

# 澳大利亚阿德莱德地区大气降水中稳定同位素变化特征

王迪宙<sup>1</sup>, 章新平<sup>1,2\*</sup>, 刘仲黎<sup>1</sup>, 李广<sup>1</sup>, 关华德<sup>1,3</sup>

1. 湖南师范大学 地理科学学院, 长沙 410081

2. 湖南师范大学 地理空间大数据挖掘与应用湖南省重点实验室, 长沙 410081

3. School of the Environment, Flinders University, Adelaide 5001, Australia

**摘要:** 水体中  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  在自然界中含量稀少, 对环境变化极为敏感并能够记录环境变化。水稳定同位素技术被广泛应用于水文气象、气象诊断和古气候恢复等领域。根据在澳大利亚阿德莱德地区收集的前后跨 4 a 日降水中  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  资料, 分析该地区日时间尺度下降水中  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  和氡盈余 ( $d$ ) 的变化特征以及与各气象要素的关系, 为理解云下二次蒸发与气象要素间的联系, 探讨区域水循环机理提供依据。结果表明: 在研究区, 日时间尺度下大气降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与降水量、相对湿度在全年和冬夏半年均表现出显著负相关关系, 与温度在全年以及冬半年表现出显著正相关关系, 在夏半年表现出不显著的正相关关系, 表明该地区降水中氧同位素的变化具有显著的降水量效应和湿度效应。冬半年降水中  $d$  值明显高于夏半年, 指示冬夏半年间的降水气象条件与水汽来源存在较大差异。阿德莱德地区的大气降水线为:  $\delta\text{D}=6.38\times\delta^{18}\text{O}+6.68$ , 斜率和截距明显小于全球大气水线 GMWL, 表征出阿德莱德地区较为干旱的气候特征。在降水量、相对湿度偏低以及气温值偏高的降水事件中, 大气水线出现显著偏低的斜率和截距, 表明雨滴在下落过程中受到强烈的二次蒸发影响。研究结果将为澳大利亚阿德莱德地区水文气象、气象诊断和古气候恢复等领域提供基础。

**关键词:** 阿德莱德; 大气降水; 稳定同位素; 大气降水线; 逐步回归分析

## Variation characteristics of stable isotopes in atmospheric precipitation in Adelaide, Australia

WANG Dizhou<sup>1</sup>, ZHANG Xinping<sup>1,2\*</sup>, LIU Zhongli<sup>1</sup>, LI Guang<sup>1</sup>, GUAN Huade<sup>1,3</sup>

1. School of Geographic Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

2. Hunan Key Laboratory of Geospatial Big Data Mining and Application, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

3. School of the Environment, Flinders University, Adelaide 5001, Australia

**Abstract: Background, aim, and scope** Stable isotope in water could respond sensitively to the variation of environment and be reserved in different geological archives, although they are scarce in the environment. And the methods derived from the stable isotope composition of water have been widely applied in researches on hydrometeorology, weather diagnosis, and paleoclimate reconstruction, which help well for understanding

收稿日期: 2022-06-30; 录用日期: 2022-10-05; 网络出版: 2022-10-20

Received Date: 2022-06-30; Accepted Date: 2022-10-05; Online first: 2022-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41772373, 42001080)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41772373, 42001080)

通信作者: 章新平, E-mail: zxp@hunnu.edu.cn

Corresponding Author: ZHANG Xinping, E-mail: zxp@hunnu.edu.cn

引用格式: 王迪宙, 章新平, 刘仲黎, 等. 2024. 澳大利亚阿德莱德地区大气降水中稳定同位素变化特征 [J]. 地球环境学报, 15(4): 641–652.

Citation: Wang D Z, Zhang X P, Liu Z L, et al. 2024. Variation characteristics of stable isotopes in atmospheric precipitation in Adelaide, Australia [J]. *Journal of Earth Environment*, 15(4): 641–652.

the water-cycle processes in one region. Here, it is aimed to explore the temporal changes of stable isotopes in precipitation from Adelaide, Australia and determine the influencing factors at different timescales. **Materials and methods** Based on the isotopic data of daily precipitation over four years collected in Adelaide, Australia, the variation characteristics of daily  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ , and  $d_{\text{excess}}$  in precipitation and its relationship with meteorological elements were analyzed. **Results** The results demonstrated the local meteoric water line (LMWL) in Adelaide, was  $\delta D = 6.38 \times \delta^{18}O + 6.68$ , with a gradient less than 8. There is a significant negative correlation between daily  $\delta^{18}O$  and precipitation amount or relative humidity at daily timescales in both the whole year and winter/summer-half year ( $p < 0.001$ ), but a significant positive correlation between daily  $\delta^{18}O$  and temperature in the whole year and the winter half-year ( $p < 0.001$ ). **Discussion** The correlation coefficients between  $\delta^{18}O$  and daily mean temperature didn't show a significant positive correlation, which may be attributed to that the precipitation in Adelaide area in January was mainly influenced by strong convective weather, and the stable isotope values in precipitation were significantly negative. Furthermore, this propose was also evidenced by the results from  $d_{\text{excess}}$  of precipitation with larger value in the winter half-year than that in the summer half-year, which may be resulted from the precipitation events in winter are mostly influenced by oceanic water vapor, while the sources of water vapor in summer precipitation events are more complicated and influenced by strong convective weather. On the other hand, the slope and intercept of the  $\delta^{18}O$ — $P$  regression lines in the summer months ( $-0.41$  and  $0.50\text{‰}$ ) are larger and smaller than those in the winter months ( $-0.22$  and  $-2.15\text{‰}$ ), respectively, indicating that the precipitation stable isotopes have a relatively stronger rainout effect in the summer months than in the winter months. Besides, the measured values of  $\delta^{18}O$  in daily precipitation have a good linear relationship with our simulated values of  $\delta^{18}O$ , demonstrating the established regression model could provide a reliable simulation for the  $\delta^{18}O$  values in daily precipitation in Adelaide area. It's worth noting that the precipitation events with low precipitation amount, low relative humidity and high temperature, usually had relatively small slope and intercept of MWL, implying that raindrops may be strongly affected by sub-cloud secondary evaporation in the falling process. **Conclusions** The variation of  $\delta^{18}O$  in daily precipitation from Adelaide region was controlled by different factors at different timescales. And the water vapor sources and the meteorological conditions of precipitation events (such as the degree of sub-cloud secondary evaporation) also played an important role on the variation of  $\delta^{18}O$ . **Recommendations and perspectives** Stable isotope in daily precipitation can provide more accurate information about water-cycle and atmosphere circulation, it is therefore necessary to continue to collect and analyze daily-scale precipitation data over a longer time span. The results of this study will provide the basis for the fields of hydrometeorology, meteorological diagnosis and paleoclimate reconstruction in Adelaide, Australia.

