

新疆地区大气降水中稳定同位素的变化特征^{*}

李 晖^{1,2}, 蒋忠诚³, 王 月¹, 罗为群³

(1. 广西师范大学 环境与资源学院, 广西 桂林 541004; 2. 广西环境工程与保护评价重点实验室, 广西 桂林 541004; 3. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 国土资源部岩溶动力学开放实验室, 广西 桂林 541004)

摘 要: 大气降水是水循环中重要的输入因子, 对其同位素组分的研究有助于深入了解水循环过程及其结构具有重要的意义。研究新疆乌鲁木齐地区 1986 - 2002 年大气降水的氢氧同位素组成, 提出大气降水线方程, 并与全国及全球降水线方程进行对比, 揭示该降水线方程的特征。研究表明: 乌鲁木齐水分来源复杂, 主要是西风带输送的海洋水汽和局地的蒸发, 大气降水的加权平均¹⁸O 与月平均气温相关关系显著, 与雨量效应(降水量效应)较相关, 降水中温度效应明显, 且在一定时期很大程度上其影响掩盖了雨量效应。乌鲁木齐降水中¹⁸O 的季节变化与温度的季节变化几乎一致, 温度是制约降水中稳定同位素变化的主要影响因子。

关键词: 大气降水; D; ¹⁸O; 温度效应; 雨量效应

中图分类号: P426.65

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)05-0157-05

Variation Characteristics of Stable Isotopes in the Precipitation of Xinjiang

LI Hui^{1,2}, JIANG Zhong-cheng³, WANG Yue¹, LUO Wei-qun³

(1. College of Environment & Resources, Guangxi Normal University, Guangxi Guilin 541004, China;
2. The Guangxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Protection and Assessment, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: Precipitation is the most important input to water cycle. Study of hydrogen and oxygen isotopes of precipitation can help identify relationships between different water and climatic information of the study area, which is the foundation for integrated water cycle research. In this paper, hydrogen and oxygen isotopic compositions of the precipitation in the recent 17 years (from 1986 - 2002) in Urumqi area are studied, and the precipitation line equation is brought forward. Comparison with the national and global equation is made to reveal the characters of this equation. According to researching, precipitation sources in Urumqi is complicated, mainly from oceanic vapor and local evaporation. ¹⁸O of precipitation (monthly means) and average precipitation assume prominent correlation. The temperature amount effect of D and ¹⁸O in the precipitation is very pronounce, that concealed the temperature effect. There is notable temperature effect in Urumqi area. It has been observed that the seasonal variations of ¹⁸O in precipitation are almost consistent with its air temperature in Urumqi area, which shows that temperature is a main factor controlling the stable isotopic variations in precipitation.

Key words: precipitation; D; ¹⁸O; temperature effect; amount effect of precipitation

大气降水是水循环中重要的输入因子, 对大气降水中稳定同位素组成特征的研究, 是利用同位素技术研究全球及局地水循环所必须的前提, 同时它对于我们深入了解水循环过程及其结构具有重要意义^[1-3]。¹⁸O 和 ²H 是自然界水体中两种天然示踪剂, 由于水体在相变过程中稳定同位素发生平衡分馏和动力分馏, 不同来源的水体具有不同的同位素组成特征, 这

使利用水体中稳定同位素变化对水循环过程进行研究成为可能。稳定同位素在水文循环过程中的研究应用, 始于 20 世纪 50 年代初, 大范围有组织的取样工作, 开始于 1961 年。在国际原子能机构 IAEA (the International Atomic Energy Agency) 和世界气象组织 WMO (the World Meteorological Organization) 的联合推动下, 全球建立了降水中稳定同位素比率监测网,

