

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0899

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

河西走廊中部大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及水汽输送

李佳芳¹, 石培基^{1,*}, 朱国锋^{1,2}, 何元庆^{2,3}, 刘原峰¹, 童华丽¹, 杨玲¹

1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730070

3. 兰州大学西部环境与气候变化研究院, 兰州 730000

收稿日期: 2014-06-09

修回日期: 2014-08-19

录用日期: 2014-09-08

摘要:河西走廊中部地区气候条件特殊,小循环过程独特复杂,因而应用降水等各种水体中的氢氧稳定同位素信息来明晰水循环特征,成为近年较为常用的方法.利用 GNIP 张掖站点大气降水稳定同位素资料和 NCEP/NCAR 再分析资料,通过研究张掖站 11 年大气降水的氢氧稳定同位素组成,建立了张掖局地大气降水线方程,结合西水、莺落峡、平川、正义峡 4 个辅助站点资料,分析了河西走廊中部地区氢氧稳定同位素的时间变化规律,并建立水汽输送模式.结果表明,除西水外,其余站点区域大气降水线方程的斜率与截距均低于全球和中国大气水线,说明河西走廊中部地区降水主要来源于大尺度水汽循环,局地蒸发较为强烈且降水过程中张掖站点的蒸发作用强于其他站点.河西走廊中部地区大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度、水汽压之间呈现较为显著的正相关关系;在全年尺度下,降水量效应不明显;由于干旱区降水主要集中在气温较高的月份,在暖季,温度效应掩盖了降水量效应,使得降水量效应无法体现.对过量氘和水汽输送的研究表明,西风带的水汽输送为河西走廊中部地区提供了基本的水汽来源,西风带季节变化对其水汽输送通量散度和 d 值季节变化有直接的作用.从 d 值的变化来看,河西走廊中部具有明显的季节变化特征,暖季 d 值明显小于冷季,且呈现一种先降后升的变化趋势;从数值来看,暖季 d 值小于 10‰ 的次数多于 d 值大于 10‰ 的次数,冷季 d 值大于 10‰ 的次数多于 d 值小于 10‰ 的次数,说明冷季水汽在运行过程中受到地表水汽补给的作用明显.

关键词:大气降水; 稳定同位素; 同位素效应; 河西走廊

文章编号: 0253-2468(2015)04-947-09

中图分类号: X513

文献标识码: A

Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and moisture transports in the central Hexi Corridor

LI Jiafang¹, SHI Peiji^{1,*}, ZHU Guofeng^{1,2}, HE Yuanqing^{2,3}, LIU Yuanfeng¹, TONG Huali¹, YANG Ling¹

1. College of Geography and Environment Science of Northwest Normal University, Lanzhou 730070

2. State Key Laboratory of Cryosphere Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730070

3. Research School of Arid Environment and Climate Change, Lanzhou University, Lanzhou 730000

Received 9 June 2014;

received in revised form 19 August 2014;

accepted 8 September 2014

Abstract: Stable hydrogen and oxygen isotopes become a diagnostic tool in geosciences and environmental studies to investigate the circulation mechanism in rivers, lakes and groundwater. Based on the data provided by the Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP) and the national environmental protection agency / national center for atmospheric research (NCEP/NCAR) together with observed stable isotopic composition in Zhangye Region, we analyzed temporal variation of the isotopes and developed local meteoric water line equation and water vapor transportation model. The results show that the

基金项目:西北师范大学青年教师科研能力提升计划项目(No.NWNU-LKQN-13-10);中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室开放基金(No.SKLCs-OP-2014-11);国家自然科学基金项目(No.41271133,41273010);国家重点基础研究计划(No.2013CBA01800)

Supported by the Young Teachers' Scientific Research Ability Promotion Plan of Northwest Normal University (No.NWNU-LKQN-13-10), the Open Fund of State Key Laboratory of Cryosphere Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences(No.SKLCs-OP-2014-11), the National Natural Science Foundation of China(No.41271133,41273010) and the National Key Basic Research and Development Program of China (No. 2013CBA01800)

