

The Characteristics of Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes of Atmospheric Precipitation in Poyang Lake Wetland

Huiping Zhao^{1,2}, Xiang Zhang^{1,2}, Zhimin Deng³, Yang Xiao^{1,2}, Guoyan Pan^{1,2}

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

²Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang Jiangxi

³Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan Hubei

Email: zhangxiang@whu.edu.cn

Received: Jun. 7th, 2015; accepted: Jun. 27th, 2015; published: Jun. 30th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Precipitation is an important part of hydrologic cycle. Study on stable hydrogen and oxygen isotopes is advantageous to reveal the laws of water circulation and infer vapor source for further analysis of watershed hydrological processes. We collected the samples of rainfall in Poyang Lake wetland from November 2013 to May 2014, measured oxygen 18 and deuterium by using MAT253 IRMS connecting with Flash EA/HT and analyzed the characteristics of stable isotopes afterwards. In addition, factors affecting and deuterium excess with the meteorological data of Poyang lake wetland were discussed. The results show that the local meteoric water line is fitting the equation: $\delta D = 8.99\delta^{18}O + 11.52$, which the slope and intercept are above the average level of the Global and National Meteoric Water Line, is according with the characteristic of humid and rainy climate in the region. A significant negative correlation called "precipitation effect" between oxygen 18 and precipitation is indicated. In contrast, temperature effect is restrained under the influence of monsoon climate. Deuterium excess shows the obvious seasonal variation: deuterium excess is higher in winter than in summer which conforms to the laws in monsoon area in eastern China. Moreover, the main influencing factor is mean relative humidity which showed a negative correlation with deuterium excess.

Keywords

Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes, Meteoric Water Line, Precipitation Effect, Deuterium Excess, Poyang Lake Wetland

鄱阳湖湿地降水氢氧稳定同位素特征分析

赵惠萍^{1,2}, 张翔^{1,2}, 邓志民³, 肖洋^{1,2}, 潘国艳^{1,2}

¹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

²江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西 南昌

³长江水资源保护科学研究所, 湖北 武汉

Email: zhangxiang@whu.edu.cn

收稿日期: 2015年6月7日; 录用日期: 2015年6月27日; 发布日期: 2015年6月30日

摘要

大气降水是水文循环的重要环节, 对降水氢氧稳定同位素的研究有利于揭示水循环规律、推断水汽来源, 进而可深入分析流域水文过程。本文收集2013年11月~2014年5月鄱阳湖湿地降水样品, 采用MAT253同位素质谱仪连接Flash EA/HT对该地区降水氢氧稳定同位素进行测定, 分析了其组成特征; 并结合研究区气象观测数据, 研究了降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 的变化规律。结果表明, 鄱阳湖湿地大气降水线方程 $\delta\text{D} = 8.99\delta^{18}\text{O} + 11.52$ 的斜率、截距均大于全球及我国大气降水线的平均水平, 符合该地区湿润多雨的气候特点。 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量呈显著负相关关系, 表现为“降水量效应”, 而温度效应在季风气候的影响下受到一定的抑制。 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量呈显著负相关关系, 表现为“降水量效应”, 而温度效应在季风气候的影响下受到一定的抑制。氘盈余值受冬夏季风的影响, 呈现出冬高夏低的季节性变化规律, 与我国东部季风区的变化特征相符; 影响氘盈余值的主要因素为相对湿度, 两者呈显著负相关关系。

关键词

氢氧稳定同位素, 大气降水线, 降水量效应, 氘盈余, 鄱阳湖湿地

1. 引言

湿地的生态功能被人们形象地喻为“地球之肾”, 它在提供水资源、调节气候、降解污染、涵养水源和保护生物多样性等方面发挥了重要作用。鄱阳湖是我国第一大淡水湖, 鄱阳湖湿地是国际重要湿地之一。近年来, 受气候变化和人类活动的影响, 鄱阳湖出现了低水位提前并持续时间延长、最低水位屡超历史记录的现象, 导致湿地退化、草滩扩大、生物多样性减少等问题日益严重, 鄱阳湖湿地保护逐渐受到国内外的广泛关注。

