

DOI: 10.5846/stxb201404160739

张翔, 邓志民, 潘国艳, 吴绍飞, 肖洋, 朱才荣. 鄱阳湖湿地土壤水稳定同位素变化特征. 生态学报, 2015, 35(22): - .

Zhang X, Deng Z M, Pan G Y, Wu S F, Xiao Y, Zhu C R. Variation in Stable Isotope Composition in Soil Water in Poyang Lake Wetland. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(22): - .

鄱阳湖湿地土壤水稳定同位素变化特征

张 翔^{1,2,*}, 邓志民^{1,2}, 潘国艳^{1,2}, 吴绍飞^{1,2}, 肖 洋^{1,2}, 朱才荣^{1,2}

1 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉大学, 武汉 430072

2 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉大学, 武汉 430072

摘要: 土壤水稳定同位素组成的时空变化反映了区域降水与前期水分的混合及蒸散发过程。2013 年 7—9 月对鄱阳湖湿地保护区三个断面不同土地覆盖下 0—2 m 剖面土壤水进行分层采样, 以及采集修水和赣江的河水, 测定其氢、氧稳定同位素, 分析土壤水稳定同位素沿土壤剖面的变化规律、土壤水运动机制及其主要补给来源。研究表明, 鄱阳湖采样区三个断面土壤水同位素 $\delta^{18}O$ 值变化范围 -10.63‰ — -1.17‰ , 其中 7 月份的土壤水 $\delta^{18}O$ 均值最小, 8、9 月份土壤水 $\delta^{18}O$ 均值相对较大。表层 (0—60 cm) 土壤水同位素富集可能因为蒸发作用, 深层土壤水同位素组成变化因降水入渗与前期水分混合作用。不同土地覆盖表层土壤水同位素变化较大, 随着深度的增加, 同位素变化减少。从水分溯源上, 断面一的土壤水同位素组成主要受降水的影响, 断面二的土壤水同位素组成主要受赣江和降水的影响, 而断面三则主要受鄱阳湖水体和降水的影响。研究结果可为鄱阳湖区域地下水资源的评价提供参考

关键词: 鄱阳湖; 土壤水; 稳定同位素

Variation in Stable Isotope Composition in Soil Water in Poyang Lake Wetland

ZHANG Xiang^{1,2,*}, DENG Zhimin^{1,2}, PAN Guoyan^{1,2}, WU Shaofei^{1,2}, XIAO Yang^{1,2}, ZHU Cairong^{1,2}

1 State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China

2 Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan 430072, China

Abstract: Soil water plays a crucial role in the hydrological cycle by, for example, delivering nutrients to plants, acting as storage to buffer deficiencies in surface water availability, and serving as a medium to transfer suspended and dissolved material. Understanding water balance processes can be aided by knowledge of the relative contributions of soil water source components, which could be a mix of recent precipitation, older groundwater, and water that has been subjected to evapotranspiration. We used stable oxygen isotopes as a geochemical tracer to identify soil water composition in a wetland area of Poyang Lake, the largest freshwater lake in China, which contains the largest single area of habitat for migratory birds. The focus was on characterizing the variation with depth of the stable isotope composition in soil water profiles, understanding the mechanisms of soil water movement, and identifying the main source of soil water recharge. Sampling was undertaken from July to September 2013 in Poyang Lake National Nature Protection Area at three wetland sites with different land cover characteristics and different degrees of proximity to the lake and river environments. Water samples collected from the Xiu and Gan rivers, which flow into the study area, and soil water sampled at 10-cm intervals over the top 200 cm, were analyzed for stable oxygen isotope composition. For all soil water samples, the value of δD relative to $\delta^{18}O$ plotted above the global meteoric water line (GMWL), implying an evaporation level lower than the global average. The $\delta^{18}O$ value of soil water from all samples ranged from -10.63‰ to -1.17‰ , with mean values of -3.99‰ , -4.99‰ , and -5.02‰ for

基金项目: 国家自然科学基金 (51279143, 71073115)

收稿日期: 2014-04-16; 网络出版日期: 2015-04-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangxiang@whu.edu.cn

the three sites. The mean $\delta^{18}O$ value of soil water was lowest in July. The stable isotope compositions of soil water were found to be mainly controlled by precipitation and evaporation. The value of $\delta^{18}O$ declined with increasing soil depth, with most values of $\delta^{18}O$ at depths of 10 to 60 cm ranging from $-6‰$ to $-2‰$, at depths of 80 to 150 cm ranging from $-8‰$ to $-3‰$, and at a depth of 200 cm ranging from $-7‰$ to $-4‰$. The ^{18}O -enrichment of shallow (<60 cm) soil water was probably due to evaporation, while the stable isotope composition of water in deep soil layers suggested it was a mix of recent precipitation and older groundwater. For shallow (<80 cm) soil water, the three sites had a similar pattern of stable isotope composition with depth, but there were differences among sites in absolute values. At one site, stable isotope compositions of soil water were mainly influenced by precipitation; at another site, by precipitation and Gan River water; and at the third site, by precipitation and Poyang Lake water. This study provided reference data that could make a useful contribution to the assessment of regional groundwater resources in Poyang Lake.

