

The Composition of Isotopes in Precipitation in the Mediterranean of Europe

Han Yan, Beiying Zhang*

College of Jiangsu Normal University, Xuzhou Jiangsu
Email: gftght@126.com, *zhangbeiying@163.com

Received: Jul. 23rd, 2018; accepted: Aug. 4th, 2018; published: Aug. 13th, 2018

Abstract

Based on the $\delta^{18}\text{O}$ and δD data of precipitation events from January 2000 to December 2010 in Mediterranean climate region of Europe provided by the Global Network of (GNIP) and the meteorological statistics, the spatial and seasonal variations of the $\delta^{18}\text{O}$ and δD in precipitation and their influencing factors were analyzed and Local Meteoric Water Line (LMWL) was established in the study area. The result shows the stable isotopes are negative correlation with latitude and altitude and positive correlation with temperature. And result shows stable isotopes are negative correlation with precipitation in summer and positive correlation with precipitation in winter. Deuterium excess of precipitation was also calculated. The results showed that climate conditions should be relatively wet in the water vapor source region.

Keywords

Mediterranean Climate, Precipitation, Stable Isotopes, Isotope Effects

欧洲地中海气候区大气降水同位素组成分析

闫 晗, 张北赢*

江苏师范大学, 江苏 徐州
Email: gftght@126.com, *zhangbeiying@163.com

收稿日期: 2018年7月23日; 录用日期: 2018年8月4日; 发布日期: 2018年8月13日

摘 要

基于国际原子能机构和世界气象组织在全球范围内降水中同位素观测计划提供的2000~2010年地区数据, 分析研究区数年内稳定同位素与季节、降水、纬度等因素的变化规律。结果表明: 在降水量和温度的影响下, 降水

作者简介: 闫晗(1994-), 女(汉), 宁夏银川人, 硕士研究生, 主要从事土壤水分研究。

*通讯作者。

中的同位素表现为温度与 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值呈正相关, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 均在夏季明显偏重, 冬季偏轻, $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 与降水量分别呈现出夏季负相关, 冬季正相关。随着纬度和海拔的增加, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 逐渐变轻。研究区大气降水线方程表明: 该地区在降水下落过程中水汽经历了以动力分馏作用为主的二次蒸发, 致使重同位素在雨水中富集。氘盈余值低于全球平均值, 该地区的水汽来源区气候条件相对湿润。

关键词

地中海气候, 大气降水, 稳定同位素, 同位素效应

Copyright © 2018 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

1. 引言

同位素是大气降水中的组成物质, 根据其原子结构的稳定性可以分为稳定同位素和放射性同位素。同位素以不同的比例分配与不同的物质的现象称为同位素分馏, 用于描述同位素分馏的参数—同位素比率、千分差值都与降水的环境变化有较大的相关性。过去 50 年的大量研究表明, 局地降水中的同位素组成(氢和氧)显然受局地尺度过程控制, 并在中高纬度地区尤为显著。大气水汽源地的特殊蒸发过程条件[1] [2]、气团从海洋到内陆的传输形式[3] [4]、分馏凝结过程[5]、温度效应和高程效应[6] [7]等都对同位素的组分[8]产生影响。降水作为水循环中的一部分, 是调节不同地区水量空间分布的重要过程, 也是衡量当地气候的重要依据。水汽来源地的环境变化与降水地的环境变化对同位素分馏均有不同程度的影响, 具体的影响因素现在可得知的效应有: 温度效应、纬度效应、高程效应和降水量效应[9]等, 且大气降水同位素的特征中过量氘(deuterium excess)也是反应湿度特征的重要指标。

在我国, 许多学者对降水稳定同位素近些年来进行了大量的研究[10]-[15], 期间也发表了不少的综述性研究成果[16] [17] [18]。近年来, 有关于地中海地区的大部分同位素来源研究中, 主要集中在湖水、地表水、洞穴堆积物、深海沉积和珊瑚[18]等, 对整个地中海地区大气降水中氢氧同位素的研究并不多。因此, 研究地中海地区的大气降水稳定氢氧同位素将有助于地中海气候下的降水机制的了解, 对地中海地区大气降水同位素的研究的丰富, 也将对当前地中海地区古气候中同位素信号对降水、温度等方面的解译提供重要参考价值, 并对我国干旱区的大气降水同位素和水汽来源问题的研究具有参考价值。

2. 数据和方法

文中所选用的降水同位素资料均来源于 GNIP, 其数据均可从网站直接下载(<http://isohis.iaea.org>), 各站点的同位素数据信息见表 1。为保证数据的连续性和时间序列上的同步, 通过限定和筛选时间范围, 选择数据连续性较好的 17 个站点, 将所选数据站点自西向东进行排序编号, 站点数据时间范围均选取为 2000~2010 年。