降水是水循环过程的一个重要环节, 也是湿地水分的主要来源之一。降水中氢氧同位素丰度变化与产生降水的气象过程、大尺度环流形势和水汽源初始状态及水汽路径密切相关[1]-[3], 已被广泛地应用于水文学、气象学和古气候学的研究中。世界各地大汽水中的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 存在着正相关关系, Craig [4]于1961年提出了全球大气降水线GMWL: $\delta\text{D} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10$, 世界各地降水的氢氧同位素都沿着该降水线分布; 郑淑惠[5]于1980年从八个站点收集到的107个降水样品分析得出我国大气降水线为 $\delta\text{D} = 7.9 * \delta^{18}\text{O} + 8.2$ 。全球大气降水线和中国大气降水线方程分别是根据世界各地和中国南北各地的观测数据得到的, 是综合了干旱地区和湿润地区的月平均降水数据得到的结果。然而, 不同地区大气降水中氢氧同位素的组成及变化是不同的。国内外学者对中国西北、中国南部、中国西南地区、中国北方沙区、长江流域和内蒙古等地区的大气降水氢氧同位素组成、水汽来源、变化特征和异常现象等进行了深入的研究[6]-[13]。但由于区域气候状况和水分来源不同, 区域大气降水线不尽相同, 降水同位素的变化规律也有所差异。

近年来, 鄱阳湖湿地的水文相关研究虽逐步深入, 但稳定同位素技术在该地区的运用仍然较为缺乏, 尤其是对氢氧稳定同位素的研究鲜有涉及。分析探讨该地区降水氢氧稳定同位素的组成与变化特征, 可进一步研究大气降水的时空变化规律, 揭示水循环机制, 推断降水的水汽来源及水源地气象条件, 为流域内水资源评价与管理提供理论依据。故本文收集鄱阳湖湿地吴城镇 2013 年~2014 年 95 个降水样品, 旨在分析鄱阳湖湿地水循环中大气降水稳定同位素的变化特征, 探讨大气降水稳定同位素变化的影响因素, 为深入研究鄱阳湖湿地流域水文过程奠定基础。

2. 研究区概况

鄱阳湖位于长江之南, 江西省北部, 地理坐标为 $115^{\circ}49'E\sim 116^{\circ}46'E$, $28^{\circ}21'N\sim 29^{\circ}52'N$, 上接江西境内赣江、信江、抚河、饶河、修水五条河流, 下有湖口通长江。鄱阳湖区植被群落结构类型多样, 季相变化丰富。在全湖尺度上, 从优势群落比率来看, 苔草是鄱阳湖面积最大、分布最广的植被类型。

本文以鄱阳湖国家级自然保护区湿地为研究对象(如图 1 所示)。保护区内有大湖池、沙湖、蚌湖、朱市湖、梅西湖、中湖池、大汉湖、象湖、常湖池 9 个湖泊, 是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鹤越冬地; 每年 10 月至翌年 3 月, 水落滩出, 各种形状的湖泊星罗棋布, 为水禽提供了适宜的栖息地与食物, 是全球重要的湿地生态保护区。

3. 样品采集与分析

2013 年 11 月~2014 年 5 月于鄱阳湖湿地国家自然保护区内的吴城镇 6 号和 7 号采样点(如图 2 所示)收集降水样品, 共 59 个, 另外在 2014 年 4 月和 5 月增加了采样点 1、2、3、4 和 5 号, 共收集降水样品 36 个, 故全部收集的降水样品为 95 个。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, 瓶口用密封膜或保险膜密封以防止水样蒸发。将样品放入已有冰袋的保温箱中保存, 带回实验室后放入冰箱冷藏存放。

水样的氢氧稳定同位素采用 MAT253 同位素质谱仪连接 Flash EA/HT 测定, $\delta^{18}O$ 和 δD 的仪器分析精度分别为 2‰和 0.2‰。测定水样氢氧同位素之前, 先将水样经 $0.22\ \mu m$ 滤头过滤, 然后装入 1.5 ml 自动进样瓶中。所有水样测定结果均用以 VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water)为标准的千分差表示:

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

其中, $\left(\frac{^{18}O}{^{16}O} \right)_{V-SMOW} = 2.0052 \times 10^{-3}$, $\left(\frac{D}{H} \right)_{V-SMOW} = 1.5575 \times 10^{-4}$ 。

为了进一步分析鄱阳湖湿地大气降水稳定同位素变化的影响因素, 本文还收集了附近国家级气象站——南昌气象站的气象数据, 数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://www.esi.cn/metdata/page/index.html>), 包括: 降水量、平均气温、平均相对湿度及平均风速。

4. 分析与讨论

4.1. 当地大气降水线

95 个样品的氢氧稳定同位素组成特征如图 3 所示。从图 3 可知, 氢氧稳定同位素组成变化幅度较大, 氧同位素的变化范围为 $-22.61\text{‰}\sim -1.59\text{‰}$, 平均值为 -4.64‰ ; 氢同位素值为 $-64.97\text{‰}\sim -8.49\text{‰}$, 平均值为 -30.24‰ 。其中氢同位素出现两次正值, 分别发生在 2014 年 3 月 3 日和 4 月 19 日, 且均为采样点 6, 可能原因是这两次降水过后未能及时收集雨水, 使样品发生了强烈的蒸发, 进而导致重同位素的富集而轻同位素的贫瘠。利用 95 个样品的 δD 和 $\delta^{18}O$ 的分析数据, 建立吴城镇大气降水线方程为 $\delta D = 8.99\delta^{18}O + 11.52$, 相关系数达 0.94, 具有显著相关性, 且该方程的斜率及截距均大于全球与中国大气降水线方程[4] [5] [14]。在干燥少雨的地区, 雨