Key Words: Poyang Lake; soil water; stable isotope

湿地水文在植被变化中起着关键作用,湿地植被生长及组成变化与土壤含水量、地下水位以及土壤质地等密切相关^[1-3]。鄱阳湖是中国的第一大淡水湖,也是国际重要湿地。近年来,受长江上游来水和省内降水减少的双重影响,鄱阳湖水位持续走低。2013 年 9 月份鄱阳湖星子站水位跌破 12 m,十分罕见。鄱阳湖水位的降低直接影响着湿地土壤水分的补给,导致鄱阳湖呈现一片大草原的景观。土壤水是水循环过程重要环节之一。了解土壤水及地下水的补给过程对区域水资源评价非常重要。稳定同位素(^{18}O 和 D)已被广泛地用于评价区域补给与蒸发^[4-5],特别是,作为地球化学示踪剂用于溯源分析^[6-7]。

土壤水中的稳定同位素变化受大气降水入渗、地表蒸发、土壤水分的水平迁移和垂直运动等多种因素的影响。因此利用土壤水稳定同位素的变化可以揭示其他技术难于获取的土壤水通量信息(如蒸发、蒸腾、入渗和渗透等)。国外学者对土壤水同位素的研究较早,早在 1967 年 Zimmermann 等^[8]就利用氢同位素技术报道了非饱和层土壤水分运动机制;Hsieh 等^[6]通过土壤水中氧同位素的组成定量分析了水量平衡中蒸发与蒸腾的变化趋势,指出蒸发与蒸腾比随着年降水的增加和温度的降低而减小;Gazis 和 Feng^[9]通过 6 个站点的土壤水稳定同位素组成,证实了土壤水流中存在着混合流和优先流。国内学者对土壤水同位素的研究较晚,但发展较快。田立德等^[10]根据 1998 年夏季测得的降水和土壤水中稳定同位素研究了青藏高原中部不同层位土壤剖面中稳定同位素的变化特征;Li 等^[11]应用稳定同位素研究了中国北部太行山的降水-土壤水-地下水的补给过程;程立平和刘文兆^[12]分析了陕西长武县黄土塬区 5 种不同土地利用的土壤水稳定同位素特征;陈格君^[13]探讨了鄱阳湖湿地土壤碳同位素的组成,并对土壤有机质的溯源进行了分析。但目前对鄱阳湖湿地土壤水稳定同位素特征的研究尚为空白。为此,本文以鄱阳湖湿地国家自然保护区为试验点,对三个断面的不同土地利用下 0—2 m 剖面土壤样品进行稳定同位素分析,研究土壤水稳定同位素剖面分布及其变化特征,揭示土壤水流运动机制及土壤水补给来源,为鄱阳湖区水资源的调控与规划及湿地生态系统的保护与恢复提供参考。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

鄱阳湖是我国最大的淡水湖和国际重要湿地,位于长江中下游南岸的江西省的北部,地理坐标是 $115^{\circ}49'—116^{\circ}46'E$, $28^{\circ}21'—29^{\circ}52'N$,上接江西境内赣江、信江、抚河、饶河、修水五大干流(下称“五河”),下有湖口通长江。本文以鄱阳湖国家级自然保护区为研究对象(如图 1 所示),其管辖有大湖池、沙湖、蚌湖、朱市湖、梅西湖、中湖池、大汉湖、象湖、常湖池等 9 个湖泊,是当今世界上重要的候鸟越冬栖息地,全球最主要的白鹤与东方白鹳越冬地,而且是全球重要生态区。年平均气温为 $16.5—17.8^{\circ}C$,年降水量为 $1368.7—1633.8$ mm,其中 4—6 月份占全年 46%。蒸发量 $800—1200$ mm,其中 7—9 月占全年的一半,故形成夏季洪涝,秋季

干旱的气候特点^[14]。除沙湖山、吉山和太阳山为砂质质地外,湿地土壤主要分布比较均一的壤土质地。区内主要发育有 5 种土壤类型:红壤、水稻土、黄褐土、冲积土和潮土,其分布与高程和微地形有关,其中潮土是区内的典型湿地土壤,主要分布于圩堤到湖盆的生态交错带^[15]。

