

Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Southwest (Indian) Monsoon Intensity at Kunming

Xinyu Wen, Hucai Zhang*

Yunnan Provincial Key Laboratory of Geographical Process and Environmental Change on the Plateau, Key Laboratory of Plateau Lake Ecology & Global Change, College of Tourism and Geography Science, Yunnan Normal University, Chenggong Kunming
Email: xywen0801@163.com, *zhanghc@niglas.ac.cn

Received: Oct. 29th, 2017; accepted: Nov. 10th, 2017; published: Nov. 17th, 2017

Abstract

Using isotope and meteorology data at Kunming station from the GNIP, the average monthly and annual hydrogen and oxygen stable isotopic compositions and the main factors of 15 years (1986-1992 and 1996-2003) at Kunming station were analyzed. The average monthly and annual hydrogen and oxygen stable isotopic compositions fall within the scope of changes in China and the global isotopes of precipitation, and the seasonal and interannual variations are significant. Hydrogen and oxygen stable isotopic compositions of precipitation at Kunming are mainly influenced by vapor source. There exist obvious differences in the seasonal and interannual scales. The local precipitation amount and air temperature determine 81.7% and 18.3% oxygen isotope values in the rainy season, respectively. Even the $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation affected by the precipitation amount and air temperature, the precipitation amount has a stronger affect on the $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation than the air temperature. In addition, the relationship between annual precipitation and Indian monsoon indexes show a positive correlation, but a significant negative correlation with $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation, illustrating that $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation indicates monsoon or rainfall intensity. The relationship between monsoon intensity and precipitation amount and the $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation can provide a scientific support on the meaning of the isotope of the stalagmites. Comparing the isotopes of precipitation in Kunming with that from Hong Kong station, their d values have distinct seasonality with lower values in the rainy season and higher values in the dry season, but they have almost similar values. Nevertheless, geographical location and distance from sea are different, illustrating that the vapor sources are different. Precipitation in Kunming is affected mostly by southwest monsoon from Indian Ocean, but the rainfall in Hong Kong is mainly controlled by southeast monsoon from Pacific Ocean. The seasonal and interannual variation trends of slope and intercept of Kunming precipitation can be explained by below-cloud secondary evaporation and dynamic fractionation effect.

Keywords

Precipitation, Stable Isotope, Seasonal and Annual Variation, Vapor Source, Kunming

*通讯作者。

昆明大气降水稳定同位素与西南(印度)季风强度

文新宇, 张虎才*

云南师范大学旅游与地理科学学院, 高原湖泊生态与全球变化实验室, 云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 昆明 呈贡

Email: xywen0801@163.com, *zhanghc@niglas.ac.cn

收稿日期: 2017年10月29日; 录用日期: 2017年11月10日; 发布日期: 2017年11月17日

摘要

根据全球降水同位素观测网(GNIP)提供的昆明站大气降水氢氧稳定同位素数据及其气象资料, 对昆明站1986~1992、1996~2003年共计15年的月均和年均大气降水氢氧同位素组成及其影响因素进行分析和研究。结果表明: 昆明月均及年均同位素组成均落在中国和全球降水同位素的变化范围之内, 并呈现明显的季节及年际变化。昆明大气降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 主要受到水汽来源影响, 而且在季节和年际尺度上存在较大差异。经计算得出: 昆明雨季(5~10月)降水中氧同位素值81.7%受当地降水量控制, 18.3%受气温影响, 这说明昆明大气降水中 $\delta^{18}O$ 受降水量和气温的协同影响, 但以降水量对其影响为主; 通过年降水量与西南季风指数对比证实, 昆明年降水量与西南季风指数呈正相关性, 但与 $\delta^{18}O$ 呈显著的负相关性, 由此说明在季风影响显著的单一态地区, 可以用降水 $\delta^{18}O$ 值指示降水强度或季风强度, 这种季风强度-大气降水量- $\delta^{18}O$ 三者之间的关系可为研究石笋中所蕴含的环境信息提供依据。另外, 通过与香港降水同位素对比研究, 发现二者的 d 值虽然均呈现旱季高于雨季的季节性变化趋势, 但它们的平均 d 值几乎相同, 由于昆明与香港所处地理位置和距离海洋远近的差异明显, 说明二者的水汽来源不同, 昆明降水主要受印度洋的西南季风控制, 香港降水则主要来源于太平洋控制的东南季风。昆明大气降水线斜率和截距的季节及年际变化趋势可用云下二次蒸发和动力分馏效应来解释。

关键词

大气降水, 稳定同位素, 季节和年际变化, 水汽来源, 昆明

Copyright © 2017 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

降水是水循环过程中的一个重要环节, 降水中的 ^{18}O 和D是水汽团循环的天然示踪剂, 更是水汽来源的指示剂。降水中氢氧同位素受制于水汽来源[1]、蒸发、凝结[2]及海陆之间的水汽交换[3]的影响, 此外, 还受制于水汽在源区的蒸发过程、大气水汽输送模式及降水气团的冲刷过程[4] [5] [6] [7]等一些区域尺度过程的影响, 因此可利用研究区降水中同位素组成及其相应的气象要素(温度和降水量)来识别水汽源区。研究表明[8] [9], 中国大气降水同位素组成主要受来源于印度洋的西南季风、西太平洋的东南季风及

盛行于高纬的西风影响。昆明地处于西南水汽通道上, 受西南季风影响显著, 而西南水汽通道上的水汽特征与亚洲季风的爆发、副热带高压环流、海陆热力强迫及中纬度系统扰动等动力效应密切相关[10] [11], 据此, 尽管昆明地区的水汽来源较为单一, 而其影响因素较为复杂。一些研究者[12]通过对对流层水汽通量的研究认为西南季风区降水的水汽主要来源于南印度洋的水汽蒸发。庞洪喜等[13]在稳定同位素瑞利分馏原理的基础上, 提出了一种新的确定季风水汽来源的计算方法, 研究结果表明, 西阿拉伯海和南印度洋的水汽是西南季风区降水的主要水汽来源。