GNIP 各站点的同位素资料均为月平均值, 其样品收集、运输的技术程序和标准数据均由国际原子能机构(IAEA)严格制定, 各站点的同位素信息由 IAEA 制定成册定期发表[19]。氧稳定同位素的比率 R ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)用相对于标准平均大洋水 SMOW (Standard Mean Ocean Water)的千分差值表示[20]:

$$\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right) = \left(R_{sam} / R_{sta} - 1 \right) \times 1000 \quad (1)$$

式中: R_{sam} 、 R_{sta} 分别表示的是样品和国际通用标准物中轻、重原子的摩尔比率。

用于判断降水来源地气候特征的氘盈余是由大气降水中氢、氧元素含量的差值表示:

Table 1. The data information in different sites**表 1.** 各站点的相关数据信息

序号		纬度/°	经度/°	海拔高度/M
1	PONTA DELGADA (AZORES ISL.)	37.77 N	25.65 W	175
2	LA CORUNA	43.37 N	8.42 W	57
3	CACERES TRUJILLO	39.47 N	6.33 W	405
4	MORON BASE SEVILLA	37.15 N	5.62 W	88
5	GIBRALTAR	36.15 N	5.35 W	5
6	VALLADOLID	41.63 N	4.77 W	735
7	CIUDAD REAL	38.98 N	3.92 W	682
8	MADRID-RETIRO	40.41 N	3.68 W	655
9	TORTOSA	40.81 N	0.52E	48
10	PALMA DE MALLORCA	39.55 N	2.62E	3
11	AVIGNON	43.95 N	4.82E	30
12	MONACO	43.73 N	7.42E	2
13	PATRAS	38.28 N	21.79E	100
14	ATHENS-THISSION	37.97 N	23.729E	107
15	ANTALYA	36.88 N	30.701E	49
16	ANKARA (CENTRAL)	39.95 N	32.88E	902
17	ADANA	36.98 N	35.30E	73

$$d = \delta D - 8 \cdot \delta^{18}O \quad (2)$$

式中： δD 、 $\delta^{18}O$ 分别表示的是大气降水中，氢、氧元素的千分差值。

3. 结果与分析

3.1. 稳定同位素的时空分布

研究期内降水同位素中， $\delta^{18}O$ 值的变化范围为 6.94‰~20.07‰，均值为-5.19‰； δD 的变化范围为 49.47‰~156.25‰，均值为-32.47‰；d-excess 的变化范围为 40.15‰~37.33‰，均值为 9.10‰。17 组站点数据中，其中 $\delta^{18}O$ 的最大值发生在 6-8 月份的夏季，最小值发生 12 月到次年 2 月份的冬季； δD 的最大值也主要发生在 6~8 月的夏天，最小值发生在 12 月份到次年 2 月份的冬季；d-excess 的最大值和最小值在一年中没有明显的季节分布特征，站点中的最大值发生在 MADRID-RETIRO 站点的 6 月份，其值为 40.15‰，最小值发生在 AVIGNON 站点的 7 月份，其值为-37.33‰。 $\delta^{18}O$ 、 δD 和 d-excess 在夏季 6~8 月份的均值分别为：-2.89、-20.33 和 3.88，冬季 12 月到次年 2 月份的均值分别为：-6.85、-42.46 和 11.72。

根据各个站点数据与经度、纬度和海拔的线性方程式，各个站点研究期平均 $\delta^{18}O$ ($R = -0.0428$) 呈现自西向东减小， δD ($R = -0.177$) 减小，d-excess ($R = 0.1857$) 逐渐增加，位于 25.65°W 的蓬塔德尔加达群岛，其站点的 $\delta^{18}O$ 、 δD 和 d-excess 值分别为：-3.19、-15.64 和 9.87；位于 35.3°E 的土耳其阿达纳省站点，其 $\delta^{18}O$ 、 δD 和 d-excess 值分别为：-4.75、-24.84 和 13.4。从最南端的直布罗陀到最北端的法国南部城市阿维尼翁，降水同位素呈现出 $\delta^{18}O$ ($R = -0.0814$)、d-excess ($R = -0.43$) 减小， δD ($R = -1.0797$) 值明显减小的趋势。海拔最高站点位于土耳其首都安卡拉站点，海拔高度为 902 m，最低海拔为 2 m 的站点位于摩洛哥的摩纳哥，明显的海拔变化下， $\delta^{18}O$ ($R = -0.1596$) 和 δD ($R =$

-1.1671)值呈现随着海拔的增加而减少的趋势, d-excess ($R = 0.0924$)值呈现随着海拔增加不明显的增加趋势。

3.2. 降水同位素效应

3.2.1. 温度效应与降水量效应

“温度效应”指温度与同位素的正相关关系[21]。在数据多年分布中, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的最高值均发生在夏季, 最低值发生在冬季, d-excess 的最高值和最低值虽然没有明显的季节变化, 但其最高值、最低值均发生在 5~7 月份和 9~11 份期间。 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值均在夏季明显偏重, 冬季偏轻。 $\delta^{18}\text{O}$ 为正值主要分布在 5~9 月份的大气降水中, 地中海气候区夏季由于副热带高压或信风北移, 以及沿岸寒流作用, 该地区在夏季不易形成降水且气候干燥炎热, 雨水样本的水汽来源或者雨滴下降过程中经历了强烈的蒸发而导致重同位素富集。温度是影响蒸发分馏最重要的因素, 在湿度和风速等气象因素一致的情况下, 温度越高则蒸发速度越快, 相同时间间隔内的蒸发量越大, 剩余水体富集程度也越大[22]。