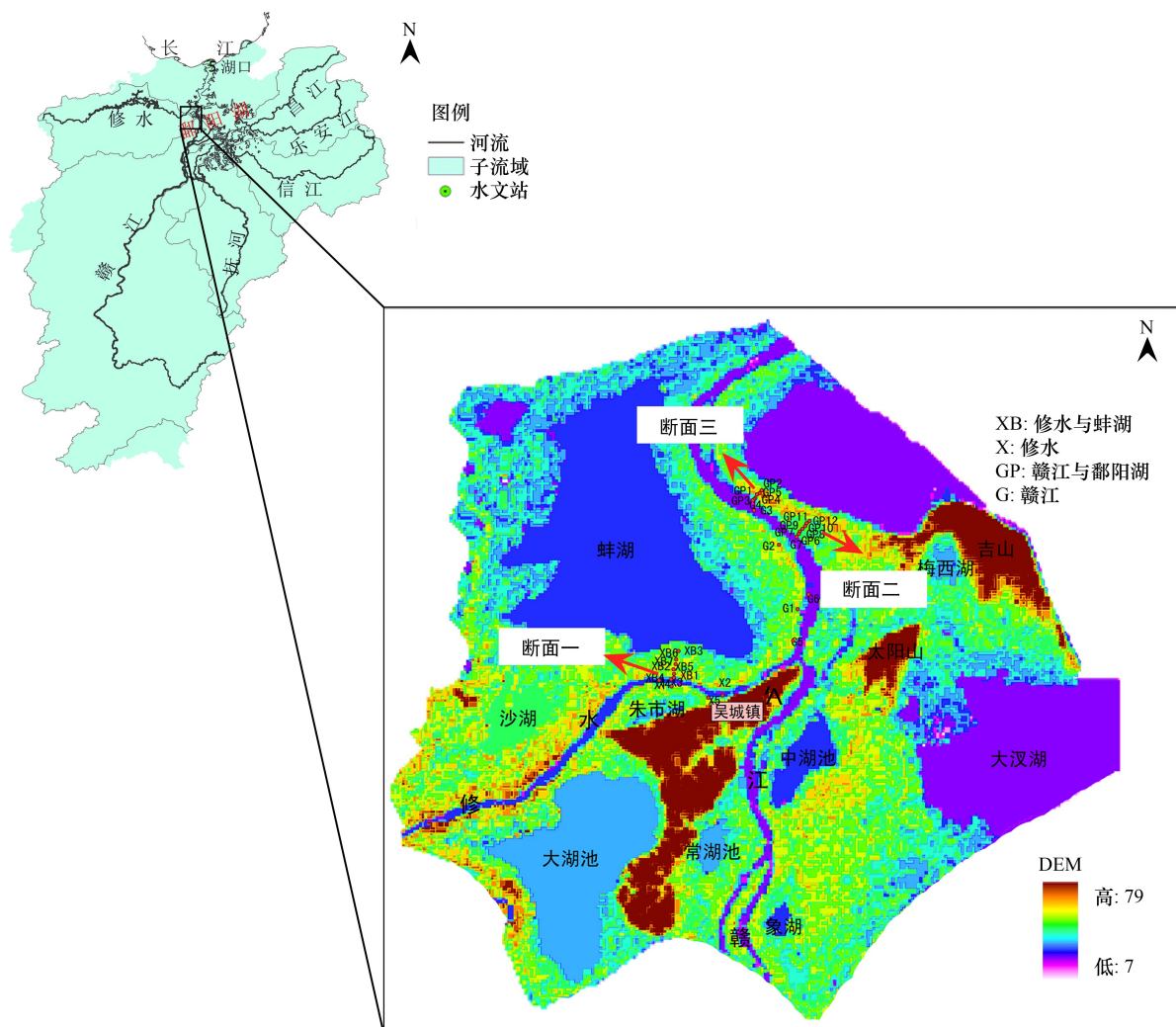


图 1 研究区域及采样分布图

Fig. 1 Sketch map of the study area and location of investigated sites

1.2 样品采集及分析

2013 年 7—9 月于九江市永修县吴城镇湿地保护区的三个断面采集土壤样品(如图 1 所示),共 403 个,三个断面的剖面示意图及采样点分布如图 2 所示。其中断面一采样点为 8 个,共采集样品数 175 个;断面二采样点为 7 个,共采集样品数 134 个,且采样时间仅为 9 月份;断面三采样点为 5 个,共采集样品数 94 个。采用圆筒土钻钻取 2 m 深的土壤样品,每 10 cm 深取样一次,其中有 4 个采样点处,由于土壤质地或土壤含水量等原因,最深处(地下深 2 m)的土壤样品无法收集。现场将土样用保鲜袋包装,再用保鲜膜包扎放入密封袋带回实验室,采用真空蒸馏技术^[16]提取土壤水样。所有水样采集后立刻装入 5 mL 玻璃瓶密封冷藏保存。同期在赣江和修水上采集河水样品共 20 个。水样的氢氧稳定同位素在武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室稳定同位素分析实验室测定,采用 MAT253 同位素比质谱仪连接 Flash EA/HT 测定水样中 $\delta^{18}O$ 和 δD 的含量, $\delta^{18}O$ 和 δD 的仪器分析精度分别为 0.2‰和 2‰。所有水样测定结果以 V-SMOW 为标准的千分差表示:

$$\delta^{18}O = \left[\frac{{}^{18}O/{}^{16}O \text{ 样品}}{{}^{18}O/{}^{16}O \text{ V-SMOW}} - 1 \right] \times 1000, \delta D = \left[\frac{(D/H) \text{ 样品}}{(D/H) \text{ V-SMOW}} - 1 \right] \times 1000 \quad (1)$$