**Key words:** Adelaide; precipitation; stable isotopes; meteoric water line; stepwise regression analysis

水循环是联系陆地表层各圈层的纽带。大气降水作为陆面水循环的输入项,是河流、湖泊等淡水系统的重要补给。同时,降水是描述气候变化的关键指标,许多影响气候变化的因子都在降水的变化上得到体现。因此,为探究气候变化的原因,对降水的变化特征及趋势规律的研究必不可少。

$^{18}O$  和  $^2H$  (D) 作为自然水体中水分子的重要组成部分,尽管其所占比例很小,却能非常敏感地响应环境变化,并记载水循环演化的历史信息。这是由于在水循环过程中同位素的分馏,贯穿于

整个循环的每个环节 (Dansgaard, 1964; O'Neil et al., 1969; Araguás-Araguás et al., 1998; 章新平等, 2006)。对降水中稳定同位素的研究始于 20 世纪 50 年代初,从 1961 年开始,国际原子能机构 (IAEA) 和世界气象组织 (WMO) 共同倡导建立了全球降水同位素监测网 (GNIP),为确定全球或区域的水循环机制提供了基础资料。降水中稳定同位素组成与降水形成的气象过程 (Coplen, 1982; Rozanski et al., 2013)、水汽源区的初始状态、大气环流及水汽路径 (Zhang et al., 2004; 刘相超等, 2005; Tian et al., 2007;

李佳芳等, 2015) 密切相关, 从而导致降水中稳定同位素组成具有环境同位素效应, 主要包括温度效应、降水量效应和湿度效应等。温度效应, 即降水中稳定同位素比率与温度之间存在显著的正相关关系, 主要发生在中高纬度的内陆地区, 其产生的原因在于大气和大气降水中的稳定同位素分馏受制于相变过程中的温度 (Dansgaard, 1964)。利用温度效应, 可以对不同沉积物中蕴含的古气候、古环境记录进行合理解释和定量恢复 (von Grafenstein et al., 1996; Wang et al., 2001; 杨梅学和姚檀栋, 2003; Griebinger et al., 2011)。降水量效应, 即降水中稳定同位素比率与降水量之间存在显著的负相关关系, 主要发生在中低纬度海岸带和海岛地区, 它的产生与强对流现象相联系 (Dansgaard, 1964)。由于降水量效应形成机制的复杂性, 中低纬度季风区降水中稳定同位素比率所特有的“降水量效应”远没有中高纬度内陆地区的“温度效应”那么显著, 并且其空间差异很大 (Yapp, 2003; 章新平等, 2005)。因此降水量效应在季风区古气候研究中的应用受到很大限制。湿度效应是指降水中稳定同位素比率与大气湿度存在显著的负相关关系 (章新平等, 2004), 因为降水量与大气湿度往往表现出正相关关系, 所以湿度效应是降水量效应的另一种表现形式。

全球降水同位素监测网 (GNIP) 在澳大利亚已进行了长达 40 a 的观测, 积累的稳定同位素资料为了解澳大利亚降水中  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  的时空分布特征提供了基本数据。但在澳大利亚, 基于天气尺度下的降水稳定同位素变化特征的研究较少, 并且研究区域主要集中在东部及东南部地区。因此, 对天气尺度下降水稳定同位素的变化特征进行研究就显得尤为重要, Barras and Simmonds (2008) 在塔斯马尼亚州的马盖特地区进行了 9 a 天气尺度下的降水样品采样, 分析了降水中稳定同位素的变化特征; Munksgaard et al. (2012) 在昆士兰州东北部的凯恩斯地区进行了极短时间尺度 (30 s) 的连续性降水收集, 在 9 起降水事件中共获得 5948 个水样。利用这些取样数据, Munksgaard et al. (2012) 探究了降水稳定同位素与水汽源区的联系; Crawford et al. (2017) 在南南威尔士州的半干旱地区——麦格里沼泽进行了

7 a 的日时间尺度降水同位素数据收集, 并探究了降水中稳定同位素变化特征以及与主要气象要素的关系。结果发现: 降水中  $\delta^{18}O$  值变化主要受局地地表相对湿度影响, 而与降水量没有显著相关性; 且当地大气水线方程表征出麦格里沼泽作为半干旱地区温暖干燥的气候特征。Guan et al. (2013) 基于在南澳大利亚州弗林德斯大学校园内收集的 17 组降水数据以及在洛夫蒂山脉收集的 8 组降水事件, 对天气系统类型及水汽来源与降水中  $d$  值的关系进行分析, 结果显示: 低压和低压槽影响下的降水事件中  $d$  值整体偏低 (10‰—15‰), 其降水水汽主要来源于内陆, 而受锋面系统影响下的降水事件中  $d$  值整体偏高 (15‰—25‰), 主导其降水的水汽主要为西风带传输的印度洋海洋性水汽。这些成果仅揭示了澳大利亚阿德莱德地区在事件尺度上的降水稳定同位素特征, 缺少长时间序列的连续观测。因此, 本文分析了阿德莱德地区前后跨 4 a 的大气降水稳定同位素资料, 以期为该地区的水循环特征、降水水汽来源以及环境的变迁演化提供来自稳定同位素的依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

阿德莱德 (129.00°—141.00°E, 26.00°—38.06°S) 位于南澳大利亚州南部海岸带地区, 地处海岸带平原, 西邻圣文森特湾, 东靠洛夫蒂山, 南与袋鼠岛 (Kangaroo Island) 隔海相望, 托伦斯河 (Torrens River) 为流经阿德莱德市区的主要河流, 向西流入圣文森特湾 (图 1)。阿德莱德地区年均降水量为 544 mm, 月均最高降水量为 77.7 mm (7 月), 月均最低降水量为 15.6 mm (2 月); 月均最高气温为 23.4 °C (1 月、2 月), 月均最低气温为 11.5 °C (7 月)。该地夏半年炎热干燥, 冬半年温和多雨, 表现出明显的雨热不同期的气候特征, 为典型的地中海气候。

### 1.2 样品采集及分析

2012 年 5 月 20 日—2013 年 8 月 21 日以及 2016 年 11 月 1 日—2017 年 10 月 31 日在阿德莱德弗林德斯大学地球科学楼楼顶 (138°30'E, 35°00'S, 160 m a.s.l) 进行降水取样工作。降水样品均采用连续降水采集器进行收集。该降水采集器能在一次降水事件中进行多达 32 个降水样品的连

续收集, 并且记录下每个水样采集的起始时间(年/月/日/时/分)、降水量及编号。一个集水瓶可收集 2 mm 的降水量, 水量满足同位素分析仪测试水样量的要求。当集水瓶在短时间集满 2 mm 降水量后, 转盘将自动旋转至下一位置的集水瓶。为保证每个集水瓶收集的雨水是在同一时段, 当降水时间间隔超过 120 min 时, 转盘将自动

旋转至下一集水瓶。相关气象要素如气温、相对湿度等则由安装在取样点附近的自动气象站同步记录。所取降水样均在低温条件(4 °C 左右)保存。取样期间共收集 908 个降水样, 其中, 2012 年 5 月 20 日—2013 年 8 月 21 日收集了 536 个样品, 2016 年 11 月 1 日—2017 年 10 月 31 日收集了 372 个样品。