大气降水同位素受气象要素等参数的综合影响, 是一种较为复杂的时间序列动态过程, 具有其独特的时间空间变化特征, 因此受到研究者的青睐。我国科研人员自 20 世纪 70 年代以来对大气降水中氢氧稳定同位素进行了深入系统的研究, 并取得了一系列研究成果。大量科研工作者对青藏高原地区大气降水同位素研究表明, 青藏高原南部在西南季风期间降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 偏低[14], 而在季风前期及后期降水 $\delta^{18}\text{O}$ 相对偏高[15] [16], 表现出明显的降水量效应[17]。在青藏高原北部非季风区, 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 具有明显的温度效应[18] [19]。Li 等(2016)通过对云南省的蒙自、思茅及腾冲三地区降水同位素研究发现 $\delta^{18}\text{O}$ 与日均温呈现显著的负相关性[20]。庞洪喜等(2006)根据丽江 2003 年夏季降水 $\delta^{18}\text{O}$ 数据, 并结合 NCEP/NCAR 再分析资料, 研究了天气尺度下季风降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化, 发现丽江夏季日降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 主要受降水量控制, 但不存在温度效应, 西南季风活动的波动对降水 $\delta^{18}\text{O}$ 产生显著影响[21]。

大气降水氧同位素在时间和空间的变化规律中蕴含着外界环境信息(气温、降水量及水汽运移途径等), 因此可通过分析大气降水中稳定同位素组成及其分布特征能有效获得外部环境信息[22] [23]。然而, 通过石笋中的 $\delta^{18}\text{O}$ 研究历史降水记录已受到研究者的广泛关注, 相关研究表明[24] [25] [26], 在受季风影响强烈的单一态地区, 石笋氧同位素组成与温度负相关代表降雨量, 可指示季风强度, 并且能直接反映大气降水中的氧同位素组成及变化情况。在季风强烈的地区, 大气降水中的氧同位素与降雨量呈负相关关系, 因此氧同位素-季风强度-大气降水量三者之间存在定量关系, 可以用降水中的氧同位素指示季风强度。

本文选择昆明地区作为研究区, 旨在通过分析昆明站不同时间尺度下的降水同位素变化特征及其影响机制, 利用单一点降水稳定同位素数据, 并参考其它观测点资料探讨昆明大气降水的主要水汽来源, 进一步揭示西南季风区降水中氧同位素在年际时间尺度上与季风强度之间的关系。

2. 研究区概况

昆明市位于云南省中部, 坐标介于北纬 $24^{\circ}23' \sim 26^{\circ}22'$, 东经 $102^{\circ}10' \sim 103^{\circ}40'$, 海拔 1890.2 m, 四面环山。昆明位于我国西南水汽通道上, 主要受控于西南(印度)季风, 同时受高原季风及东亚季风的协同影响, 属典型季风气候区。根据 1951~1980 年气象观测数据, 昆明年均气温 14.7°C , 多年平均降雨量 1006.5 mm, 形成冬无严寒, 夏无酷暑, 四季如春和干湿两季的气候特征, 与深圳气候差别明显(图 1)。这里我们选用深圳气象观测数据有两个原因: 1、统一用中国气象局处理数据便于对比; 2、深圳与香港距离较近。

3. 数据来源及处理

昆明降水同位素资料 ^{18}O 、D (1986~1992, 1996~2003 年), 气温及降水量数据均来自全球降水同位素观测网 GNIP (<http://isohis.iaea.org>), 其所有观测数据以月为单位, 包括 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 、 $\delta^3\text{H}$ 、温度、降水量及水汽压。样品收集、运输和标准数据均由国际原子能机构(IAEA)严格规定, 因此数据质量和精度是可靠而有保证的。资料中, 降水中稳定同位素 δ 值($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 或 D/H)均以相对于维也纳标准平均海洋水(V-SMOW)的千分差表示, 其 δ 值表示如下:

$$\delta = \left(\frac{R_{sam}}{R_{V-SMOW}} - 1 \right) \quad (1)$$

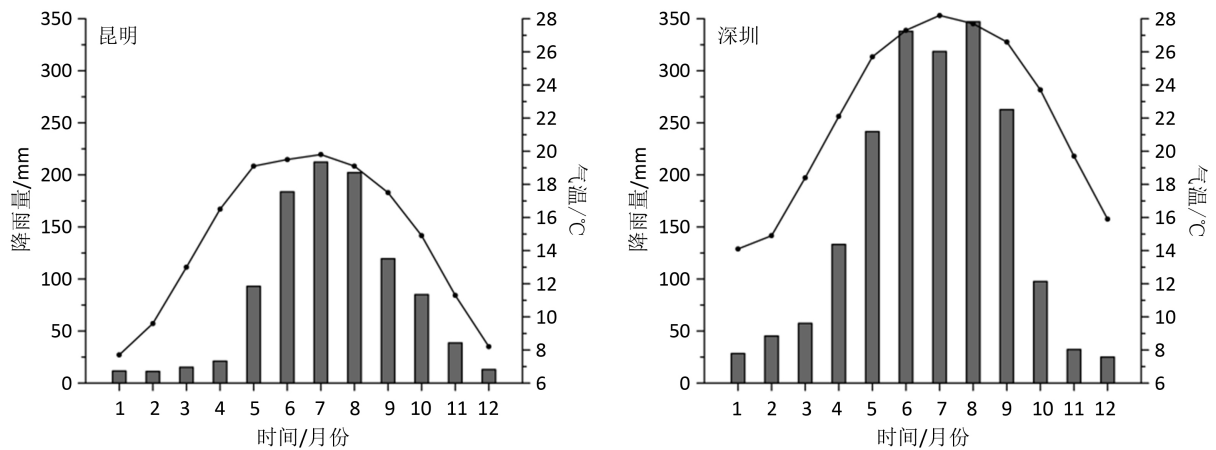


Figure 1. Variation trends of mean temperature and precipitation amount in Kunming and Shenzhen stations

图 1. 昆明和深圳的月均气温和降水的变化趋势

式(1)中, R_{sam} 和 R_{V-SMOW} 分别表示降水样品中和 V-SMOW 中稳定同位素比值($^{18}O/^{16}O$ 或 D/H)。

本文中降水中同位素的平均值为降水量的加权平均值 δ_p , 计算方法如下:

$$\delta_p = \sum P_i \delta_i / \sum P_i \quad (2)$$

式(2)中, δ_i 和 P_i 分别为月同位素值和月降水量。根据 GNIP 中昆明站收集的 1986-2003 年的大气降水同位素、气温及降水量等指标可以对该区大气降水同位素变化规律及水汽来源进行探讨, 并在此基础上进一步揭示昆明降水中氧同位素与季风强度之间的关系。