夏季和冬季的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 和其对应季节的均温均呈线性正相关, 在相同时间段的夏季(6~8 月份)和冬季(12~次年 2 月份), $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值在不同站点同一时段呈现出温度较高的地方, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值也更高的特征, 符合温度效应, 如图 1 和图 2 所示。由于冬季降水事件多于夏季, 同位素含量因降水量的增加而含量降低, 冬季 δD 值均为负值且明显低于夏季 δD 值, 当降水地区温度升高, 降水中的同位素含量发生聚集, 在研究期内, δD 值的温度效应特征更加显著, 是由于氢同位素的质量数轻于氧元素, 所以氢元素更加容易引起稳定同位素的分馏, 对温度效应的响应也更明显。

“降水量效应”实质上可以理解为是一种“淋滤”效应[23]。研究区整体在夏季和冬季, $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 与降水

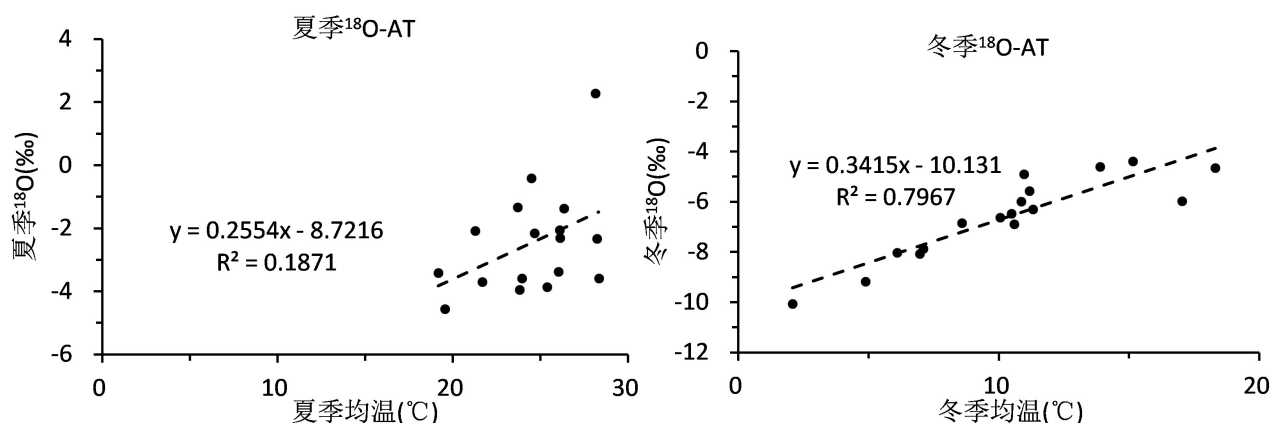


Figure 1. The relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and its seasonal air temperature variation at 17 stations

图 1. 各站点研究期内 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度相关季节变化(AT: Air temperature)

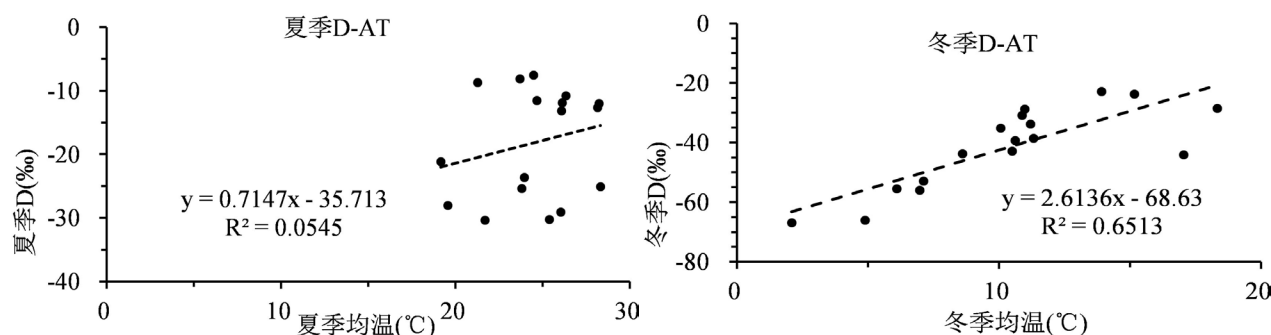


Figure 2. The relationship between δD and its seasonal air temperature variation at 17 stations

图 2. 各站点研究期内 δD 与温度相关季节变化(AT: Air temperature)