* 收稿日期: 2008-07-19

基金项目: 广西环境工程与保护评价重点实验室研究基金(桂科能 0704 K039); 广西师范大学青年基金

作者简介: 李晖(1981 -), 男, 河南南阳人, 讲师, 主要从事水文水资源与生态环境等方面的研究。E-mail: lh1029@126.com

目前为止全球已建立了 550 多个降水取样站点,对降水中稳定同位素比率进行连续的跟踪监测,以建立全球降水模型,并且,所有取样站的同位素资料 and 同期的常规气象资料由 IAEA 定期出版,其目的在于推断大气环流型以及全球和局地的水循环机制。这为研究全球及局地水循环提供了宝贵的同位素资料。目前,利用稳定同位素示踪法来追踪水汽来源,是国际上研究的热点。由于降水中过量氘^[4] ($d = D - 8^{18}O$) 主要受制于水汽源区的相对湿度、海温和风速等气象条件^[5-6],所以过量氘是示踪水汽源区的一个重要参数。因此,许多学者利用降水中过量氘的变化去追踪水汽来源^[7-11]。

我国从 1966 年开始对珠穆朗玛峰科考的降雪样品中氘和重氧进行分析,在此方面陆续开展了一些工作^[12],有组织地建立长期观测站则始于 1983 年,并初步获得了中国大气降水稳定同位素资料^[13-16]。近年来,我国气象工作者利用氢氧稳定同位素方法对中国降水变化的研究已经取得许多成果,尤其对我国青藏高原的水汽来源和东部地区的降水变化规律及干旱、洪涝灾害等的研究^[17-21]。目前国内研究主要集中在以下两个方面:(1) 青藏高原大气降水(雪)的氢、氧同位素研究,其重要意义在于,帮助追溯该地区的古环境和古气候,进而阐明人类活动对全球变化的影响。(2) 总结中国大气降水的氢氧同位素组成与分布规律,探讨各种气象要素(气温、降水量、季风等)对降水中同位素组成的影响,进而为全球水循环模型提供基本数据。

以乌鲁木齐气象站大气降水中氢氧同位素多年

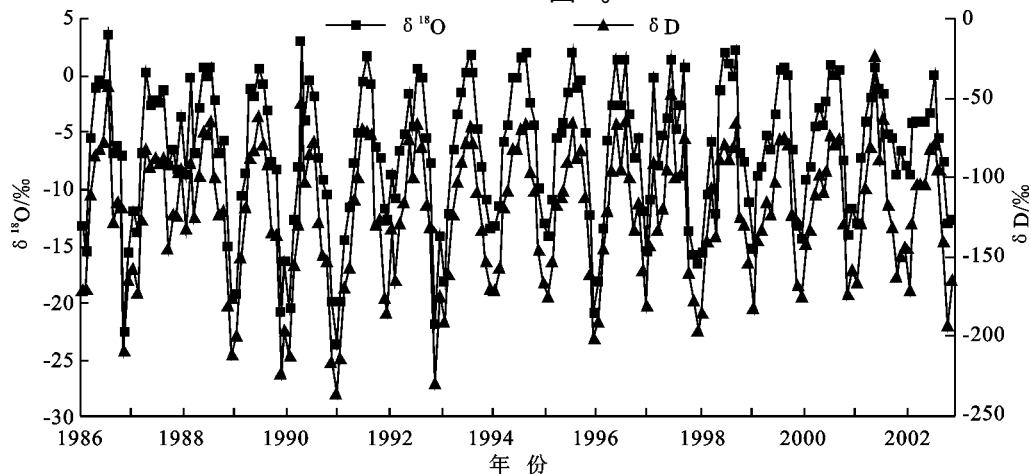


图 1 1986 - 2002 年乌鲁木齐大气降水同位素组成

2 结果与讨论

2.1 乌鲁木齐大气降水 D 和 ^{18}O 的变化和地区降水线性方程

从图 1 可以看出,乌鲁木齐降雨同位素值有较大的变化幅度: D 从 - 8.9 ‰到 - 204.5 ‰, ^{18}O 从

监测数据为基础,建立本地区大气降水线方程,并分析降水量和气温及离海岸远近等因素对降水同位素组成的影响,探讨它们与水汽来源的关系,对于深入探讨区域水分来源变化及其水文循环过程研究具有积极的意义。