4. 结果与讨论

4.1. 月均降水同位素变化趋势分析

由图 2 可看出, 昆明月均降水量和气温的变化大致都呈单峰型分布, 属典型的季风降水和气温分布特征; 同时也可看出昆明的降水主要集中在 5~10 月期间, 降水量变化较大, 以 6~8 月三个月降水量为最大, 由此用 5 至 10 月代表雨季, 11 月至次年 4 月代表旱季。根据 1951~1980 年气象观测数据, 昆明年均气温 14.7°C , 平均降雨量 1006.5 mm , 雨季平均降水量为 895.7 mm , 旱季仅为 110.8 mm , 雨季降水量占全年降水量的 88.99% 。

从图 2 可看出, 昆明降水同位素季节变化幅度较大, δD 从 -8.95‰ 到 -97.58‰ , $\delta^{18}O$ 从 -2.43‰ 到 -13.69‰ 。研究表明, 全球降水平均同位素组成, δD 介于 $+50\text{‰}$ ~ -350‰ 之间, $\delta^{18}O$ 介于 $+10\text{‰}$ ~ -50‰ 之间[27]。陈中笑等研究表明中国降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 分别为 $+10\text{‰}$ ~ -271‰ , $+1.5\text{‰}$ ~ -33.5‰ [28]。由此可见, 昆明降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 均落在中国和全球降水同位素的变化范围之内, 且处于一个比较集中的范围内。进一步分析发现, 多年月均值降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 与气温呈现出负相关关系($\delta^{18}O/\text{‰} = -0.57T/^{\circ}\text{C} + 1.19$, $r = -0.663$; $\delta D/\text{‰} = -4.76T/^{\circ}\text{C} + 23.20$, $r = -0.695$), 这种在年际尺度上的反相关性(反温度效应)与我国中纬度地区降水中同位素的温度效应特点[29]相符合。

在雨季即季风盛行期, 降水中 $\delta^{18}O$ 与温度和降水量的关系分别为: $\delta^{18}O/\text{‰} = -0.22T/^{\circ}\text{C} - 6.26$, $r = -0.134$; $\delta^{18}O/\text{‰} = -0.03P/\text{mm} - 6.60$, $r = -0.599$, 根据相关系数进行计算, 昆明雨季降水氧同位素值 81.7% 受当地降水量控制, 18.3% 受气温影响。在旱季或非季风期, 降水中 $\delta^{18}O$ 与气温和降水量的关系分别为: $\delta^{18}O/\text{‰} = -0.01T/^{\circ}\text{C} - 4.69$, $r = -0.016$; $\delta^{18}O/\text{‰} = -0.20P/\text{mm} - 0.90$, $r = -0.735$, 由相关系数可以看出, 非季风期降水 $\delta^{18}O$ 主要也是由降水量控制的。降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 与降水量和气温之间这种不同程度的反相关性表明, 降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 受降水量和气温的协同影响, 这是中纬度季风区降水独一无二的同位素效

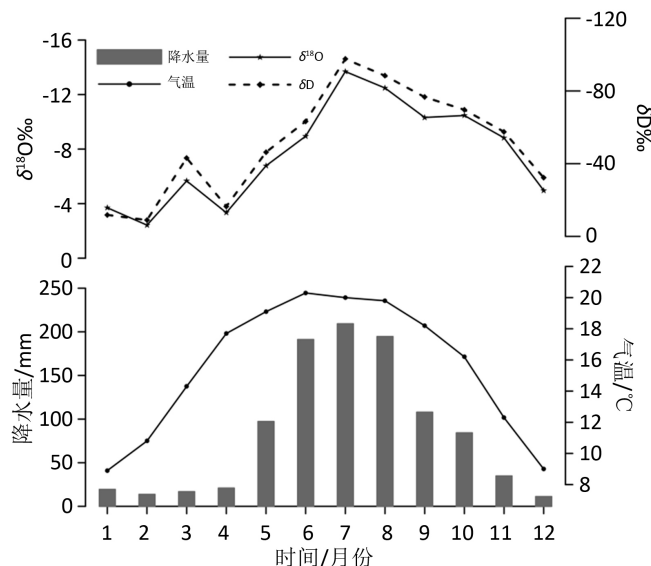


Figure 2. Variation trend of average temperature and hydrogen-oxygen isotopes in precipitation of Kunming

图 2. 昆明站月均气温、降水量和氢氧同位素变化趋势

应特点。但是在不同季节, 由于大气降水水汽来源不同, 导致不同季节中气温和降水量对 δD 和 $\delta^{18}O$ 影响权重存在一定差异, 并且昆明雨季降水虽然主要是由西南季风输送, 但可能还含有锋面降水, 所以降水量效应比温度效应显著。无论雨季还是旱季, $\delta^{18}O$ 与降水量的关系相对较为密切, 说明季风区降水 $\delta^{18}O$ 主要受降水量的影响。由图 2 可知, 昆明降水 $\delta^{18}O$ 和 δD 的变化趋势一致, 季节变化明显。昆明大气降水中偏正的 $\delta^{18}O$ 、 δD 主要出现在旱季, 其中最大值出现在 2 月。随着西南季风开始逐渐增强, $\delta^{18}O$ 、 δD 逐渐偏负, 并在 7 月达到最小值。总体来说, 昆明降水氢氧同位素均呈现雨季偏负, 旱季偏正的特点。这与章新平等研究的昆明[30]及李平等研究的腾冲地区[31]的降水同位素季节变化趋势一致。

从水汽循环角度来讲, 影响大气降水中 $\delta^{18}O$ 和 δD 的因素包括如下几个方面: (1) 区域气候环境背景 [5] [32], 即水汽来源、性质及输送过程中氢氧同位素所发生的变化; (2) 局部地理因素, 即各种气象要素(降水量、气温及大气相对湿度等)及纬度、海拔高度等[17]。对于昆明站点来讲, 由于其特定的地理位置和海拔高度, 多年来大气降水中月均 δ 值的季节差异是由水汽来源及蒸发条件的差异而造成的。雨季即夏季风盛行期间, 印度洋季风携带的暖湿气流在向该地区输送过程中, 随着不断的降水过程, 水汽中重同位素不断损失, 使其到达固定观测点昆明站降水中的 ^{18}O 和 D 不断贫化; 旱季主要受大陆性气团及局地水体蒸发影响, 使雨滴在降落过程中轻同位素优先蒸发而重同位素逐渐富集。

