
鄱阳湖湿地土壤—植物—地下水 稳定氧同位素组成分析¹

邓志民¹，张翔^{2*}，张华³，潘国艳²，秦学全⁴

(1 长江水资源保护科学研究所，湖北武汉 430051 ；

2 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室，湖北武汉 430072 ；

3 江西省勘察设计研究院，江西南昌 330095 ；

4 山东省鲁北地质工程勘察院，山东德州 253015)

摘要：近年来，鄱阳湖水位持续走低，极端干旱事件频繁发生，湿地生态系统结构与功能遭受破坏。为此，于 2014 年鄱阳湖湿地保护区两个断面分层采集 0 — 100 cm 土壤，并采集优势种植物和河湖水以及地下水数据，运用稳定同位素技术，分析了土壤—植物—河湖水—地下水稳定同位素变化特征，并探寻它们之间的补给关系。结果表明，两断面土壤水氧同位素变化范围分别为—10.48‰ ~ —5.23‰ 和—12.39‰ ~ —6.55‰，算术平均值分别为—8.36‰ 和 8.63‰。断面一表层（0 — 30 cm）土壤水氧重同位素较富集，且随深度增加而减小；断面二表层（0 — 40 cm）土壤水中氧同位素组成基本无变化。断面一的地下水主要是受降水补给，断面二可能是受降水和河湖水共同补给。鄱阳湖湿地两断面优势种植物萌草叶片水的氧同位素值最大，为—0.9‰，其次是灰化苔草和芦苇，分别为—4.23‰ 和—5.25‰。

关键词：稳定氧同位素；水分补给；鄱阳湖湿地

中图分类号：5 1527 **文献标识码：**A **文章编号：**1004 — 8227 (2016) 06 — 0989 — 07

DOI : 10.11870 / Cjlyzyyhjz01606016

¹收稿日期：2015 — 0930 ； 修回日期：2016 — 02 — 03

基金项目：国家自然科学基金项目“基于稳定碳同位素的牧草水分利用效率研究”（51409191）

作者简介：邓志民（1985 —），男，博士，工程师，主要从事同位素生态水文方面研究。E-mail : whudzmngx @ 163com

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

鄱阳湖是我国第一大淡水湖，是国际重要湿地。近年来，鄱阳湖高水位逐渐降低，低水位持续时间逐渐增长^[1]，且年最低水位呈现显著的下降趋势^[2]。鄱阳湖极端干旱事件频发，引起国内外学者的广泛关注^[3-6]。湖水位的高低对洲滩土壤含水量起到重要作用，鄱阳湖水位低枯是湿地植被退化的主要原因^[7]。因此，研究土壤-植物-河湖水稳定氢氧同位素变化特征以探索水分的来源、迁移等动态变化规律，对鄱阳湖湿地植被的保护与恢复以及湿地生态系统的可持续发展具有重要的现实意义。

水分是湿地植被的根本，水的稳定同位素在分析水分来源、迁移和混合等动态变化以及植物水分利用的研究中发挥着日益重要的作用。Dawson 等^[8]利用氢同位素比率分析了河边生长的植物使用很少或根本没有使用附近水面的河水。Phillips 等^[9]运用稳定氢氧同位素采用混合模型对多种来源的混合水进行了溯源分析。Meibner 等^[10]利用稳定氢氧同位素探寻植物吸水深度，张翔等^[11]利用稳定氢氧同位素分析鄱阳湖湿地土壤水补给来源。故本文以鄱阳湖湿地为研究区域，通过野外采集土壤、河水、地下水和植物等数据，运用稳定同位素技术探讨鄱阳湖湿地土壤水氧同位素变化特征及其水分来源，以及分析湿地植物氧同位素变化特征。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域

鄱阳湖位于长江之南，江西省北部，地理坐标为 115° 49' - 116° 46' E, 28° 21' - 29° 52' N，是我国最大的淡水湖。江西鄱阳湖国家级自然保护区管辖有大湖池、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，是生物多样性十分丰富的国际重要湿地。年平均气温为 16.5 °C - 17.8 °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。湖区主汛期为 4 - 7 月份，8 - 9 月受长江来水的顶托和倒灌影响，维持高水位。区内主要发育土壤类型为红壤、水稻土、黄褐土、冲积土和潮土，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。鄱阳湖区湿地植物群落沿湖滩地势的变化，土壤结构、水体深度的不同，总体上明显沿水分梯度呈环带状分布。在全湖尺度上，从优势群落比率来看，灰化苔草是鄱阳湖面积最大、分布最广的植被类型。

1.2 数据采集与处理

由于鄱阳湖低水位时，蚌湖受其低水位波动影响较小^[12]，所以于蚌湖与修水间的断面一和赣江与鄱阳湖间的断面二上每隔约 150m 分别布置 4 个采样点。于 2014 年 4 月采集河水、地下水、土壤和植物，共采集样品数 99 个，详见表 1 所示。土壤样品共采集 77 个。采用圆筒土钻钻取 100 cm 深的土壤样品，每 10 cm 深取样一次，其中断面二采样点 4 由于土壤质地及土壤含水量等原因，最深处（地下深 90 - 100 cm）的土壤样品无法收集；采集土壤样品的同时，采用 TDR 仪器测量每层土壤体积含水量；植物样品于土壤样品采集点周围采集优势种植物（断面一植物优势种为芦苇，断面二为灰化苔草），共采集植物样品 8 个；地下水于土壤采样点处采集，故共采集地下水样品 8 个；河水于断面的上、中、下 3 个位置采集样品数 7 个，如图 1 所示。