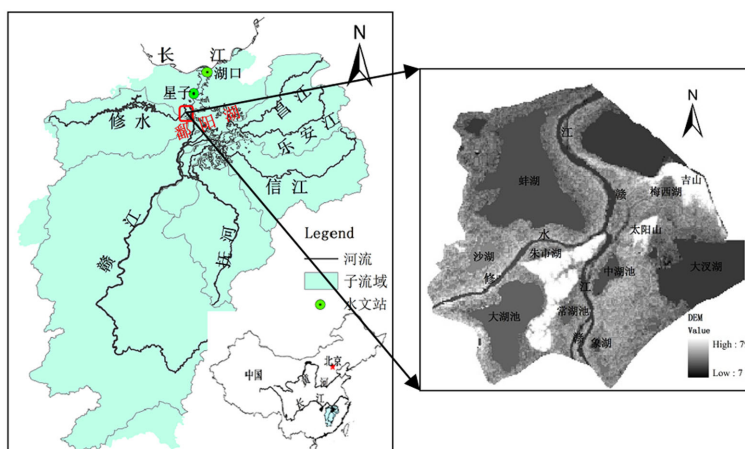


Figure 1. National nature reserve of Lake Poyang

图 1. 鄱阳湖国家级自然保护区

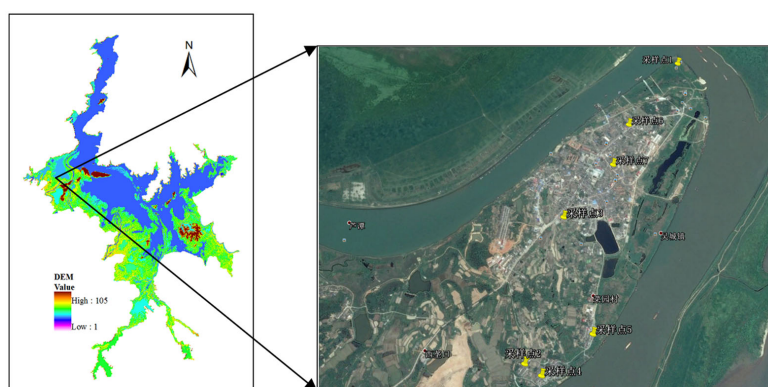


Figure 2. The distribution of precipitation sample collection points

图 2. 降水样品采集点位置分布图

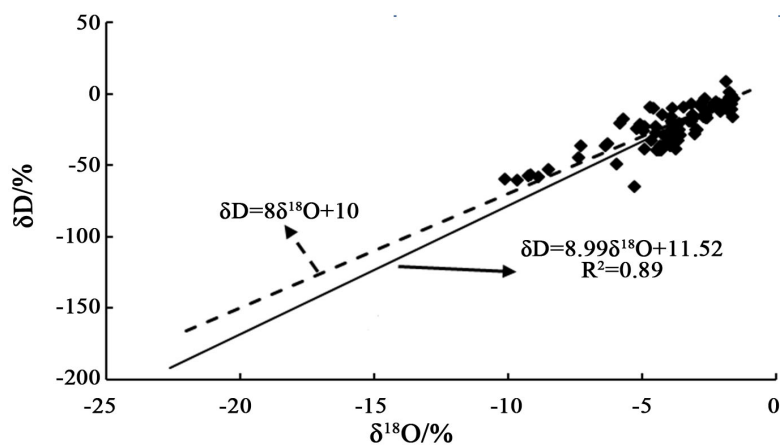


Figure 3. The composition characteristics of stable hydrogen and oxygen isotopes of precipitation in Wucheng

图 3. 吴城镇降水氢氧稳定同位素组成特征

滴在云底相对干燥的大气条件下发生二次蒸发会导致降水线方程的斜率和截距偏低；而湿润多雨的区域则相反。因此，本文所得大气降水线方程符合该地区湿润多雨的气候特点。

4.2. 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度、降水量相关关系

大气降水过程中, 降水的氧同位素组成主要受温度和剩余云团水汽质量控制。温度制约着水汽的凝结与蒸发, 影响着降水同位素的分馏, 从而导致大气降水氢氧同位素的变化差异。蒸发过程中同位素分馏作用随着温度的升高而减弱。当温度较高时, 分馏作用较弱, 水汽团中的 $\delta^{18}\text{O}$ 得以较大程度保留, 这使得由这种水汽团所形成的降雨中的 $\delta^{18}\text{O}$ 含量较高; 否则反之。降水同位素含量与气温一般为正相关关系[15], 即“温度效应”。由吴城镇降水样品及气象数据可知, 鄱阳湖湿地吴城镇降水同位素与月平均气温呈现正相关关系, 线性关系为: $\delta^{18}\text{O} = 0.34t - 10.32$, 相关系数为 0.377。利用 SPSS 统计分析软件对该地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 月平均值与月平均气温做线性回归分析, 发现该地区两者的线性相关性不显著。这可能是由于鄱阳湖湿地处于中低纬地区, 属亚热带季风气候区, 夏季受海洋性季风影响, 降水量大, 空气湿度高, 降水过程中 $\delta^{18}\text{O}$ 的优先蒸发富集作用微弱, 再加上水汽再循环的进一步干扰, 使该地区温度效应受到抑制, 故降水同位素与月平均气温的正相关关系并不明显。在某些季风盛行的地区, 这种关系甚至不存在或是表现为负相关关系[7] [9] [10]。

“降水量效应”是指降水量与重同位素含量的负相关关系, 其实质可以理解作为一种“淋滤”作用, 即同一来源水汽经历多次降水过程, 降水同位素分馏作用引起剩余水汽中同位素比值持续偏轻的现象[16]。研究表明, 在雨热同期的中纬度海洋或季风气候区, 降水中稳定同位素具有明显的降水量效应, 且该效应的产生与强对流天气的降水过程相联系。产生该效应的原因多种多样, 可能是雨滴下降过程中发生了蒸发效应, 也可能是雨滴与云团内部或与大气中同位素进行了交换[5]。由于吴城镇地区降水在时间上分布不均, 雨量主要集中在 3~7 月, 而其他月份分布较少, 故从全年降水同位素数值来看, 降水同位素与月降水量无明显的相关关系。本文选取降水集中的 3~5 月份, 分析日尺度条件下降水同位素与降水量的关系。由相关数据分析得, 鄱阳湖湿地吴城镇大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量存在负相关性(如图 4 和图 5): $\delta^{18}\text{O} = -0.02P - 2.75$, 相关系数为 0.404 ($p < 0.1$), 显著相关。