4.2. 年均降水同位素变化趋势分析

降水中氢氧同位素的年际变化特征对于分析解释沉积物中所蕴含的气候环境信息具有极其重要的意义。根据 IAEA/WMO 数据资料, 对昆明站年均 $\delta^{18}O$ 和 δD 进行线性趋势回归(图 3)。昆明站年均降水中 $\delta^{18}O$ 和 δD 的范围分别为 $-8.29\text{‰} \sim -52.81\text{‰}$ 和 $-11.99\text{‰} \sim -80.89\text{‰}$, 其平均值分别为 -10.11‰ 和 -69.67‰ 。由图 3 知, 昆明站 $\delta^{18}O$ 和 δD 的年际变化幅度较大, 符合中国季风气候的特点, 季风开始时间、季风强度[33]及进入内地的程度等都对降水量的变化产生强烈影响, 进而导致降水 $\delta^{18}O$ 和 δD 年际变化显著。对年均降水 $\delta^{18}O$ 和 δD 与时间做线性回归(图 3)可以看出, 昆明站年均 $\delta^{18}O$ 和 δD 序列呈上升趋势变化, 其 $\delta^{18}O$ 和 δD 上升率分别为: $0.23\text{‰}/10a$ 和 $3.5\text{‰}/10a$, 表明从有记录的 1986~2003 年昆明大气降水中逐渐富集 ^{18}O 和 D 。

4.3. 氘盈余(d-excess)分析

Dansgaard [2]于 1964 年提出并利用过量氘对全球降水中的氘盈余进行了描述, 过量氘是由水汽在蒸发、冷凝过程中 D、 ^{18}O 发生动力学分馏引起的, 任何地区降水的氘盈余被定义为: $d = \delta\text{D} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$ (‰)。降水中 d 受制于水循环相变过程中 D 和 ^{18}O 分馏速率的差异, 其大小与形成降水水汽源地的大气相对湿度、风速及水体表面温度等有关[2], 因此从宏观上可利用 d 值推断水汽来源及形成降水时的地理环境和气象条件。全球 d 平均值为 10‰, 而我国受季风影响的地区, 一般情况下, 夏季风期间 $d < 10$ ‰, 冬季风期间 $d > 10$ ‰, 反映我国冬夏季风期间降水云团来源不同[34], 冬季降水同位素多与当地或近源水体的再蒸发相关。

15 年来昆明月均降水 d 值变化范围(图 4): 2.22‰~17.76‰, 平均值为 10.08‰。雨季 d 值分布范围 7.90‰~14.10‰, 平均 $d \approx 9.95$ ‰, 大部分样品的 $d < 10$ ‰。由于雨季主要受西南季风的影响, 在暖湿水汽团的影响下, 动力分馏效应小, d 值偏小。同时雨季较小的 d 值表明昆明大气降水源区的湿度大、蒸发速率慢, 并且水汽来源单一。旱季 d 值分布范围 2.22‰~17.76‰, 平均 $d \approx 10.21$ ‰, 其中 90% 的样品 $d > 10$ ‰。由于旱季受区域环流的影响, 很少有长距离运移的水汽来源, 主要是近源湖泊等水体的蒸发而来, 因这些水体本身同位素比较偏正(我们对云贵高原湖泊水体同位素多次测量结果), 再加上长期蒸发, 导致降水中同位素相应偏重, 从而引起 $d > 10$ ‰。昆明 d 值呈现旱季偏正雨季偏负的特征与李广研究 2009 年 1 月~2012 年 12 月年昆明实时降水中的加权平均 d 值的季节性变化趋势相一致[35]。

地处海陆交互地带的香港, 其降水不仅受东南季风控制, 而且具有较长时间和较完整的同位素监测数据, 因此我们利用香港资料对同位素变化进行分析并与昆明进行对比。香港 1974~2009 年的月均 d 值变化范围为: 8.08‰~14.30‰, 平均值为 10.99‰(图 4), 与世界大部分地区雨水 d 值(~10‰)十分接近,

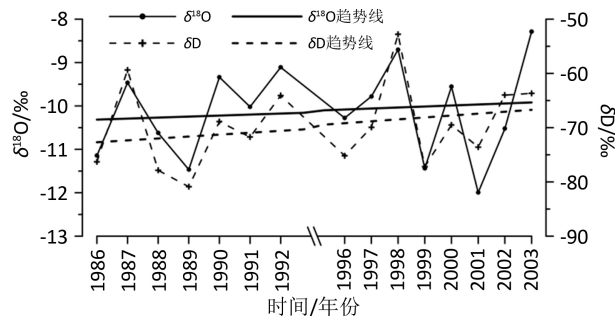


Figure 3. Variation trend of hydrogen and oxygen isotopes in annual average precipitation of Kunming

图 3. 昆明年均降水氢氧同位素变化趋势

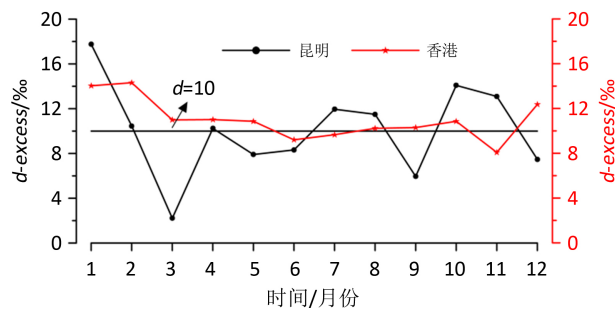


Figure 4. Variation trend of the monthly average d -excess at Kunming and Hong Kong station