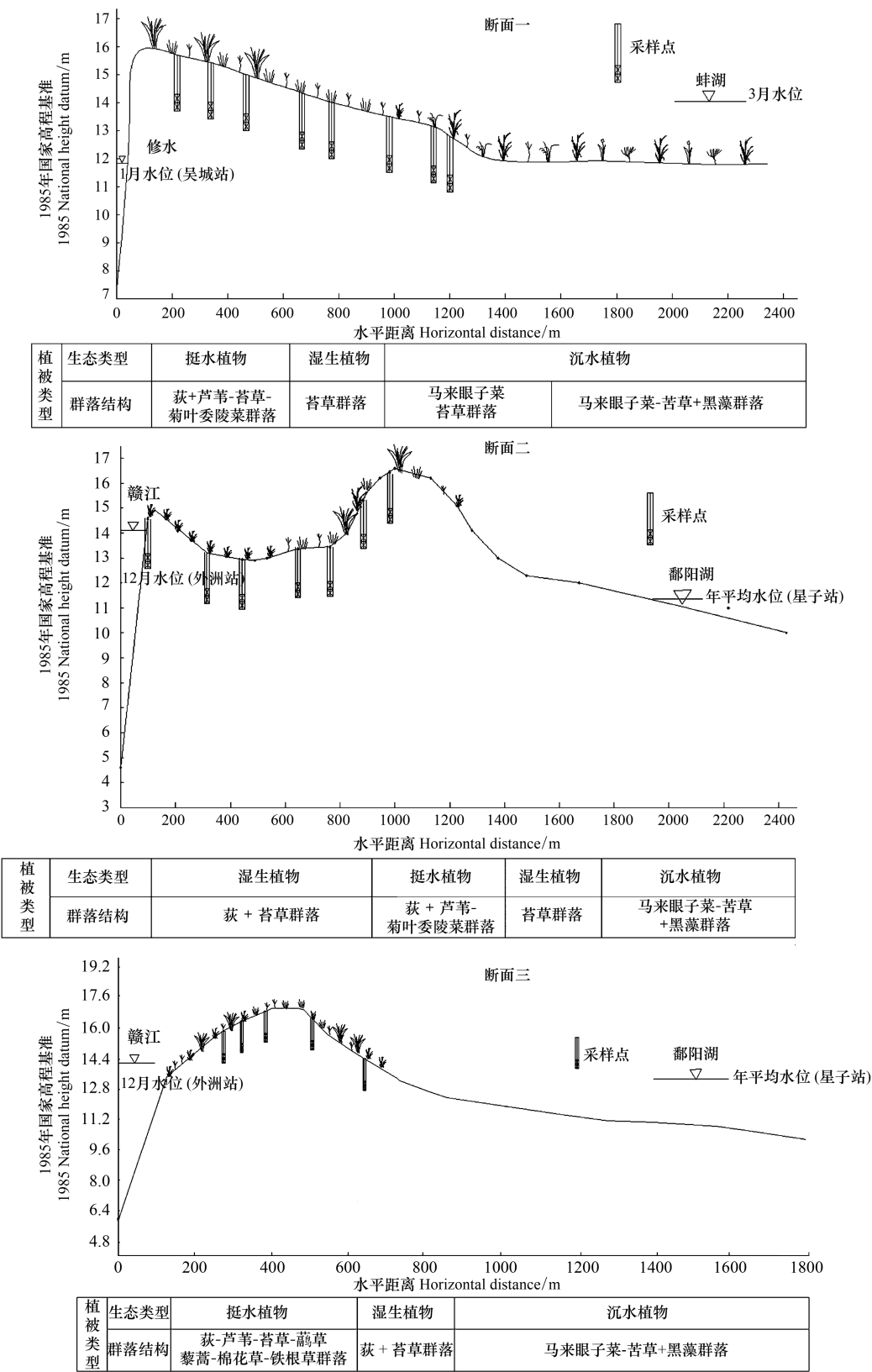


图2 采样区三个断面的剖面示意图
Fig. 2 Sketch map of three sections in the sampled site

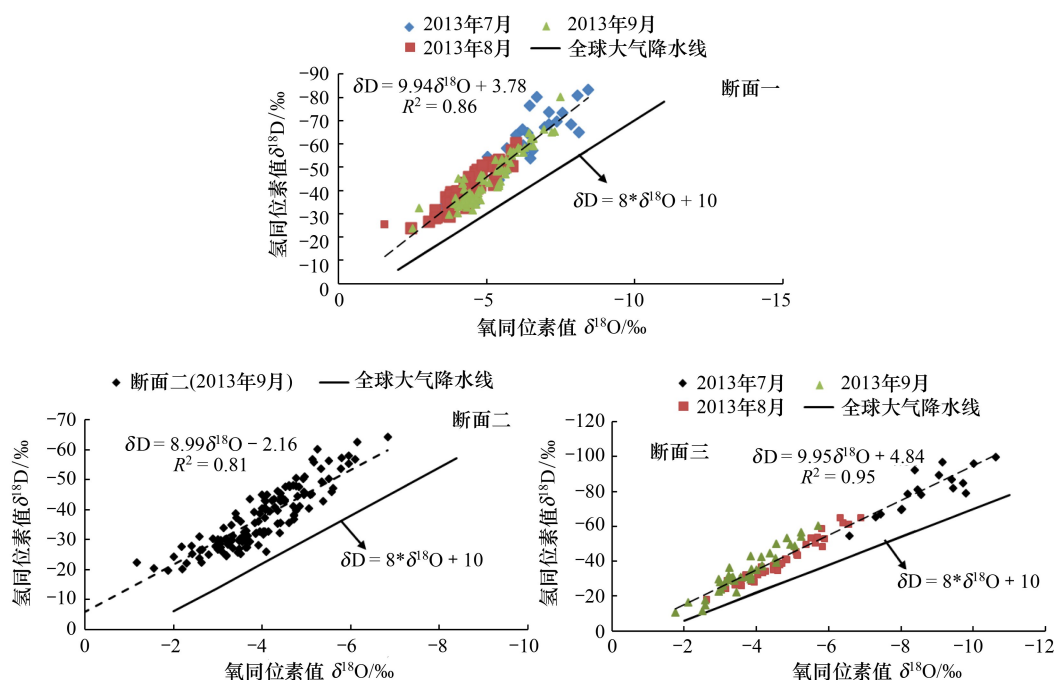


图3 土壤水同位素总体变化特征

Fig. 3 Characteristics of stable isotope in soil water

2 结果与讨论

2.1 鄱阳湖采样区土壤水同位素总体特征

图3显示鄱阳湖采样区三个断面土壤水同位素总体分布特征, $\delta^{18}O$ 值变化范围 -10.63‰ — -1.17‰ , 其中断面二的 $\delta^{18}O$ 值变化范围最小, 其次是断面一和三; 断面二的 $\delta^{18}O$ 均值 $>$ 断面三的 $>$ 断面一的, 分别为 -3.99‰ 、 -4.99‰ 和 -5.02‰ 。由图3(a)和(c)可知, 7月份的土壤水 $\delta^{18}O$ 均值最小, 8、9月份土壤水 $\delta^{18}O$ 均值较大。由于吴城镇位于永修县东北部, 距南昌市 90 km, 距九江市 120 km, 故本文用南昌市的气候特征代替吴城镇气候(采样区的气候)。由图4可知, 南昌市7月份的降水量最大, 蒸发量介于中间; 8月份的蒸发量最大, 降水量较低; 9月份的降水量最小, 蒸发量也最小。故本研究认为降水和蒸发是控制该断面土壤水同位素组成的重要因素。