

DOI: 10.11766/trxb202110180561

姜鹏举, 吴华武, 闵雷雷, 沈彦俊, 田丽慧, 张志华, 毕会涛. 华北平原典型土地利用类型下包气带土壤水稳定同位素变化特征[J]. 土壤学报, 2023, 60 ( 6 ): 1626–1636.

JIANG Pengju, WU Huawu, MIN Leilei, SHEN Yanjun, TIAN Lihui, ZHANG Zhihua, BI Huitao. Isotopic Characteristics of Soil Water from Deep Vadose Zone of Different Typical Land Use Patterns in the North China Plain[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60 ( 6 ): 1626–1636.

## 华北平原典型土地利用类型下包气带土壤水稳定同位素变化特征\*

姜鹏举<sup>1, 2</sup>, 吴华武<sup>2†</sup>, 闵雷雷<sup>3</sup>, 沈彦俊<sup>3</sup>, 田丽慧<sup>4</sup>, 张志华<sup>1</sup>, 毕会涛<sup>1</sup>

(1. 河南农业大学林学院, 郑州 450002; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所/中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008; 3. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 石家庄 050022; 4. 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 西宁 810016)

**摘 要:** 基于华北平原典型土地利用类型(梨园、农田)包气带(>18 m)土壤水同位素测定结果, 分析了华北平原深层土壤水稳定同位素( $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ )特征, 揭示了不同土地利用类型下包气带土壤水补给过程中蒸发和入渗的规律。结果表明, 研究区大气降水线  $\delta D = 6.07\delta^{18}O - 5.76$  ( $R^2 = 0.86$ ), 土壤水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值均落在大气降水线下方, 表明降水入渗补给土壤水过程中经历了强烈的蒸发作用; 除梨园 I, 土壤水同位素值变异系数浅层>中层>深层, 表明浅层土壤水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  波动较大, 主要由于其易受到降水和蒸发的影响, 随土壤剖面深度的增加, 蒸发和降水的影响逐渐变弱; 梨园 I 深层土壤水同位素变异系数较大, 表明该样点深层土壤水受到地下水波动的影响; 梨园浅层土壤水氘盈余(d-excess)较农田大, 说明农田浅层土壤水蒸发强度大于梨园; 0.25~0.5 m 深处土壤水均出现  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  的明显富集, 主要受土壤质地分层影响导致土壤水入渗受阻, 同位素较为富集的土壤水在此深度层积聚; 而梨园 2~5 m 出现  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  的贫化现象, 主要是梨树根系埋深使得降水以优先流形式补给至此土壤层。梨园和农田包气带土壤水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  垂直剖面上差异显著, 表明了华北平原不同土地利用方式的包气带土壤水入渗过程有明显差异, 梨园包气带土壤水入渗过程主要以优先流补给影响。本研究为深入了解华北平原农田区厚包气带水分运动、氮素迁移转化与地下水水质之间的关系提供了理论依据。

**关键词:** 华北平原; 土壤水; 稳定同位素; 土地利用; 包气带

**中图分类号:** S714 **文献标志码:** A

## Isotopic Characteristics of Soil Water from Deep Vadose Zone of Different Typical Land Use Patterns in the North China Plain

JIANG Pengju<sup>1, 2</sup>, WU Huawu<sup>2†</sup>, MIN Leilei<sup>3</sup>, SHEN Yanjun<sup>3</sup>, TIAN Lihui<sup>4</sup>, ZHANG Zhihua<sup>1</sup>, BI Huitao<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002; 2. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 4. State Key Laboratory of

\* 国家自然科学基金项目(41930865, 41877169 和 42071145)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41930865, 41877169, 42071145)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wuhuawu416@163.com

作者简介: 姜鹏举(1997—), 男, 河南郑州人, 硕士研究生, 主要从事土壤水文研究。E-mail: 2191695249@qq.com

收稿日期: 2021-10-18; 收到修改稿日期: 2022-05-11; 网络首发日期(www.cnki.net): 2022-08-25

*Plateau Ecology and Agriculture, Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xi ning 810016, China)*

**Abstract:** 【Objective】The mechanisms of evaporation and infiltration during the processes of precipitation on soil layers are still not clear. Thus, this study was designed to investigate the spatial variations of soil water isotopes from deep vadose zones(>18 m) of pear orchard and farmland plots in the North China Plain. 【Method】Stable isotopes ( $\delta D$  and  $\delta^{18}O$ ) in soil water, soil water content and soil texture were explored in the pear orchard and farmland plots of the North China Plain. 【Result】Results showed that the local meteoric water line (LMWL) was established as  $\delta D = 6.07\delta^{18}O - 5.76$  ( $R^2=0.86$ ). The  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  of soil water from different soil layers fell below the LMWL, indicating that soil water replenished from precipitation experienced strong evaporation. Except for pear orchard (I), the coefficient of variation (CV) of soil water isotopic values was in the order of shallow layer > middle layer > deep layer, indicating that the  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  of shallow soil water fluctuated greatly. This implies that shallow soil water was more impacted by precipitation and evaporation compared with other soil layers. As the profile depth increased, the effect of precipitation and evaporation gradually became weaker. The larger isotopic CV of deep soil water in pear orchard (I) indicated deep soil water was affected by groundwater at this sampling site. The d-excess values of shallow soil water were greater in pear orchard plots than those in farmland plots, indicating that the evaporation intensity of shallow soil layers was less in the pear orchard plots than in farmland plots. The obvious isotopic enrichment ( $\delta D$  and  $\delta^{18}O$ ) was observed in the soil layer of 0.25–0.5 m, which was associated with soil texture stratification and hindered infiltration into deep soil layers. This resulted in enriched soil water accumulating in the soil layer. The phenomenon of isotopic depletion was found in the soil layers (2–5 m) from the pear orchard plots and resulted from preferential flow induced by pear roots. 【Conclusion】The remarkable spatial differences of isotopic variations in soil layers were observed in the pear orchard and farmland plots, indicating that the infiltration processes of soil water differed in various land-use patterns of the North China Plain. The preferential flow of soil water during the infiltration processes was dominated in the pear orchard plots. These findings provide a theoretical basis for understanding the relationship between water movement, nitrogen migration and transformation, and groundwater quality in the deep vadose zone of the North China Plain.