量分别呈现出夏季负相关，冬季正相关，见图 3。研究区位于地中海气候区，夏季和冬季的降水量有明显的差异，且水汽来源的湿度在夏季和冬季也有明显不同，夏季的水汽源地由于受到西风带与副热带高压带交替控制，水汽来源于内陆地区，不易形成降水且气候较为干燥，冬季西风带南移，此时水汽主要来源于地中海和大西洋，气候温和多雨。由于夏季的水汽来源为大陆，降水事件和降水量较少，且同位素含量贫乏，而冬季的降水来源于大量的湿润水汽，同位素含量较高，由于地中海地区的降水事件主要发生在冬季，根据水汽来源的路线，水汽在输送的过程中，“淋滤”效果较弱，即使在容易富集同位素的干燥夏季，其同位素含量也低于降水事件较多的冬季，故在地中海地区，不呈现明显相关的降水量效应。

3.2.2. 纬度效应与高程效应

大气降水的氢、氧同位素组成受纬度效应、高度效应和大陆效应的综合影响，因而在纬度相同或相近的局部地区， $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值有一个变化范围[24]。研究区纬度范围内，从低纬到高纬，随着温度的降低， $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值呈现下降趋势，在排除高程效应的影响下，选取相差高程为 $150\text{ m} \pm 100\text{ m}$ 的 6 个点进行了 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值和纬度相关关系的计算：

根据图 4 方程可以看出，在排除高程效应影响下，表明在研究区内纬度 36.98° 到 43.367° 之间，每升高 1° ， $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 分别减少 0.053‰ 、 0.78‰ 。表明越靠近与内陆地区，同位素显示出逐渐递减的趋势，水汽从源地向内陆的输送过程，降水中同位素的含量随着降水事件的发生而逐渐减少。相同纬度的高海拔地区，雨水的 δ 值偏低。纬度效应和高程效应基本上是由温度效应衍生出来的[25]。对研究区内的站点进行高程与 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 均值的线性分析：

根据图 5 方程可以看出， $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值均与高程呈负相关关系，且每当高程增加 100 m ， $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值分别减

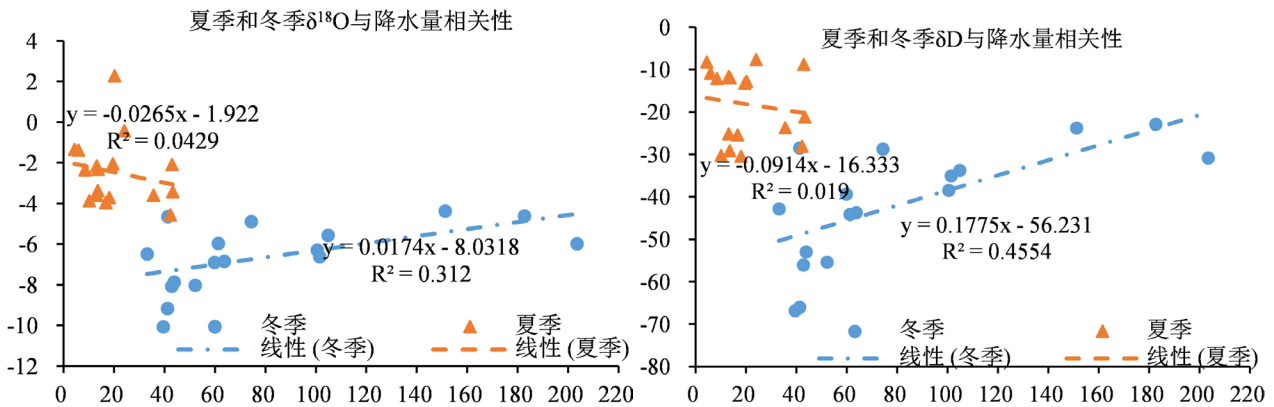


Figure 3. The correlation of δD and its precipitation variation at 17 stations in summer & winter