图 4. 昆明和香港站月均氘盈余变化趋势

香港 d 值较低表明大气降水水源区的蒸发过程缓慢。雨季(5~10月)的 d 值分布范围 9.20‰~10.86‰, 平均值 $d \approx 10.18$ ‰, 绝大部分样品的 $d > 10$ ‰。旱季(11月~次年4月)的 d 值分布范围 8.08‰~14.30‰, 83% 样品 $d > 10$ ‰, 平均值 $d \approx 11.79$ ‰。相对而言, 香港旱季平均 d 值略高于雨季, 这表明旱季香港降水水汽源区蒸发过程较我国其他内陆地区慢[36]。香港旱季、雨季 d 值差别不明显与张琳等研究香港地区 1986~2003 年平均 d 值在 10~次年4月为 11.34‰, 而其在 5~9 月为 10.21‰基本一致[37]。昆明和香港站的 d 值都与全球降水中 d 值一样呈现“夏低冬高”的变化趋势, 二者的 d 值均都接近于全球平均 $d = 10$ ‰, 未出现较大的变化波动, 这可能与昆明和香港的降水主要集中在雨季及其特殊的气候条件有关。此外, 图 4 清楚显示, 昆明和香港早(冬)季和雨(夏)季 d 值十分接近, 从这一事实推断, 香港地区降水水汽主要来源于西太平洋, 而昆明则主要为印度洋, 因为相对香港而言, 昆明深居内陆, 如果昆明与香港的水汽来源相同, 那么在经过长距离输送后, 其 d 值必然发生较显著的变化而有别于香港降水的 d 值。

章新平研究的腾冲和蒙自在 2003 年 2 月~2004 年 2 月实时降水 d 算数平均值, 腾冲旱季平均 $d \approx 13.97$ ‰, 雨季平均 $d \approx 8.35$ ‰; 蒙自旱季平均 $d \approx 13.12$ ‰, 雨季平均 $d \approx 7.73$ ‰[38]。李广研究腾冲和蒙自在 2009 年 1 月~2012 年 12 月年降水 d 值的加权平均值分别为 10.33‰、7.51‰, 旱季平均 d 值分别为 11.64‰、11.21‰, 雨季平均 d 值分别为 10.22‰、6.50‰ [35]。在不考虑降水量影响的情况下, 昆明站降水中 d 值的季节变化与蒙自和腾冲的变化趋势一致, 这是由相同的水汽来源决定的。昆明降水 d 值的季节变化与长江流域的变化趋势相反[39], 这可能是有不同的蒸发因素引起的。

进一步对昆明站 15 年和香港站 36 年旱季和雨季降水 d 值分析统计发现, d 值年际变化明显(图 5), 昆明站雨季 d 值分布范围 3.87‰~20.24‰, 平均为 9.17‰; 旱季 d 值分布范围 2.96‰~23.31‰, 均值为 12.08‰。昆明站年均雨季 d 值的变化幅度较旱季小, 尤其在 1998 年、2001 年、2002 年旱季 d 值远远大于雨季, 这可能是由于近源湖泊水体的强烈蒸发, 形成了极为不平衡的蒸发-凝结降水造成的。香港站雨季 d 值分布范围 5.11‰~13.05‰, 平均为 9.98‰; 旱季 d 值分布范围 4.97‰~16.55‰, 均值为 11.72‰。香港站旱季、雨季年均 d 值差异不明显, 说明这么多年香港降水水汽来源比较稳定, 香港地处亚洲大陆东南沿海, 濒临西太平洋, 受海洋性气团影响较大。昆明和香港雨季年均 d 值差别不大, 这说明二者雨季的水汽来源不同。

4.4. 昆明大气降水线中斜率和截距变化趋势分析

1961 年, Craig [40] 在研究氢氧同位素变化时, 提出了全球大气降水线(GMWL)方程, 即 $\delta D (\text{‰}) = 8 * \delta^{18}O (\text{‰}) + 10$, 该式揭示在全球平均状况下, 水汽在其源地非平衡蒸发及在凝结过程中平衡分馏条件

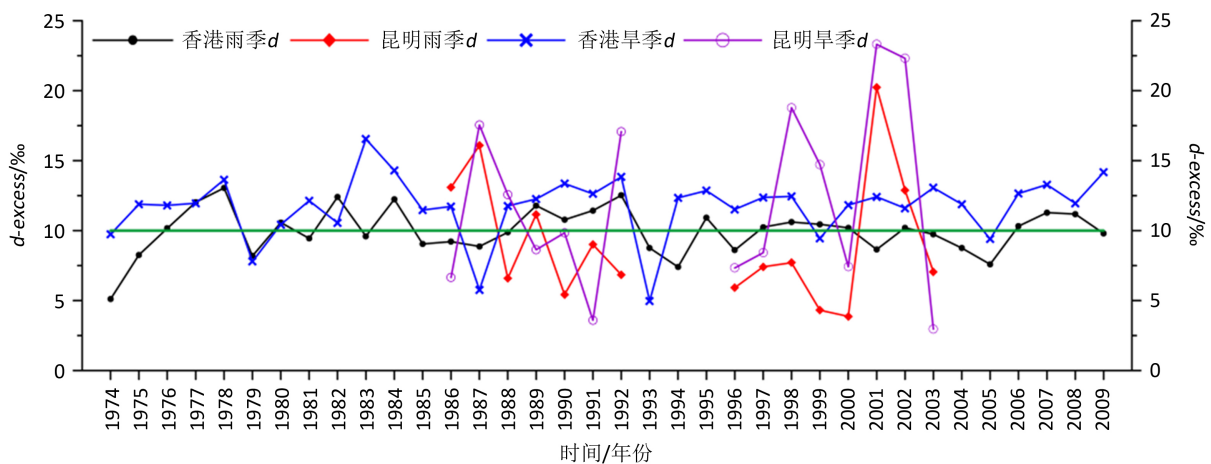


Figure 5. Variation trend of the annual mean d -excess at Kunming and Hong Kong stations

图 5. 昆明和香港站年均旱季与雨季氘盈余变化趋势

下降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 之间的关系。水汽从源区到雨滴降落的过程使稳定同位素分馏因子之间产生差异, 因此各地大气水线(LMWL)方程往往偏离全球大气降水线方程, 表现出不同的斜率和截距, 大气降水线中斜率反映两类同位素 D 和 ^{18}O 的分馏速率对比, 而截距反映 D 对平衡状态的偏离程度。

采用最小二乘法通过计算获得了昆明 15 年来大气降水斜率和截距的月变化(图 6)及年际变化(图 7)。由图 6 和图 7 可知, 斜率和截距具有相似的季节和年际变化, 且二者与 Yurtsever [41]于 1975 年获得的全球雨水线方程($\delta D = 8.17 * \delta^{18}O + 10.56$)及陈中笑等[28]提出中国大气水线方程($\delta D = 7.57 * \delta^{18}O + 6.02$)的斜率和截距相差不大, 这反映了印度洋水汽是昆明降水的主要来源。