**Key words:** North China Plain; Soil water; Stable isotope; Land use; Vadose zone

华北平原作为我国重要的粮食生产基地, 小麦产量占全国总产量的 11%, 玉米占 28%, 在我国经济社会发展中占据重要地位<sup>[1]</sup>。为增加粮食产量, 华北地区平均每年使用超过 500 kg·hm<sup>-2</sup> 的氮素<sup>[2]</sup>, 造成土壤和地下水严重污染。研究表明, 农区包气带硝酸盐污染严重, 深层地下水硝酸盐污染也在不断加剧<sup>[3]</sup>。然而, 华北平原农业土地利用方式多样, 作物类型主要为冬小麦、夏玉米、单季玉米、果树、蔬菜和棉花等<sup>[4]</sup>, 不同农业土地利用类型下灌溉强度和施肥强度存在较大差异<sup>[5]</sup>; 区域内地下水埋深呈现出自山前平原到滨海平原不断减少的趋势, 包气带的质地和厚度也存在显著的区域差异, 这些因素增加了华北平原农区厚包气带地下水硝酸盐污染时空异质性和水资源不均衡性<sup>[6]</sup>。

包气带是土壤表层与地下水之间的非饱和带, 是硝酸盐运移、累积的重要场所, 3~6 m 浅层包气带储存的硝酸盐量最多, 占据了华北平原总硝酸盐

储量的 1/2 左右。水分通过包气带向下运动, 既构成了地下水的主要补给<sup>[7]</sup>, 又携带大量的硝酸盐等污染物向下运移, 对地下水水质产生了直接影响或造成严重威胁。硝酸盐在包气带中的迁移受多种因素影响, 补给速率、水文迁移过程和土壤中化学反应等均会影响包气带硝酸盐的迁移和含量变化, 此外降水条件、土地利用方式、土壤质地等也会引起地下水硝酸盐污染程度的变化<sup>[8]</sup>。而土壤水是土壤、植物、大气之间能量流动的重要纽带, 也是影响区域水循环的关键因子<sup>[9-11]</sup>。作为硝酸盐迁移的重要载体, 土壤水调控着硝酸盐在包气带中的迁移和变化过程, 土壤水的入渗速率及入渗深度影响包气带中硝酸盐的迁移转化, 进而影响地下水硝酸盐的浓度变化。因此, 包气带土壤水运移过程研究是揭示华北平原农区厚包气带硝酸盐富集机理和系统评估地下水水质的关键。

水体中的氢氧稳定同位素灵敏度高, 且不易受

环境中其他物质的影响,可以有效追踪土壤水从输入、入渗到蒸发的运移过程<sup>[12-13]</sup>。早在 1967 年 Zimmermann 等<sup>[14]</sup>就利用氢稳定同位素研究土壤水分的蒸发规律,建立土壤水分移动模型;杨斌等<sup>[15]</sup>基于华北平原小麦玉米田生态系统大气水汽和不同深度土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  日变化特征,讨论了土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  蒸发的日变化特征及其影响因素;王仕琴等<sup>[16]</sup>结合降水和华北平原中、东部典型地下水浅埋区不同深度土壤水同位素的变化特征,研究了降水、土壤质地、植被覆盖对土壤水入渗过程的影响;马斌等<sup>[17]</sup>通过分析不同深度厚包气带土壤水  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  随埋深的波动特征,研究了华北平原山前冲积平原包气带土壤水的入渗特征;魏静文<sup>[18]</sup>通过分析华北平原山前、中部和滨海地下水  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  的分布特征,研究了华北平原浅层和深层地下水的补给模式;Li 等<sup>[19]</sup>通过降水、土壤水和地下水同位素研究了华北地区不同植被覆盖条件下降水入渗补给规律。以上研究大都停留在华北平原浅层土壤水稳定同位素变化研究,对深层包气带土壤水稳定同位素变化研究大多仅限于西北干旱区<sup>[20-22]</sup>,对华北平原厚包气带土壤水稳定同位素变化及影响因素的研究还非常有限。基于此,本研究通过选择华北平原不同土地利用类型下厚包气带土壤水中氢氧稳定同位素监测采样和分析,揭示包气带土壤水同位素变化特征及其主要影响因素,刻画典型包气带土壤蒸发和入渗过程,这将为理解华北平原不同土地利用方式厚包气带水分运动、氮素迁移转化与地下水水质之间的关系提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

华北平原是我国第二大平原,面积约为 140 000 km<sup>2</sup>,位于燕山以南,黄河以北,东临渤海,西依太行山,地理位置为 34°46′—40°25′N, 112°30′—119°30′E。华北平原地势平坦,总体西高东低,海拔自西向东约为 100~1 m<sup>[23]</sup>。根据地理位置和沉积特征将华北平原分为山前洪积平原、中部冲积平原和临海三角洲平原。山前平原沿太行山分布,海拔高度低于 100 m,由河流冲积扇相连而成;中部平原海拔低于 40 m,由海河、滦河等冲积物组成,地势低洼;临

海平原海拔低于 4 m,地势低平,主要由河流三角洲、临海洼地组成。

华北平原属中朝准地台中的次一级大地结构单元—华中拗陷带,是中、新生代以来持续沉降的断陷盆地,受不同时期构造运动影响形成北京凹陷、冀中拗陷、沧县隆起、黄骅拗陷、皇宁隆起。第四系含水层分为四个含水组:第 I 含水组含水层沉积物颗粒自东向西由砂砾变为细砂;第 II 含水组深度约为 120~170 m,含水层主要由砂砾石、中砂、细砂组成;第 III 含水组埋深为 250~310 m,岩性主要为中粗砂、中砂、细砂;第 IV 含水组在 350 m 以下,岩性自西向东为砂砾、中细砂、细砂、粉砂。华北平原浅层地下水主要通过降水、河渠回渗等垂向补给,通过开采和蒸发消耗;深层地下水主要通过山前降水入渗和地下侧向径流等补给,主要消耗途径为开采。

华北平原属大陆性干旱季风气候,四季分明,年平均气温为 10~15℃,年际、年内降水分布不均,年均降水量为 500~600 mm,蒸发量为 900~1 400 mm。黄河、海河、滦河是华北平原的三大水系,此外还有大小共计 60 多条河流,本文主要研究区位于海河流域。华北平原也是我国重要的商品粮基地,主要农业作物为小麦、玉米、林果、蔬菜和棉花等<sup>[24]</sup>。

### 1.2 数据来源

2020 年 10 月,在华北平原选择典型土地利用类型(梨园和农田)开展包气带土壤水氢氧同位素监测试验(图 1),共设置四个样地(梨园 I、梨园 II、农田 I、农田 II),四个样地土壤深度分别为 23 m、19.5 m、18 m 和 22 m,具体土壤剖面信息详见表 1。梨园 I 和梨园 II 梨树树龄均为 30 a 左右,农田 I 为小麦—玉米轮作田、农田 II 单季只种植玉米。样地土壤质地垂直分布较为复杂,浅层多为较薄的壤土(国际制分级标准),壤土下层多为粉砂质壤土、黏土交错分布,部分深度层黏土与粉砂质壤土混合,10 m 以下砂壤土、砂质黏壤土含量较多,20 m 深度存在少量砂土。