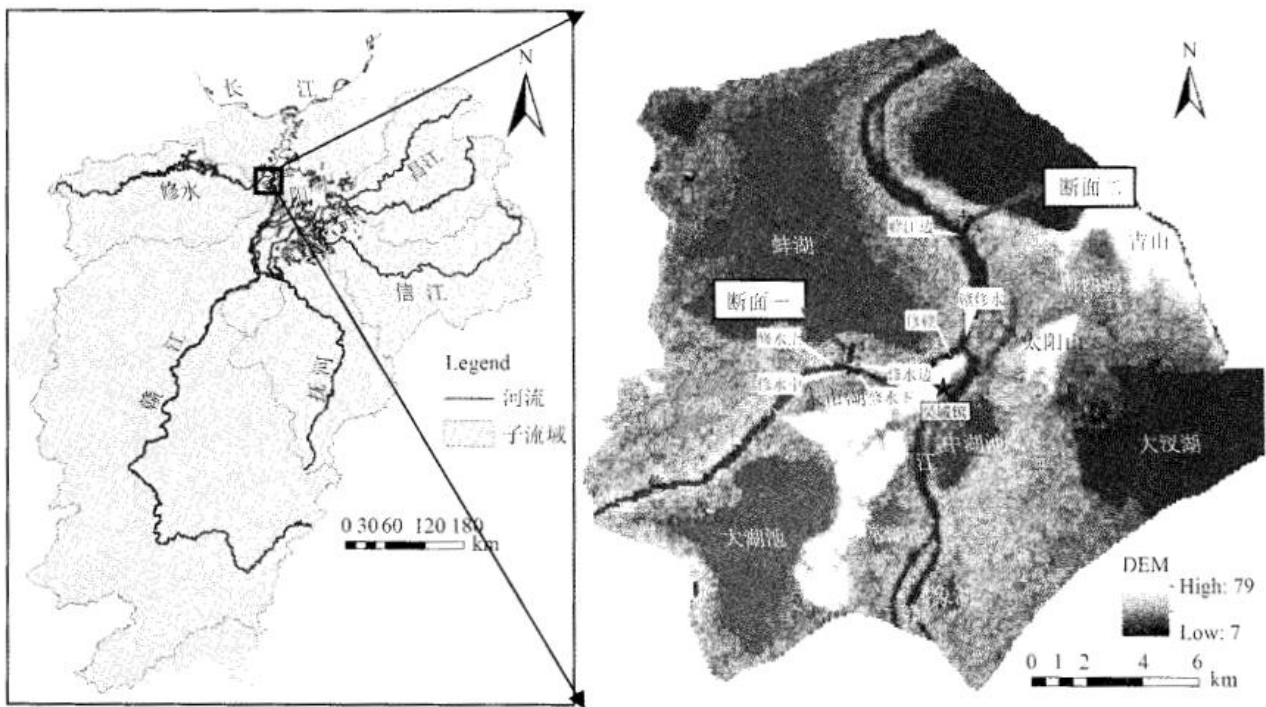


图 1 研究区域及断面分布示意图

Fig.1 Sketch Map of the Study Area and the Location of Cross Sections

表 1 野外采集的样品种类及其数量

Tab.1 Type and Number of Samples

样品种类	河水	地下水	土壤		植被	
			断面一	断面二	断面一	断面二
数量(个)	7	8	39	38	4	4

所有水样均用 60 mL 的聚乙烯塑料瓶子装满, 避免瓶内有气泡以防止水样蒸发, 瓶盖用密封膜或保险膜密封, 放入已有冰袋的保温箱中保存带回实验室后冷藏保存。现场将土样装入 8 mL 的玻璃瓶中, 再用保鲜膜包扎瓶口放入保温箱中; 将植被样品用保鲜袋包装, 再用保鲜膜包扎放入密封袋, 最后放入保温箱中保存, 带回实验室后土样和植物样品均冷冻保存。土壤水分和植物水分在中国林业科学研究院同位素实验室利用真空抽取装置抽取^[13]。水样的稳定氧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 $\delta^{18}O$ 的含量, $\delta^{18}O$ 仪器分析精度为 0.3%。所有水样测定结果以 V-SMOW 为标准的千分差表示:

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

2 结果与讨论

2.1 土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 特征

断面一土壤中氧同位素组成特征如图 2 (a) 所示。土壤水氧同位素变化范围为 $-10.48\text{‰} \sim -5.23\text{‰}$ ，算术平均值为 -8.36‰ 。总体上土壤中氧同位素值随深度的增加而减小，表层 ($0 \sim 30\text{cm}$) 土壤水氧重同位素较富集，且随深度增加而减小，主要是由于表层水分易受强烈蒸发导致同位素分馏；深层 70cm 以下各采样点的土壤水氧同位素值变化不大，变化趋势不明显。然而，采样点 2 表层氧同位素值较小，表层 $0 \sim 40\text{cm}$ 土壤深的氧同位素值随深度的增加而增大，这种变化趋势与田日昌等^[14]研究结果一致，可能是植被覆盖类型不同导致的差异。