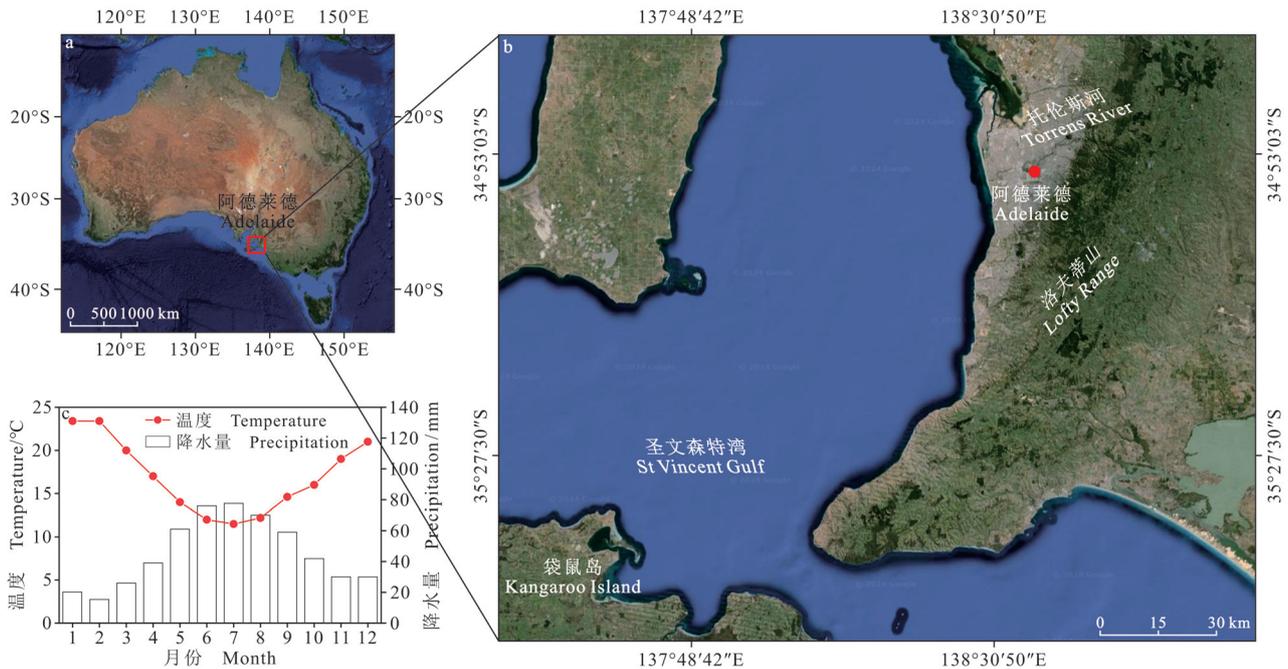


图 1 澳大利亚阿德莱德研究区地理位置及气候特征示意图  
Fig. 1 Geographical location and climatic characteristics of the Adelaide study area, Australia

水稳定同位素比率的测试在弗林德斯大学研究分析中心利用 Picarro L2130-i 液态水稳定同位素分析仪进行, 分析结果用相对于维也纳标准平均海洋水 (V-SMOW) 的千分差 (‰) 表示:

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

式中:  $R_{\text{sample}}$  和  $R_{\text{V-SMOW}}$  分别表示降水样与维也纳标准平均海洋水样中的氧或氢稳定同位素的比率  $R (^{18}O/^{16}O, D/H)$ 。水样中  $\delta^{18}O$  的测试精度为 0.1‰,  $\delta D$  的测试精度为 0.5‰。

### 1.3 数据处理

由于连续降水采集器在某些降水事件中收集到 2 个或 2 个以上的降水样, 且不同降水样的降水量可能存在差异, 所以在研究日时间尺度降水稳定同位素变化特征时, 需对多个降水样品中稳

定同位素值进行降水量的加权平均处理:

$$\overline{\delta X} = \frac{\sum P_i \times \delta X_i}{\sum P_i} \quad (2)$$

式中:  $\delta X_i$  与  $P_i$  分别为稳定同位素比率以及相应降水量。收集到的 908 个降水样经过加权平均处理后共获得 250 个日降水同位素值, 代表 250 个降水日。本文的分析均在 250 个日降水同位素值的基础上展开。

本文所涉及的日平均温度、日平均相对湿度均为当日 24 h 平均值。

### 1.4 天气系统统计

为了探究同位素与天气系统的关系, 根据澳大利亚气象署每日发布的逐 6 h 天气图整理了所有取样降水日的天气系统变化图。统计表明, 影响阿德莱德地区降水的主要天气系统是冷锋、低压

槽、低压以及高压。

## 2 结果与讨论

### 2.1 降水中稳定同位素时间变化特征

根据对取样期间日时间尺度下大气降水中  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $d$  与其相对应的气温、降水量、相对湿度日变化 (图2) 的统计, 阿德莱德地区日降水中  $\delta^{18}\text{O}$

的变化范围为  $-13.46\text{‰}$ — $5.66\text{‰}$ , 加权平均值为  $-4.69\text{‰}$ ; 日降水中  $d$  值为  $-17.6\text{‰}$ — $24.6\text{‰}$ , 加权平均值达  $14.6\text{‰}$ , 高于全球降水中平均  $d$  值 ( $10\text{‰}$ )。夏半年 (10月—次年3月) 平均温度为  $17.8\text{℃}$ , 冬半年 (4—9月) 平均温度为  $11.1\text{℃}$ , 表现出明显的季节变化; 降水主要集中在6—8月, 夏半年的降水事件相对较少。

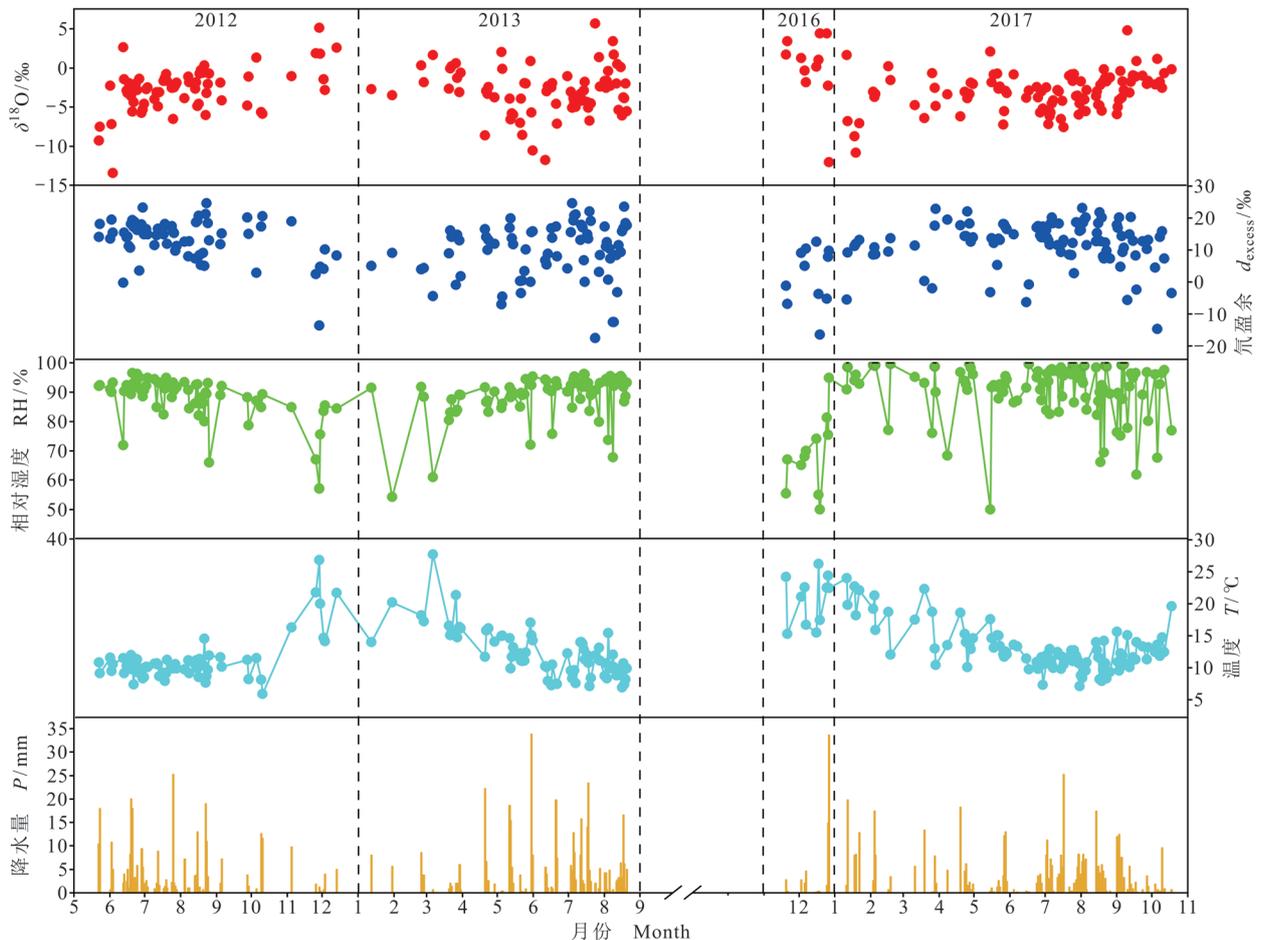


图2 阿德莱德地区降水中  $\delta^{18}\text{O}$ 、氡盈余 ( $d$ )、相对湿度 (RH)、气温 ( $T$ )、降水量 ( $P$ ) 的逐日变化 (2012年5月20日—2013年8月21日; 2016年11月1日—2017年10月31日)