1 资料来源和分析方法

乌鲁木齐降水同位素资料 D 和 ^{18}O (1986 - 2002 年) 来自全球降水同位素观测网 GNIP (Global of Isotope in Precipitation), 观测网中各个观测点项目包括 D, ^{18}O , 3H , 温度和降水量以及水汽压,所有观测项目数据记录均为月值,与月平均温度和月降水量的统计不同,IAEA/WMO 取样站降水中稳定同位素的取样时间为每月 15 日。因此,稳定同位素比率的月值实际上代表上个月 16 日到本月 15 日的平均。数据通过国际互联网 (<http://isohis.iaea.org>) 可直接下载。

水中氢氧同位素制样分别采用金属钕法和 $CO_2 - H_2O$ 平衡法,同位素分析采用英国的 MM903 质谱仪进行。质谱仪内部精度: $CO_2 < 0.125 ‰$, $H/D < \pm 1.0 ‰$, 文中的 δ 值均以 SMOW 为标准。降水中氢、氧同位素含量分别由 D、 ^{18}O 表示:

$$D = [(D/H_{sam} - D/H_{std}) / (D/H_{std})] \times 1000 (‰)$$

$$^{18}O = [(^{18}O/^{16}O_{sam} - ^{18}O/^{16}O_{std}) / (^{18}O/^{16}O_{std})] \times 1000 (‰)$$

式中: R_{sam} 和 R_{std} 表示样品和标准物中稳定性氢同位素 (D/H) 或稳定性氧同位素 ($^{18}O/^{16}O$), 精度分别为 $\pm 2 ‰$ 和 $\pm 0.3 ‰$ 。17 a 降水样品的同位素组成见图 1。

1.80 ‰到 - 27.97 ‰, 二者的变化幅度分别为 195.6 ‰和 29.77 ‰。全球降水平均稳定同位素组成,估计 D 介于 + 50 ‰~ - 350 ‰之间, ^{18}O 介于 + 10 ‰~ - 50 ‰^[22]。郑淑惠等^[14]报道了中国大气降水 D 含量为 + 20 ‰~ - 210 ‰, ^{18}O 为 + 2.0 ‰~ - 24 ‰。夏半年(通常 5 - 10 月) 值大,冬半年

(11 月 - 次年的 4 月) 小。可见,乌鲁木齐大气降水的氢氧同位素含量均落在中国与全球降水的变化范围之中。

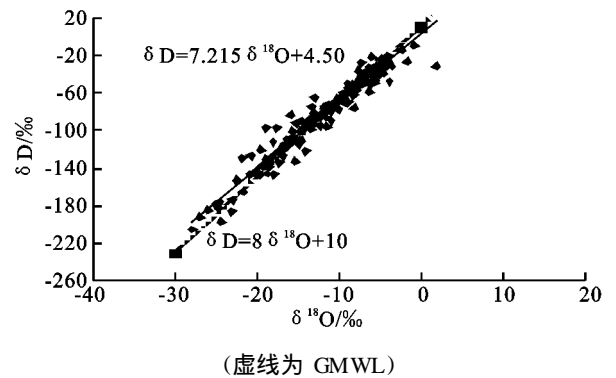
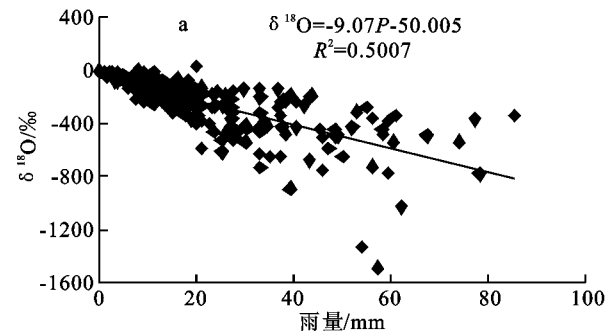


