的来源 通过挖掘植物根系确定其空间分布特征来分析植物吸收水分来源的传统研究方法,既耗时又具有破坏性^[61],并且结果准确性差^[62]。研究表明,除少数排盐的盐生植物外^[63],大多数植物在土壤中吸收水分以及水分在植物体内运移的过程中,不会产生氢、氧同位素的分馏^[60,64]。因而通过分析植物体内水分及不同深度土层土壤水氢、氧同位素比例可以对植物吸收水分的来源做出可靠判断^[44,65]。

利用稳定同位素技术确定植物吸收水分的来源主要有直观法和模型法2种方法。直观法是将植物体内水氢、氧同位素同不同层次土壤水同位素进行直

接对比以确定植物的水分来源的方法^[66-67]。这一方法简单便捷,但需要假设任一时间植物根系优先利用某一特定土层的水分。而实际上植物吸收的水分有多种来源^[68],因此利用直观法研究所得结果可能不精确;而模型法能够克服直观法的弊端,计算出不同水分来源对植物吸收水分的相对贡献^[69]。当假设植物有2种或3种水分来源时,可分别用二项和三项式模型计算^[70];当植物吸收水分的来源更为复杂时,可以使用Phillips等^[71]提出的基于同位素质量守恒原理的多水源混合模型(IsoSource模型)确定植物利用各潜在水源的比率。

由于干旱、半干旱地区降雨稀少,土壤水分状况成为影响当地植物生长及其生理过程的最为关键的因子^[8,72],因此在这些地区探究植物吸收利用水分的来源,对于阐明植物应答水分胁迫及水分利用机理具有重要作用。在以往研究中,氢、氧同位素技术已经广泛应用于示踪树木和草原生态系统中植物的水分吸收过程^[73]。其研究内容主要包含2个方面:一是确定植物吸收土壤水的层位及其动态变化;二是利用同位素自然丰度确定植物吸收各潜在水源的比例及其变化^[58-59,72]。不同类型植物利用水分的方式不同,如草本植物、禾本科植物主要利用浅层土壤水及最近的降水,深根性灌木和河岸树木则主要利用深层土壤水和地下水,而灌木所利用水分为几种水源的混合,即“两层用水模式”^[58];此外,在雨季不同植物对土壤水分利用模式相似,而在旱季不同类型植物会选择利用不同深度的土壤水来应对可能面临的水分胁迫^[8,72]。

关于确定干旱、半干旱地区自然植被水分来源的研究已有较多,目前这一技术被逐渐应用到了农田作物中。Zhang等^[74]研究证实灌溉冬小麦根系吸收的水分主要来自深度0—40 cm土层,因此,应将灌溉计划湿润层深度调整至40 cm而不是传统的100 cm。王鹏等^[75]基于同位素技术探究了夏玉米的耗水规律,结果表明夏玉米整个生长季吸收水分的土层呈现先由浅变深,后由深变浅的变化特征;而其他报道^[8]则指出玉米和棉花在整个生长期利用水分的来源只存在由浅变深的规律。Guo等^[76]研究指出冬小麦农田灌溉不同深度土层土壤水的利用数量受不同水源的可用性、作物根长密度和根细胞活性的影响,而全层灌溉可以改善作物根系分布,从而提高土壤水利用效率。虽然目前这方面的研究还很有限,但仅就以上研究结果而言,掌握不同农作物根系的吸水深度及其水分来源对于制定合理的灌溉方案具有重要作用,使用同位素技术深入开展农田作物耗水规律的研究是十分必要的。

3.2.2 探究根系的“水分提升”机理 在干旱环境条件下,植物会产生一些生理反应以抵御干旱胁迫,满

足自身生长发育需要^[77]。根系是植物调节水分胁迫的主要器官之一^[78]。许多使用同位素技术对植物吸收利用土壤水特点的研究发现植物具有提升土壤水分现象,即分布于深层的植物根系可以把相对湿润的下层土壤中的水分转移到较干燥的上层土壤中,供位于浅层的植物根系利用^[15]。水分提升现象作为植物的一种生存机制,是土壤中深层根系和浅层根系相互协调使之适应环境的过程^[79]。近年来,运用同位素技术研究不同环境条件下的植物根系对水分的提升作用,尤其是对于干旱地区以及农田作物间作系统的研究取得了有益的结果,这些研究结果对于改善农田土壤水分管理、提高水分利用率起到了积极促进作用^[80-81]。这方面研究还在不断深入,新近的研究结果表明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^[82]。因此,为了更客观地描述植物这一水分调控特征,一些学者使用植物“水分再分配”来代替“水分提升”^[83]。Scholz 等^[84]的研究则进一步证实了植物根系水分提升现象白天和夜晚均可发生,但水分的运移方向不同。另外,在旱季雨后,植物根系先吸收浅层土壤中的水分,然后由主根将水分送入深层较干燥土壤中也是“植物水分再分配”的很好例证。