为了更好地反映土壤含水量及其同位素变化,土壤剖面取样:前 10 m 的土柱取样间隔为 25 cm,10 m 后取样间隔为 50 cm。取样过程中除去根系杂物后,一部分立即装入铝盒称重并密封,用于测定土壤含水率,另一部分存于 30 mL 玻璃瓶内,用封

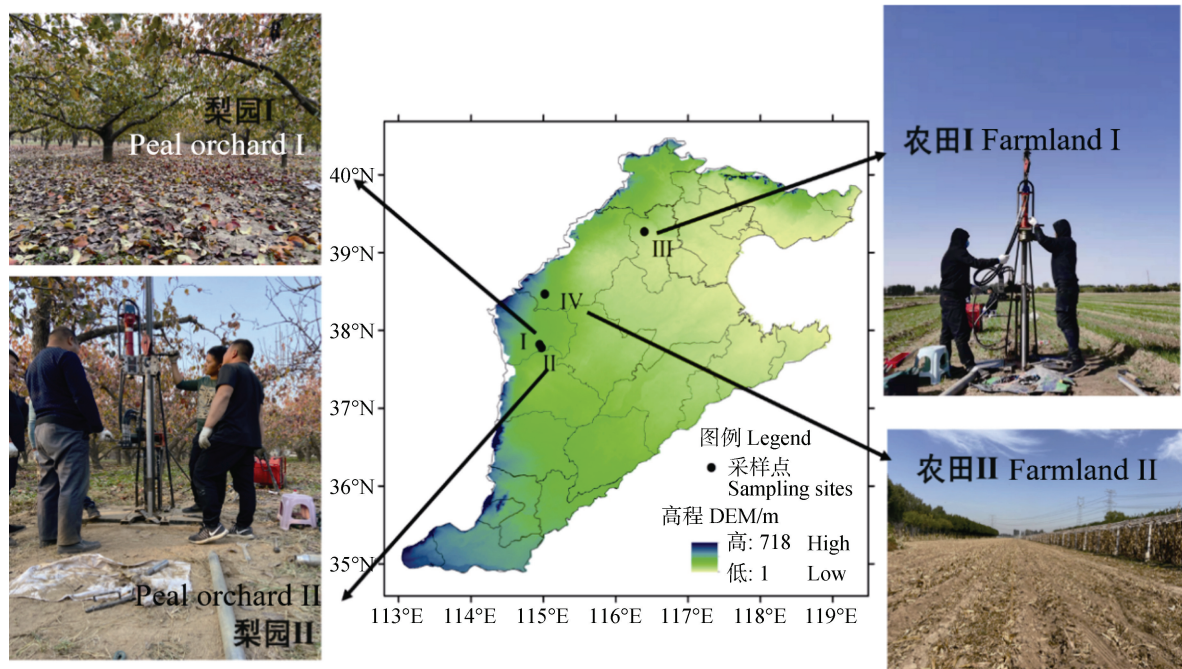


图 1 研究区及采样点分布  
Fig. 1 Distribution of investigated sites in the study region

表 1 典型土地利用类型包气带采样点基本信息

Table 1 Basic information statistics of field sites from typical vadose zones of land use patterns					
样点 Sites	纬度 Latitude	经度 Longitude	植被 Vegetation	地下水 Groundwater	
梨园 I	37.82°N	114.95°E	25~30 a 梨树	剖面深 23 m, 浅层地下水埋深 20~30 m	
梨园 II	37.82°N	114.98°E	30 a 梨树	剖面深 19.5 m, 浅层地下水埋深 20~30 m	
农田 I	38.47°N	115.02°E	玉米—小麦轮作	剖面深 18 m, 浅层地下水埋深 40~50 m	
农田 II	39.27°N	116.40°E	单季玉米	剖面深 22 m, 浅层地下水埋深 35~40 m	

口膜密封防止蒸发，冷藏保存。所有土壤样品在青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室，使用 LI-2100 全自动真空冷凝抽提系统获取土壤样品中的水分，抽提时间设为 3 h 以确保样品中无剩余水分；抽提结束后将试管取出并用封口膜密封试管口，试管中冷凝水在室温条件下融化后用注射器抽出，过滤后将 1 mL 抽提得到的土壤水装进 2 mL 透明色谱进样瓶中用于测定土壤水中同位素含量。采用美国 Los Gatos Research 公司生产的水同位素分析仪（IWA—35EP 型号 912-0026-0001）测定土壤水中  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  含量，仪器分析精度分别为  $\delta D < 0.3\text{‰}$ ， $\delta^{18}O < 0.1\text{‰}$ 。所有样品的测试结果采用相对于维也纳标准平均海洋水 V-SMOW 的千分差表示：

$$\delta^{18}O \text{ (or } \delta D) = (R_{\text{sample}}/R_{\text{V-SMOW}}) \times 1000\text{‰} \text{ (1)}$$

式中， $R_{\text{sample}}$  和  $R_{\text{V-SMOW}}$  分别表示样品和标样（V-SMOW）中氢氧同位素比率  $R$ （ $^{18}O/^{16}O$ 、 $D/H$ ）。

本研究中使用的大气降水同位素数据来自全球降水同位素监测网络（GNIP：[http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS\\_resources\\_gnip.html](http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_gnip.html)）提供的月均降水同位素数据。氘盈余（d-excess= $\delta D - 8 \times \delta^{18}O$ ）是水体氢氧稳定同位素组成的重要指标，可直观地反映水体同位素分馏程度。蒸发越强烈，同位素受到分馏作用的影响越大，d-excess 值就越小。

1.3 数据分析

采用 SPSS 对土壤水同位素数据进行描述性统计分析，并对不同包气带和土层深度进行方差分析。

采用 Origin2018 拟合分析不同深层土壤水氢氧稳定同位素的关系。

2 结 果

2.1 垂直剖面土壤含水量和土壤质地变化特征

从表 2 可以看出, 农田 II 土壤含水量平均值最大, 梨园 II 土壤含水量平均值与农田 II 相似, 农田 I

含水量平均值最小, 但与梨园 I 含水量平均值较接近。梨园 I、农田 I 和农田 II 剖面土壤含水量随深度层的变化均为浅层土壤含水量最高, 深层土壤含水量最低, 梨园 II 剖面则为浅层土壤含水量最低, 深层土壤含水量最高, 梨园 II 深层土壤含水量最大( 23.8%), 农田 I 深层土壤含水量最小( 9.1%)。图 2a 和图 2c 可以看出, 梨园 I 剖面 20~23 m、农田 I 剖面 9.5~12.5 m 和 16~18 m 土壤含水量均明显减少。

表 2 不同土地利用类型包气带土壤水稳定同位素统计特征

Table 2 Statistics of soil water isotopes at different soil depths from various land-use patterns