Fig. 2 Temporal variations of daily  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation,  $d_{\text{excess}}$  ( $d$ ), relative humidity (RH), temperature ( $T$ ) and precipitation ( $P$ ) in Adelaide from May 20, 2012 to August 21, 2013 and November 1, 2016 to October 31, 2017

根据图2, 降水中  $\delta^{18}\text{O}$  在夏半年大部分降水日偏高, 小部分降水日偏低, 波动性较大; 而在冬半年整体偏低。这与气温的季节变化趋势基本同步, 但与降水的季节变化表现出较明显的反位相关系。为进一步探索降水中  $\delta^{18}\text{O}$  在月时间尺度下的变化特征, 对阿德莱德地区月尺度下的降水中  $\delta^{18}\text{O}$  的加权平均值、 $\delta^{18}\text{O}$  的最小值和最大值、

变差系数、 $d$  的加权平均值以及相关气象要素进行统计 (表1)。根据表1, 降水稳定同位素的变差系数在冬半年较为稳定, 但在夏半年有较大波动, 这可能由于阿德莱德地区在冬半年受西风带的显著影响, 气温较低, 降水事件绝大部分受海洋性水汽影响, 而夏半年的降水事件较少、水汽来源复杂、气温较高且空气干燥。

表 1 阿德莱德地区 1—12 月降水中  $\delta^{18}\text{O}$  值、平均  $d$  值以及相关气象要素的变化统计  
 Tab. 1 Statistics on the variation of precipitation  $\delta^{18}\text{O}$ , with mean  $d_{\text{excess}}$  and related meteorological elements from January to December in Adelaide, South Australia

月份 Month	均值 Mean/‰	最小 Min/‰	最大 Max/‰	变差系数 The coefficient of variation/‰	平均 $d$ 值 Mean $d_{\text{excess}}$ /‰	平均降水量 Average precipitation/mm	平均温度 Average temperature /°C	平均相对湿度 Average relative humidity/%	样本数 Number of samples
1	-6.62	-10.86	1.64	-0.77	9.68	10.10	20.1	88.3	7
2	-2.45	-3.72	0.32	-0.88	8.63	6.34	17.5	93.5	7
3	-3.70	-6.45	1.64	-1.28	9.28	3.42	17.3	85.4	13
4	-5.62	-8.62	-1.88	-0.48	16.33	5.97	14.3	89.9	12
5	-5.56	-9.31	2.08	-0.89	15.79	5.75	13.1	88.4	26
6	-5.13	-13.46	2.66	-0.78	14.59	4.69	10.2	91.1	35
7	-4.68	-7.59	5.66	-0.67	15.26	5.18	10.8	92.0	53
8	-3.73	-6.13	3.40	-0.83	16.48	4.14	10.0	89.0	50
9	-3.85	-5.91	4.79	-1.14	15.83	3.85	11.6	87.5	20
10	-4.31	-5.78	1.30	-1.43	15.79	4.31	12.2	87.6	9
11	1.36	-1.07	5.11	0.96	10.29	2.73	20.7	67.8	6
12	-0.84	-12.05	4.43	5.54	8.61	5.82	19.9	73.9	12

表格中平均降水量为该月总降水量与降水样本数之比。

The average precipitation in the table is the ratio of total precipitation to the number of precipitation samples in the month.

阿德莱德地区降水中  $\delta^{18}\text{O}$  的月均最低值出现在 1 月，月均最高值出现在 11 月。在夏半年月降水稳定同位素值整体偏正的情况下，1 月降水稳定同位素值却出现异常偏负现象。统计发现出现在 1 月的 7 起降水事件的平均降水量达 10.1 mm，远高于其他月，且主导 7 起降水事件的天气系统均为低压和低压槽。在以低压和低压槽为主的对流更强的天气系统影响下，单次降水事件中更高的降水量代表降水中重同位素被“冲刷”的程度更高，这可能是导致 1 月降水中的平均同位素值明显偏低的原因。

在春夏之交的 11 月共发生 6 起降水事件，平均降水量仅为 2.73 mm，降水期间的平均相对湿度低至 67.8%，远低于其他月份。受雨滴下降过程中强烈的蒸发富集作用影响，11 月降水中稳定同位素值明显偏高。

过去的研究发现：降水中  $d$  值不仅与水汽源地蒸发状况有关 (Ciais and Jouzel, 1994)，还受制于水循环过程水体相变中  $\delta\text{D}$  与  $\delta^{18}\text{O}$  的分馏差异。通过将日降水中  $d$  值进行月加权平均可以发现，冬半年降水中  $d$  值明显高于夏半年。原因在于冬夏半年降水的水汽来源不同，降水事件大多受海洋性水汽影响，夏半年降水事件的水汽来源较为复杂且受强对流天气影响，因此降水中  $d$  值可以有效表征冬夏半年的降水气象条件与水汽来

源的差异。

## 2.2 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度、降水量及相对湿度的相关关系

### 2.2.1 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的关系

将降水中日  $\delta^{18}\text{O}$  依日平均温度按年、夏半年和冬半年进行点绘，分别得到 3 个不同时段日降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与日平均温度的线性关系 (图 3)。在全年及冬半年，阿德莱德地区日降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与日平均气温的相关系数分别为 0.31 和 0.24，均通过 0.001 显著性检验，呈现显著正相关关系；而在夏半年，降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与日平均气温的相关系数仅为 0.19，呈现不显著的正相关关系。阿德莱德地区 1 月降水主要受强对流天气的影响，降水中稳定同位素值显著偏负，这可能是研究区在夏半年温度效应不显著的一个重要原因。在 250 个日降水数据中，夏半年仅有 54 个，其余 196 个样本数据均出现在冬半年，因此冬半年显著的温度效应对于阿德莱德地区全年温度效应有较大贡献。

### 2.2.2 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量的关系

将降水中日  $\delta^{18}\text{O}$  依日降水量按年、夏半年和冬半年进行点绘，分别得到 3 个时段内  $\delta^{18}\text{O}$  与日降水量的线性关系 (图 4)。在全年、夏半年以及冬半年，阿德莱德地区日降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与降水量之间的相关系数分别为 -0.53、-0.72 和 -0.49，均通过 0.001 显著性检验，表现出显著的降水量效应。

值得注意的是, 在夏半年, 日时间尺度降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与日降水量的相关系数高达  $-0.72$ , 远高于冬半年对应的相关系数, 表明在夏半年降水量效应更加凸显, 从而也在一定程度上掩盖了温度效应。