目前,关于根系水分提升的研究已经从树木、牧草延伸到了农作物(尤其是间作系统作物),该现象的普遍性也被越来越多地得到试验证明^[15,85]。Vodila 等^[8]通过测定豆科一禾本科作物间作系统中标记的 D 和¹⁸O 稳定同位素的分布情况,确认了豆科作物的确可以把下层土壤中的水分提升上来并转移给邻近的玉米吸收利用,并证实遮光措施可以增强豆科作物水分提升的强度。Sekiya 等^[86]从间作作物之间距离远近的角度进一步证明了间作系统作物的水分提升过程可以受人为控制。此外,李晖等^[16]用添加富 D(氘)与自然丰度同位素相结合的方法进行示踪研究,得到了对解释植物吸收水分的动态以及水分在同株无性系分株(分蘖植株)之间的转移很有帮助的结果。

3.2.3 制定合理的灌溉策略 我国农业是用水大户,灌溉水利用系数一直很低,目前也只有 53% 左右,因此农业节水任务艰巨^[87]。而掌握农田作物生产过程中水分在土壤—植物—大气系统的转化机理^[75],是提高灌溉水利用效率的工作基础。应用稳定同位素技术使精准掌握灌水后水的运转途径、揭示不同灌溉方式节水机理成为可能。目前,将氢、氧同位素技术用于农田灌溉系统的研究还较少,已有报道主要集中在掌握降水的去向以及探索灌溉农田水汽变化、明确传统灌溉制度存在的问题以及新型灌溉方式下的水分运动特点等方面^[88-89]。

近地表空气湿度是反映农田耗水状况的重要指标;张玉翠等^[88]建立了土壤蒸发和植物蒸腾强度与氢、氧同位素组成之间的数量关系,发现两者之间相关关系密切。吴友杰等^[90]则利用氢、氧同位素技术研究了覆膜沟灌条件下土壤水和膜下凝结水数量变化,表明沟中土壤水蒸发的前缘在 0—10 cm 处,该土层水分移动以水汽分子扩散为主,而垄台土壤水蒸发前缘在 10—20 cm 处,水汽分子通过土壤孔隙向上扩散最后逸散至近地表大气中,其中部分水分子还会被所经过的土层吸附。在传统灌溉方面,苑晶晶等^[91]运用同位素计量的方法总结出当前大田灌溉制度对冬小麦吸收利用地下水会产生明显的抑制作用。王鹏等^[75]的研究则得出农田漫灌后水的深层渗漏是灌水损失的最大途径的结论,因此应改变灌溉方式或减少一次灌溉灌入农田的水量(低额高频)^[44]以提高灌溉水利用率。在一些新型灌溉方式方面,有报道^[44]指出,膜下滴灌后棉花能调整其水分利用深度,显著增加对浅层土壤水的利用。邬佳宾等^[89]也用同位素的方法开展滴灌节水机理研究,结果显示滴灌条件下牧草能够迅速而高效地吸收利用灌溉水,且滴灌后紫花苜蓿对灌溉水的利用并不偏向于某一深度土层。近年来,控制性分根交替灌溉被认为是一种高效节水灌溉技术,而稳定同位素技术的应用可从微观尺度上解析这一灌水技术的水分运动规律,阐明其节水机理。魏镇华等^[92]研究表明交替灌溉后作物体内水分以纵向运移为主,而横向运移的主要动力是渗透势作用下的组织液再分配。吴友杰等^[93]进一步研究了多个交替灌溉周期时段的作物水分运移与分配过程,结果显示在该灌溉条件下灌水沟、非灌水沟部位以及不同深度土层对玉米根系吸水的贡献存在明显差异。