图 3. 各站点夏季和冬季 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 与降水量相关性

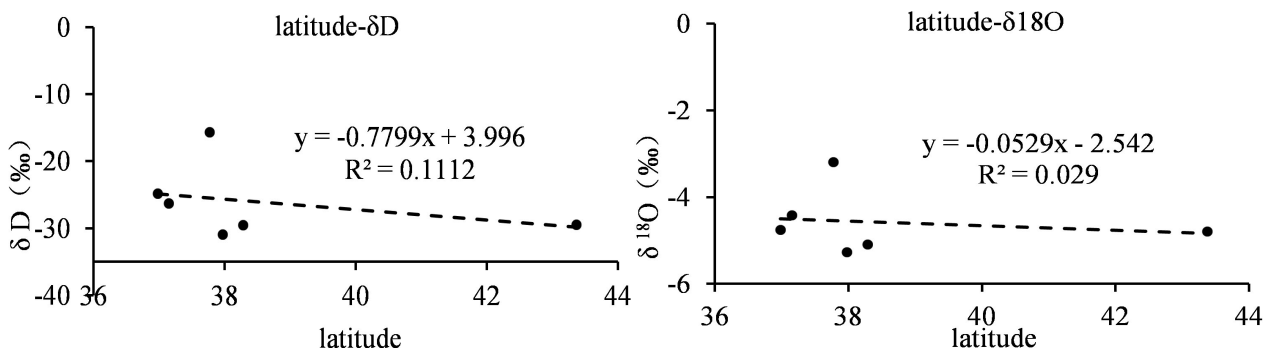


Figure 4. The correlation of latitude between $\delta^{18}\text{O}$ and δD

图 4. $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值和纬度相关关系

少 0.33‰和 2.66‰。高程效应是由于随着地表海拔高度的增加，温度随着海拔增加而降低，温度较高的低海拔地区的蒸发强度大于高海拔的低温地区，所以在低海拔地区同位素更容易发生聚集，体现出从同位素含量随着海拔增加而减少的趋势。

3.3. 大气降水线与氡盈余

3.3.1. 大气降水线

大气降水线是某一地区特定时段内降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 之间的线性关系，其斜率反映 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 分馏速率的对比关系，常数项指示 δD 对平衡状态的偏离程度[26]。根据站点的年平均数据计算出当地的大气降水线方程(LMWL)为：

$$\delta\text{D} = 7.9604\delta^{18}\text{O} + 8.123 (R^2 = 0.9111) \tag{3}$$

其中， $R^2 = 0.9111$ ，其中斜率为 7.9604，截距 $d = 8.123$ 。如图 6 所示，国际原子能委员会求得的全球大气降水线方程(GMWL)为： $\delta\text{D} = (8.17 \pm 0.06) \delta^{18}\text{O} + (10.56 \pm 0.65)$ ，LMWL 与全球大气降水线很接近。区域大气降水线

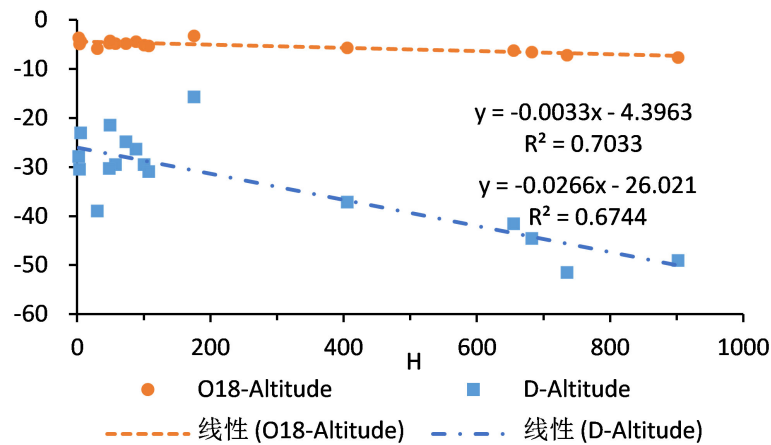


Figure 5. The correlation of altitude between $\delta^{18}\text{O}$ and δD

图 5. $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值与海拔相关关系

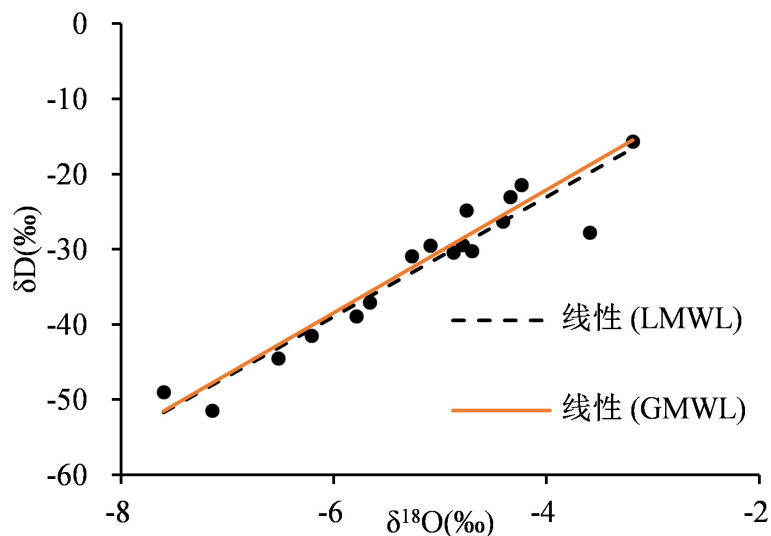


Figure 6. Local meteoric water line (LMWL) for study region

图 6. 研究区当地大气降水线方程

取决于水汽来源和降水下落过程中的蒸发, 研究区的以地中海气候为主, 6~9 月份气候较干燥, 在降水下落过程中水汽经历强烈的二次蒸发, 导致更重的同位素在雨水中富集, 下落过程中蒸发较强, 降水线的斜率较小, 且图中的研究区 LMWL 低于 GMWL, 说明该地的气水汽来源较为湿润, 导致 d 值较小。