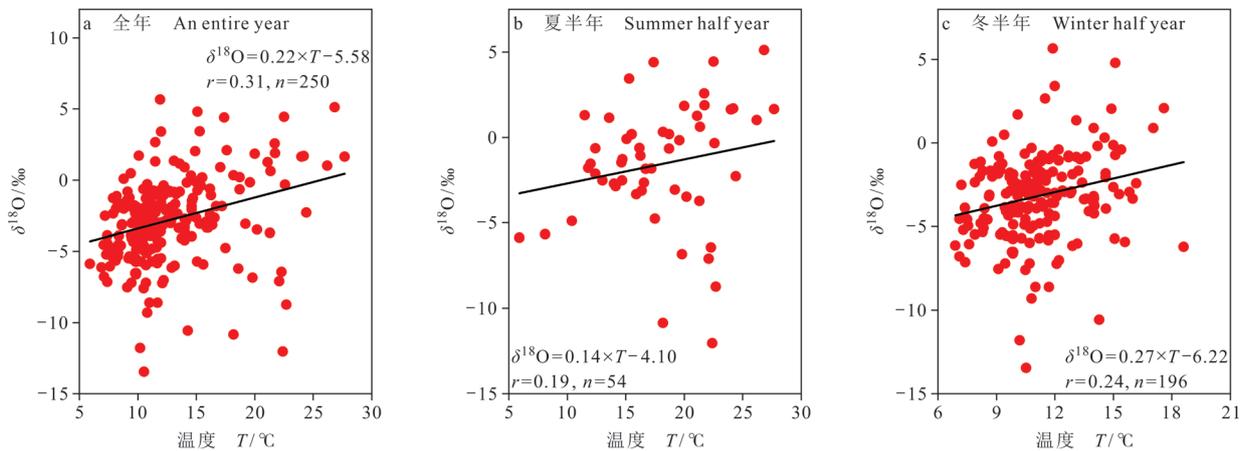


图3 在年(a)、夏半年(10月—次年3月)(b)、冬半年(4—9月)(c)3个时段内阿德莱德地区大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 依气温 $T$ 的散布

Fig. 3 Correlated scatters between  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation and temperature in Adelaide in three periods: an entire year (a), summer half year (October to the following March) (b) and winter half year (April to September) (c)

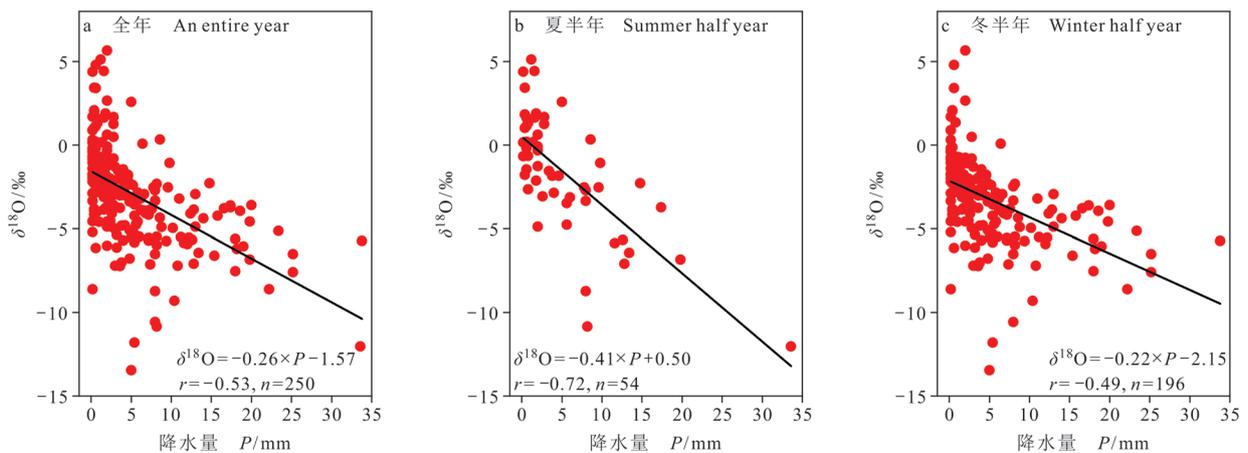


图4 在年(a)、夏半年(10月—次年3月)(b)、冬半年(4—9月)(c)3个时段内阿德莱德地区大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 依降水量 $P$ 的散布

Fig. 4 Correlated scatters between  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation and precipitation in Adelaide in three periods: an entire year (a), summer half year (October to the following March) (b) and winter half year (April to September) (c)

通常, 度量降水量效应强度主要依据  $\delta^{18}\text{O}$ — $P$  回归直线的斜率, 该斜率代表降水稳定同位素在相变过程中的雨除水平 (Dansgaard, 1964)。夏半年  $\delta^{18}\text{O}$ — $P$  回归直线的斜率与截距 ( $-0.41$  和  $0.50\text{‰}$ ) 分别大于和小于冬半年  $\delta^{18}\text{O}$ — $P$  回归直线的斜率与截距 ( $-0.22$  和  $-2.15\text{‰}$ ), 表明夏半年降水稳定同位素的雨除效应相对冬半年较强。

### 2.2.3 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与相对湿度的关系

将降水中日  $\delta^{18}\text{O}$  值依日相对湿度按年、夏半

年和冬半年进行点绘, 分别得到3个时段内  $\delta^{18}\text{O}$  与日相对湿度的线性关系 (图5)。在全年、夏半年以及冬半年, 阿德莱德地区日降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与相对湿度之间的相关系数分别为  $-0.48$ 、 $-0.59$  和  $-0.34$ , 均通过  $0.001$  显著性检验, 表现出显著的湿度效应。夏半年日尺度降水中  $\delta^{18}\text{O}$ —RH 回归直线的斜率为  $-0.16$ , 大于冬半年  $\delta^{18}\text{O}$ —RH 回归直线的斜率  $-0.12$ , 表明夏半年相较于冬半年具有更强的湿度效应。夏半年降水日的平均相对湿度为

83%，冬半年降水日的平均相对湿度为 90%，夏半年偏低的平均相对湿度使得云下二次蒸发作用更为强烈，加剧了同位素的分馏，使  $\delta^{18}\text{O}$  与相对湿度之间的变化速率更快，所以夏半年  $\delta^{18}\text{O}$ —RH 回归直线的斜率大于冬半年。

### 2.3 大气水线及其影响大气水线的气象因子

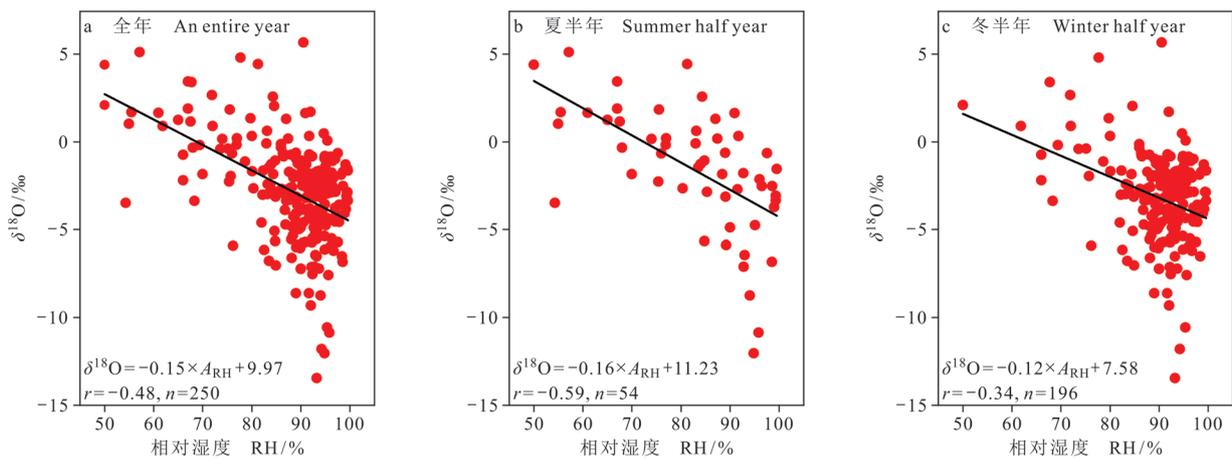
#### 2.3.1 局地大气水线

采用最小二乘法，得到阿德莱德地区日时间尺度下的全年大气水线方程（图 6）：

$$\delta D = 6.38 \times \delta^{18}\text{O} + 6.68 \quad (r=0.95, n=250) \quad (3)$$

该大气水线的斜率与截距明显小于全球大气水

线（GMWL） $\delta D = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$ ，表征出阿德莱德地区较为干旱的气候特征。同样的情况在澳大利亚新南威尔士州半干旱地区——麦格里沼泽被观测到，Crawford et al. (2017) 通过利用该地区 7 a 日尺度降水同位素数据计算得到大气水线方程  $\delta D = 6.96(\pm 0.11) \times \delta^{18}\text{O} + 6.4(\pm 0.5)$ ，其斜率与截距与阿德莱德地区日时间尺度下的全年大气水线方程比较相似；但同处新南威尔士州沿海地区的悉尼，由于气候较为湿润，年均降水量高达 1214.3 mm，其大气水线方程为： $\delta D = 8.01(\pm 0.05) \times \delta^{18}\text{O} + 16.8(\pm 0.3)$ （Crawford et al., 2013），表现出明显的差别。



$A_{RH}$  代表相对湿度 (RH)。  $A_{RH}$  means RH.