由图3可以看出, 三个断面土壤水同位素值均落于全球大气降水线(Global Meteoric Water Line, GMWL)之上, 表明三个断面的蒸发作用均小于全球蒸发平均值。鄱阳湖土壤水同位素氘盈余(3.78‰)小于全球大气降水(10‰), 因为鄱阳湖为亚热带温暖湿润气候, 而 GMWL 是根据世界各地的采样数据而得到, 是综合了干旱地区与湿润地区的降水数据。断面一和三土壤水同位素的斜率相接近, 均大于断面二的。断面二氘盈余小于断面一和三的, 是因为断面二的土壤采样时间为9月份, 其他两个断面的采样时间为7—9月份, 9月份的平均相对湿度大于7和8月份的, 而9月份的蒸发量小于7和8月份的。

2.2 鄱阳湖采样区土壤水 $\delta^{18}O$ 值剖面

降水和河湖水(修水、赣江和鄱阳湖水)是该研究区土壤水来源。蒸发是表层土壤水同位素富集的主要因素。Depalol 等^[17]指出能够引起土壤水同位素分馏的土壤深度一般只有 0.5—3 m。基于 403 个土壤样品的

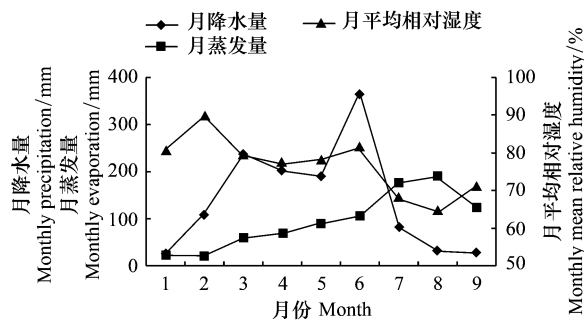


图4 南昌市月降水量、蒸发量和平均相对湿度(中国气象科学数据共享服务网)

Fig. 4 monthly precipitation, evaporation and average relative humidity in Nanchang city (provided by China Meteorological Data Sharing Service System)