3.3.2. d 值的变化

氘盈余($d = \delta D - 8\delta^{18}O$)是由降水中 $\delta^{18}O$ 、 δD 组成的一个二级指标, 是描述降水中氢氧稳定同位素特征的重要参数, 全球范围内均值为 10‰[27]。d 的变化与水汽来源地的气象条件相关, 以及当地的气候特征和降水过程有关。通过分析降水中 d 值变化, 可以在宏观层面上追踪降水水汽从源地到降落地的复杂气候过程。

研究区 d 值的变化范围为 1.42‰~13.40‰, 均值为 9.10‰。夏季氘盈余的变化范围为-4.25‰~8.40‰, 均值为 3.77‰, 冬季氘盈余的变化范围为 4.39‰~17.95‰, 均值为 11.24‰, 如图 7 所示, 即最低值出现在夏季, 最高值出现在冬季。

降水中过量氘除了与蒸发源区的气象条件有关外, 还与降落雨滴在降落过程中的蒸发富集作用以及水汽来源有关[28]。地中海气候区的水汽来源在上存在明显的季节差异, 冬季地中海地区受到西风带控制, 大量的降水来源于大西洋, 此时地中海的水温相对较高, 形成低压后加强的西风为研究区带来大量潮湿的水汽。夏季西风带北移, 此时地中海地区受副热带高压带的影响, 水汽来源于干旱的内陆陆地。一般而言, 形成降水的水汽源地相对湿度越高, 形成的降水中 d 值就越低, 相反, 随着降水水汽源地大气相对湿度的降低, 降水中 d 值会升高。在干热的气候条件下, 大气降水过程中的二次蒸发则会导致降水中 d 值偏低[29]。研究区所处的地中海气候夏季气候干燥, 夏季的均温可以达到 24.52℃, 高于冬季均温 14.2℃, 最大的温差可以达到 21.73℃。正由于不同季节的水汽来源和夏季干热的气候条件, 在夏季的降水过程中存在剧烈的二次蒸发, 导致夏季降水氘盈余较冬季偏低。

4. 结论

研究区的大气降水中氢、氧同位素在空间分布上存在差异性。 $\delta^{18}O$ 、 δD 自西向东、自南向北逐渐减少, 并且随着海拔增加呈现减少趋势; 在季节变化上, $\delta^{18}O$ 、 δD 最大值均出现在夏季, 最小值出现在冬季。

研究区大气降水同位素符合温度效应, 在冬季和夏季均呈现降水同位素与温度正相关关系, 随着温度的增加, 同位素元素因分馏作用和富集使得同位素的含量增加。研究区大气降水同位素不存在明显的降水量效应, 由于在夏季和冬季的水汽来源地不同, 来源地的气候条件的差异, 对比研究区夏季和冬季时 $\delta^{18}O$ 、 δD 与降水量的关系, 结果呈现出夏季负相关, 冬季正相关。在排除高程效应影响下, 研究区的纬度效应呈现随着纬度的增加, 越靠近与内陆地区, 同位素显示出逐渐递减的趋势, 而递减的原因是由于水汽输送的过程中, 不断地降水

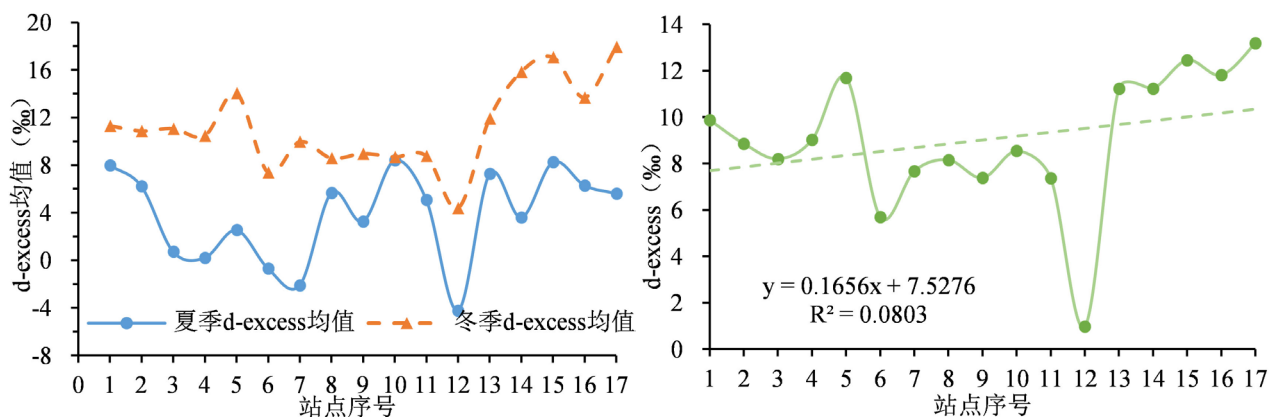


Figure 7. The space variation of d-excess
图 7. d-excess 的时空间变化

事件导致水汽中所携带的同位素的含量不断地减少而造成的。 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值均与高程呈负相关关系, 且每当高程增加 100 m, $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值分别减少 0.33‰和 2.66‰。