由图 6 可知, 大气水线的斜率和截距月均变化趋势相同, 但变化幅度不同, 从另一个角度说明昆明水汽来源比较单一, 雨季大气水线的斜率和截距均略大于旱季, 这是由于雨季降雨量较大或出现持续降雨使大气中水汽含量趋于饱和或过饱和, 水汽压变大, 使云下二次蒸发减弱, 引起雨滴降落过程中受到不平衡蒸发引起的同位素分馏效应减弱所致。4 月份的斜率远远小于 8, 这可能是由于 4 月份处于西南季风来临前期, 此时昆明气温变化频繁, 变率较大, 加之水汽来源不同造成。8 月份斜率低的原因可能是气温较高, D 和 ^{18}O 的分馏效应之比较小所致。

15 年来昆明斜率和截距的年际变化趋势基本一致, 都呈下降趋势且与气温和降水量的变化趋势相反(图 7)。由于降水同位素对蒸发-凝结相变过程的响应很敏感, 气温控制蒸发-凝结相变过程, 因此可用年

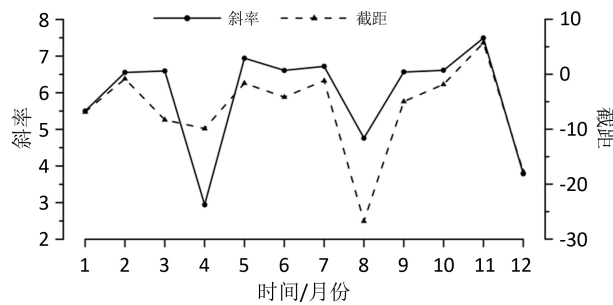


Figure 6. Monthly variations trend of slope and intercept at Kunming station

图 6. 斜率和截距的月变化

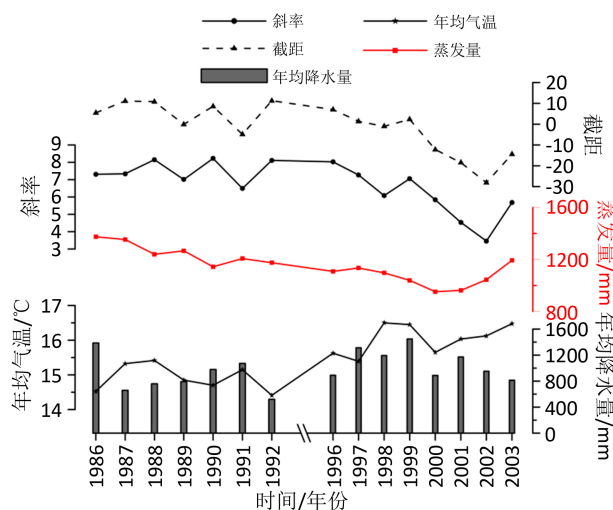


Figure 7. Annual variation trend of slope, intercept, evaporation capacity, air temperature and precipitation amount at Kunming

图 7. 斜率、截距、蒸发量、气温及降水量的年际变化

降水线的斜率和截距来示踪降水过程中所发生的云底再蒸发现象。由图 7 可看出, 昆明站 15 年来降水线的斜率和截距年际变化明显, 这是由于昆明受季风气候的显著影响导致。斜率和截距越小, 说明降水过程中受到的蒸发作用越强烈, 同位素动力分馏效应越强。斜率和截距在 2002 年均出现最低值, 这可能由于气温升高、降水量减少导致昆明气候暖干, 使蒸发加剧(图 7 蒸发量), 同时 2002 年出现了多次小降雨 ($P < 10 \text{ mm}$) 事件, 在更大程度上引起降水过程中云下二次蒸发更为强烈、动力分馏效应显著。

4.5. 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与西南季风强度分析

大气降水氧同位素组成在不同地区可能存在着不同的特点和规律, 在此我们利用 GNIP 中已有资料对西南季风区从南到北, 即从印度的科泽科德到昆明, 再到贵阳站点的数据进行对比分析, 挖掘西南季风区降水氧同位素的区域性特征, 并结合印度季风指数资料, 探讨西南季风与大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的联系。

图 8 是受西南季风影响强烈的地区大气降水中年均 $\delta^{18}\text{O}$ 、降水量及印度季风指数的时间序列变化图, 可以看出三地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量呈明显的负相关性, 其变化趋势相差不大, 但科泽科德降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值较大, 这与其距离印度洋较近, 水汽没有经过长距离的输送、蒸发有关。同时图 8 也清楚展示, 西南季风对三地区降水量的影响较大, 而且三地区降水量与西南季风指数呈不稳定的正相关关系。但是, 由于 GNIP 中三个站点的观测时间较短, 时间序列几乎均小于 10a, 只能进行这样粗略的分析。尽管如此, 我们还是能够得出强季风年, 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏负, 而弱季风年, 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 偏正。这与已有研究结果一致[42] [43]。因此在季风区可以用降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 指示季风强度。由于科泽科德、昆明及贵阳三地区降水量比较集中, 受西南季风影响强烈, 因此可以用年均 $\delta^{18}\text{O}$ 值来指示季风强弱。西南季风影响强烈地区, 可大致建立季风强度-大气降水量- $\delta^{18}\text{O}$ 三者之间的定量关系。

5. 结论

本文主要研究了昆明站大气降水中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 值的年际、季节变化特征及与水汽来源的关系, 此