图 5 在年 (a)、夏半年 (10 月—次年 3 月) (b)、冬半年 (4—9 月) (c) 3 个时段内阿德莱德地区大气降水中  $\delta^{18}\text{O}$  依相对湿度 RH 的散布

Fig. 5 Correlated scatters between  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation and relative humidity in Adelaide in three periods: an entire year (a), summer half year (October to the following March) (b) and winter half year (April to September) (c)

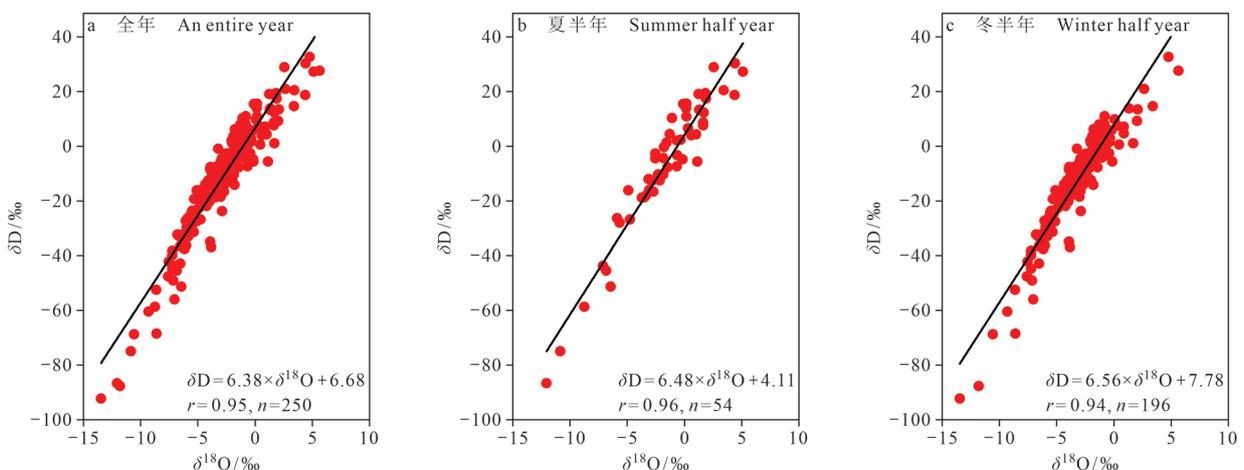


图 6 在年 (a)、夏半年 (10 月—次年 3 月) (b)、冬半年 (4—9 月) (c) 3 个时段内阿德莱德地区的局地大气水线 (LMWL)

Fig. 6 Correlated scatters between  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta D$  in precipitation in Adelaide in three periods: an entire year (a), summer half year (October to the following March) (b) and winter half year (April to September) (c)

阿德莱德地区在日时间尺度下冬夏半年间的大气水线方程分别为:

$$\text{夏半年: } \delta D = 6.48 \times \delta^{18}O + 4.11 \quad (r = 0.96, n = 54) \quad (4)$$

$$\text{冬半年: } \delta D = 6.56 \times \delta^{18}O + 7.78 \quad (r = 0.94, n = 196) \quad (5)$$

可以看出: 日时间尺度下不同季节大气水线方程的斜率比较接近, 但截距有一定差异, 夏半年大气水线表现出更低的截距, 可能是由于夏半年气温偏高、空气相对湿度偏低, 加剧了云下二次蒸发, 同位素动力分馏效应导致降水中  $\delta D$  更加偏离平衡状态, 从而降低了大气水线的斜率与截距 (Peng et al., 2007)。

### 2.3.2 不同等级气象要素下的大气水线

根据水同位素的分馏原理, 一方面大气水线的斜率反映稳定同位素 D 和  $^{18}O$  分馏速率的对比关系, 截距表示从水源地蒸发的 D 相对平衡状态的偏离程度 (Craig, 1961; Jouzel and Merlivat, 1984); 另一方面, 大气水线的斜率和截距还与云下二次蒸发密切相关, 主要体现在不同降水量、温度、相对湿度等气象要素对大气水线的影响 (孟玉川和刘国东, 2010; 吴华武等, 2012;

黄一民等, 2014)。为了探究云下二次蒸发程度与大气水线的关系, 依次计算降水量  $P$ 、温度  $T$ 、相对湿度 RH 分别大于某选定值 (即  $P_{\min}$ 、 $T_{\min}$ 、 $RH_{\min}$ , 简称为  $P_m$ 、 $T_m$ 、 $RH_m$ ) 时的大气水线的斜率与截距 (图 7)。

在以降水量阈值  $P_m$  为自变量的大气水线斜率和截距变化图 (图 7a) 中, 降水量阈值的变化范围为 0—17 mm, 斜率与截距的变化范围分别为 6.38—8.53 和 6.68‰—18.74‰。当  $0 \leq P_m \leq 9$  时, 大气水线的斜率和截距先迅速增加后缓慢增加; 当  $P_m > 9$  时, 大气水线的斜率与截距变化趋于稳定。产生这种变化的原因可能是当降水量阈值  $P_m = 0$  时, 平均相对湿度仅为 88%, 云下二次蒸发作用较强, 大气水线的斜率和截距也较低; 当降水量阈值增大到  $P_m = 9$  时, 平均相对湿度增大到 92%, 雨滴在下降过程中受云下二次蒸发作用的影响减弱, 大气水线的斜率和截距也随之增大; 当降水量阈值  $9 \leq P_m \leq 16$  时, 平均相对湿度的变化范围仅为 92%—93%, 云下二次蒸发作用在该降水量范围内相对较弱并且不再发生明显变化, 因此大气水线的斜率和截距变化也趋于稳定。

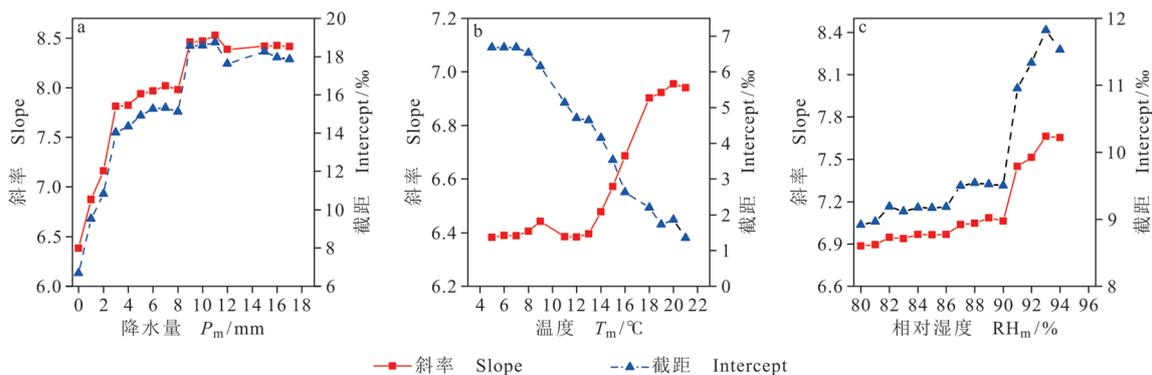


图 7 阿德莱德日时间尺度下大气水线斜率和截距随不同降水量  $P_m$  (a)、不同温度  $T_m$  (b)、不同相对湿度  $RH_m$  (c) 的变化