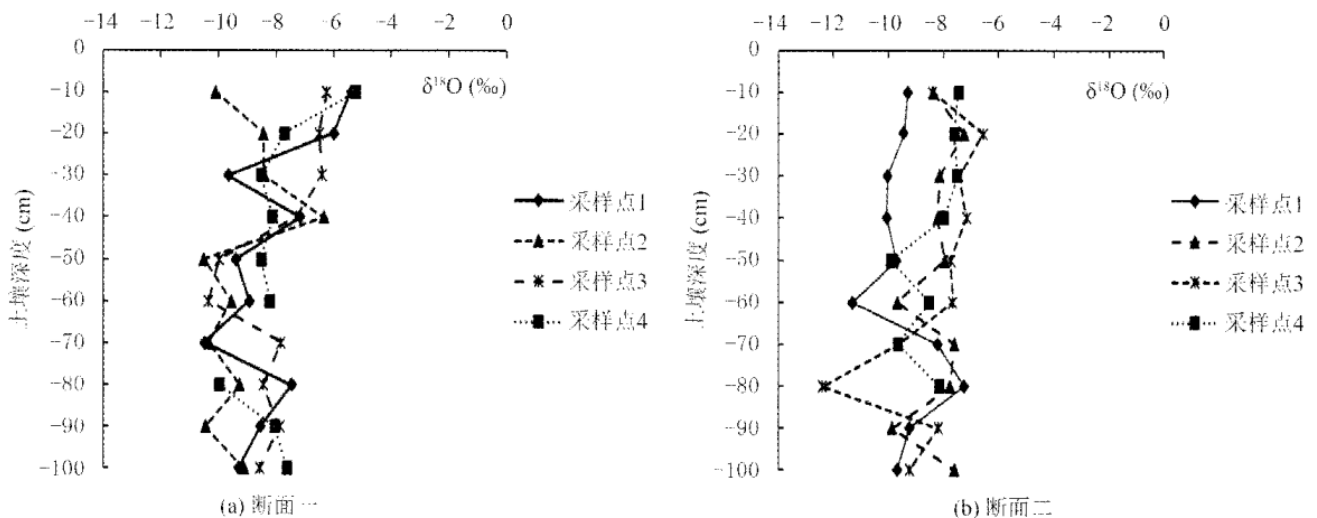


图 2 剖面土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 分布(注：土壤深度“-”代表方向)

Fig.2 $\delta^{18}\text{O}$ Value of Soil at Different Layer

断面二土壤中氧同位素组成特征如图 2 (b) 所示。土壤水氧同位素变化范围为 $-12.39\text{‰} \sim -6.55\text{‰}$ ，算术平均值为 -8.63‰ ，与断面一的土壤水氧同位素算术平均值相当。各采样点表层 ($0 \sim 40\text{cm}$) 土壤中 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化较小，标准差分别为 0.39 、 0.50 、 0.77 和 0.24 ，Clark 等^[15]认为土壤中 $\delta^{18}\text{O}$ 值标准差小于分析误差的 2 倍时氧同位素组成基本无变化的，本实验 $\delta^{18}\text{O}$ 的测量精度为 0.3‰ ，故本研究认为表层土壤中 $\delta^{18}\text{O}$ 组成相对稳定，可能是因为该断面采样点处植物优势种为灰化苔草，其盖度大^[16, 17]，表层蒸发作用小。Bristow 和 Horton^[18]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 40cm 以上。随着深度的增加 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈杂乱无章的变化现象。采样点 1 表层 ($0 \sim 40\text{cm}$) 土壤中 $\delta^{18}\text{O}$ 值较小，均值为 -9.71‰ ，而采样点 2、3 和 4 表层 ($0 \sim 40\text{cm}$) $\delta^{18}\text{O}$ 值相接近，均值为 -7.67‰ ，表明采样点 1 土壤的通透性比其他三个采样点强，也可能与植被覆盖度等有关。1 号采样点 60cm 和 3 号采样点 80cm 处氧同位素值较小，分别为 -11.29‰ 和 -12.39‰ ，1 号采样点 60cm 处氧同位素值较小原因有待进一步验证，但可排除受降水的影响，因为从图 3 可知， 60cm 处土壤体积含水量最低，即排除降水通过优先流形式到达该处的可能；采样点 3 可能是土壤中存在大孔隙，降水通过优先流形式入渗到土壤深处。