作者简介:李佳芳(1992—),女,E-mail:tljiafang@163.com; * 通讯作者(责任作者),E-mail: xbsdspj@163.com

Biography: LI Jiafang (1992—), female, E-mail: tljiafang@163.com; * Corresponding author, E-mail: xbsdspj@163.com

slope and intercept of local atmospheric precipitation line equations at all sites except Xishui are lower than those in the national and global atmospheric precipitation line equations. This is because precipitation in the central Hexi corridor region mainly comes from large scale water circulation and Zhangye site has a stronger local rainfall evaporation than other stations. The stable isotope $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation has a significantly positive correlation with temperature and vapor pressure. In the whole year, there is no obvious precipitation effect. As precipitation in arid areas is mainly concentrated in the summer months, temperature effect dominates over precipitation effect. The deuterium and water vapor transportation show that westerly water vapor transport provides the basic water vapor sources in central Hexi corridor and the seasonal variation of westerlies affects the seasonal change of the water vapor transport flux divergence and d value. The range of d value in the warm season is much smaller than the cold season, showing that water sources in the warm season have high relative humidity. The occurrence of d value under 10‰ is higher than above 10‰ in the warm season and vice versa, which indicates that the surface moisture replenishment has an obvious effect during the running process of atmospheric water vapor in the cold season.

Keywords: precipitation; stable isotope; isotope effect; Hexi corridor

1 引言 (Introduction)

稳定同位素是自然水体的重要组成,在不同的水体(状态、来源等)中表现出不同的信号,人们利用这些信号判断和推导大气降水的一系列效应和不同状态水体同位素分馏机制,借以探索环境的变化.氢氧稳定同位素作为研究水循环的示踪元素,不仅因水体的不同而存在差异,并且受到诸多气象和地理条件的影响,使其组成随时间和空间呈一定规律的变化,因而通过观测其丰度的变化会引导人们深入认识地球化学和水循环过程(Dansgaard, 1964).降水是水资源的主要输入因子,降水中稳定同位素可作为水汽源的自然示踪或利用其变化来反演大气过程,对降水中稳定同位素组成及比率大小的分析帮助人们了解和认识不同地理区域的水汽来源(Araguás-Araguás *et al.*, 1998),反映大气水汽循环的整个历史(Dansgaard, 1953; 1964),同时在一定程度上反映天气气候与区域性特征(章新平和姚檀栋, 1994).

对降水中稳定同位素的观测和研究国外起步较早(宋献方等, 2007),国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)与世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)与1961年成立了全球大气降水同位素网络(Global Network of Isotopes in Precipitation, GNIP),在全球共建立100多个观测点,对降水中稳定同位素比率进行连续的跟踪监测,到目前全球已建立了550多个降水取样站点,这为研究全球及局地水循环提供了宝贵的同位素资料(IAEA/WMO, 2001).利用稳定同位素示踪法来追踪水汽来源是现今国际上研究的热点,许多学者利用降水中过量氘的变化去追踪水汽来源(Gat and Matsui, 1991; Petit *et al.*, 1991; 庞洪喜等, 2005),已经取得极大成果.我国为解决国内大气降水联网观测不足的问题,与2004年借鉴国外

经验,以中国生态系统研究网络(Chinese Ecosystem Research Network, CERN)野外站台为依托,选取国内31个站台作为观测站点,开始建立中国大气降水同位素网络(Chinese Network Isotopes in Precipitation, CHNIP),系统的对 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 进行观测(柳鉴容等, 2006).在氢氧同位素研究应用领域,我国也取得了进一步的发展(陈中笑等, 2010; 李亚举等, 2011).例如,研究表明季风降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与高空风速存在显著的正相关关系(庞洪喜等, 2004);利用大气降水的同位素资料寻找地下水、河水以及湖泊水的补给源区(王仕琴等, 2009);基于氢氧同位素,探讨了局地蒸发水汽贡献率和云下二次蒸发效应(孟玉川和刘国东, 2010; 马潜等, 2012, 2013)等.