土壤水同位素组成如图 5 所示。结果显示,所有土壤水同位素值均位于当地大气降水线的左上侧。在土壤深 10—60 cm 间,大部分 $\delta^{18}\text{O}$ 值落在 -6‰ — -2‰ 之间;在土壤深度 80—150 cm 间,大部分 $\delta^{18}\text{O}$ 值落在 -8‰ — -3‰ 之间;随着深度的增加, $\delta^{18}\text{O}$ 值继续减小,在土壤深度 180 cm、200 cm,大部分 $\delta^{18}\text{O}$ 值落在 -7‰ — -4‰ 之间,而 6—9 月的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围 -13.33‰ — -5.29‰ ,表明蒸发作用在该研究区域所影响的深度在 60 cm 左右,从而能够引起更深层土壤水同位素组成变化的只有混合作用,降水存在以优先流形式快速通过土壤剖面到达土壤深处。Chung 和 Horton^[18]以及 Bristow 和 Horton^[19]研究表明,土壤表层覆盖物可能对近地表的土壤物理环境具有巨大的影响,特别是在土壤深度 40 cm 以上。不同的覆盖物对土壤水蒸发的抑制强度不同。因此,三个断面的蒸发趋势线不同可能是因为不同的地表植物对表层土壤水同位素组成的影响程度不同。

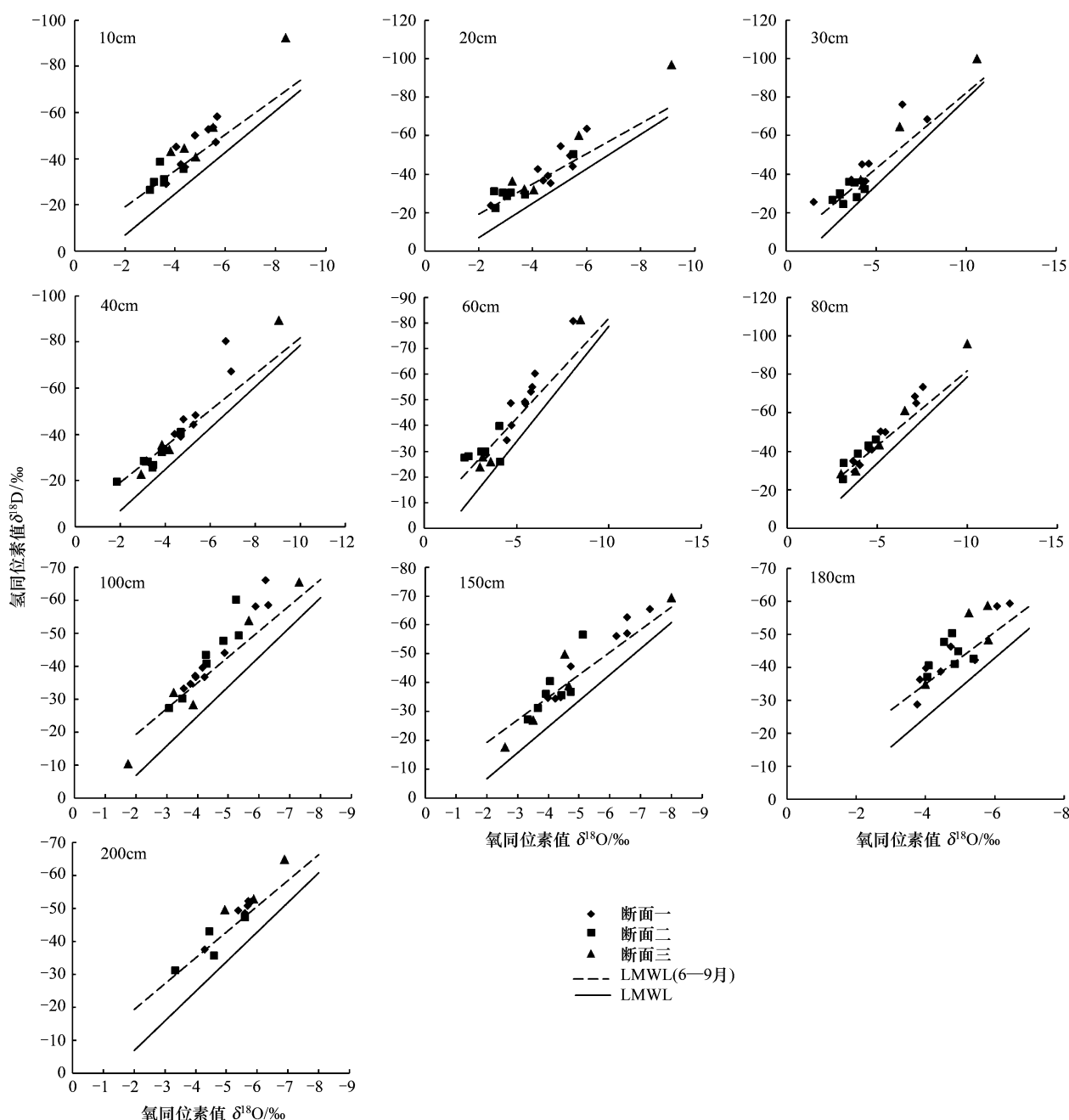


图 5 不同深度土壤水同位素组成 (LMWL: Local Meteoric Water Line)