Fig. 7 Variation of slope and intercept of local meteoric water line with different precipitation (a), temperature (b), relative humidity (c) on daily time scale in Adelaide

在以温度阈值  $T_m$  为自变量的大气水线斜率和截距变化图 (图 7b) 中, 温度阈值的变化范围为 5—21 °C, 大气水线斜率和截距的变化范围分别为 6.38—6.96 和 1.35‰—6.68‰。当  $T_m = 5$  时, 平均相对湿度为 88%; 当  $T_m = 10$  时, 平均相对湿度为 87%; 当  $T_m = 15$  时, 平均相对湿度为 81%;

当  $T_m = 20$  时, 平均相对湿度为 76%。可以看出, 随着温度阈值的升高, 平均相对湿度显著降低, 使得云下二次蒸发作用逐渐加强, 从而导致大气水线的截距降低。然而, 大气水线的斜率却不降反升, 可能的原因为: 冬半年的降水事件 (同位素值较为偏负) 随着温度阈值的上升而被逐步剔

除掉, 剩余的降水事件中夏半年所占的比例越来越高, 大气水线的斜率也随之降低, 但夏半年 1 月降水同位素值异常偏负 (表 1) 且较大的蒸发使其散点偏离水线, 这种反常特征导致斜率在数学统计中增大 (孟玉川和刘国东, 2010; 戴军杰等, 2020)。

在以相对湿度阈值  $RH_m$  为自变量的大气水线斜率和截距变化图 (图 7c) 中, 相对湿度阈值的变化范围为 80%—94%, 大气水线斜率和截距的变化范围分别为 6.89—7.66 和 8.92‰—11.82‰。随着相对湿度阈值的增加, 大气水线的斜率和截距均呈先稳定后增加的变化趋势。当相对湿度阈值为 80% 时, 平均降水量为 4.9 mm, 平均温度为 12.5 °C; 当相对湿度阈值为 90% 时, 平均降水量为 6 mm, 平均温度为 11.6 °C; 当相对湿度阈值为 93% 时, 平均降水量为 6.2 mm, 平均温度为 11.6 °C。可以看出, 随着相对湿度阈值的增加, 平均降水量值随之增加, 平均温度值随之减小, 云下二次蒸发作用逐渐减弱, 因此大气水线的斜率和截距均呈现先稳定后增加的变化趋势。

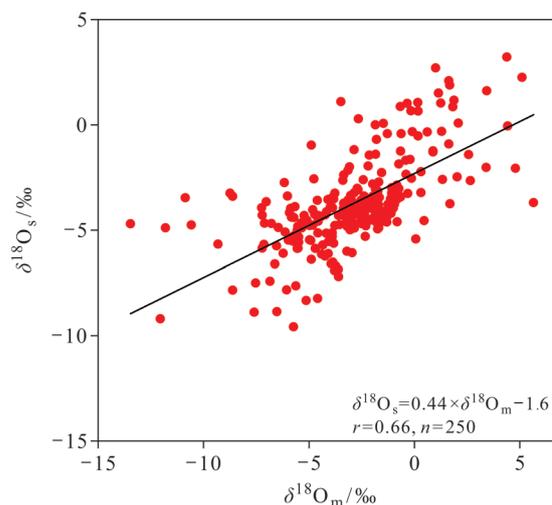
#### 2.4 降水中 $\delta^{18}O$ 与降水量、温度、湿度的逐步回归分析

为了揭示日时间尺度下降水量、温度、相对湿度对降水中  $\delta^{18}O$  变化的综合影响程度, 以降水中  $\delta^{18}O$  值为因变量, 降水量、温度、相对湿度为自变量, 进行逐步回归计算, 得到模型:

$$\delta^{18}O = 3.70 - 0.23 \times P - 0.08 \times A_{RH} + 0.14 \times T \quad (r = 0.66, n = 250) \quad (6)$$

在引入的 3 个因子中, 降水量对  $\delta^{18}O$  的偏相关系数为 -0.51, 贡献率为 59.7%; 相对湿度对  $\delta^{18}O$  的偏相关系数为 -0.29, 贡献率为 19.3%; 温度对  $\delta^{18}O$  的偏相关系数为 0.22, 贡献率为 11.1%。总体上, 影响降水中  $\delta^{18}O$  变化的主导因素为降水量。

利用建立的逐步回归模型对阿德莱德地区日降水中  $\delta^{18}O$  进行模拟计算, 并将实测值与模拟值进行比较 (图 8)。模拟值与实测值的相关系数为 0.66, 通过 0.001 显著性检验。日降水中  $\delta^{18}O$  实测值的加权平均为 -4.684‰,  $\delta^{18}O$  模拟值的加权平均为 -4.679‰, 模拟值的加权平均值与实测值的加权平均值差距并不大。模型拟合的均方根误差仅为 2.45‰。以上分析表明, 建立的回归模型能够很好地模拟阿德莱德地区日降水中的  $\delta^{18}O$  值。



$\delta^{18}O_m$  与  $\delta^{18}O_s$  分别表示  $\delta^{18}O$  的实测值与模拟值。  
 $\delta^{18}O_m$  and  $\delta^{18}O_s$  represent the measured and simulated values of  $\delta^{18}O$ , respectively.

图 8 阿德莱德地区日降水中  $\delta^{18}O$  的实测值与模拟值的关系  
Fig. 8 Correlation between measured and simulated of daily precipitation  $\delta^{18}O$  in Adelaide, South Australia

### 3 结论

阿德莱德地区日降水中  $\delta^{18}O$  值在夏半年除 1 月外的其他月份相对偏高, 在冬半年相对偏低, 季节变化范围较大。盛夏 1 月, 低压和低压槽为主的强对流天气系统主导降水, 并且单次降水事件的降水量更高, 使得降水中重同位素被“冲刷”的程度更高, 这可能是导致该月降水中同位素值整体偏低的重要原因。而在春末的 11 月, 较低的相对湿度引起的同位素云下蒸发富集效应, 可能是导致该月降水中同位素值整体偏高的重要原因。日降水中  $d$  值变化范围较大, 平均  $d$  值为 14.6‰, 高于全球降水中平均  $d$  值 (10‰)。冬夏半年的降水  $d$  值差异明显, 冬半年降水中  $d$  值明显高于夏半年, 很好地指示出冬夏半年的降水气象条件与水汽来源存在较大差异。

阿德莱德地区日降水中  $\delta^{18}O$  的变化在全年表现出显著的温度效应、降水量效应以及湿度效应, 但在夏半年期间, 更为显著的降水量效应在一定程度上掩盖了温度效应的显现。

阿德莱德地区冬夏半年大气水线方程的斜率较为接近, 但夏半年大气水线的截距小于冬半年, 可能是夏半年的云下二次蒸发更强烈, 导致降水中  $\delta D$  更加偏离平衡状态, 从而降低了大气水线的截距。阿德莱德地区全年大气水线的斜率与截距明显小于全球大气水线, 表征出阿德莱德地区较

为干旱的气候特征。在降水量阈值、相对湿度阈值偏低以及气温阈值偏高的降水事件中, 雨滴在下落过程中受二次蒸发影响将更为剧烈, 从而导致这些降水事件中出现显著偏低的斜率与截距(在以温度阈值为划分依据时, 数学统计方法造成了斜率的异常变化)。