由以上分析可得出, 鄱阳湖湿地大气降水同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值的降水量效应更加强烈, 而在季风气候影响下, 温度效应则受到一定的抑制和掩盖。

4.3. 氘盈余的变化特征及影响因素

不同地区测得的局地大气降水线与全球大气降水线在斜率和截距上均有不同程度的差异, 为了量化比较这种差异, Dansgaard [17]提出了氘盈余参数(*d-excess*)的概念, 并定义为: $d = \delta D - 8 * \delta^{18}\text{O}$ 。全球氘盈余平均值约为 10‰。不同地区的氘盈余可以直观地反映该地区大气降水蒸发、凝结过程的不平衡程度。在季风气候区, 降水中氘盈余多体现出与季节相关的变化规律[3], 同时也反映出水汽团的多样性[18]。在中国东部季风区, 受季风影响, 冬夏两季的降水水汽源地不同, 加之水汽循环的季节变化, 使氘盈余显示出冬高夏低的变化规律。水源地的气候条件如相对湿度、风速及气温对降水中氘盈余有很大影响, 故通过研究氘盈余的分布特征, 可以有效推断出降水的来源及水源地的气候变化特征。

吴城镇降水中氘盈余变化如图 6 所示, 全年内氘盈余变化幅度为 0.97%~23.97%, 平均值为 11.56%。可分为两部分研究: 12~2 月相对较大, 变化范围为 23.97%~11.03%, 平均值为 19.12%, 总体在 10%之上, 表明该地区冬季受大陆性气团影响, 降水的水汽来源于内陆寒区, 水源地气候干旱, 相对湿度小, 蒸发速率大且不平衡程度高, 氘盈余偏高; 而 11 月与 3~5 月则相对较小, 变化范围为 0.97%~8.94%, 平均值为 4.25%, 总体在 10%以下, 表明夏季受海洋气团影响, 降水的水汽来源于低纬度海洋, 水源地气候湿润, 相对湿度大, 蒸发速率小且不平衡程度较低, 氘盈余偏低。研究结果与我国东部季风区氘盈余值冬高夏低的变化特征相符。

利用气象数据与降水样品分析吴城镇降水中氘盈余与平均相对湿度、气温、降水量及风速的关系。如图 6 和图 7 所示, 氘盈余与平均相对湿度呈负相关关系, 相关系数为 -0.734 ($p < 0.1$), 显著相关; 而与平均气温、降

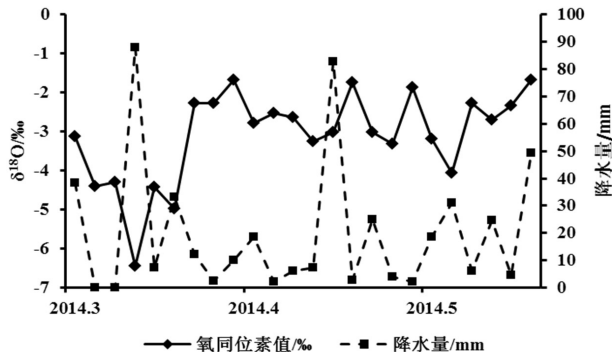


Figure 4. The contrast of $\delta^{18}\text{O}$ and rainfall

图 4. 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量对比图

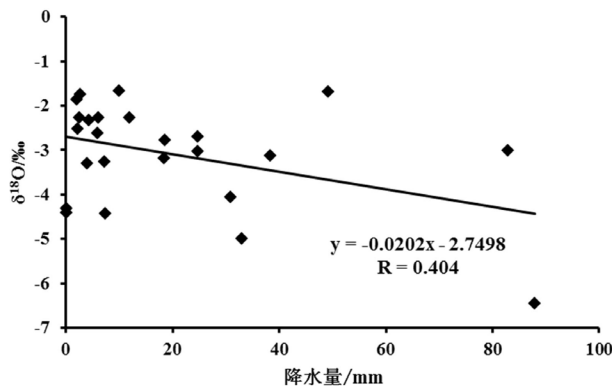


Figure 5. The linear relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and rainfall