4 结语

综上所述,将氢、氧同位素理论与方法引入到土壤水运动、循环过程研究中来,为掌握大尺度的水分运移、分配规律和在微观尺度上了解水分运动规律、明晰节水机理提供了有效手段,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。经过几十年的发展,该项技术在土壤水研究中的应用越来越广泛,无论是研究水分在土壤中的水平迁移、垂直运动,还是研究不同界面间水的运动过程(降水入渗、地表蒸发、地下水补给等),亦或进一步探究植物对土壤水的吸收利用机理等均取得了明显进展。毫无疑问,稳定同位素技术在土壤水中的应用突破了传统土壤水测定方法的局限,正在蓬勃发展。

然而,由于土壤水问题特殊、复杂,加之同位素技术在该领域应用起步较晚,导致该技术在土壤水研究上还不够成熟,对某些问题认识还不全面,相关知识

还有待普及,取样、样本处理、测定等多个环节在内的完整的操作规范还没有建立起来;现有研究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,可能还有很多问题没有遇到、没有被发现;同位素技术未能和已有的土壤水分研究方法、与其他技术手段(如遥感技术)很好地结合,所得数据的潜力没有得到充分挖掘。随着对这些问题的不断探索、不断解决,稳定同位素技术必将得到进一步应用,一定会对土壤学、水文与水利学以及生态与环境科学的研究与生产实践做出应有的积极贡献。未来研究的重点主要为:

(1)发展示踪技术。目前,氢、氧同位素在土壤水循环、运动研究中的应用绝大部分是基于不同来源水的天然同位素差异进行的,而用人工控制添加示踪剂(如富集D的重水)的方法开展研究的还很少^[26,94]。相比较而言,人工示踪方法能够更精确地追踪不同来源水分在土壤物理、化学和生物学过程中的变化,从而避免天然稳定同位素自然丰度低、试验误差大的弊端。因此,今后应加强利用氢、氧同位素示踪手段的运用研究,以求获得更加精准的研究结果。

(2)加强多环节水循环过程研究。到目前为止,大部分同位素示踪试验只针对SPAC过程的某一环节,缺乏整体性和系统性。因此,今后应利用氢、氧同位素技术的优势加强对SPAC的系统研究,将土壤水入渗、蒸发以及植物吸收利用、蒸腾等过程有机地结合起来,提高研究水平,以进一步把握农田水分运动规律,探明不同灌溉方法与农艺措施组合的节水机理。此外,将氢、氧同位素技术与碳稳定同位素技术结合起来,揭示水分转化与植物碳光合成的关系,可在更深层次上解决农业节约用水、固碳减排理论与技术问题。

(3)不同尺度研究相结合。当前稳定同位素技术在土壤水研究上的应用尚处于起步和探索发展阶段,受到大范围数据采集困难等因素制约,致使已有研究绝大部分属小尺度,是在小范围内进行的,显然这对于准确揭示全球范围水循环背景下的土壤水时空变化规律是不利的。所以,在不同时空尺度下,由点到面、从微观到宏观,把土壤水同位素研究与全球水循环中的同位素变化联系起来,探索有关人类关注的资源与环境问题,为土壤科学的发展展示了广阔的空间。例如,将具有高度空间异质性的土壤水分问题^[95]放到发生着复杂的生物地球化学过程及水文过程的地球关键带^[96]中进行研究,摸清土壤水同位素的时空变化规律,进而逐步建立全球范围不同区域、不同尺度下的研究网络,推动土壤水及多种元素地球生物化学循环的耦合过程研究不断深入开展。

参考文献:

- [1] 靳宇蓉,鲁克新,李鹏,等. 基于稳定同位素的土壤水分运动特征[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 792-801.
- [2] 宋献方,王仕琴,肖国强,等. 华北平原地下水浅埋区土壤水分动态的时间序列分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(1): 145-155.
- [3] 潘素敏,张明军,王圣杰,等. 基于 GCM 的中国土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布特征[J]. 生态学杂志, 2017, 36(6): 1727-1738.
- [4] 孙宁霞. 基于同位素示踪的农田水分转化规律研究[D]. 北京:中国地质大学, 2015.
- [5] 邓文平,章洁,张志坚,等. 北京土石山区水分在土壤—植物—大气连续体(SPAC)中的稳定同位素特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2171-2178.
- [6] 肖德安,王世杰. 土壤水研究进展与方向评述[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 1182-1188.
- [7] Dansgaard W. The Abundance of ^{18}O in atmospheric water and water vapour [J]. Tellus, 1953, 5(4): 461-469.
- [8] Vodila G, Palcsu L, Futó I, et al. A 9-year record of stable isotope ratios of precipitation in Eastern Hungary: Implications on isotope hydrology and regional palaeoclimatology [J]. Journal of Hydrology, 2011, 400(1): 144-153.
- [9] Négrel P, Petelet-Giraud E, Millot R. Tracing water cycle in regulated basin using stable $\delta^{18}\text{O}$ — $\delta^2\text{H}$ isotopes: The Ebro river basin (Spain) [J]. Chemical Geology, 2016, 422: 71-81.
- [10] 马菁,宋维峰,吴锦奎,等. 元阳梯田水源区林地降水与土壤水同位素特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 243-248.
- [11] 刘保清,刘志民,钱建强,等. 科尔沁沙地南缘主要固沙植物旱季水分来源[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2093-2101.
- [12] 张小娟,宋维峰,王卓娟,等. 应用氢氧同位素技术研究土壤水的原理与方法[J]. 亚热带水土保持, 2015(1): 32-36.
- [13] 马雪宁,张明军,李亚举,等. 土壤水稳定同位素研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(4): 554-561.
- [14] 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.
- [15] 祁亚淑,朱林,许兴,等. 氢氧稳定同位素在植物水分提升机理研究上的应用[J]. 农业科学研究, 2015, 36(4): 51-57.
- [16] 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[J]. 干旱区地理, 2006, 29(6): 810-816.
- [17] 徐晓梧,余新晓,贾国栋,等. 基于稳定同位素的 SPAC 水碳拆分及耦合研究进展[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2369-2378.
- [18] Dawson T E, Mambelli S, Plamboeck A H, et al. Stable isotopes in plant ecology [J]. Annual Review of Ecology & Systematics, 2002, 33(1): 507-559.
- [19] Dawson T E, Brooks P D. Fundamentals of stable isotope chemistry and measurement [J]. Springer Nether-