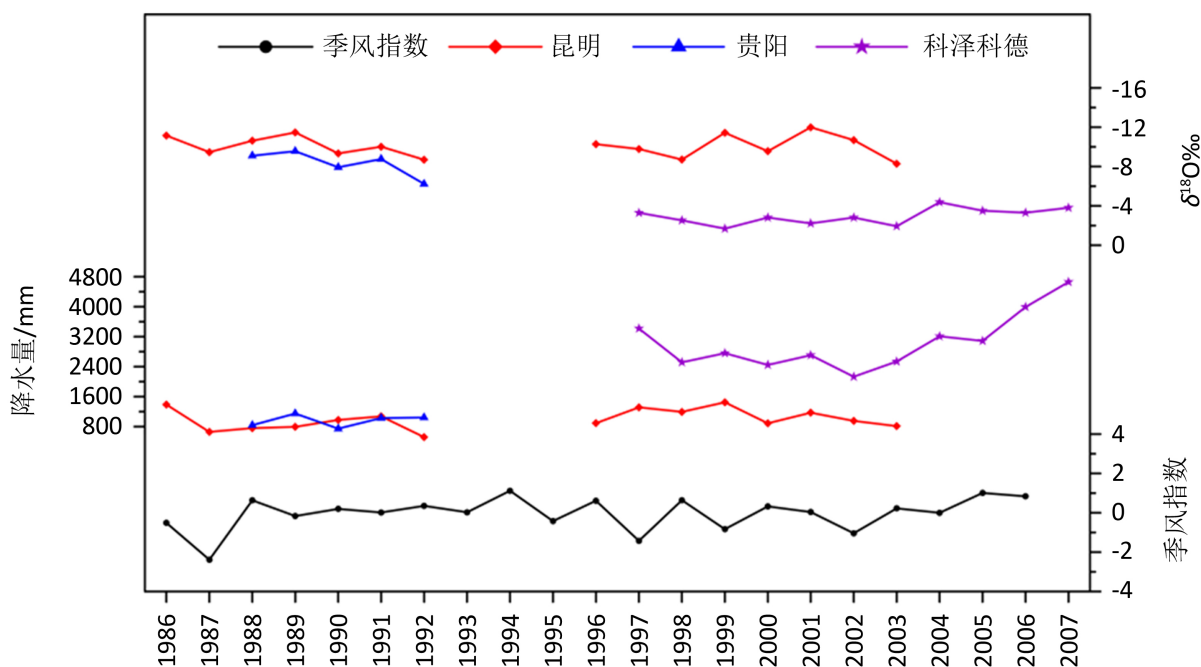


Figure 8. The time series of annual mean $\delta^{18}\text{O}$, amount of precipitation and Indian monsoon indexes at Kozhikode in India, Kunming and Guiyang

图 8. 印度可泽科德、昆明和贵阳降水的年均 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量及印度季风指数的时间变化序列

外探讨了斜率、截距的变化趋势及规律, 得到如下结论: 昆明大气降水同位素呈逐年富集的年际变化趋势。昆明雨季受西南季风影响, 旱季受大陆性气团及局地近源湖泊水体蒸发的影响, 使 δD 和 $\delta^{18}O$ 值呈现雨季小, 旱季大的季节性变化趋势。根据昆明降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 与温度和降水量之间的反相关性及相关系数, 得出昆明雨季降水同位素值 81.7% 受当地降水量控制, 18.3% 受气温控制, 说明降水同位素值受降水量和气温的协同影响, 但降水量为主要的影 响因子。在受季风影响强烈的地区, 通过年降水量, 年均 $\delta^{18}O$ 与印度季风指数的对比, 可以建立季风强度-降水量- $\delta^{18}O$ 之间的定量关系, 这可为解译石笋中所蕴含的古气候信息提供有力证据。昆明站和香港站的旱季和雨季的 d 值均交接近, 从地理位置上可以说明, 昆明主要受印度季风控制, 而香港主要受东南季风影响。15 年来昆明大气降水线斜率和截距季节和年际变化明显, 云下二次蒸发和动力分馏效应可解释斜率和截距的变化趋势。

基金项目

云南省领军人才项目“云贵高原湖泊演化与水安全”(2015HA024) 和高端人才引进项目“云南(云贵高原)湖泊记录与生态环境及可持续发展研究”(2010CI111)资助。

参考文献 (References)

- [1] Price, R.M., Swart, P.K. and Willoughby, H.E. (2008) Seasonal and Spatial Variation in the Stable Isotopic Composition ($\delta^{18}O$ and δD) of Precipitation in South Florida. *Journal of Hydrology*, **358**, 193-205. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.06.003>
- [2] Dansgaard, W. (1964) Stable Isotopes in Precipitation. *Tellus*, **16**, 436-468. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v16i4.8993>
- [3] Guan, H., Simmons, C.T. and Love, A.J. (2009) Orographic Controls on Rain Water Isotope Distribution in the Mount Lofty Ranges of South Australia. *Journal of Hydrology*, **374**, 255-264. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.018>
- [4] Charles, C.D., Rind, D., Jouzel, J., et al. (1994) Glacial-Interglacial Changes in Moisture Sources for Greenland: Influence on the Ice Core Record of Climate. *Science*, **263**, 508-511. <https://doi.org/10.1126/science.263.5146.508>
- [5] Merlivat, M. and Jouzel, J. (1979) Global Climatic Interpretation of Deuterium-Oxygen-18 Relationship for Precipitation. *Journal of Geophysical Research*, **84**, 5029-5033. <https://doi.org/10.1029/JC084iC08p05029>
- [6] Rozanski, K., Sonntag, C. and Munnich, K.O. (1981) Factors Controlling Stable Isotope Composition of Modern European Precipitation. *Tellus*, **34**, 142-150.
- [7] Johnsen, S.J., Dansgaard, W. and White, J.W.C. (1989) The Origin of Arctic Precipitation under Present and Glacial Conditions. *Tellus Series B-chemical & Physical Meteorology*, **41B**, 452-468. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.1989.tb00321.x>
- [8] Araguás-Araguás, L., Froehlich, K. and Rozanski, K. (1998) Stable Isotope Composition of Precipitation over Southeast Asia. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **103**, 2872-2874.
- [9] Zhang, X.P., Liu, J.M., Tian, L.D., et al. (2004) Variations of $\delta^{18}O$ in Precipitation along Vapor Transport Paths. *Advance in Atmospheric Sciences*, **21**, 562-572. <https://doi.org/10.1007/BF02915724>
- [10] 段旭, 距建华, 肖子牛, 等. 云南气候异常物理过程及预测信号的研究[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 1-23.
- [11] 徐祥德, 陶诗言, 王继志, 等. 青藏高原-季风水汽输送“大三角扇型”影响区域特征与中国区域旱涝异常的关系[J]. 气象学报, 2002, 60(3): 257-266.
- [12] Pearce, R.P. and Mohanty, U.C. (1984) Onsets of Asian Summer Monsoon, 1979-1982. *Journal of Atmosphere Science*, **41**, 1620-1639. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1984\)041<1620:OOTASM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1984)041<1620:OOTASM>2.0.CO;2)
- [13] 庞红喜, 何元庆, 张忠林, 等. 季风降水中 $\delta^{18}O$ 与季风水汽来源[J]. 科学通报, 2005, 50(20): 81-84.
- [14] 姚檀栋, 丁良福, 蒲健辰, 等. 青藏高原唐古拉山地区降雪中 $\delta^{18}O$ 特征及其与水汽来源的关系[J]. 科学通报, 1991, 36(20): 1570-1573.
- [15] Tian, L.D., Yao, T.D., Schuster, P.F., et al. (2003) Oxygen-18 Concentrations in Recent Precipitation and Ice Cores on the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, **108**, 4293-4302. <https://doi.org/10.1029/2002JD002173>
- [16] Tian, L.D., Yao, T.D., White, J.C.W., et al. (2005) Westerly Moisture Transport to the Middle of Himalayas Revealed from the High Deuterium Excess. *Chinese Science Bulletin*, **50**, 1026-1030. <https://doi.org/10.1360/04wd0030>
- [17] 田立德, 姚檀栋, 蒲健辰, 等. 拉萨夏季降水中稳定同位素变化特征[J]. 冰川冻土, 1997, 19(4): 295-301.