样点 Sites	深度 Soil layers	$\delta D/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	氘盈余 d-excess/ $\text{‰}$	土壤含水量 SWC/ $\%$
梨园 I	浅层	-70.8	-9.3	3.7	18.5
Peal orchard I	中层	-69.5	-9.2	4.5	17.2
	深层	-65.8	-8.0	-2.0	11.3
梨园 II	浅层	-68.3	-9.2	5.5	17.0
Peal orchard II	中层	-70.6	-9.7	7.3	19.2
	深层	-68.0	-9.3	6.5	23.8
农田 I	浅层	-68.1	-8.6	0.4	20.3
Farmland I	中层	-68.7	-8.7	0.9	13.4
	深层	-72.3	-8.5	-4.1	9.1
农田 II	浅层	-69.5	-8.8	0.5	22.2
	中层	-68.7	-8.9	2.7	21.9
Farmland II	深层	-68.4	-8.9	2.4	21.1

图 2 显示了典型包气带各剖面土壤质地分布不均, 呈现交错分布。梨园 I 表层为 0.5 m 厚的壤土, 0.5~16 m 为粉砂质壤土、黏土和粉砂质黏土交替分布, 17.5~18 m 为少量的壤土层, 20 m 以下均为砂壤土。梨园 II 表层为 0.5 m 厚的粉砂质壤土, 下层有少量砂质黏壤土和粉砂质黏土, 4~11 m 为不同厚度的粉砂质壤土和黏土层交替分布, 11~12 m 含有少量壤土, 15 m 以下为砂壤土。农田 I 浅层 0~4 m 为较厚的壤土层, 4~7 m 为黏土和粉砂质黏土交替分布, 7~13 m 主要为砂壤土和砂土, 其中 9.5~12.5 m 存在大量砂土层, 15 m 以下多为砂壤土, 也存在少量砂土。农田 II 表层为 1 m 左右的壤土层, 1~5.5 m 为粉砂质壤土和黏土交替分布层, 5.5~12.5 m 为粉砂质黏土层, 其中 10.5~11.5 m 夹杂少量砂壤土层, 12.5~16.5 m 为较厚的黏土层, 下方还有少量粉砂质黏土和砂质黏壤土层, 19 m 以下为

砂壤土, 并伴有少量砂土。

2.2 包气带土壤水稳定同位素垂直剖面变化特征

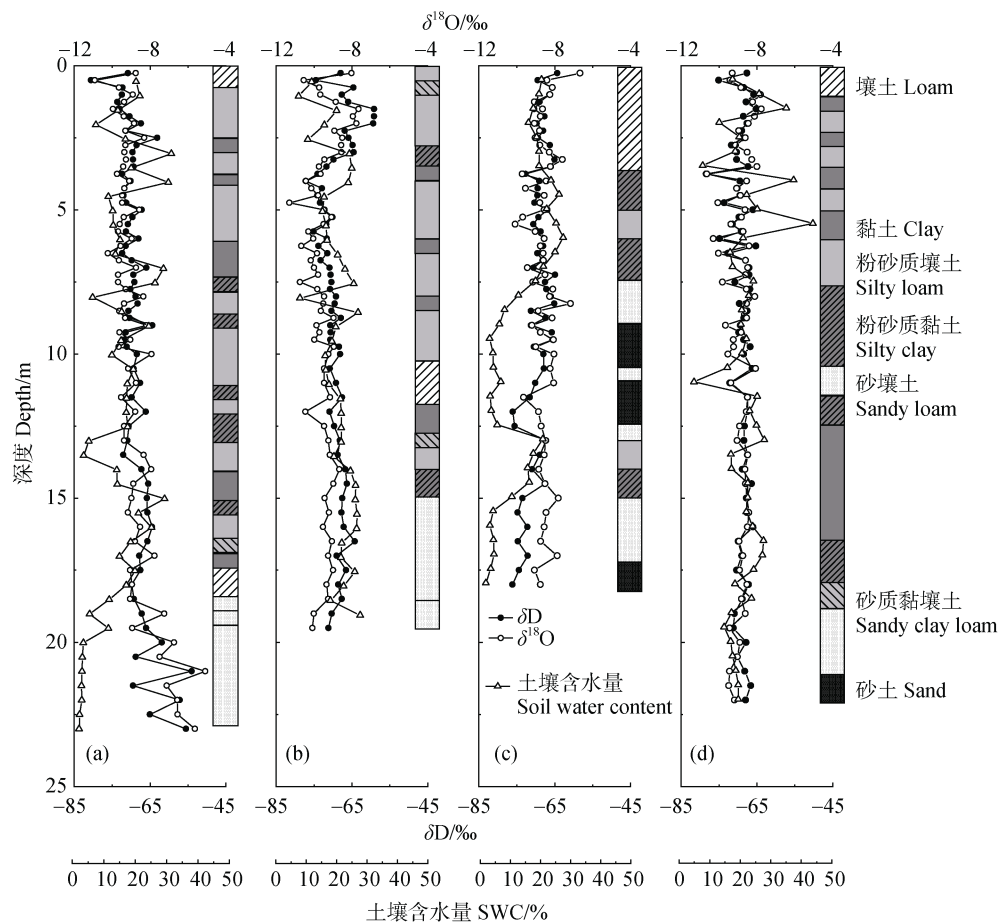
通过对华北平原典型包气带( 梨园 I、梨园 II、农田 I、农田 II ) 土壤水中氢氧稳定同位素进行统计分析, 结果表明采样点总体  $\delta D$  和  $\delta^{18}\text{O}$  的变化范围分别为:  $-80.6\text{‰} \sim -54.0\text{‰}$  和  $-11.3\text{‰} \sim -5.1\text{‰}$ , 其平均值分别为  $-69.0\text{‰} \pm 3.3\text{‰}$  和  $-8.9\text{‰} \pm 0.8\text{‰}$ 。梨园 I 包气带土壤水  $\delta D$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值波动范围最大, 梨园 II 次之, 而农田土壤水  $\delta D$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值波动范围相对较小,  $\delta D$  和  $\delta^{18}\text{O}$  的变化范围分别为:  $-80.6\text{‰} \sim -54.0\text{‰}$  和  $-11.3\text{‰} \sim -5.1\text{‰}$ ,  $-77.2\text{‰} \sim -59.2\text{‰}$  和  $-11.4\text{‰} \sim -8.0\text{‰}$ ,  $-76.1\text{‰} \sim -64.3\text{‰}$  和  $-8.8\text{‰} \sim -6.7\text{‰}$ ,  $-78.3\text{‰} \sim -65.2\text{‰}$  和  $-10.6\text{‰} \sim -7.8\text{‰}$ 。包气带土壤水  $\delta D$  和  $\delta^{18}\text{O}$  加权平均值农田 I (  $-68.2\text{‰}$ ,  $-8.7\text{‰}$  ) > 农田 II (  $-69.0\text{‰}$ ,  $-8.9\text{‰}$  ) > 梨园 I (  $-69.2\text{‰}$ ,  $-9.1\text{‰}$  ) > 梨园 II (  $-69.2\text{‰}$ ,  $-9.5\text{‰}$  )。