研究区的大气降水线方程为: $\delta\text{D} = 7.9604\delta^{18}\text{O} + 8.8123$, 与全球大气降水线相近。研究区的 LMWL 低于 GMWL, 表明在地中海地区主要的水汽来源地的气候较为湿润, 且在降水过程中经历了较为强烈的蒸发作用。由于不同季节的水汽来源和夏季干热的气候特征, 降水过程中的二次蒸发使得研究区的氘盈余呈现于夏季低于冬季的分布特征。研究区降水同位素在时空分布符合地中海气候类型, 并且呈现明显的温度效应, 具有纬度效应、高程效应, 在研究时段内不具有明显的降水量效应。

基金项目

国家自然科学基金资助项目: 黄土丘陵区深剖面土壤水分特征及其补给地下水过程研究(41701025); 江苏师范大学校级研究生科研创新计划项目: 皇藏峪不同植被类型下土壤元素含量(2017YXJ033)。

参考文献

- [1] EPSTEIN, S., MAYEDA, T. Variation of ^{18}O content of water natural sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1953, 4: 213-224. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(53\)90051-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(53)90051-9)
- [2] MERLIVAT, L., JOUZEL, J. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen-18 relationship for precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 98: 5029-5033. <https://doi.org/10.1029/JC084iC08p05029>
- [3] CRAIG, H., CORDON, L. Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and marine atmosphere. In: Tongiorgi, E., Ed., *Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Palaeotemperatures*, Pisa: CNR, 1965: 9-130.
- [4] JOHNSON, S. J., DANSGAARD, W., WHITE, J. W. C. The origin of Arctic precipitation under present and glacial conditions. *Tellus*, 1989, 41: 452-468. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v41i4.15100>
- [5] CRAIG, H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, 133: 1702-1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>
- [6] SIEGENTHALER, U., OESCHGER, H. Correlation of ^{18}O in precipitation with temperature and altitude. *Nature*, 1980, 285: 314-316. <https://doi.org/10.1038/285314a0>
- [7] HOFFMANN, G., JOUZEL, J., MASSON, V. Stable water isotopes in atmospheric general circulation models. *Hydrological Processes*, 2000, 14: 1385-1406. [https://doi.org/10.1002/1099-1085\(20000615\)14:8<1385::AID-HYP989>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/1099-1085(20000615)14:8<1385::AID-HYP989>3.0.CO;2-1)
- [8] ROZANSKI, K., SONNTAG, C., MUNNICH, K. O. Factors controlling stable isotope composition of modern European precipitation. *Tellus*, 1982, 34: 142-150. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v34i2.10796>
- [9] DANSGAARD, W. Stable isotope in precipitation. *Tellus*, 1964, 16: 436-468. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v16i4.8993>
- [10] 陈曦, 李志, 程立平, 等. 黄土塬区大气降水的氢氧稳定同位素特征及水汽来源[J]. *生态学报*, 2016, 36(1): 98-106.
CHEN Xi, LI Zhi, CHENG Liping, et al. Analysis of stable isotopic composition and vapor source of precipitation at the Changwu Loess Tableland. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(1): 98-106. (in Chinese)
- [11] 宋春林, 孙向阳, 王根绪. 贡嘎山亚高山降水稳定同位素特征及水汽来源研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(11): 1860-1869.
SONG Chunlin, SUN Xiangyang, WANG Genxu. A study on precipitation stable isotopes characteristics and vapor sources of the subalpine Gongga Mountain, China. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(11): 1860-1869. (in Chinese)
- [12] 庞朔光, 赵诗坤, 文蓉, 等. 海河流域大气降水中稳定同位素的时空变化[J]. *科学通报*, 2015, 60(13): 1218-1226.
PANG Shuoguang, ZHAO Shikun, WEN Rong, et al. Spatial and temporal variation of stable isotopes in precipitation in the Haihe River basin. *Science China Press*, 2015, 60(13): 1218-1226. (in Chinese)
- [13] 詹泸成, 陈建生, 张时音. 洞庭湖湖区降水-地表水-地下水同位素特征[J]. *水科学进展*, 2014, 25(3): 327-335.
ZHAN Lucheng, CHEN Jiansheng, ZHANG Shiyin. Characteristics of stable isotopes in precipitation, surface water and groundwater in the Dongting Lake region. *Advances in Water Science*, 2014, 25(3): 327-335. (in Chinese)
- [14] 杨玉忠, 吴青柏, 贡汉伯. 北麓河多年冻土区降水及河水稳定同位素特征分析[J]. *水科学进展*, 2013, 24(6): 778-785.
YANG Yuzhong, WU Qingbai, YUN Hanbo. Characteristic analysis of stable isotope variation in precipitation and rivers in Beilu River permafrost region. *Advances in Water Science*, 2013, 24(6): 778-785. (in Chinese)
- [15] 孟玉川, 刘国东. 长江流域降水稳定同位素的云下二次蒸发效应[J]. *水科学进展*, 2010, 21(3): 327-334.
MENG Yuchuan, LIU Guodong. Effect of below-cloud secondary evaporation on the stable isotopes in precipitation over the