图 5. 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量线性关系

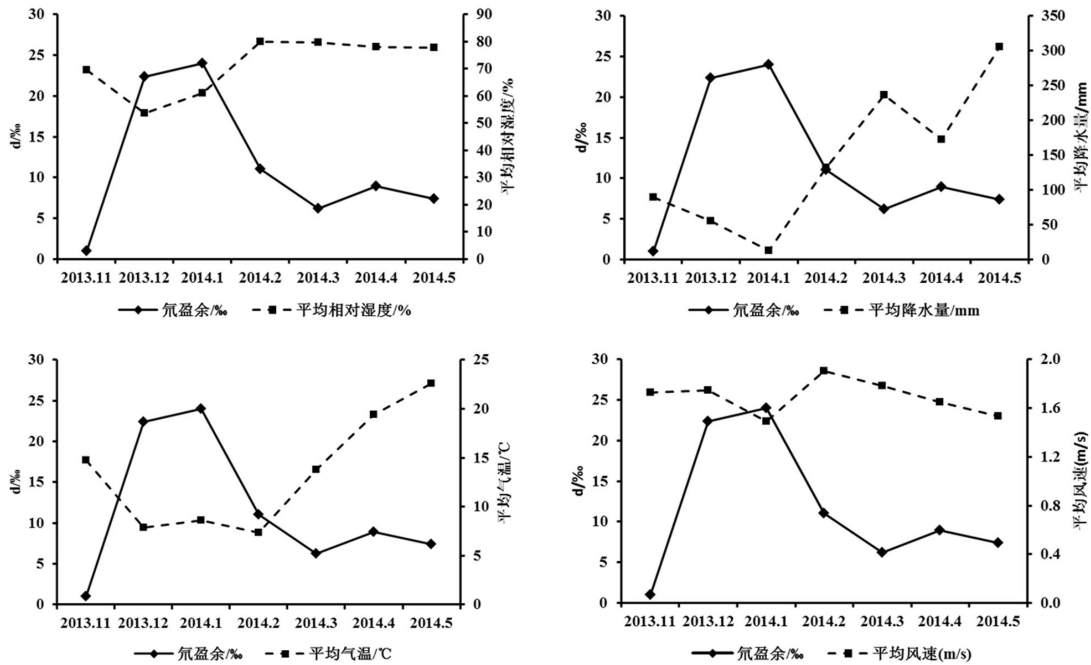


Figure 6. The contrast of *d-excess* and mean relative humidity, temperature, rainfall, wind speed