Fig. 5 Stable isotope composition of soil water at different soil depth

2.3 降水同位素组成

图 6 为基于 55 个降水样品的 2010 年全年和 6—9 月的南昌市氢氧同位素组成^[20], 全年大气降水线的斜率(8.97‰)和截距(11.05‰)均大于全球大气降水线的(8‰和 10‰), 而 6—9 月的降水线斜率(7.82‰)和截距(-3.67‰)均小于全球大气降水线的。全年降水 δD 值的变化范围-105.48‰—-2.52‰, 平均值和标准差分别为-43.01‰和 32.10‰; $\delta^{18}O$ 值变化范围-13.56‰—-0.99‰, 平均值和标准差分别为-6.03‰和 3.46‰。6—9 月的降水 $\delta^{18}O$ 值的变化范围-13.33‰—-5.29‰, 平均值和标准差分别为-9.16‰和 2.16‰。由此可见, 6—9 月降水 $\delta^{18}O$ 值的平均值和标准差均小于全年的, 因为 6—9 月为南昌市的雨季, 降水集中, 即所谓的“降水效应”。

2.4 降水和土壤水入渗补给

由于气候条件、植被类型、下垫面条件以及包气带岩性特征等不同, 不同的地区具有不同的补给特征, 土壤水中的氢氧稳定同位素呈现出不同的变化特征。7—9 月各个断面土壤水 $\delta^{18}O$ 均值沿土壤剖面变化特征如图 7 所示。结果显示, 总体上, 断面一和断面三沿土壤剖面变化趋势基本一致, 但变化幅度有所差异, 断面三表层 0—30 cm 土壤水 $\delta^{18}O$ 均值沿土壤剖面变化趋势与其他两个断面相同, 而在土壤剖面最深处(2 m)则表现出相反的趋势。在土壤深度 80 cm 以上, 断面二的土壤水 $\delta^{18}O$ 均值与断面一和三差异较大, 而在土壤深度 80 cm 以下, 三个断面的土壤水同位素组成变化不大, 主要是因为地表覆盖不同, 导致净辐射及地表温度差异进而影响蒸发作用。断面一、断面二和断面三土壤水 $\delta^{18}O$ 均值变化范围分别为-5.67—-3.19‰、-4.76—-3.19‰和-5.91—-4.36‰。6—9 月的降水 $\delta^{18}O$ 值的变化范围

-13.33—-5.29‰, 7—9 月的修水 $\delta^{18}O$ 值的变化范围-4.75—-3.75‰(如图 8 所示), 故断面一土壤水同位素组成主要受降水的影响; 7—9 月的赣江 $\delta^{18}O$ 值的变化范围-5.36—-3.30‰(如图 9 所示), 7—9 月鄱阳湖湖体的 $\delta^{18}O$ 值的变化范围-8.30—-5.65‰(图 10), 故断面二土壤水同位素组成主要受赣江和降水的影响, 而断面三主要受鄱阳湖水体和降水的影响。

3 结论

根据 2013 年 7—9 月鄱阳湖湿地保护区三个断面不同土地利用下 0—2 m 剖面土壤水稳定同位素的研究, 得出以下结论:

(1) 土壤水同位素 $\delta^{18}O$ 值变化范围-10.63‰—-1.17‰, 其中 7 月份的土壤水 $\delta^{18}O$ 均值最小, 8、9 月份土壤水 $\delta^{18}O$ 均值相对较大, 降水和蒸发是控制土壤水同位素组成的重要因素。

(2) 土壤水同位素值均落于全球大气降水线之上, 表明研究区的蒸发作用小于全球蒸发平均值, 且蒸发作用在该研究区域所影响的深度为 60 cm。

(3) 不同土地利用对土壤同位素组成的影响程度不同, 表层土壤深度(80 cm 以上)表现的尤为突出。

(4) 三个断面的土壤水补给源不同, 断面一土壤水同位素组成主要受降水的影响, 断面二土壤水同位素组成主要受赣江和降水的影响, 而断面三主要受鄱阳湖水体和降水的影响。

致谢: 本文特别感谢 2014 年度武汉大学国家外国专家局“高端外国专家项目”特聘专家 Christopher James Gippel 博士对英文摘要的修改及图件提供的宝贵意见。