图 2 乌鲁木齐地区大气降水的 D 和 ¹⁸O 的关系
大气降水中 D 和 ¹⁸O 之间的关系对于研究水循环过程中稳定同位素的变化具有重要意义。根据实测 D 和 ¹⁸O 数据(图 1),用最小二乘法求得乌鲁木齐大气降水线方程(图 2)为: $D = 7.21 \delta^{18}O + 4.50$, $R^2 = 0.951$ 。该方程与 Craig^[23]提出的全球降水线方程(GMWL) $D = 8 \delta^{18}O + 10$, Yurtsever^[24]获得的全球降水线方程 $D = 8.17 \delta^{18}O + 10.56$,及郑淑惠等^[14]的中国降水线方程 $D = 7.9 \delta^{18}O + 8.2$ 相比较,其斜率和截距稍偏低。造成这种差异主要原因是乌鲁木齐远离海洋,气候干燥,产生的水汽有相当一部分来自局部的蒸发。干旱地区表面水体中 ¹⁸O 和 D 偏高,因此蒸发水汽中 ¹⁸O 和 D 亦偏高。加上在干旱气候条件下雨滴在降落过程中由于蒸发而产生的重同位素的富集,致使乌鲁木齐地区降水中 ¹⁸O 偏高。而 Craig、Yurtsever、郑淑惠等提出的降水线方程在相当程度上反映了海洋性气候的海岛城市的降水氢氧同位素特征。



2.2 大气降水 D 和 ¹⁸O 的季节变化及温度效应和雨量效应

大气降水中 ¹⁸O 的变化与产生降水的物理过程密切相关,其中水循环过程中的蒸发和凝结过程对 ¹⁸O 大小的影响最显著^[25]。制约蒸发和凝结过程的重要因子之一是温度。因此,温度与 ¹⁸O 之间的关系受到重视,它是稳定同位素技术在古气候研究中应用的重要内容。¹⁸O 与温度之间的正相关关系称为温度效应。

大气降水的平均同位素组成是空气湿度的函数,其差别主要是由云团冷凝时遵循瑞利分馏过程所造成的^[4],因此,雨水的同位素组成与当地降水量存在一定的相关关系。雨量效应指降水中 D 和 ¹⁸O 值与降水量大小呈反相关关系。

根据乌鲁木齐气象站(1986 - 2002 年)17 a 的监测数据,降水中氢氧同位素值和温度、降水量的季节变化一样,也存在明显的季节变化。通过对加权平均的月降水¹⁸O 和月平均气温的相关关系发现,¹⁸O 与月降水量呈显著的相关关系(图 3a),但 ¹⁸O 与月平均气温之间却有较显著相关关系(图 3b)。此外以 D 或 ¹⁸O 值加权平均对温度和雨量作其它相关分析(指数、对数、幂函数及其组合等),其相关性皆不及线性回归。线性回归分析表明雨水的同位素值受到温度影响显著,而雨量的影响较小,也就是说,乌鲁木齐大气降水的温度效应(图 4a)大于雨量效应(图 4b),同时温度效应和雨量效应在这 17 a 中它们之间也是相互交叉的,其交叉说明同位素效应是受到多种因子(温度和雨量)影响。但在相当一段时期内,温度效应还是占主导地位。