根据包气带土壤水氢氧同位素 ( $\delta D$  和  $\delta^{18}O$ ) 和土壤水垂直变化规律, 将土壤垂直剖面分为浅层 (0~5 m)、中层 (5~12 m) 和深层 (>12 m) 三层。梨园 I、梨园 II、农田 I、农田 II 浅层土壤水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值呈现较大的变化范围, 梨园 II 和农田 II 包气带土壤水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  变异系数均为浅层>中层>深层 (表 2), 表明其浅层  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值波动较大, 深层波动较小。而梨园 I 深层包气带  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  的变异系数相较浅层 (7.2%) 和中层 (15.4%) 偏大, 农田 I 包气带不同深度层土壤水  $\delta D$  变异系数与  $\delta^{18}O$  变异系数相反,  $\delta D$  变异系数为浅层最小, 深层最大  $\delta^{18}O$  变异系数为浅层最大, 深层最小。图 2 可以看出梨园 I、梨园 II 和农田 II 包气带土壤水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  在 0.25~0.5 m 处均出现显著变化, 此深度  $\delta D$  和

$\delta^{18}O$  值明显小于相邻其他土壤层, 梨园 I、梨园 II 包气带 2~3 m 深度也出现了明显的拐点, 此深度  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值明显变大; 而在梨园 I 包气带 18~20 m 土壤水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值呈现变大的趋势并呈现上下波动的规律性变化。

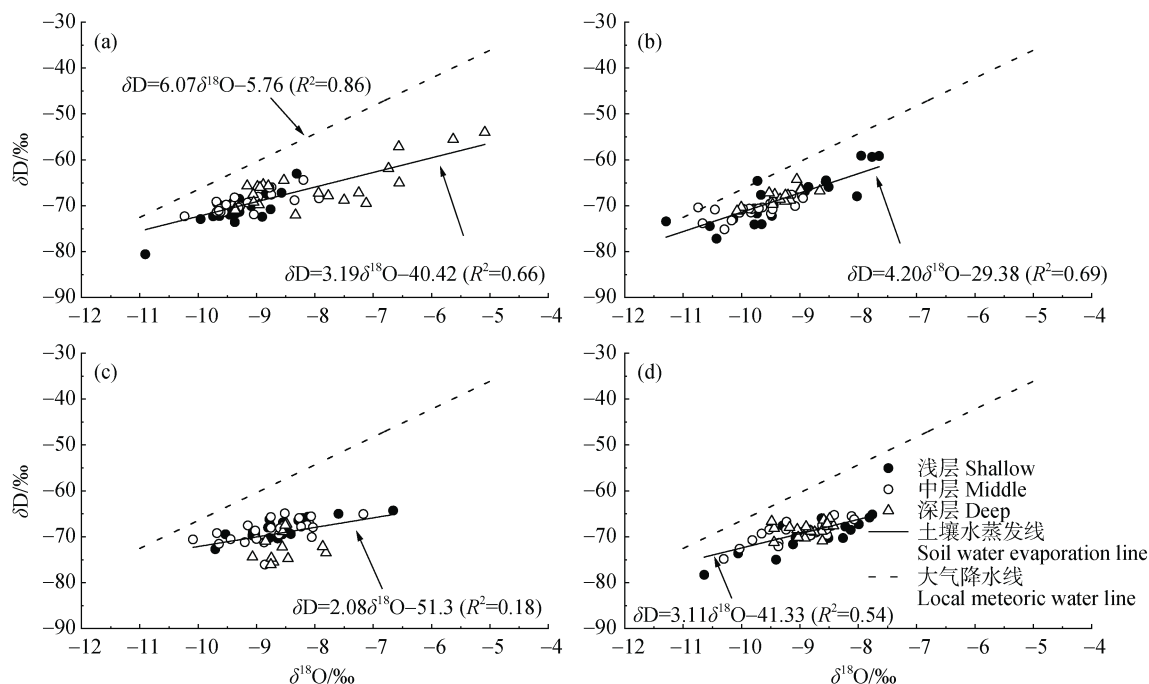
利用石家庄站 GNIP 多年 (1985—2002 年) 监测的月均降水同位素数据, 拟合得到研究区大气降水线:  $\delta D=6.07\delta^{18}O-5.76$  ( $R^2=0.86$ )。研究区土壤水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  间线性关系为  $\delta D=4.05\delta^{18}O-32.76$  ( $R^2=0.99$ ,  $n=245$ ), 其斜率和截距均小于研究区大气降水线的斜率和截距。图 3 给出了不同剖面土壤水同位素与大气降水线的关系, 显示各剖面土壤水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值均落在研究区大气降水线的右下方。梨园 I、梨园 II、农田 I、农田 II 包气带土壤水  $\delta D$



注: (a) 梨园 I, (b) 梨园 II, (c) 农田 I, (d) 农田 II。Note: (a) Pear orchard I, (b) Pear orchard II, (c) Farmland I, (d) Farmland II

图 2 典型土地利用类型下包气带土壤水氢氧稳定同位素 ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ )、土壤质地和土壤含水量随深度的变化

Fig. 2 Vertical variations of soil water stable isotopes ( $\delta D$  and  $\delta^{18}O$ ), soil texture and SWC in different land-use patterns



注: (a) 梨园 I, (b) 梨园 II, (c) 农田 I, (d) 农田 II。Note: (a) Pear orchard I, (b) Pear orchard II, (c) Farmland I, (d) Farmland II.

图 3 不同典型土地利用类型包气带土壤水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  散点分布

Fig. 3 Relationship between  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  of soil water from various land-use patterns