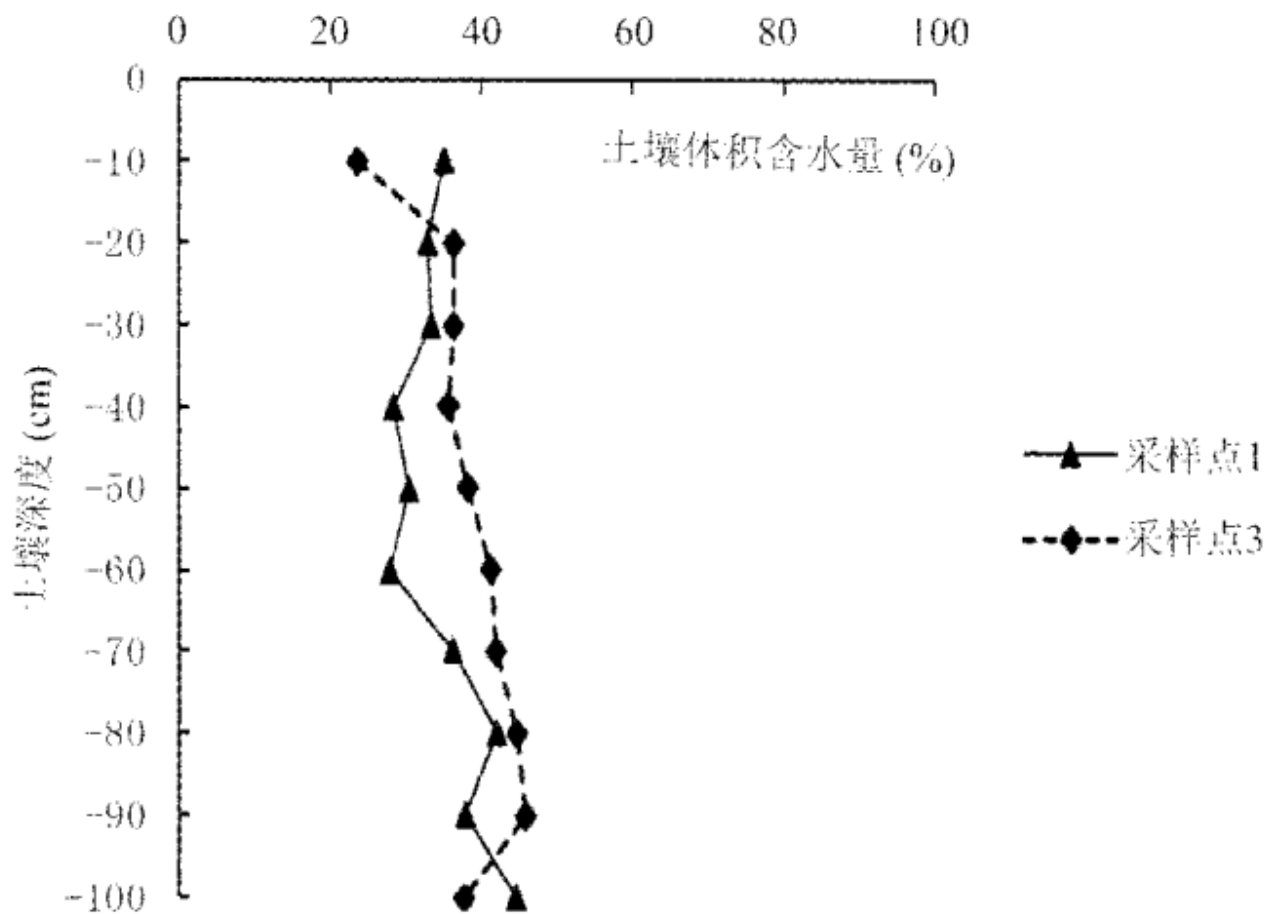


图 3 断面二采样点1和3的土壤剖面体积含水量

Fig.3 Volumetric Water Content of Soil at Different Layer at First and Third Sample Point at Second Site

2.2 地下水与河水 $\delta^{18}O$ 特征

断面一和断面二采集的地下水中氧同位素组成特征如图 4 所示。断面一和二的地下水氧同位素变化范围分别为 -8.15% -6.64% 和 -5.33% -3.14% ，算术平均值分别为 -7.13% 和 -14% 。断面一的地下水氧同位素值小于断面二的，两个断面 4 个采样点的地下水氧同位素值均呈现中间采样点的氧同位素值大于两边的，这可能跟它们各自的补给源及其埋深有关，由表 2 可知，断面一的地下水埋深基本上大于断面二的，故断面一地下水受蒸发作用弱，同位素值偏低。由图 5 可知，流经断面一的修河水氧同位素值为 -7.24% -3.43% ，流经断面二的两个赣江水氧同位素值为 -3.35% 和 -4.64% ，除了修水上和修水下两个采样点的河水氧同位素较低，其他点的河水氧同位素值基本相接近，总体上，赣江水氧同位素值大于修水的，这与梁越^[9]研究结果相一致。由图 4 和图 5 可知，断面一采样点的地下水氧同位素值小于修水中河水的，而断面二上的与赣江水几乎相接近的，结合当地大气降水同位素值^[20]可知，断面一的地下水主要是受降水补给，断面二可能是受降水和河湖水共同补给^[11]。

另外，结合表 2 的地下水深以及土壤水与地下水氧同位素值可知，除了断面一采样点 1 的地下水氧同位素值与相应地下深度的土壤水氧同位素值相接近外，其余的地下水氧同位素值均大于相应深度的土壤水的氧同位素值，且均大于表层土壤水的氧同位素值（除了断面一采样点 3—4 地下水氧同位素值与表层 20 cm 深土壤水的相接近外）。这可能跟野外打的钻孔和植被类型及其盖度有关，由于地下水位较浅，且钻孔口密封措施不到位而暴露野外，导致蒸发作用更强烈产生重同位素的富集。