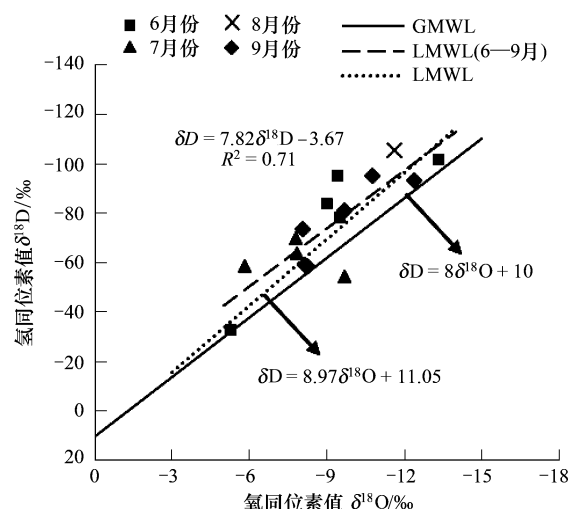


图 6 南昌市 2010 年和 6—9 月降水同位素组成

Fig. 6 Stable isotope composition of precipitation in 2010 and from June to September in Nanchang city

参考文献 (References):

- [1] 胡振鹏, 葛刚, 刘成林, 陈伏生, 李述. 鄱阳湖湿地植物生态系统结构及湖水位对其影响研究. 长江流域资源与环境, 2010, 19(6): 597-605.
- [2] Chui T F M, Low S Y, Liong S Y. An ecohydrological model for studying groundwater-vegetation interactions in wetlands. Journal of Hydrology, 2011, 409(1): 291-304.
- [3] Ren G H, Deng B, Shang Z H, Hou Y, Long R J. Plant communities and soil variations along a successional gradient in an alpine wetland on the Qinghai-Tibetan Plateau. Ecological Engineering, 2013, 61: 110-116.
- [4] Allison G B, Barnes C J. Estimation of evaporation from non-vegetated surfaces using natural deuterium. Nature, 1983, 301(5896): 143-145.
- [5] Saxena R K, Dressie Z. Estimation of groundwater recharge and moisture movement in sandy formations by tracing natural oxygen-18 and injected tritium profiles in the unsaturated zone // Proceedings of the Symposium on Isotope Hydrology in Water Resource Development. Vienna: IAEA, 1984: 139-150.
- [6] Hsieh J C C, Chadwick O A, Kelly E F, Savin S M. Oxygen isotopic composition of soil water: Quantifying evaporation and transpiration. Geoderma, 1998, 82(1-3): 269-293.
- [7] Bugalho M N, Barcia P, Caldeira M C, Cerdeira J O. Stable isotopes as ecological tracers: an efficient method for assessing the contribution of multiple sources to mixtures. Biogeosciences, 2008, 5: 1351-1359.
- [8] Zimmermann U, Münnich K O, Roether W. Downward movement of soil moisture traced by means of hydrogen isotopes. Geophysical Monograph Series, 1967, 11: 28-36.
- [9] Gaziz C, Feng X. A stable isotope study of soil water: evidence for mixing and preferential flow paths. Geoderma, 2004, 119(1): 97-111.
- [10] 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): 289-295.
- [11] Li F D, Song X F, Tang C Y, Liu C M, Yu J J, Zhang W J. Tracing infiltration and recharge using stable isotope in Taihang Mt., North China. Environmental Geology, 2007, 53(3): 687-696.
- [12] 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. 应用生态学报, 2012, 23(3): 651-658.
- [13] 陈格君. 鄱阳湖湿地土壤碳、氮分布特征及其来源分析[D]. 南昌: 东华理工大学, 2013.
- [14] 朱海虹, 张本. 鄱阳湖——水文·生物·沉积·湿地·开发整治. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997.
- [15] 毛建华, 邱小剑, 游海, 莫明浩. 鄱阳湖典型湿地土壤空间分布格局研究. 江西师范大学学报: 自然科学版, 2007, 31(2): 215-218.
- [16] West A G, Patrickson S J, Ehleringer J R. Water extraction times for plant and soil materials used in stable isotope analysis. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2006, 20(8): 1317-1321.
- [17] DePaolo D J, Conrad M E, Maher K, Gee G W. Evaporation effects on oxygen and hydrogen isotopes in deep vadose zone pore fluids at Hanford, Washington. Vadose Zone Journal, 2004, 3(1): 220-232.
- [18] Chung S O, Horton R. Soil heat and water flow with a partial surface mulch. Water Resources Research, 1987, 23(12): 2175-2186.
- [19] Bristow K L, Horton R. Modeling the impact of partial surface mulch on soil heat and water flow. Theoretical and Applied Climatology, 1996, 54(1-2): 85-98.
- [20] 刘萍. 江西省酸雨的氢、氧、硫同位素特征及成因探讨[D]. 南昌: 东华理工大学, 2012.
- [21] 丁梯平, 高建飞, 石国钰, 陈峰, 罗绶荣, 王成玉, 韩丹. 长江水氢、氧同位素组成的时空变化及其环境意义. 地质学报, 2013, 87(5): 661-676.
- [22] Hu C H, Froehlich K, Zhou P, Lou Q, Zeng S M, Zhou W B. Seasonal variation of oxygen-18 in precipitation and surface water of the Poyang Lake Basin, China. Isotopes in Environmental and Health Studies, 2013, 49(2): 188-196.