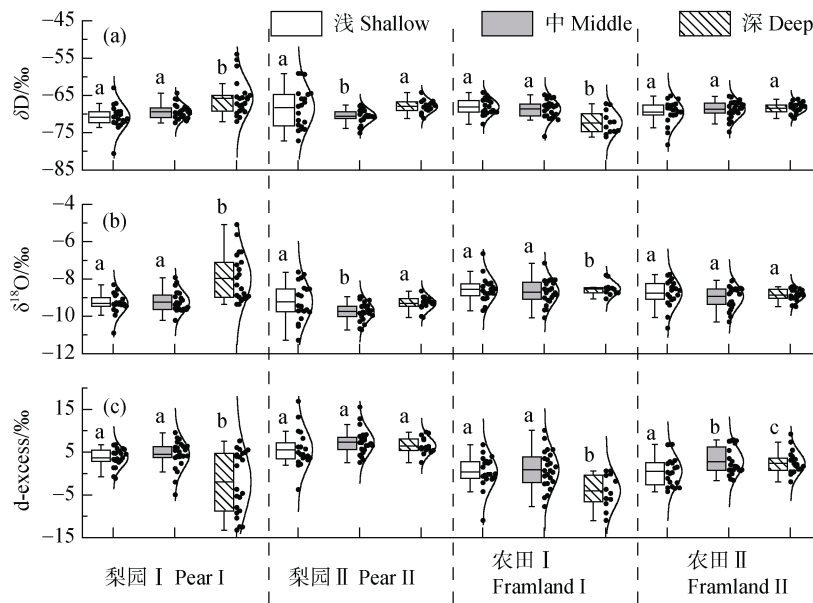
和  $\delta^{18}O$  间线性关系分别为  $\delta D = 3.19\delta^{18}O - 40.42$  ( $R^2 = 0.66$ ,  $n = 66$ ),  $\delta D = 4.20\delta^{18}O - 29.38$  ( $R^2 = 0.69$ ,  $n = 59$ ),  $\delta D = 2.08\delta^{18}O - 51.30$  ( $R^2 = 0.18$ ,  $n = 56$ ),  $\delta D = 3.11\delta^{18}O - 41.33$  ( $R^2 = 0.54$ ,  $n = 64$ )。

四个典型土地利用类型 (梨园 I、梨园 II、农田 I、农田 II) 包气带土壤水 d-excess 平均值分别为  $2.1\text{‰} \pm 5.5\text{‰}$ ,  $6.5\text{‰} \pm 3.4\text{‰}$ ,  $-0.4\text{‰} \pm 4.5\text{‰}$ ,  $1.9\text{‰} \pm 3.3\text{‰}$ ; 梨园土壤水 d-excess 平均值相比农田较大, 其中梨园 II 的 d-excess 平均值最大, 农田 I 土壤水 d-excess 平均值最小。梨园 I 和农田 I 土壤水 d-excess 平均值均为中层最大, 深层最小, 梨园 II 和农田 II 土壤水 d-excess 平均值均为中层最大, 浅层最小。利用 SPSS 对包气带不同深度层土壤水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  和 d-excess 进行单因素方差分析, 发现梨园 I 浅层土壤水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  和 d-excess 值与深层相比存在显著差异 (图 4), 梨园 II 浅层土壤水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值与中层存在显著差异, 而梨园 II 包气带土壤水 d-excess 值在浅层、中层与深层均无显著差异; 农田 I 与梨园 I 的分析结果类似, 农田 II 包气带各深度层  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值无显著差异, 各深度层 d-excess 值则存在明显差异。

### 3 讨论

#### 3.1 典型包气带土壤水 $\delta^{18}O$ 和 $\delta D$ 关系

区域大气降水线与剖面土壤水同位素的关系反映了土壤水的补给来源以及土壤水同位素受蒸发分馏的程度<sup>[25-26]</sup>。图 3 显示华北平原典型包气带土壤水同位素值位于研究区大气降水线的右下方, 且土壤水  $\delta^{18}O$ - $\delta D$  的斜率明显小于大气降水线, 表明典型包气带土壤水蒸发作用强烈。王欢欢等<sup>[25]</sup>发现黄土塬区小麦田剖面深 10 m 以下土壤水氢氧稳定同位素值位于当地大气降水线右下方; 程立平和刘文兆<sup>[26]</sup>在长武塬区小麦田、果园等也发现相同规律, 两者均得出结论: 研究区土壤水主要补给来源为降水, 且降水在补给土壤水的过程中发生了强烈的蒸发作用, 使土壤水中同位素富集。邢丽娜<sup>[27]</sup>在华北平原的门头沟区—廊坊市—宁海县剖面也发现此区域深剖面地下水有相同的现象, 此外还发现浅层土壤水同位素值高于深层, 说明浅层地下水受到的蒸发作用更强, 与本研究结果相似。马斌等<sup>[17]</sup>在石家庄包气带土壤水入渗的研究中, 发现包气带土壤水同位素偏离中国大气降水线, 主要分布在中国大气



注：不同字母表示不同深度同位素值之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。Different letters indicate the significant difference ( $P < 0.05$ ) of isotopic values among soil profiles.

图 4 典型土地利用类型包气带不同深度同位素值 ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  and  $\text{d-excess}$ ) 变化特征

Fig. 4 Box-whisker diagrams showing the median, mean, and standard deviation (SD) for  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ , and  $\text{d-excess}$  values of soil water from different land-use types

降水线右下方。图 3 显示四个典型包气带土壤水同位素值基本落于研究区大气降水线右下方，说明华北平原梨园和农田土壤水补给来源主要为降水，且补给过程中受到不同程度的蒸发作用的影响。

农田土壤水同位素值偏离大气降水线的程度更大，说明农田土壤水较梨园受到更强烈的蒸发作用影响，土壤水同位素富集程度更高，导致农田土壤水蒸发线的截距和斜率小于梨园。梨园与农田土壤水同位素除受降水补给的影响，还受到蒸发和人类活动的影响，总体上各剖面浅层土壤水同位素变异系数大于深层，表明浅层土壤水更易受到降水、蒸发的影响；梨园和农田浅层土壤水同位素值变异系数存在差异，农田浅层土壤水同位素值变异系数较梨园小，表明梨园和农田浅层土壤水同位素受到的影响程度不同，这与梨园和农田植被覆盖类型不同有关。在植被覆盖率较高时，太阳辐射对土壤表层的影响显著下降，土壤表层温度降低，很大程度上抑制土壤水的蒸发<sup>[28]</sup>。

### 3.2 典型包气带土壤水稳定同位素变化特征

不同植被覆盖下土壤水同位素的垂直变化与土壤质地、土壤含水量和植被覆盖类型等密切相关，这也反映了土壤水差异性的垂直入渗过程<sup>[29-32]</sup>。研究

区梨园和农田 II 剖面土壤水同位素值在 0.25~0.5 m 处均出现贫化现象， $\text{d-excess}$  值也出现较大值，这主要与研究区近期降水补给土壤水密切相关<sup>[29]</sup>，且土壤含水量明显增加（图 2）。马斌<sup>[29]</sup>通过室内烘干土壤柱入渗实验发现，土柱氢氧稳定同位素值在 0.4 m 和 0.7 m 附近出现明显贫化，主要由于降水在入渗过程中在此深度层逐渐靠近湿润锋面，土壤水同位素值在 0~0.8 m 左右随深度增加而减小。梨园 2~3 m 处出现同位素富集现象，而农田在此深度没有明显变化（图 2），这主要是由于梨园和农田植被根系不同，根系吸水深度也不相同。侯士彬等<sup>[22]</sup>在太行山荒草地 0.1~0.3 m 垂直剖面 and 刺槐林地 0.1~0.5 m 垂直剖面也发现了土壤水同位素值变化的拐点，认为这种拐点变化是不同土地利用类型下植物的根系深度造成的。果林根系发达，根系埋深较深，耗水量大。3~4 m 左右果树根系生长密集，吸收周围土壤水的能力较强，导致此深度土壤含水量降低。除了根系影响外，人类活动也会影响浅层土壤水同位素的蒸发富集效应。相较于农田，梨园缺少耕作活动，对表层土壤扰动较小，表层土壤大孔隙较少，土壤含水量下降导致浅层土壤水同位素富集；而农田由于受耕作活动的影响，土壤入渗能力强，则不