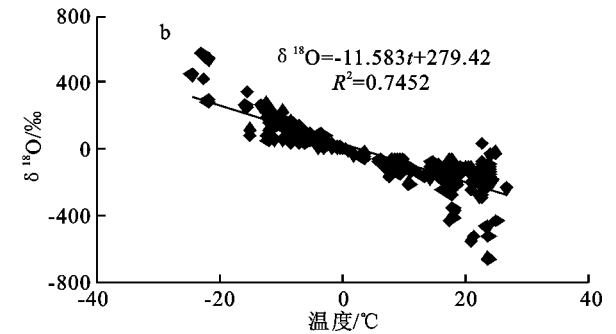


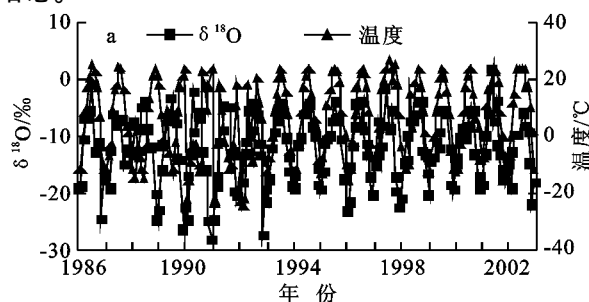
图 3 乌鲁木齐大气降水的月加权 ¹⁸O 与月降水量和月平均气温的关系

2.3 大气降水(d)过量氘的变化

过量氘参数亦称氘盈余,同全球性降水线方程相比,任何地区的大气降水,都可以计算出一个氘的过量参数 d。Dansgaard 引入的过量氘值定义为 $d = D - 8 \delta^{18}O$ 。世界上大部分地区雨水的 d 值为 10 ‰左右。d 值反映形成降水过程的气团同位素,

含有形成暖湿气团源区蒸发过程性质的重要信息,包括蒸发过程的平衡或不平衡状态和蒸发速率等等。如果蒸发速率大,气候干旱,风速大,d 值也大。我国是受季风影响的地区,冬季风期间过剩值 d 一般都大于 10,反映我国冬夏季风期间降水云团有不同的源区。

根据乌鲁木齐气象站 1986 - 2002 年的监测数据统计,乌鲁木齐氘盈余较高的月份,均出现在 5 - 9 月, d 值一般为 20 ‰~ 25 ‰,最高值可 54.84 ‰,平均 d 值为 14.78 ‰。从乌鲁木齐月平均降水中 d 的季节变化趋势来看,具有冬低夏高的季节变化特点(图 5),这与中国东部地区降水中 d 有截然相反的结论。



夏季 6 - 9 月,降水主要来源于季风活动,由于水汽来源于北冰洋的水汽蒸发,降水中高的 ^{18}O 和 d 较高,而在非季风降水时段(10 月至次年的 4 月),降水的水汽来源于西风带输送,降水中低的盈余值说明水汽来源于比较干燥地域。由于乌鲁木齐非季风降水在 1 a 降水中所占的比例很大,所以使得该地区全年降水中 d 远远高于其它地区。

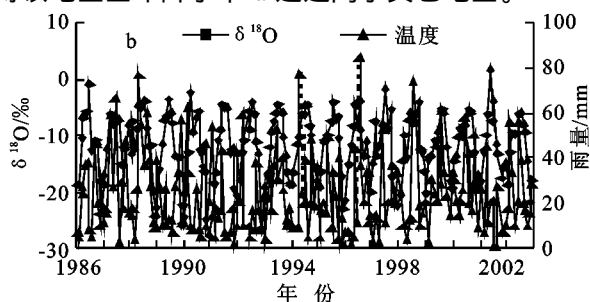


图 4 乌鲁木齐大气降水的温度效应(a)和雨量效应(b)