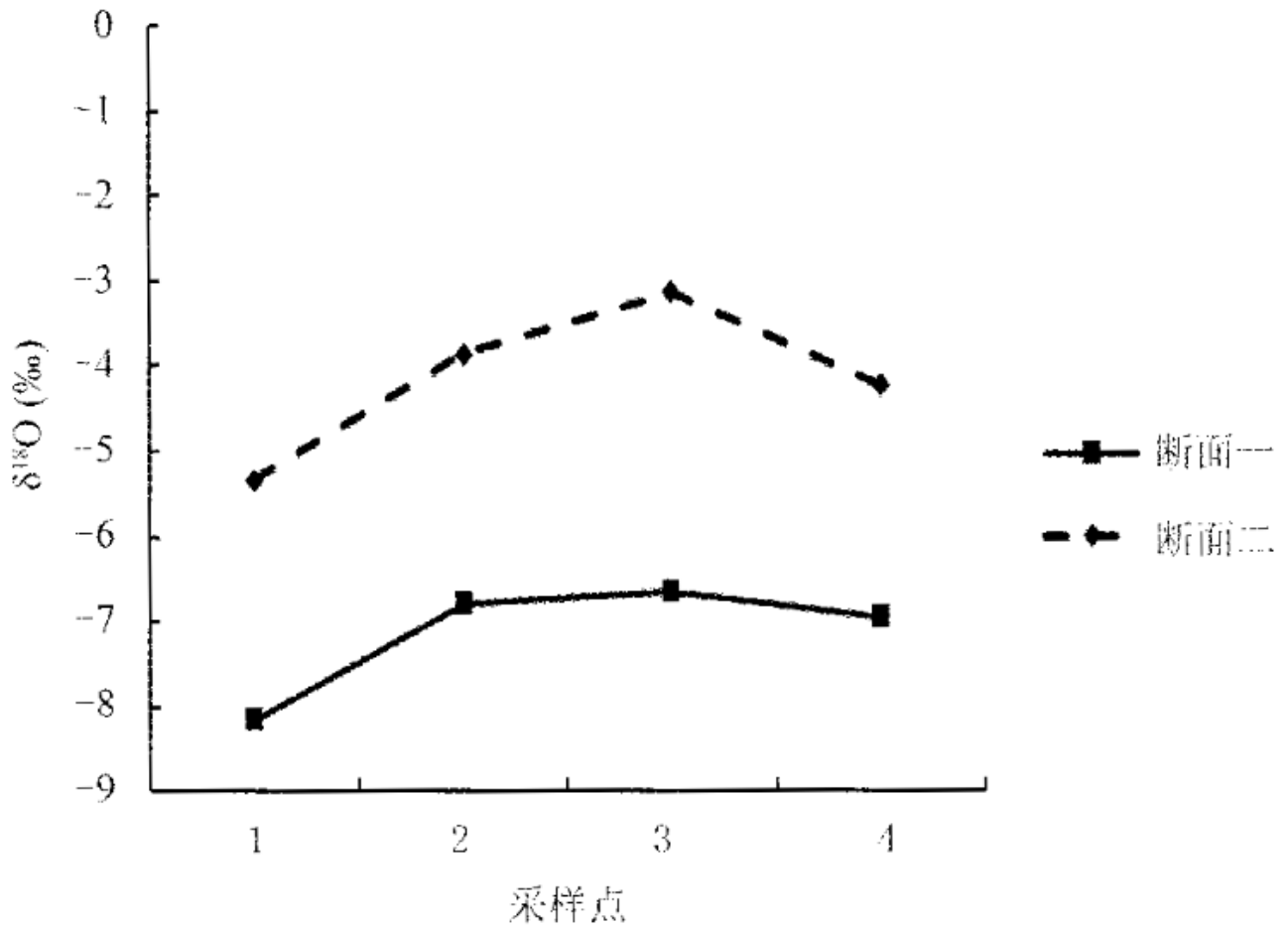


图 4 地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 值

Fig.4 $\delta^{18}\text{O}$ Value of Ground Water

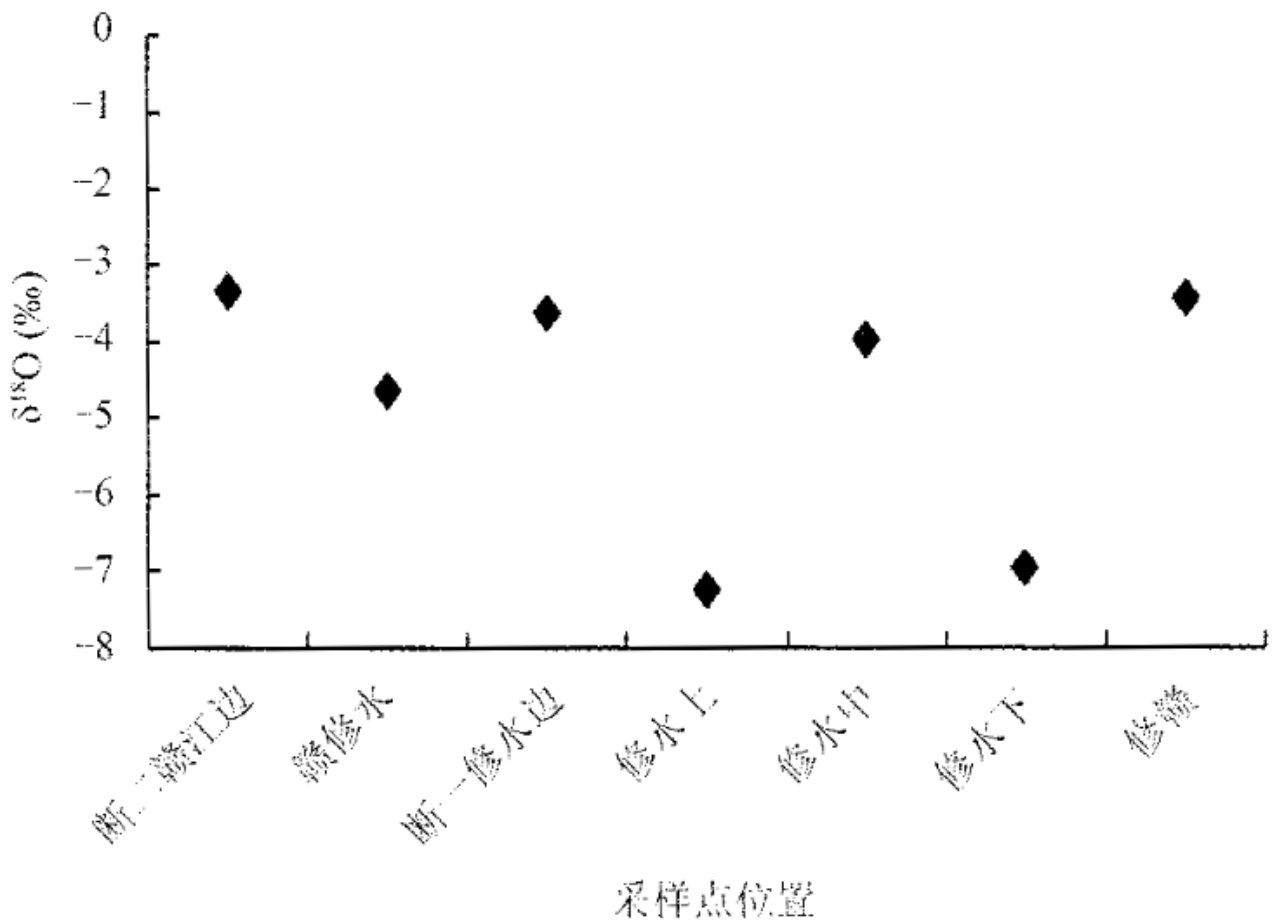


图 5 河水 $\delta^{18}\text{O}$ 值

(备注：“断一修水边”是指位于断面一采样点连线上修水边的河水，“修水上”是指位于断面一采样点连线上游的河水，“修赣”是指修水汇入赣江口的河水，“赣修水”是指修水和赣江水刚刚混合后的赣江水，其他点代表意义类似，采样点位置如图1所示)

表 2 断面一和断面二各采样点的地下水深
 Tab.2 Groundwater Depth of Each Sample Point at
 First and Second Site

采样点		1	2	3	4
地下水深(m)	断面一	0.65	0.70	0.97	0.85
	断面二	缺测	0.70	0.44	0.28

2.3 植物叶片水 $\delta^{18}O$ 值

断面一和断面二表层优势种植物及其叶片水中氧同位素值如图 6 所示。由图可知，断面一和断面二上优势种植物分别是葫草、芦苇和灰化苔草，它们叶片中水的氧同位素值分别为 -6.52% — -0.9% 和 -5.04% — -3.58% ，算术平均值分别为 -4.16% 和 -4.23% 。葫草叶片氧同位素值最大，为 -0.9% ，芦苇的最小，均值为 -5.25% ，苔草位于中间，均值为 -4.23% 。同一断面同种优势种植物在不同采样点植物叶片水氧同位素值存在差异，但差异不是很大，这可能是因为不同地貌部位（坡地、洼地等）主要元素（Ca、Mg 等）的迁移特征不同从而导致对植物蒸腾作用的影响不同^[21]。