- lands, 2001, 40: 1-18.
- [20] Burgess S S O, Adams M A, Turner N C, et al. Characterisation of hydrogen isotope profiles in an agroforestry system: Implications for tracing water sources of trees [J]. *Agricultural Water Management*, 2000, 45(3): 229-241.
- [21] Hobson K A, Wassenaar L I. Stable isotope ecology: An introduction [J]. *Oecologia*, 1999, 120(3): 312-313.
- [22] Asbjornsen H, Mora G, Helmers M J. Variation in water uptake dynamics among contrasting agricultural and native plant communities in the Midwestern U. S [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2007, 121(4): 343-356.
- [23] 钱云平, 王玲. 同位素水文技术在黑河流域水循环研究中的应用 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2008.
- [24] 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 [J]. *中国沙漠*, 2008, 28(4): 787-794.
- [25] Fry B. Stable isotope ecology [M]. Berlin: Springer Berlin, 2015.
- [26] Schwinning S, Davis K, Richardson L, et al. Deuterium enriched irrigation indicates different forms of rain use in shrub/grass species of the Colorado Plateau [J]. *Oecologia*, 2002, 130(3): 345-355.
- [27] Koeniger P, Gaj M, Beyer M, et al. Review on soil water isotope-based groundwater recharge estimations [J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(16): 2817-2834.
- [28] 王涛, 包为民, 陈翔, 等. 真空蒸馏技术提取土壤水实验研究 [J]. *河海大学学报 (自然科学版)*, 2009, 37(6): 660-664.
- [29] 刘文茹, 彭新华, 沈业杰, 等. 激光同位素分析仪测定液态水的氢氧同位素及其光谱污染修正 [J]. *生态学杂志*, 2013, 32(5): 1181-1186.
- [30] Ruppenthal M, Oelmann Y, Wilcke W. Isotope ratios of nonexchangeable hydrogen in soils from different climate zones [J]. *Geoderma*, 2010, 155(3/4): 231-241.
- [31] 张翔, 邓志民, 潘国艳, 等. 鄱阳湖湿地土壤水稳定同位素变化特征 [J]. *生态学报*, 2015, 35(22): 7580-7588.
- [32] 刘君, 聂振龙, 段宝谦, 等. 氢氧稳定同位素指示的呼和浩特地区土壤水的补给特征 [J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(10): 145-150.
- [33] Tang K, Feng X. The effect of soil hydrology on the oxygen and hydrogen isotopic compositions of plants source water [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2001, 185(3/4): 355-367.
- [34] 崔军, 安树青, 徐振, 等. 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 [J]. *自然资源学报*, 2005, 20(5): 660-668.
- [35] 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]. *Physics & Chemistry of the Earth*, 2010, 35(13/14): 565-570.
- [36] Gowing J W, Konukcu F, Rose D A. Evaporative flux from a shallow watertable: The influence of a vapour-liquid phase transition [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 321(1/4): 77-89.
- [37] 孙晓旭, 陈建生, 史公勋, 等. 蒸发与降水入渗过程中不同水体氢氧同位素变化规律 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(4): 100-105.
- [38] 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 [J]. *四川大学学报 (工程科学版)*, 2010, 42(1): 10-13.
- [39] 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.
- [40] 侯士彬, 宋献方, 于静洁, 等. 太行山区典型植被下降水入渗的稳定同位素特征分析 [J]. *资源科学*, 2008, 30(1): 86-92.
- [41] Yano K, Sekiya N, Samson B K, et al. Hydrogen isotope composition of soil water above and below the hardpan in a rainfed lowland rice field [J]. *Field Crops Research*, 2006, 96(2): 477-480.
- [42] Meißner M, Köhler M, Schwendenmann L, et al. Soil water uptake by trees using water stable isotopes ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$): A method test regarding soil moisture, texture and carbonate [J]. *Plant & Soil*, 2014, 376(1/2): 327-335.
- [43] 梁亮. 土壤水分 $\delta^{18}\text{O}$ 变化对城市热岛的指示研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2007.
- [44] 李惠, 梁杏, 刘延锋, 等. 基于氢氧稳定同位素识别干旱区棉花水分利用来源 [J]. *地球科学*, 2017, 42(5): 843-852.
- [45] 汪集旻, 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.
- [46] Zimmermann U, Ehhalt D, Muennich K O. Soil-water movement and evapotranspiration: Changes in the isotopic composition of the water [C]// *Proceedings of IAEA Symposium on Isotope Hydrology*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1967: 567-585.
- [47] Barnes C J, Allison G B. The distribution of deuterium and ^{18}O in dry soils: 1. Theory [J]. *Journal of Hydrology*, 1983, 60(1): 141-156.
- [48] Braud I, Bariac T, Gaudet J P, et al. SiSPAT-Isootope, a coupled heat, water and stable isotope (HDO and H_2^{18}O) transport model for bare soil. Part I. Model description and first verifications [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 309(1): 277-300.
- [49] Robertson J A, Gazis C A. An oxygen isotope study of seasonal trends in soil water fluxes at two sites along a climate gradient in Washington State (USA) [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 328(1/2): 375-387.
- [50] Allison G B, Hughes M W. The use of natural tracers