我国关于大尺度下西北干旱区大气降水稳定同位素研究方面成果丰硕(张应华和仵彦卿, 2007a, 2007b; 柳鉴容等, 2008; 王宁练等, 2008; 吴锦奎等, 2011; 张明军等, 2011; 李小飞等, 2012),但是,关于河西走廊中部地区这一独特地域下大气降水中稳定同位素组成、时空分布规律以及水汽输送的变化规律和机理还未进行深入研究;从局地环境及气候状况来讲,分析大气降水中的环境同位素组成,对于探清河西走廊地区的水循环过程、改善气候状况和研究环境变化特征具有一定的价值;其次,降水中的环境同位素信息可以很好地示踪和反演夏季季风降水的主要水汽通道(柳鉴容等, 2007),对河西走廊地区大气降水中的环境同位素组成进行分析,掌握其时空分布规律,将有助于深刻明晰西北干旱区的水循环特征,为我国境内大气降水同位素的时空分布规律研究提供重要依据.鉴于此,本研究以张掖站点为例,借助西水、莺落峡、平川和正义峡4个辅助站点资料,分析了河西走廊中部地区降水稳定同位素的环境效应和时空变化特征,探讨了过量氘的变化规律,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。

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 研究区概况

河西走廊(图 1)位于我国甘肃省境内,河西走廊中部地理坐标为东经 $97^{\circ}20' \sim 102^{\circ}12'$,北纬 $37^{\circ}28' \sim 39^{\circ}57'$,东西长 465 km,南北宽 148 km,海拔高度 1284~5564 m,处在青藏高原与内蒙古高原的过渡地带,大地形有南部祁连山区,北部合黎山龙首山区及中部走廊平原区组成(张洁等,2013)。河西走廊中部地区处于中纬度地带,南接祁连山脉,北连

巴丹吉林沙漠,深入欧亚大陆腹地,远离海洋,地处内陆干旱地区,受青藏高原大地形作用的影响,形成典型的温带大陆性干旱气候。该地区气候干燥,年降水量稀少,蒸发量大,年平均降水量 112.3~354.0 mm,且分布极不均匀,其中 70%集中在 6—9 月,年平均蒸发量 2002.5 mm,远远大于年平均降水量;光照充足,太阳辐射强,其年平均气温为 $4.0 \sim 8.3^{\circ}\text{C}$,气温年较差 $26.2 \sim 31.6^{\circ}\text{C}$,极端最低气温 -30.6°C ,极端最高气温 40.0°C ,四季分明,冬季寒冷而漫长,夏季炎热而短暂,春季升温快,秋季降温较快,常年以西北风和东风为主。