会发生表层土壤水同位素大量富集的现象<sup>[31]</sup>。梨园剖面2~3 m处土壤含水量明显低于同剖面5~10 m,且低于农田同深度土壤层,这主要是由于梨园受根系吸水影响进而降低了此深度的土壤含水量。黄亚楠等<sup>[32]</sup>在黄土高原土地利用方式对土壤水影响的研究中也发现果林根系分布对土壤含水量空间变化的影响,0~10 m处土壤含水量果林>农田,且果树根系的高耗水作用会导致0~5 m土壤水同位素的富集,与本研究的结果相似。

梨园 I、梨园 II 和农田 II 包气带土壤水同位素的分布特征为浅层土壤水同位素平均值大于中层,小于深层,这与包气带土壤水的蒸发富集和入渗过程密切相关<sup>[20, 22]</sup>。侯士彬等<sup>[22]</sup>认为这可能是降水对深层土壤水的补给较少,且入渗过程中土壤水会经过强烈的蒸发作用才能到达深层,导致深层土壤水同位素相对富集。研究区梨园相对农田0~5 m深度土壤水同位素值波动更明显,且2~3 m处有明显同位素富集,这说明梨园浅层土壤水变化受土壤水优先流影响显著,而农田根系较浅,因此土壤优先流作用在深层土壤水中不明显,导致农田土壤水同位素仅在0.5 m处出现明显波动。在梨园监测样地林下枯枝落叶覆盖在土壤表层,其在一定程度上能拦截并延长降水入渗时间,因此降水补给土壤水的过程较慢,而农田降水到达土层表面后快速入渗,因此农田浅层土壤水同位素相比梨园波动不明显。农田浅层土壤水同位素平均值与中层无显著差异,表明农田区包气带土壤水主要以活塞流入渗方式为主,而梨园包气带土壤水受优先流的补给方式影响,这与该区梨树和农田作物根系分布范围有关。研究发现华北平原区土层深厚,排水良好梨树根系可达3~4 m,而小麦玉米根系主要分布在0~0.4 m<sup>[33]</sup>。梨园 I 土壤剖面在20~23 m处表征土壤水同位素富集,且随深度有规律地波动,主要是由于在18~19.5 m剖面层土壤质地为壤土和砂质黏壤土致使土壤水滞留时间偏长,上层土壤水不能与此深度层土壤水充分混合,致使该层土壤水同位素与其他层土壤水同位素具有显著差异。

## 4 结 论

基于华北平原典型土地利用类型下(梨园、农田)包气带土壤水同位素监测和结果分析,得到以

下主要结论:(1)华北平原典型包气带浅层土壤水同位素值波动较大,且随深度增加土壤水同位素值趋于稳定,主要是浅层土壤水直接受降水和蒸发影响;不同土地利用方式下,农田浅层土壤水较梨园更易受到蒸发作用的影响;深层土壤水的变化主要受到混合作用和浅层地下水的影响。(2)典型土地利用类型包气带土壤水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  间线性关系为  $\delta D = 4.05\delta^{18}O - 32.76$  ( $R^2 = 0.99$ ,  $n = 245$ ),其斜率和截距均小于研究区大气降水线( $\delta D = 6.07\delta^{18}O - 5.76$ ,  $R^2 = 0.86$ ),表明典型包气带土壤水受到强烈的蒸发作用影响。四个典型包气带土壤水同位素值基本落在研究区大气降水线右下方,表明梨园和农田土壤水补给来源主要为降水,且补给过程中受到不同程度的蒸发作用影响。(3)梨园和农田包气带土壤水同位素总体变化特征为浅层土壤水同位素平均值大于中层,小于深层,农田浅层土壤水同位素平均值与中层无显著差异,而梨园包气带各层土壤水差异性显著,这与农田和梨园包气带土壤质地和植物根系埋深密切相关。

## 参考文献 (References)

- [1] Weil R R, Weismiller R A, Turner R S. Nitrate contamination of groundwater under irrigated coastal plain soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1990, 19 (3): 441—448.
- [2] Liu G D, Wu W L, Zhang J. Regional differentiation of non-point source pollution of agriculture-derived nitrate nitrogen in groundwater in Northern China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 107 (2/3): 211—220.
- [3] Ma H B, Li X X, Hu C S. Status of nitrate nitrogen contamination of groundwater in China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43 (6): 1532—1536. [马洪斌, 李晓欣, 胡春胜. 中国地下水硝酸盐污染现状研究[J]. *土壤通报*, 2012, 43 (6): 1532—1536.]
- [4] Zhang Y C, Lei H M, Zhao W G, et al. Comparison of the water budget for the typical cropland and pear orchard ecosystems in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 198: 53—64.
- [5] Min L L, Shen Y J, Pei H W, et al. Water movement and solute transport in deep vadose zone under four irrigated agricultural land-use types in the North China Plain[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 559: 510—522.
- [6] Hu K L, Huang Y, Li H, et al. Spatial variability of shallow groundwater level, electrical conductivity and nitrate concentration, and risk assessment of nitrate contamination in North China Plain[J]. *Environment*