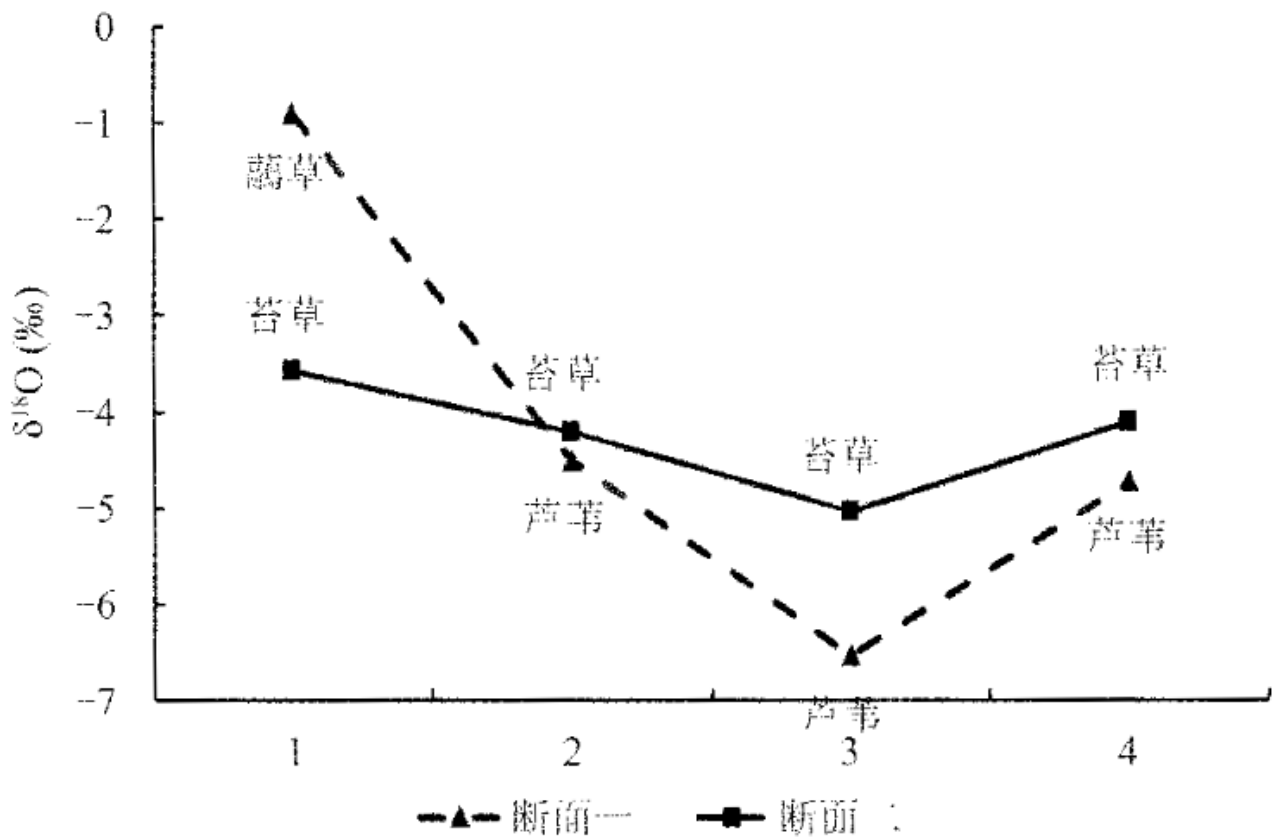


图 6 植物水 $\delta^{18}\text{O}$ 值

Fig.6 $\delta^{18}\text{O}$ Value of Plant

植物根系的分布及其根深是决定植物利用水分来源的一个重要因素^[22]，旱生芦苇毛细根大多分布在地下深 0 — 30 cm^[23]，灰化苔草根系一般分布在地下深 0 — 20 cm^[24]，蒺藜草根系分布在 0 — 30cm。两断面不同采样点上的植物根系深度相对应的表层土壤水氧同位素值如表 3 所示，除了断面一采样点 3 的土壤水氧同位素值与相应地植物叶片水基本相同外，其它采样点的土壤水氧同位素值均小于相应地植物叶片水的，原因有：（1）植物根系吸水及向叶片输送过程中，一般不发生同位素分馏^[25, 26]，但叶片水与空气直接接触，植物蒸腾时叶片水重同位素会发生富集^[27]，（2）植物根系分布深度不同，吸收的土壤水的同位素值不同，即植物水分来源不同。

表 3 两断面采样点表层土壤水氧同位素算术平均值

Tab.3 Average $\delta^{18}\text{O}$ Value of Surface Soil at Two Sites

断面一	采样点	1	2	3	4
	土壤深度(cm)	0~30	0~30	0~30	0~30
	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	-7.02	-8.98	-6.39	-7.14
断面二	采样点	1	2	3	4
	土壤深度(cm)	0~20	0~20	0~20	0~20
	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	-9.37	-7.82	-7.47	-7.54

3 结论

根据 2014 年野外采集两个断面的河水、地下水、土壤和植物等数据,运用稳定同位素技术,分析了鄱阳湖湿地土壤—植物—河湖水—地下水稳定同位素的变化特征,并探寻它们之间的水分补给关系,得到以下结论:

(1) 断面一土壤中氧同位素变化范围为 $10.48\% \sim -5.23\%$, 算术平均值为 -8.36% 。断面一表层(0—30 cm)土壤水氧重同位素较富集,且随深度增加而减小,但采样点 2 可能由于植被覆盖等原因导致表层(0—40cm)土壤深的氧同位素值随深度的增加而增大;断面二土壤水氧同位素变化范围为 $-12.39\% \sim -6.55\%$, 算术平均值为 -8.63% , 与断面一的土壤水氧同位素算术平均值相当,断面二表层(0—40 cm)土壤中 $\delta^{18}O$ 组成相对稳定,可能是因为该断面植物优势种灰化苔草的盖度大,表层受蒸发作用影响较小。

(2) 断面一和二的地下水氧同位素变化范围分别为 $-8.15\% \sim -6.64\%$ 和 $-5.33\% \sim -3.14\%$, 算术平均值分别为 -7.13% 和 -4.14% 。根据两断面地下水与河湖水的氧稳定同位素值,并结合地下水埋深可知,断面一的地下水主要是受降水补给,断面二可能是受降水和河湖水共同补给。