- [18] Zhang, X.P., Shi, Y.F. and Yao, T.D. (1995) Variational Features of Precipitation $\delta^{18}\text{O}$ in Northeast Qinghai-Tibet Plateau. *Science in China (B)*, **38**, 854-864.
- [19] Yao, T.D., Thompson, L.G., Jiao, K.Q., *et al.* (1995) Recent Warming as Recorded in the Qinghai Tibetan Cryosphere. *Annals of Glaciology*, **21**, 196-200. <https://doi.org/10.1017/S0260305500015810>
- [20] Li, G., Zhang, X.P., Xu, Y.P., *et al.* (2016) Synoptic Time-Series Surveys of Precipitation $\delta^{18}\text{O}$ and Its Relationship with Moisture Sources in Yunnan, Southwest China. *Quaternary International*, 1-12.
- [21] 庞洪喜, 何元庆, 卢爱刚, 等. 天气尺度下丽江季风降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化[J]. 科学通报, 2006, 51(10): 1218-1223.
- [22] Celle, J.H., Travi, Y. and Blavoux, B. (2001) Isotopic Typology of the Precipitation in the Western Mediterranean Region at Three Different Time Scale. *Geophysical Research Letters*, **28**, 1215-1218. <https://doi.org/10.1029/2000GL012407>
- [23] Liotta, M., Bellissimo, S., Favara, R., *et al.* (2008) Isotopic Composition of Single Rain Events in the Central Mediterranean. *Journal of Geophysical Research*, **113**, D16304. <https://doi.org/10.1029/2008JD009996>
- [24] Bar-Matthews, M., Ayalon, A. and Kaufman, A. (1997) Late Quaternary Paleoclimate in the Eastern Mediterranean Region from Stable Isotope Analysis of Speleothems at Soreq Cave, Israel. *Quaternary Research*, **47**, 155-168. <https://doi.org/10.1006/qres.1997.1883>
- [25] Neff, U., Burns, S.J., Mangini, A., *et al.* (2001) Strong Coherence between Solar Variability and the Monsoon in Oman between 9 and 6 kyr Ago. *Nature*, **411**, 290-293. <https://doi.org/10.1038/35077048>
- [26] Wang, Y.J., Cheng, H., Edwards, R.L., *et al.* (2001) A High-Resolution Absolute-Dated Late Pleistocene Monsoon Record from Hulu Cave, China. *Science*, **294**, 2345-2348. <https://doi.org/10.1126/science.1064618>
- [27] 丁悌平. 氢氧同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1980: 61-65.
- [28] 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, 33(6): 667-679.
- [29] 张琳, 陈宗宇, 聂振龙, 等. 我国不同时间尺度的大气降水氧同位素与气温的相关关系分析[J]. 核技术, 2008, 31(9): 715-720.
- [30] 章新平, 刘晶淼, 孙维贞. 西南水汽通道上昆明站降水中的稳定同位素[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(5): 665-669.
- [31] 李平, 章新平, 张新主, 等. 云南腾冲地区大气降水中氢氧稳定同位素特征[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(11): 1458-1465.
- [32] Guan, H., Simmons, C.T. and Love, A.J. (2009) Orographic Controls on Rain Water Isotope Distribution in the Mount Lofty Ranges of South Australia. *Journal of Hydrology*, **374**, 255-264. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.018>
- [33] 朱敏, 左瑞亭, 张铭. 南海季风爆发与风向改变指数关系初探[J]. 气象科学, 2009, 29(6): 787-792.
- [34] 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, 23(1): 33-41.
- [35] 李广. 我国西南地区降水稳定同位素变化特征及水汽来源追踪的研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙, 湖南师范大学, 2014.
- [36] 涂林玲, 王华, 冯玉梅. 桂林地区大气降水的 D 和 ^{18}O 同位素的研究[J]. 中国岩溶, 2004, 23(4): 304-309.
- [37] 张琳, 陈立, 刘君, 等. 香港地区大气降水中的 D 和 ^{18}O 同位素研究[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 572-577.
- [38] 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): 613-617.
- [39] 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): 07-12.
- [40] Craig, H. (1961) Standard for Reporting Concentration of Deuterium and Oxygen-18 in Natural Water. *Science*, **133**, 1702. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>
- [41] Yurtsever, Y. (1975) Worldwide Survey of Stable Isotopes in Precipitation. International Report, IAEA, Vienna.
- [42] Ding, Y.H., Wang, Z.Y. and Sun, Y. (2008) Inter-Decadal Variation of the Summer Precipitation in East China and Its Association with Decreasing Asian Summer Monsoon. Part I: Observed Evidences. *International Journal of Climatology*, **28**, 1139-1161. <https://doi.org/10.1002/joc.1615>
- [43] 吴夏, 张晓燕, 张美良, 等. 大气降水中稳定同位素组成的高分辨率记录——以桂林地区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(2): 182-188.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2168-5711，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ccrl@hanspub.org