图 6. 降水中氘盈余与平均相对湿度、气温、降水量及风速对比图

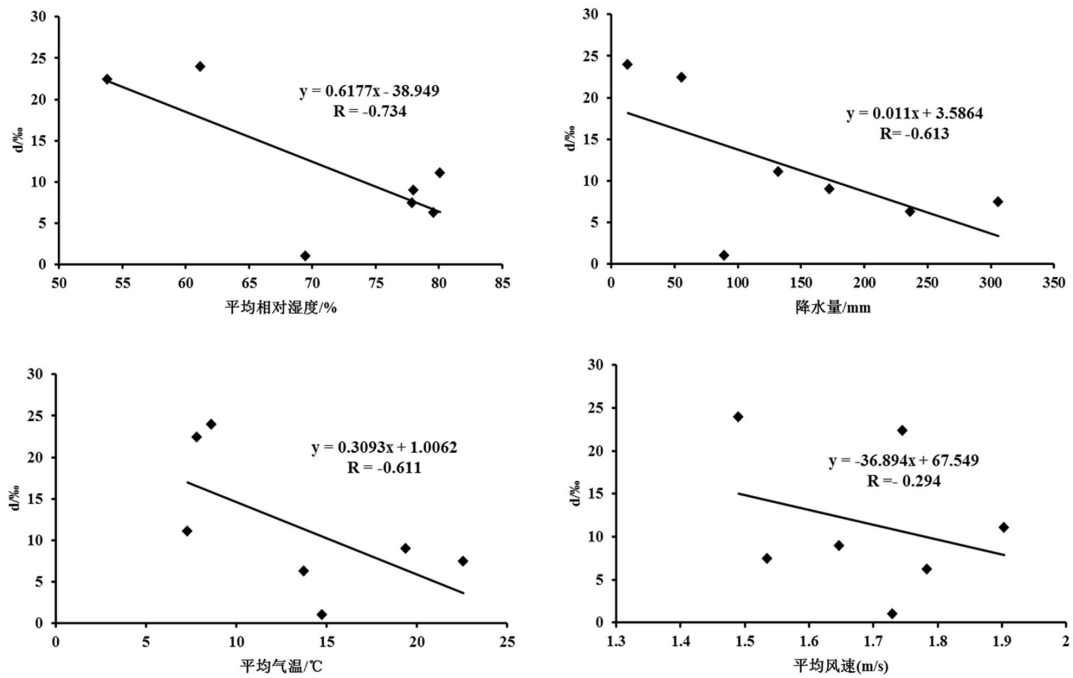


Figure 7. The linear relationship between $d\text{-excess}$ and mean relative humidity, temperature, rainfall, wind speed
图 7. 降水中氘盈余与平均相对湿度、气温、降水量及风速的线性关系

水量和风速的线性相关性不显著，表明相对湿度是影响氘盈余的主要因子。

5. 结论

本文通过收集鄱阳湖国家自然保护区内湿地 2013 年 11 月~2014 年 5 月的 95 个降水样品和气象数据，分析了鄱阳湖湿地降水氢氧稳定同位素组成特征及其影响因素，得到以下结论：

- 1) 鄱阳湖湿地大气降水线方程： $\delta D = 8.99\delta^{18}\text{O} + 11.52$ 的斜率及截距均大于全球大气降水线以及中国大气降水线方程，符合该地区湿润多雨的气候特点。
- 2) 鄱阳湖湿地降水中氧同位素与降水量呈现为显著负相关关系，与气温呈现不显著正相关关系，表现为“降水量效应”。
- 3) 鄱阳湖湿地降水中氘盈余主要受该地区的平均相对湿度的影响，并呈现为显著负相关关系。湿地降水中氘盈余的季节变化规律为冬高夏低，与我国东部季风区的氘盈余值变化特征相符。

基金项目

国家自然科学基金项目(51409191)和江西省重大生态安全问题监控协同创新中心项目(No. JXS-EW-00)资助。

参考文献 (References)

- [1] STURM, K., HOFFMANN, G., LANGMANN, B., et al. Stable water isotopes in precipitation: A regional circulation modeling approach. *Hydrological Process*, 2005, 19(17): 3425-3444.
- [2] ARAGUÁS-ARAGUÁS, L., FROELICH, K. and ROZANSKI, K. Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 1998, 103(D22): 28721-28742.
- [3] HOEFS, J. *Stable isotope geochemistry*. Berlin: Springer, 2004.
- [4] CRAIG, H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [5] 郑淑惠, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. *科学通报*, 1983, 28(13): 801-806.