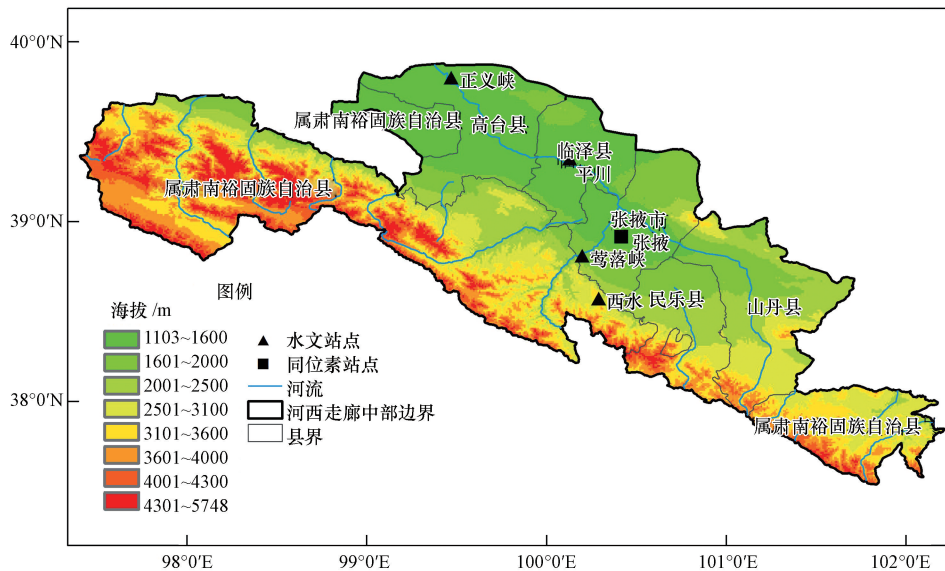


图 1 研究区域概况

Fig.1 Location of the study area

2.2 数据来源和分析方法

张掖站($38^{\circ}55' \text{N}$, $100^{\circ}25' \text{E}$)降水稳定同位素资料来自于 GNIP,其提供的观测点资料包括各个站点的编号、经纬度、高程、采样日期、降雨类型、 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的月平均值、稳定同位素比率($^2\text{H}/^1\text{H}$ 和 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)、分析实验室编号、降雨量、温度等信息。西水、莺落峡、平川、正义峡 4 个站点的实测资料通过其他文献获得(吴锦奎等,2011),如表 1 所示。测量结果,以相对于标准平均海洋水(standard mean ocean water, SMOW)的千分差(即国际规定统一采用待测样品中某元素的同位素比值与标准同种同位素的相对千分差作为量度)表示为如下形式:

$$\delta^{18}\text{O} = (R_s/R_{\text{SMOW}} - 1) \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中, R_s 为降水样中 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比值, R_{SMOW} 为 SMOW

中 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比值。

降水中氢氧稳定同位素加权值为月降水量加权平均值,其计算方法为:

$$\delta_{(w)} = \sum P_i \delta_i / \sum P_i \quad (2)$$

式中, $\delta_{(w)}$ 为加权平均值, P_i 为不同年份下相同月份里的降水量, δ_i 为其相应的同位素值。由于西北干旱区 4—10 月平均温度都在 0°C 以上,并且降水多集中在 4—10 月,其他月份降水量较少,为方便研究,对数据进行统一划分,将 4—10 月划分为暖季,11 月至次年 3 月划分为冷季。

利用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 1971—2010 年的 NCEP/NCAR 再分析资料,空间分辨率为水平 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 网格点,采用自下往上垂直积分至

300 hPa的方式,计算对流层水汽输送.

表 1 氢氧同位素采集站点相关信息

Table 1 Basic information of 3 sites for gathering hydrogen and oxygen isotopes data

站点	纬度	经度	$\delta^{18}\text{O}$	δD	过量氘 d	资料年限	数据源
张掖	100.42°	38.92°	-6.0‰	-42.8‰	5.0‰	1986—2003	GNIP
西水	100.29°	38.57°	-9.2‰	-58.7‰	15.2‰	2002—2003	吴锦奎等,2011
莺落峡	100.20°	38.81°	-6.5‰	-42.8‰	9.5‰	2002—2003	吴锦奎等,2011
平川	100.13°	39.35°	-4.4‰	-27.4‰	7.9‰	2002—2004	吴锦奎等,2011
正义峡	99.47°	39.80°	-2.2‰	-74.2‰	-57.0‰	2002—2004	吴锦奎等,2011

3 结果与分析(Results and analysis)

3.1 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 的时间变化及其影响因素

已知全球降水平均稳定同位素组成, $\delta^{18}\text{O}$ 介于 -50‰到 10‰, δD 介于 -350‰到 50‰之间,中国大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 含量为 -24‰到 2.0‰, δD 含量为 -210‰到 2‰(郑淑蕙等,1983).对张掖站点降水同位素数据进行统计分析后发现,张掖大气降水同位素值有较大的变化幅度: $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围为 -28.5‰到 0.87‰, δD 变化范围为 -191.4‰到 4.3‰.辅助站点部分样品值超出中国大气降水同位素值范围且降水量年加权平均值差异明显,分析其原因可能是由于辅助站点的同位素观测值为事件降水数据,每次降水的降水量变化幅度较大,且数据的时间序列较短(吴锦奎等,2011).总的来说,河西走廊中部地区大气降水的氢氧同位素含量落在中国与全球降水的变化范围之内.