- as indicators of soil-water movement in a temperate semi-arid region [J]. *Journal of Hydrology*, 1983, 60 (1): 157-173.
- [51] 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[J]. *水科学进展*, 2010, 21(1): 16-22.
- [52] Gaziz C, Feng X. A stable isotope study of soil water: Evidence for mixing and preferential flow paths [J]. *Geoderma*, 2004, 119(1/2): 97-111.
- [53] Lee K S, Kim J M, Lee D R, et al. Analysis of water movement through an unsaturated soil zone in Jeju Island, Korea using stable oxygen and hydrogen isotopes [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 345(3/4): 199-211.
- [54] 邓文平,余新晓,贾国栋,等. 北京西山鹫峰地区氢氧稳定同位素特征分析[J]. *水科学进展*, 2013, 24(5): 642-650.
- [55] 王亚俊,宋献方,马英,等. 北京东南郊再生水灌区不同水体氢氧同位素特征及成因[J]. *地理研究*, 2017, 36 (2): 361-372.
- [56] 陈建生,王庆庆. 北方干旱区地下水补给源问题讨论 [J]. *水资源保护*, 2012, 28(3): 1-8.
- [57] 张兵,宋献方,张应华,等. 第二松花江流域地表水与地下水相互关系[J]. *水科学进展*, 2014, 25(3): 336-347.
- [58] 李静,吴华武,李小雁,等. 青海湖流域农田生态系统氢氧同位素特征及其水分利用变化研究[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(8): 1348-1359.
- [59] 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.
- [60] Zhang X, Xiao Y, Wan H, et al. Using stable hydrogen and oxygen isotopes to study water movement in soil-plant-atmosphere continuum at Poyang Lake wetland, China [J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2017, 25(2): 221-234.
- [61] 张丛志,张佳宝,张辉. 不同深度土壤水分对黄淮海封丘地区小麦的贡献[J]. *土壤学报*, 2012, 49(4): 655-664.
- [62] Williams D G, Ehleringer J R. Intra-and interspecific variation for summer precipitation use in pinyon-juniper woodlands [J]. *Ecological Monographs*, 2000, 70(4): 517-537.
- [63] 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.
- [64] Rong L, Chen X, Chen X, et al. Isotopic analysis of water sources of mountainous plant uptake in a karst plateau of southwest China [J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(23): 3666-3675.
- [65] Wang P, Song X, Han D, et al. A study of root water uptake of crops indicated by hydrogen and oxygen stable isotopes: A case in Shanxi Province, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(3): 475-482.
- [66] Mora G, Jahren A H. Isotopic evidence for the role of plant development on transpiration in deciduous forests of southern United States [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(2): 11-13.
- [67] Wu Y, Du T, Li F, et al. Quantification of maize water uptake from different layers and root zones under alternate furrow irrigation using stable oxygen isotope [J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 168: 35-44.
- [68] Jackson P C, Meinzer F C, Bustamante M, et al. Partitioning of soil water among tree species in a Brazilian Cerrado ecosystem [J]. *Tree Physiology*, 1999, 19 (11): 717-724.
- [69] 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.
- [70] Phillips D L. Mixing models in analyses of diet using multiple stable isotopes: A critique [J]. *Oecologia*, 2001, 127(2): 166-170.
- [71] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: Coping with too many sources [J]. *Oecologia*, 2003, 136(2): 261-269.
- [72] 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.
- [73] Schwendenmann L, Pendall E, Sanchez-Bragado R, et al. Tree water uptake in a tropical plantation varying in tree diversity: Interspecific differences, seasonal shifts and complementarity [J]. *Ecohydrology*, 2015, 8(1): 1-12.
- [74] Zhang Y, Shen Y, Sun H, et al. Evapotranspiration and its partitioning in an irrigated winter wheat field: A combined isotopic and micrometeorologic approach [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 408(3): 203-211.
- [75] 王鹏,宋献方,袁瑞强,等. 基于氢氧稳定同位素的华北农田夏玉米耗水规律研究[J]. *自然资源学报*, 2013, 28 (3): 481-491.
- [76] Guo F, Juan-Juan M A, Zheng L J, et al. Estimating distribution of water uptake with depth of winter wheat by hydrogen and oxygen stable isotopes under different irrigation depths [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(4): 891-906.
- [77] 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.
- [78] 李锋瑞,刘继亮. 干旱区根土界面水分再分配及其生态水文效应研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2008, 23 (7): 698-706.
- [79] Sekiya N, Yano K. Do pigeon pea and sesbania supply groundwater to intercropped maize through hydraulic lift? Hydrogen stable isotope investigation of xylem waters [J]. *Field Crops Research*, 2004, 86(2): 167-173.
- [80] 何兴东,高玉葆. 干旱区水力提升的生态作用[J]. *生态学报*, 2003, 23(5): 996-1002.
- [81] Hultine K R, Cable W L, Burgess S S O, et al. Hydraulic redistribution by deep roots of a Chihuahuan Desert phreatophyte [J]. *Tree Physiology*, 2002, 22 (5): 353-360.