- ZHENG Shuhui, HOU Fagao, NI Baoling. Stable isotope composition of precipitation in China. *Chinese Science Bulletin*, 1983, 28(13): 801-806. (in Chinese)
- [6] MA, J. Z., ZHANG, P., ZHU, G., et al. The composition and distribution of chemicals and isotopes in precipitation in the Shiyang River system, northwestern China. *Journal of Hydrology*, 2012, 436: 92-101.
- [7] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 我国南部夏季季风降水水汽来源的稳定同位素证据[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(6): 1004-1012.
- LIU Jianrong, SONG Xianfang, YUAN Guofu, et al. Stable evidence of vapor sources in summer monsoonal precipitation over Southern China. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(6): 1004-1012. (in Chinese)
- [8] 章新平, 刘晶淼, 孙维贞, 等. 中国西南地区降水中氧稳定同位素比率与相关气象要素之间关系的研究[J]. *中国科学, D 辑, 地球科学*, 2006, 36(9): 850-859.
- ZHANG Xinping, LIU Jingmiao, SUN Weizhen, et al. The relationship between stable isotope ratio of oxygen in precipitation and the related meteorological elements in southwest China. *Scientia Sinica Terrae*, 2006, 36(9): 850-859. (in Chinese)
- [9] 吴华武, 章新平, 孙广禄, 等. 长江流域大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化与水汽来源[J]. *气象与环境学报*, 2011, 27(5): 7-12.
- WU Huawu, ZHANG Xinping, SUN Guanglu, et al. Variations of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and moisture sources in the Yangtze River Basin. *Journal of Meteorology and Environment*, 2011, 27(5): 7-12. (in Chinese)
- [10] 孙婷婷. 长江流域稳定同位素变化特征研究[D]. 河海大学, 2007.
- SUN Tingting. Study on the variable characteristic of the water stable isotopic compositions in Yangtze River basin. Hehai University, 2007. (in Chinese)
- [11] 田立德, 姚檀栋, 沈永平, 等. 青藏高原那曲河流域降水及河流水体中氧稳定同位素研究[J]. *水科学进展*, 2002, 13(2): 206-210.
- TIAN Lide, YAO Tandong, SHEN Yongping, et al. Study on stable isotope in river water and precipitation in Naqu River basin, Tibetan Plateau. *Advances in Water Science*, 2002, 13(2): 206-210. (in Chinese)
- [12] FENG, F., LI, Z., ZHANG, M., et al. Deuterium and oxygen 18 in precipitation and atmospheric moisture in the upper Urumqi River Basin, eastern Tianshan Mountains. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 68(4): 1199-1209.
- [13] 陈中笑, 程军, 郭品文, 等. 中国降水稳定同位素的分布特点及其影响因素[J]. *大气科学学报*, 2010, (6): 667-679.
- CHEN Zhongxiao, CHENG Jun, GUO Pinwen, et al. Distribution characters and its control factors of stable isotope in precipitation over China. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2010, (6): 667-679. (in Chinese)
- [14] YURTSEVER, Y. Worldwide survey of stable isotope in precipitation. Vienna: IAEA, 1975.
- [15] MERLIVAT, L., JOUZEL, J. Global climate interpretation of the deuterium-oxygen18 relationship for precipitation. *Journal of Geophysical Resources: Oceans (1978-2012)*, 1979, 84(C8): 5029-5033.
- [16] 李廷勇, 李红春, 沈川洲, 等. 2006~2008年重庆大气降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 特征初步分析[J]. *水科学进展*, 2010, 21(6): 757-764.
- LI Tingyong, LI Chunhong, SHEN Chuazhou, et al. Study on δD and $\delta^{18}\text{O}$ characteristics of meteoric precipitation during 2006-2008 in Chongqing China. *Advances in Water Science*, 2010, 21(6): 757-764. (in Chinese)
- [17] DANSGAARD, W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 1964, 16(4): 436-468.
- [18] 赵家成, 魏宝华, 肖尚斌. 湖北宜昌地区大气降水中的稳定同位素特征[J]. *热带地理*, 2009, 29(6): 526-531.
- ZHAO Jiacheng, WEI Baohua, XIAO Shangbin. Stable isotopic characteristics of atmospheric precipitation from Yichang, Hubei. *Tropical Geography*, 2009, 29(6): 526-531. (in Chinese)