由于降水中氢氧同位素比率的大小受气象条件的制约,因此,随着气象要素的季节变化, δ 也发生变化.张掖暖季 $\delta^{18}\text{O}$ 的值介于 -18.21‰到 0.87‰之间,最大值为 0.87‰, δD 值一般介于 -90.5‰到 -4.3‰,最大值为 -4.3‰;冷季 $\delta^{18}\text{O}$ 的值介于 -28.5‰到 -4.36‰,最小值为 -28.5‰, δD 值

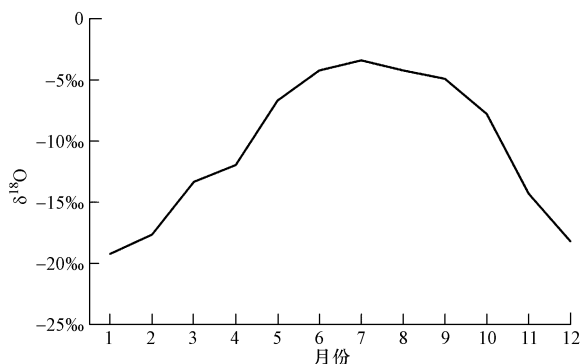


图 2 张掖站 $\delta^{18}\text{O}$ 随时间的分布

Fig.2 Monthly variation of $\delta^{18}\text{O}$ in Zhangye

-191.4‰到 -37.7‰,最小值为 -191.4‰.总体表现为,1—7月不断富集,8—12月逐渐贫化;最大值出现在夏季,最小值出现在冬季(图2). $\delta^{18}\text{O}$ 值的波动反映了西北地区典型大陆性气候年周期的变化规律(柳鉴容等,2008).

3.2 区域大气降水线

1961年Craig首次在全球尺度下,确立了大气降水中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的关系,即全球大气降水线(Global Meteoric Water Line, GMWL)(Craig,1961),表示为:

$$\delta\text{D} = 8.0\delta^{18}\text{O} + 10.0 \quad (3)$$

后来国际原子能委员会(IAEA)通过观测点网的数据统计,确定所有降水的加权平均 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 值符合下式:

$$\delta\text{D} = (8.17 \pm 0.08)\delta^{18}\text{O} + (10.56 \pm 0.64) \quad (4)$$

上述两式均反映了全球水循环过程中氢氧同位素变化的平均状况(王瑞久和王怀颖,1990),大气水线的斜率反映两类稳定同位素D和 ^{18}O 分馏速率的对比关系,常数项指示氘对平衡状态的偏离程度(张明军等,2011).

依据张掖站点大气降水同位素数据,得出该区的局地大气水线方程为(图3):

$$\delta\text{D} = 6.76\delta^{18}\text{O} - 4.54, (R^2 = 0.94) \quad (5)$$

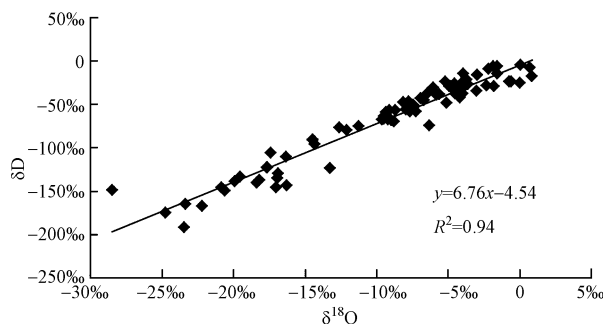


图 3 张掖站大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的关系

Fig.3 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and δD in the precipitation in Zhangye

可以得出, R^2 值高, 表明张掖降水的氢氧同位素组成有极好的相关性; 与全球大气水线和郑淑慧等报道的中国大气降水线方程 ($\delta\text{D} = 7.9\delta^{18}\text{O} + 8.2$) 相比, 除西水外, 其余站点的斜率与截距均低于全球和中国大气水线(表 2), 说明河西走廊中部地区降水主要来源于大尺度水汽循环, 且受到水汽源地的非平衡蒸发及凝结物在未饱和大气中降落时重同位素的蒸发富集作用的影响。张掖站点的斜率低于其他站点的现象说明降水过程中张掖的蒸发作用强于其他站点。河西走廊中部地处内陆, 属于典型的温带大陆性干旱气候, 干燥少雨, 空气湿度低, 雨水在降落过程中经历了一定程度的二次蒸发。在干旱区较低的斜率主要是雨滴在云底相对干燥的大气发生部分分馏的结果 (Araguás-Araguás *et al.*, 1998)。