- International, 2005, 31 ( 6 ): 896—903.
- [ 7 ] Zhang Z J. Investigation and evaluation of groundwater sustainable utilization in North China Plain[M]. Shijiazhuang : Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, 2007.[张兆吉. 华北平原地下水可持续利用调查评价[M]. 石家庄: 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 2007.]
- [ 8 ] Wang S Q, Zheng W B, Kong X L. Spatial distribution characteristics of nitrate in shallow groundwater of the agricultural area of the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26 ( 10 ): 1476—1482. [王仕琴, 郑文波, 孔晓乐. 华北农区浅层地下水硝酸盐分布特征及其空间差异性[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26 ( 10 ): 1476—1482.]
- [ 9 ] Xu Y D, Wang J K, Gao X D, et al. Application of hydrogen and oxygen stable isotope techniques on soil water research: A review[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32 ( 3 ): 1—9, 15. [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.]
- [ 10 ] Jin Y R, Lu K X, Li P, et al. Research on soil water movement based on stable isotopes[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 ( 4 ): 792—801. [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.]
- [ 11 ] Tian R C, Chen H S, Song X F, et al. Characteristics of soil water movement using stable isotopes in red soil hilly region of northwest Hunan[J]. Environmental Science, 2009, 30 ( 9 ): 2747—2754. [田日昌, 陈洪松, 宋献方, 等. 湘西北红壤丘陵区土壤水运移的稳定性同位素特征[J]. 环境科学, 2009, 30 ( 9 ): 2747—2754.]
- [ 12 ] Busari M A, Salako F K, Tuniz C, et al. Estimation of soil water evaporative loss after tillage operation using the stable isotope technique[J]. International Agrophysics, 2013, 27 ( 3 ): 257—264.
- [ 13 ] Mueller M H, Alaoui A, Kuells C, et al. Tracking water pathways in steep hillslopes by  $\delta^{18}\text{O}$  depth profiles of soil water[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 340—352.
- [ 14 ] Zimmermann U, Münnich K O, Roether W. Downward movement of soil moisture traced by means of hydrogen isotopes[M]//Isotope Techniques in the Hydrologic Cycle. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 2013: 28—36.
- [ 15 ] Yang B, Xie F T, Wen X F, et al. Diurnal variations of soil evaporation  $\delta^{18}\text{O}$  and factors affecting it in cropland in North China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36 ( 6 ): 539—549. [杨斌, 谢甫绶, 温学发, 等. 华北平原农田土壤蒸发  $\delta^{18}\text{O}$  的日变化特征及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2012, 36 ( 6 ): 539—549.]
- [ 16 ] Wang S Q, Song X F, Xiao G Q, et al. Applience of oxygen and hydrogen isotope in the process of precipitation infiltration in the shallow groundwater areas of North China Plain[J]. Advances in Water Science, 2009, 20 ( 4 ): 495—501. [王仕琴, 宋献方, 肖国强, 等. 基于氢氧同位素的华北平原降水入渗过程[J]. 水科学进展, 2009, 20 ( 4 ): 495—501.]
- [ 17 ] Ma B, Liang X, Lin D, et al. Tracing infiltration and recharge of the unsaturated zone using  $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$  isotopes in Shijiazhuang, North China Plain[J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33 ( 3 ): 163—168, 174. [马斌, 梁杏, 林丹, 等. 应用  $^2\text{H}$ 、 $^{18}\text{O}$  同位素示踪华北平原石家庄包气带土壤水入渗补给及年补给量确定[J]. 地质科技情报, 2014, 33 ( 3 ): 163—168, 174.]
- [ 18 ] Wei J W. Analysis of hydrogeochemistry and stable isotopes of surface water and groundwater in North China Plain[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012. [魏静文. 华北平原地下水与地表水的水文地球化学及氢氧同位素特征分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.]
- [ 19 ] Li F D, Song X F, Tang C Y, et al. Tracing infiltration and recharge using stable isotope in Taihang Mt., North China[J]. Environmental Geology, 2007, 53 ( 3 ): 687—696.
- [ 20 ] Ji W J, Huang Y N, Li B B, et al. Oxygen and hydrogen stable isotope compositions of soil water in deep loess profile under different land use types of northern Shaanxi, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30 ( 12 ): 4143—4149. [姬王佳, 黄亚楠, 李冰冰, 等. 陕北黄土区深剖面不同土地利用方式下土壤水氢氧稳定同位素特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30 ( 12 ): 4143—4149.]
- [ 21 ] Dai J J, Zhang X P, Luo Z D, et al. Variation of stable isotopes in soil water under *Cinnamomum camphora* woods in Changsha and its influencing factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 ( 6 ): 1514—1525. [戴军杰, 章新平, 罗紫东, 等. 长沙地区樟树林土壤水稳定同位素的变化及影响因素[J]. 土壤学报, 2020, 57 ( 6 ): 1514—1525.]
- [ 22 ] Hou S B, Song X F, Yu J J, et al. Stable isotopes characters in the process of precipitation and infiltration in Taihang mountainous region[J]. Resources Science, 2008, 30 ( 1 ): 86—92. [侯士彬, 宋献方, 于静洁, 等. 太行山区典型植被下降降水入渗的稳定同位素特征分析[J]. 资源科学, 2008, 30 ( 1 ): 86—92.]
- [ 23 ] Chen Z Y, Nie Z L, Zhang Z J, et al. Isotopes and sustainability of ground water resources, North China Plain[J]. Groundwater, 2005, 43 ( 4 ): 485—493.
- [ 24 ] Zhang Y F, Guo Y, Shen Y J, et al. Impact of planting structure changes on agricultural water requirement in North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28 ( 1 ): 8—16. [张雅芳, 郭英,

- 沈彦俊,等. 华北平原种植结构变化对农业需水的影响[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28 (1): 8—16.]
- [ 25 ] Wang H H, Si B C, Li M. Distribution of hydrogen and oxygen isotopes along deep soil profiles in a loess tableland[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37 (12): 53—59. [王欢欢, 司炳成, 李敏. 黄土塬区深剖面土壤水氢氧同位素分布特征[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37 (12): 53—59.]
- [ 26 ] Cheng L P, Liu W Z. Characteristics of stable isotopes in soil water under several typical land use patterns on Loess Tableland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23 (3): 651—658. [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.]
- [ 27 ] Xing L N. Groundwater hydrochemical characteristics and hydrogeochemical processes approximately along flow paths in the North China Plain[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012. [邢丽娜. 华北平原典型剖面上地下水化学特征和水文地球化学过程[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.]
- [ 28 ] Chung S O, Horton R. Soil heat and water flow with a partial surface mulch[J]. *Water Resources Research*, 1987, 23 (12): 2175—2186.
- [ 29 ] Ma B. Evaluation of water fractionation and infiltrated precipitation using hydrogen and oxygen stable isotopes[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017. [马斌. 氢氧稳定同位素指示水体分馏与降水入渗补给研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2017.]
- [ 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 ] Ma X N, Zhang M J, Li Y J, et al. Research advances on stable isotopes in soil water[J]. *Soils*, 2012, 44 (4): 554—561. [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.]
- [ 32 ] Huang Y N, Lin G W, Li Z. Impacts of changes in land use on ground water recharge on Baicao loess tableland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37 (3): 250—255. [黄亚楠, 林国伟, 李志. 黄土高原白草塬土地利用变化对地下水补给的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37 (3): 250—255.]
- [ 33 ] Wang Y Z, Shao L W, Liu X W, et al. Optimization of root sampling sites and modeling root length density distribution for wheat and maize[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37 (4): 365—372. [王艳哲, 邵立威, 刘秀位, 等. 小麦和玉米根系取样位置优化确定及根系分布模拟[J]. 植物生态学报, 2013, 37 (4): 365—372.]

(责任编辑: 檀满枝)