- 垄坡面产流产沙过程[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 114-119.
- [13] 程甜甜, 张兴刚, 李亦然, 等. 鲁中南山丘区坡面产流产沙与降雨关系[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 12-16.
- [14] Shi Z H, Fang N F, Wu F Z, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 454/455(3): 123-130.
- [15] Kateb H E, Zhang H, Zhang P, et al. Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: A field experiment in Southern Shaanxi Province, China [J]. *Catena*, 2013, 105: 1-10.
- [16] 李桂芳, 郑粉莉, 卢嘉, 等. 降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 147-154, 182.
- [17] 查轩, 黄少燕, 陈世发. 退化红壤地土壤侵蚀与坡度坡向的关系: 基于 GIS 的研究[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(2): 32-39.
- [18] Zhao Q, Li D, Zhuo M, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on erosion characteristics of the red soil slope [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2015, 29(2): 609-621.
- [19] 曹丹妮, 杜一凡, 郝好鑫, 等. 人工模拟降雨条件下红壤团聚体流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 141-147.
- [20] 郝好鑫, 郭忠录, 王先舟, 等. 降雨和径流条件下红壤坡面细沟侵蚀过程[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 134-140.
- [21] 吴雨赤. 第四纪红黏土侵蚀劣地桃树种植试验[J]. 中国水土保持, 1997(11): 25-26.
- [22] 朱丽东, 叶玮, 周尚哲, 等. 中亚热带第四纪红黏土的粒度特征[J]. 地理科学, 2006, 26(5): 5586-5591.
- [23] 聂小东, 李忠武, 王晓燕, 等. 雨强对红壤坡耕地泥沙流失及有机碳富集的影响规律研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 900-908.
- [24] 张旭昇, 薛天柱, 马灿, 等. 雨强和植被覆盖度对典型坡面产流产沙的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 66-70.
- [25] 杨波, 王文龙, 郭明明, 等. 模拟降雨条件下弃渣体边坡不同防护措施的减水减沙效益[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1-13.
- [26] Cheng Q, Ma W, Cai Q. The relative importance of soil crust and slope angle in runoff and soil loss: A case study in the hilly areas of the Loess Plateau, North China [J]. *Geojournal*, 2008, 71(2/3): 117-125.
- [27] 张军, 李占斌, 李鹏, 等. 移动降雨条件下坡面产流产沙过程试验研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 1-4, 11.
- [28] 于国强, 李占斌, 李鹏, 等. 不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究[J]. 水科学进展, 2010, 21(5): 593-599.
- (上接第9页)
- [82] Oliveira R S, Bezerra L, Davidson E A, et al. Deep root function in soil water dynamics in Cerrado Savannas of central Brazil [J]. *Functional Ecology*, 2010, 19(4): 574-581.
- [83] 朱丽, 黄刚, 唐立松, 等. 梭梭根系的水分再分配特征对其生理和形态的影响[J]. 干旱区研究, 2017, 34(3): 638-647.
- [84] Scholz F G, Bucci S J, Goldstein G, et al. Hydraulic redistribution of soil water by neotropical savanna trees [J]. *Tree Physiology*, 2002, 22(9): 603-612.
- [85] Wan C, Sosebee R E, McMichael B L. Does hydraulic lift exist in shallow-rooted species? A quantitative examination with a half-shrub *Gutierrezia sarothrae* [J]. *Plant & Soil*, 1993, 153(1): 11-17.
- [86] Sekiya N, Yano K. Water acquisition from rainfall and groundwater by legume crops developing deep rooting systems determined with stable hydrogen isotope composition of xylem waters [J]. *Field Crops Research*, 2002, 78(2/3): 133-139.
- [87] 山仑, 张岁岐. 能否实现大量节约灌溉用水? 我国节水农业现状与展望[J]. 资源环境与发展, 2006, 28(1): 71-74.
- [88] 张玉翠, 蔡颖哲, Stephen, 等. 灌溉农田水汽氢氧同位素组成特征研究初探[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1060-1066.
- [89] 邬佳宾, 苗澍, 徐冰, 等. 滴灌紫花苜蓿根层水分稳定同位素特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(7): 14-27.
- [90] 吴友杰, 杜太生. 覆膜沟灌下土壤水氢氧同位素分布特征及其水分运动规律研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(9): 73-76.
- [91] 苑晶晶, 袁国富, 罗毅, 等. 利用 $\delta^{18}\text{O}$ 信息分析冬小麦对浅埋深地下水的利用[J]. 自然资源学报, 2009, 24(2): 360-368.
- [92] 魏镇华, 张娟, 徐淑君, 等. 交替灌溉下作物水分运移过程的稳定氢同位素示踪研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(6): 15-18.
- [93] 吴友杰, 魏镇华, 杜太生. 交替沟灌条件下土壤水稳定氢氧同位素分布特征[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(4): 251-255.
- [94] 史建君, 郭江峰. 氙水在模拟水稻一水一土壤生态系统中的行为[J]. 应用生态学报, 2003, 14(2): 269-272.
- [95] 王云强, 邵明安, 胡伟, 等. 黄土高原关键带土壤水分空间分异特征[J]. 地球与环境, 2016, 44(4): 391-397.
- [96] Lin H. Earth's critical zone and hydrogeology: Concepts, characteristics, and advances [J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2010, 6(2): 3417-3481.