表 2 各站点局地大气水线方程参数

Table 2 Parameters of Local Meteoric Water Line of 5 sites

站点	斜率	截距	R^2
张掖	6.76	-4.54	0.94
西水	7.96	13.79	0.99
莺落峡	7.69	4.73	0.98
平川	7.85	6.0	0.98
正义峡	7.84	4.04	0.98

3.3 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的环境效应

3.3.1 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的温度效应 据研究显示, 大气降水氢氧同位素组成与各环境要素之间存在相关关系, 人们将这种相关关系称为环境同位素效应。图 4 表示张掖站大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与温度、全年降水量、暖季降水量、水汽压之间的相关散布。温度效应, 是指同位素的组分与温度成正相关的关系。在各个环境同位素效应中, 温度效应尤为突出, 这是因为环境同位素的分馏作用主要受制于相变过程中的温度 (Liu *et al.*, 2010)。一般而言, 温度效应主要出现在中高纬度地区, 且在两极表现尤为明显; 但在大陆内部, 其正相关关系也相当密切。

通过 $\delta^{18}\text{O}$ 与月平均温度 (T) 之间的回归分析 (图 4a), 获得直线方程为:

$$\delta^{18}\text{O} = 0.496T - 14.07, (R^2 = 0.644) \quad (6)$$

得出结论, 张掖 $\delta^{18}\text{O}$ 与月平均温度之间有较显著的相关关系, R^2 达 0.664, 也就是说随着温度的升高, $\delta^{18}\text{O}$ 逐渐富集, 这与李小飞等 (2012) 在研究西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送中分析的结论: $\delta^{18}\text{O} = 0.50t - 14.00, (R^2 = 0.648)$ 基本一

致。气温对降水中稳定同位素产生作用的主要机制是: 地面温度在一定程度上与上空降水云团的冷凝温度有对应关系, 而后者与降水的 δ 值有直接关系 (卫克勤和林瑞芬, 1994), 因此气温越低, 降水中同位素的分馏系数 α 也越大, 从而降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 也越低。但只有当大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 保持基本稳定时, 气温和降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 才有可能表现出明显的正相关关系 (田立德等, 1997)。河西走廊中部地区冬季温度低, 降水中同位素的分馏系数较大, 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 较低, 夏季温度高, 同位素分馏系数较低, 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 较高。另外, 夏季干旱区强蒸发使得 $\delta^{18}\text{O}$ 值较高的局地水汽进入降水云团, 致使夏季大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值较高。

3.3.2 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的降水量效应 降水量效应指降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 与降水量之间表现为明显的负相关关系。降水量效应往往出现在低纬度沿海地区或海岛, 它的产生与强对流天气的降水过程相联系 (章新平和姚檀栋, 1998)。

通过 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量 (p) 之间的回归分析 (图 4b), 获得直线方程为:

$$\delta^{18}\text{O} = 0.203p - 12.03, (R^2 = 0.197) \quad (7)$$

得出结论, $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量之间不呈现负相关, R^2 极低 (0.197), 两者基本没有相关性。由于河西走廊中部地区降水多集中在暖季, 因此, 作张掖站暖季 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量之间的相关散布 (图 4c), 获得线性方程为:

$$\delta^{18}\text{O} = 0.03p - 6.06, (R^2 = 0.02) \quad (8)$$

得出结论, 在全年尺度下, $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量之间不存在明显的相关性的原因是由于大气降水在凝结过程中以动力分馏为主, 雨滴在下降过程中可能经历了二次蒸发过程或雨滴凝结时混入了一定量的局地再循环的水汽; 由于河西走廊中部地区降水主要集中在气温较高的月份, 在暖季, 温度效应掩盖了降水量效应, 因而使得降水量效应无法体现。在内陆干旱区, 降水并不是决定降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的根本性因素。

3.3.3 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的水汽压效应 水汽压是反映空气干湿程度的一个指标, 水汽压效应指降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与水汽压之间的相关关系。张掖大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽压的相关关系 (图 4d) 显示, $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽压之间存在着较为显著的正相关关系, 考虑造成此结果的原因可能是由于干旱区特殊的气候环境, 冬季温度较低, 空气中水汽含量较少, 水汽压