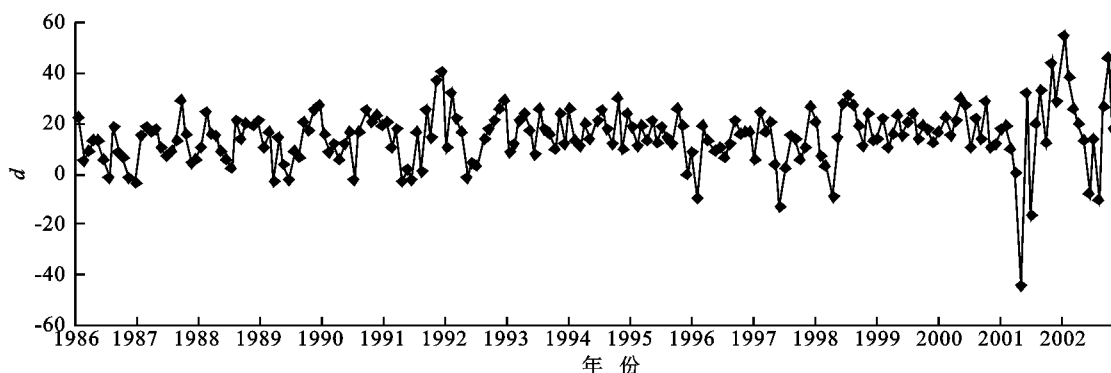


图 5 乌鲁木齐气象站大气降水(d)氘盈余的变化

乌鲁木齐远离海洋,气候干燥,产生的水汽有相当一部分来自局地的蒸发。干旱地区表面水体中 ^{18}O 偏高,因此蒸发水汽中 ^{18}O 亦偏高。再加上在干旱气候条件下雨滴在降落过程中由于蒸发而产生的重同位素的富集,致使乌鲁木齐地区降水中 ^{18}O 偏高。一般在中高纬度地区,尤其是高纬度的内陆区——乌鲁木齐,由于长期受大陆性气团的影响,冬季温度差异大。受其影响, ^{18}O 表现出夏高冬低的特征,与温度变化同步。

3 结 语

乌鲁木齐地处亚欧大陆腹地,是世界上距离海洋最远的内陆城市,海洋蒸发的水汽很难直接到达,其水汽来源主要受西风环流的影响,降落到地表的水的重新蒸发在当地水汽来源中也占很大比例。本文重点研究了乌鲁木齐地区大气降水中氢、氧同位素组成特征及其与水汽来源的关系,结果表明:

(1) 乌鲁木齐地区大气降水的氢氧同位素含量处于中国与全球雨水的变化之内。本区大气降水线方程为 $D = 7.21 \delta^{18}\text{O} + 4.50$ ($R^2 = 0.951$),与全

球和中国的降水线方程相比,其斜率和截距稍偏低。受水汽来源地和水汽循环方式的影响,乌鲁木齐降水中的稳定同位素和全国其它地区存在着时空差异。降水中的 D 和 ^{18}O 之间有很好的线性关系,但受大陆性水汽来源的影响,乌鲁木齐大气降水线方程的斜率和截距都较低。

(2) 据监测数据计算,在每年 3 - 7 月氘盈余 d 值大(氘盈余变化大),乌鲁木齐的变化也不同,盛夏 d 相对较高,高于冬春季的 d 。这种在干旱条件下的水汽内陆循环所导致 d 独特的季节变化,在蒙古冰芯和青藏高原北部降水也有记录^[25]。这种季节变化特征却与北半球降水中 d 的冬高夏低平均季节变化不同。乌鲁木齐地区水汽的内陆循环过程较强,干燥的气候条件使得降水中 d 值较高。降水中较高的 ^{18}O 是由该地区干旱的气候条件和强烈的蒸发所致。

(3) 从年内和年际的总体特征看,乌鲁木齐地区降雨中的 D 和 ^{18}O 均具有显著的温度效应。就相关关系来看,与月均气温的相关关系更好,但与月降雨量关系也可以,但温度效应在一定时期掩盖了雨

量效应。因此,我们获得现有的降水值与月平均气温均呈显著的正相关关系。可见,乌鲁木齐地区大气降水同位素组成有显著的温度效应,且降水中稳定同位素比率的季节变化与温度的季节变化几乎一致。这与全球降水中稳定同位素调查所得的结论是一致的,即在中高纬度大陆内部,降水中稳定同位素具有显著的温度效应。

参考文献:

- [1] Bosilovich M G, Schubert S D. Water vapor tracers as diagnostics of the regional hydrologic cycle[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2002, 3: 149-165.
- [2] Koster R D, Jouzel J, Suozzo R, et al. Global sources of local precipitation as determined by the NASS/ GISS GCM [J]. *Geophysical Research Letters*, 1986, 13: 121-124.
- [3] Numaguti A. Origin and recycling processes of precipitating water over the Eurasian continent: Experiments using an atmospheric general circulation model [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 1957-1972.
- [4] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, 16: 436-468.
- [5] Merlivat L, Jouzel J. Global climate interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84: 5029-5033.
- [6] Jouzel J, Merlivat L. Deuterium and oxygen-18 in precipitation: modeling of the isotope effects during snow formation. [J] *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89(D7): 11749-11757.
- [7] Gat J R, Matsui E. Atmospheric water balance in the Amazon basin: An isotopic evapotranspiration model [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96: 13179-13188.
- [8] Petit J R, White J W C, Young N W, et al. Deuterium excess in recent Antarctic snow [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(D3): 5113-5122.
- [9] Qin D H, Petit J R, Jouzel J, et al. Distribution of stable isotopes in surface snow along the route of the 1990 International Trans - Antarctic Expedition [J]. *Journal of Glaciology*, 1994, 40: 107-118.
- [10] Kondoh A, Shimada J. The origin of precipitation in eastern Asia by deuterium excess [J]. *Journal of Japan Society of Hydrology & Water Resources*, 1997, 10 (6): 627-629.
- [11] Pang H X, He Y Q, Zhang Z L, et al. The origin of summer monsoon rainfall at New Delhi by deuterium excess [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2004, 8(1): 115-118.
- [12] 章申, 于维新, 张青莲. 我国西藏南部珠穆朗玛峰地区冰雪中氘和重氧的分布 [J]. *中国科学*, 1973(4): 430-433.
- [13] 林瑞芬, 卫克勤. 北京及上海降水的同位素组成. 中国科学院地理化学研究所年报 (1980 - 1981) [M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1982: 39-41.
- [14] 卫克勤, 林瑞芬, 王志祥. 北京地区降水中的氘、氧 - 18、氦含量 [J]. *中国科学 (B 辑)*, 1982(8): 754-757.
- [15] 郑淑慧, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素的研究 [J]. *科学通报*, 1983(13): 801-806.
- [16] 于津生, 虞福平, 刘德平. 中国东部大气降水中氢氧同位素组成 [J]. *地球化学*, 1987, 16(1): 22-26.
- [17] 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.
- [18] Zhang X P, Nakawo M, Fujita K, et al. The variation of precipitation ^{18}O in Langtang Valley, Himalayas [J]. *Science in China, Ser D*, 2001, 31(3): 206-213.
- [19] Tian L D, Yao T D, Numaguti A, et al. Relation between stable isotope in monsoon precipitation in southern Tibetan Plateau and moisture transport history [J]. *Science in China (D)*, 2001, 44 (S1): 267-274.
- [20] 章新平, 中尾正义, 姚檀栋, 等. 青藏高原及其毗邻地区降水稳定同位素成分的时空变化 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 2001, 31(5): 353-361.
- [21] Tian L D, Yao T D, Schuster P F, et al. Oxygen - 18 concentrations in recent precipitation and ice cores on the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research* [J]. 2003, 108(D9): 4293-4302.
- [22] 丁悌平. 氢氧同位素地球化学 [M]. 北京: 地质出版社, 1980. 61-65.
- [23] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, 133: 1702-1703.
- [24] Yurtsever Y. Worldwide survey of stable isotopes in precipitation [M]. International Report-Vienna: IAEA, 1975.
- [25] Schotterer U, Frohlich K, Gaggeler H W, et al. Isotope records from Mongolian and alpine ice cores as climate indicators [J]. *Climatic Change*, 1997, 36: 519-530.