- Yangtze River basin. *Advances in Water Science*, 2010, 21(3): 327-334. (in Chinese)
- [16] 李亚举, 张明军, 王圣杰, 等. 我国大气降水中稳定同位素研究进展[J]. 冰川冻土, 2011, 33(3): 624-633.
LI Yaju, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Progress of the research of stable isotope in precipitation in China: A review. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(3): 624-633. (in Chinese)
- [17] 余武生, 田立德, 马耀明, 等. 青藏高原降水中稳定氧同位素研究进展[J]. 地球科学进展, 2006(12): 1314-1323.
YU Wusheng, TIAN Lide, MA Yaoming, et al. Advances in the study of stable oxygen isotope in precipitation on the Tibetan Plateau. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(12): 1314-1323. (in Chinese)
- [18] Chaabane, S., López Correa, M., Montagna, P. Exploring the oxygen and carbon isotopic composition of the Mediterranean red coral (*Corallium rubrum*) for seawater temperature reconstruction. *Marine Chemistry*, 2016, 186: 11-23.
<https://doi.org/10.1016/j.marchem.2016.07.001>
- [19] Manningcd, S. 统计自然语言处理基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 216.
MANNINGCD, Schutzem. Foundations of statistical natural language processing. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 216.
- [20] Dansgaard, W. Stable isotope in precipitation. *Tellus*, 1964, 14: 436-468. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v16i4.8993>
- [21] Yuetsever, Y. Worldwide survey of stable isotopes in precipitation. Vienna: IAEA, 1975.
- [22] 包为民, 胡海英, 王涛, 等. 蒸发皿中水面蒸发氢氧同位素分馏的实验研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(6): 780-785.
BAO Weimin, HU Haiying, WANG Tao, et al. Experimental study on the fractionation mechanism of hydrogen and oxygen stable isotopes in evaporation from water surface of evaporation pans. *Advances in Water Science*, 2008, 19(6): 80-785. (in Chinese)
- [23] 李廷勇, 李红春, 沈川洲, 等. 2006~2008 年重庆大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 特征初步分析[J]. 水科学进展, 2010, 21(6): 757-764.
LI Yanyong, LI Hongchun, SHENG Chuazhou, et al. Study on the δD and $\delta^{18}O$ characteristics of meteoric precipitation during 2006-2008 in Chongqing, China. *Advances in Water Science*, 2010, 21(6): 757-764. (in Chinese)
- [24] 于津生, 虞福基, 刘德平. 中国东部大气降水氢、氧同位素组成[J]. 地球化学, 1987(1): 22-26.
YU Jingsheng, YU Fuji and LIU Deping. The oxygen and hydrogen isotopic compositions of meteoric water in the eastern part of China. *Geochimica*, 1987(1): 22-26. (in Chinese)
- [25] 卫克勤, 林瑞芬. 论季风气候对我国雨水同位素组成的影响[J]. 地球化学, 1994(1): 33-41.
WEI Keqing, LIN Ruifen. The influence of the monsoon climate on the isotopic composition of precipitation in China. *Geochimic*, 1994(1): 33-41. (in Chinese)
- [26] 田超, 孟平, 张劲松, 等. 黄河小浪底库区降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 季节变化特征及水汽来源[J]. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3579-3587.
TIAN Chao, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al. Seasonal characteristics of δD and $\delta^{18}O$ in precipitation and Xiaolangdi reservoir area of Yellow River, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(12): 3579-3587. (in Chinese)
- [27] 李广, 章新平, 许有鹏, 等. 滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源[J]. 环境科学, 2016, 37(4): 1313-1320.
LI Guang, ZHANG Xinping, XU Youpeng, et al. Characteristics of stable isotopes in precipitation and their moisture sources in Mengzi Region, Southern Yunnan. *Environmental Science*, 2016, 37(4): 1313-1320. (in Chinese)
- [28] 章新平, 刘晶淼, 中尾正义, 等. 我国西南地区降水中过量氘指示水汽来源[J]. 冰川冻土, 2009, 31(4): 613-619.
ZHANG Xinping, LIU Jinmiao, ZHONGWEI Zhengyi, et al. Vapor origins revealed by deuterium excess in precipitation in southwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(4): 613-619. (in Chinese)
- [29] 董小芳, 杨华玮, 张峦, 等. ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 1-20.
DONG Xiaofang, YANG Huawei, ZHANG Luan, et al. Influence of ENSO events on the hydrogen (δ^2H) and oxygen ($\delta^{18}O$) isotopic values of precipitation in Shanghai. *Environmental Science*, 2017, 38(12): 1-20. (in Chinese)