(3) 鄱阳湖湿地优势种植物叶片中水的氧同位素均值藨草最大,为 -0.9% , 其次是灰化苔草,为 -4.23% 。芦苇最小,为 -5.25% 。

参考文献:

- [1] 邓志民,张翔,罗蔚,等鄱阳湖湿地苔草对水位变化的响应[J]应用基础与工程科学学报,2014,22(5):865—876
- [2] 欧阳千林,刘卫林近 50 年鄱阳湖水位变化特征研究[J]长江流域资源与环境,2014,23(11):1545—1550.
- [3] 罗蔚,张翔,邓志民,等近 50 年鄱阳湖流域入湖总水量变化与旱涝急转规律分析[J]应用基础与工程科学学报,2013,21(5):845—856
- [4] 刘小东,任兵芳.鄱阳湖低枯水位变化特征与成因探讨[J]人民长江,2014,45(4):12—16
- [5] 刘元波,赵晓松,吴桂平近十年鄱阳湖区极端干旱事件频发现象成因初析[J]长江流域资源与环境,2014,23(1):131—138
- [6] YOU HL, XU LG, LIU GL, et al Effects of inter-annual water level fluctuations on vegetation evolution in typical wetlands of Poyang Lake, China [J] Wetlands, 2015, 35(5):931—943
- [7] 胡振鹏,葛刚,刘成林鄱阳湖湿地植被退化原因分析及其预警[J]长江流域资源与环境,2015,24(3):381—386
- [8] DAWSON TE, EHLERINGER JR Streamside trees that do not use stream water [J] Nature, 1991, 350(6316):335—337
- [9] PHILLIPS DL, GREGG JW Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources [J] Oncologic, 2003, 136(2):261—269

-
- [10] MEIBNER M , KHLER M , SCHWENDENMANN L , et al Soil water uptake by trees using water stable isotopes ($\delta^{2}H$ and $\delta^{18}O$)— a method test regarding soil moisture , texture and carbonate [J] *Plant and Soil* , 2014 , 376 (1 / 2) : 327 — 335
- [11] 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
- [12] 胡春华, 姜加虎, 朱海虹. 蚌湖与鄱阳湖水位关系及滩地淹露分析 [J] *海洋与湖沼*, 1997 , 28 (6) : 617 — 623
- [13] WEST A G , PATRICKSON S J , EHLEROMGER J R water extraction times for plant and soil materials used in stable isotope analysis [J] *Rapid Communications in Mass Spectrometry* , 2006 , 20 (8) : 1317 — 1321
- [14] 田日昌, 陈洪松, 宋献力等湘西北红壤丘陵区土壤水运移的稳定同位素特征 [J] *环境科学*, 2009 , 30 (9) : 2747 — 2754
- [15] CLARK I D FRITZ P *Environmental isotopes in hydrogeology* [M] Boca Raton FL : CRC Press LLC , 1997
- [16] 吴建东, 刘观华, 金杰峰, 等番邸日湖秋季洲滩植物种类结构分析 [J] *江西科学*, 2010 , 28 (4) : 549 — 554
- [17] 胡显显, 欧阳克蕙戴征煌等鄱阳湖湿地灰化苔草草甸群落特征及多样性 [J] *草业科学*, 2013 , 30 (6) : 844 — 848
- [18] BRISTOW KL , 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
- [19] 梁越. 鄱阳湖区蚌湖重金属及氮的生物地球化学与同位素示踪 [D] 南昌: 南昌大学博士学位论文, 2014
- [20] 赵惠萍, 张翔, 邓志民, 等鄱阳湖湿地降水氢氧稳定同位素特征分析 [J] *水资源研究*, 2015 , 4 (3) : 257 — 264
- [21] 李为, 刘彦, 余龙江, 等桂林岩溶试验场不同地貌部位主要元素迁移特征及与植物蒸腾作用的相关性 [J] *华中农业大学学报*, 2007 , 26 (1) : 55 — 58
- [22] 段德玉, 欧阳华. 稳定氢氧同位素在定量区分植物水分利用来源中的应用 [J] *生态环境*, 2007 , 16 (2) : 655 — 660
- [23] 李修仓, 胡顺军. 李岳坦, 等干旱区旱生芦苇根系分布及土壤水分动态 [J] *草业学报* 2008 , 17 (2) : 97 — 101
- [24] 朱海虹, 张本, 等著鄱阳湖— 水文生物沉积湿地开发整治 [M] 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997

[25] BRUNEL J P , WALKER GR , WALKER CD , et al Using stable isotope \ of water to trace plant water uptake [M]
// STEWARTGR Stable isotopes in Plant Nutrition , Soil Fertility and Environmental Studies Vienna : International
Atomic Energy Agency , 1991 : 543 — 551

[26] ALESSIO GA , DE L M BRUGNOLIE , et al Water sources and water use efficiency In Mediterranean coastal
dune vegetation [J] Plant Biology 2004 , 6 (3) : 350 - 357

[27] WHITE J W C Stable Hydrogen isotope ratios In plants A review of current theory and some potential
applications [M] // RUNDEL PW , EHLERINGER JR , NAGV KA , et al Stable isotopes In Ecological Research New York :
Sponger , 1989 , 68 : 142 - 162