降水量是影响阿德莱德地区日降水中  $\delta^{18}\text{O}$  变化的主要气象要素, 远大于温度和相对湿度对日降水中  $\delta^{18}\text{O}$  变化的影响。日降水中  $\delta^{18}\text{O}$  的实测值与回归模型对  $\delta^{18}\text{O}$  的模拟值具有良好的线性关系, 且加权平均值的差距并不大, 均方根误差仅为 2.45%, 建立的回归模型对阿德莱德地区日降水中  $\delta^{18}\text{O}$  值的模拟效果良好。

### 参考文献

- 戴军杰, 章新平, 罗紫东, 等. 2020. 长沙地区樟树林穿透水空间变异及稳定同位素特征 [J]. *水土保持学报*, 34(3): 291–298. [Dai J J, Zhang X P, Luo Z D, et al. 2020. Spatial variation and stable isotopic characteristic of throughfall under *Cinnamomum camphora* woods in Changsha [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 34(3): 291–298.]
- 黄一民, 章新平, 孙 蓓. 2014. 长沙大气水线及与局地气象要素的关系 [J]. *长江流域资源与环境*, 23(10): 1412–1417. [Huang Y M, Zhang X P, Sun J. 2014. Meteoric water line and relationship with local meteorological factors in Changsha [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 23(10): 1412–1417.]
- 李佳芳, 石培基, 朱国锋, 等. 2015. 河西走廊中部大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  变化特征及水汽输送 [J]. *环境科学学报*, 35(4): 947–955. [Li J F, Shi P J, Zhu G F, et al. 2015. Characteristics of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation and moisture transports in the central Hexi Corridor [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 35(4): 947–955.]
- 刘相超, 宋献方, 夏 军, 等. 2005. 东台沟实验流域降水氧同位素特征与水汽来源 [J]. *地理研究*, 24(2): 196–205. [Liu X C, Song X F, Xia J, et al. 2005. A study on oxygen isotope in precipitation of Dongtaigou Basin in Chao and Bai River Basin [J]. *Geographical Research*, 24(2): 196–205.]
- 孟玉川, 刘国东. 2010. 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*, 21(3): 327–334. [Meng Y C, Liu G D. 2010. Effect of below-cloud secondary evaporation on the stable isotopes in precipitation over the Yangtze River Basin [J]. *Advances in Water Science*, 21(3): 327–334.]
- 吴华武, 章新平, 关华德, 等. 2012. 不同水汽来源对湖南长沙地区降水中  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  的影响 [J]. *自然资源学报*, 27(8): 1404–1414. [Wu H W, Zhang X P, Guan H D, et al. 2012. Influences of different moisture sources on  $\delta\text{D}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation in Changsha, Hunan Province [J]. *Journal of Natural Resources*, 27(8): 1404–1414.]
- 杨梅学, 姚檀栋. 2003. 古里雅冰芯气候记录对 ENSO 事件的响应 [J]. *冰川冻土*, 25(1): 27–33. [Yang M X, Yao T D. 2003. The response of the climate records in the Guliya ice core to ENSO events [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 25(1): 27–33.]
- 章新平, 刘晶森, 孙维贞, 等. 2006. 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*, 36(9): 850–859. [Zhang X P, Liu J M, Sun W Z, et al. 2006. Relations between oxygen stable isotopic ratios in precipitation and relevant meteorological factors in Southwest China [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 36(9): 850–859.]
- 章新平, 田立德, 刘晶森, 等. 2005. 沿三条水汽输送路径的降水中  $\delta^{18}\text{O}$  变化特征 [J]. *地理科学*, 25(2): 190–196. [Zhang X P, Tian L D, Liu J M, et al. 2005. Variations of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation along three vapor transport paths [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 25(2): 190–196.]
- 章新平, 姚檀栋, 田立德, 等. 2004. 湿度效应及其对降水中  $\delta^{18}\text{O}$  季节分布的影响 [J]. *冰川冻土*, 26(4): 420–425. [Zhang X P, Yao T D, Tian L D, et al. 2004. Humidity effect and its influence on seasonal distribution of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 26(4): 420–425.]
- Araguás-Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. 1998. Stable isotope composition of precipitation over Southeast Asia [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D22): 28721–28742.
- Barras V J I, Simmonds I. 2008. Synoptic controls upon  $\delta^{18}\text{O}$  in southern Tasmanian precipitation [J]. *Geophysical Research Letters*, 35(2): L02707. DOI: 10.1029/2007GL031835.
- Ciais P, Jouzel J. 1994. Deuterium and oxygen 18 in precipitation: Isotopic model, including mixed cloud processes [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D8): 16793–16803.
- Coplen T. 1982. Stable isotope hydrology: deuterium and

- oxygen-18 in the water cycle [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 63(45): 861–862.
- Craig H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 133(3465): 1702–1703.
- Crawford J, Hollins S E, Meredith K T, et al. 2017. Precipitation stable isotope variability and subcloud evaporation processes in a semi-arid region [J]. *Hydrological Processes*, 31(1): 20–34.
- Crawford J, Hughes C E, Parkes S D. 2013. Is the isotopic composition of event based precipitation driven by moisture source or synoptic scale weather in the Sydney Basin, Australia? [J]. *Journal of Hydrology*, 507: 213–226.
- Dansgaard W. 1964. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 16(4): 436–468.
- Grießinger J, Bräuning A, Helle G, et al. 2011. Late Holocene Asian summer monsoon variability reflected by  $\delta^{18}\text{O}$  in tree-rings from Tibetan junipers [J]. *Geophysical Research Letters*, 38(3): L03701. DOI: 10.1029/2010GL045988.
- Guan H D, Zhang X P, Skrzypek G, et al. 2013. Deuterium excess variations of rainfall events in a coastal area of South Australia and its relationship with synoptic weather systems and atmospheric moisture sources [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(2): 1123–1138.
- Jouzel J, Merlivat L. 1984. Deuterium and oxygen 18 in precipitation: modeling of the isotopic effects during snow formation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 89(D7): 11749–11757.
- Munksgaard N C, Wurster C M, Bass A, et al. 2012. Extreme short-term stable isotope variability revealed by continuous rainwater analysis [J]. *Hydrological Processes*, 26(23): 3630–3634.
- O'Neil J R, Clayton R N, Mayeda T K. 1969. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 51(12): 5547–5558.
- Peng H D, Mayer B, Harris S, et al. 2007. The influence of below-cloud secondary effects on the stable isotope composition of hydrogen and oxygen in precipitation at Calgary, Alberta, Canada [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 59(4): 698–704.
- Rozanski K, Araguás-Araguás L, Gonfiantini R. 2013. Isotopic patterns in modern global precipitation [M]// Swart P K, Lohmann K C, McKenzie J, et al. 1993. Climate change in continental isotopic records. Washington: American Geophysical Union: 1–36.
- Tian L D, Yao T D, MacClune K, et al. 2007. Stable isotopic variations in west China: a consideration of moisture sources [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D10): D10112. DOI: 10.1029/2006JD007718.
- von Grafenstein U, Erlenkeuser H, Müller J, et al. 1996. A 200 year mid-European air temperature record preserved in lake sediments: an extension of the  $\delta^{18}\text{O}_p$ -air temperature relation into the past [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(21): 4025–4036.
- Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. 2001. A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China [J]. *Science*, 294(5550): 2345–2348.
- Yapp C J. 2003. A model for  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  variations in  $\text{CO}_2$  evolved from goethite during the solid-state  $\alpha\text{-FeOOH}$  to  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  phase transition [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(11): 1991–2004.
- Zhang X P, Liu J M, Tian L D, et al. 2004. Variations of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation along vapor transport paths [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 21(4): 562–572.