低,大气降水(包括雨雪)因蒸发而产生的重同位素富集作用很小,使其具有较低的 ^{18}O 值;由于河西走廊中部地区降水多集中在夏季,随着夏季温度的升

高,空气中水汽含量增加,水汽压亦增大,温度的影响以及因蒸发产生的重同位素富集均使降水中 ^{18}O 升高。

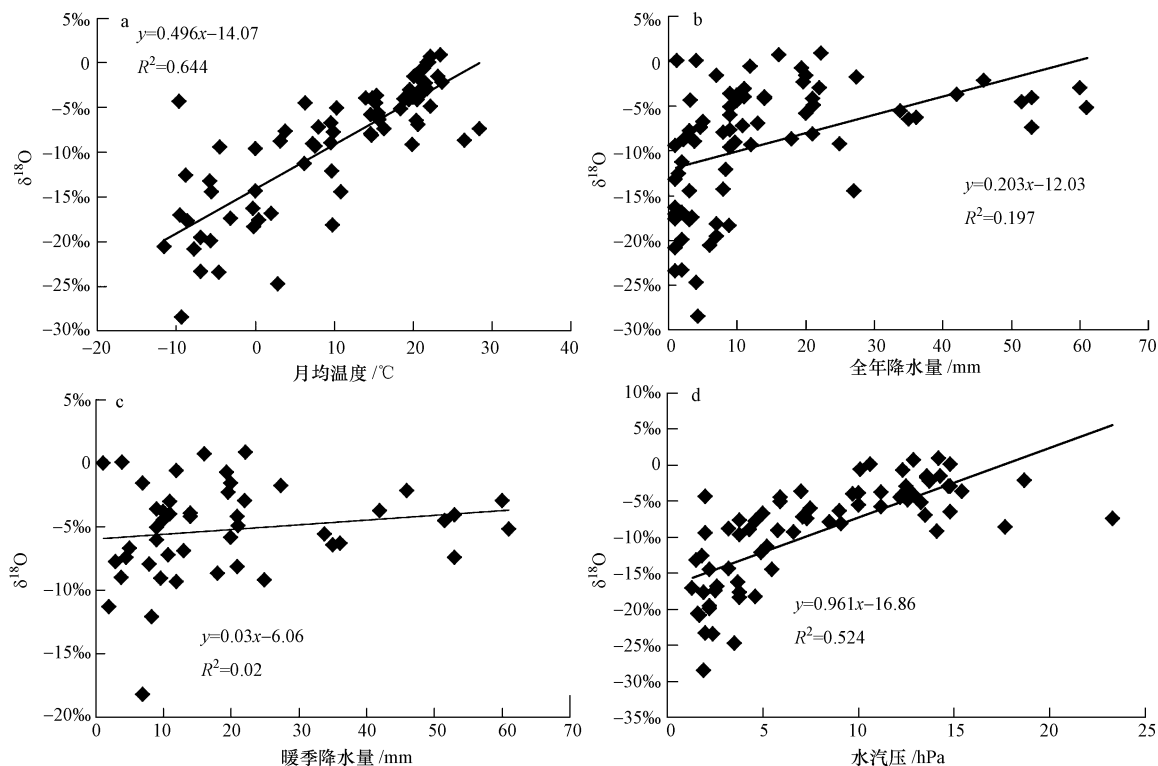


图4 张掖站降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度、全年降水量、暖季降水量、水汽压之间的相关散布

Fig.4 Correlation of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation with temperature, annual precipitation, warm season precipitation and Vapor pressure in Zhangye

4 讨论 (Discussion)

4.1 大气降水过量氘

Dansgaard 在 1964 年引入了过量氘(d)的概念,用于评价地区大气降水因地理与气候因素偏离全球大气降水线的程度,其表达式为:

$$d = \delta\text{D} - 8.0\delta^{18}\text{O} \quad (9)$$

同全球大气降水线方程相比,任何地区的大气降水,都可以计算出一个氘的过量参数 d 。不同地区大气降水的 d 值,可较直观地反映该地区大气降水蒸发、凝结过程的不平衡程度,实际上是一个大气降水的重要综合环境因素指标(张应华等,2006)。降水中的 d 值主要取决于形成降水时水汽源地的相对湿度(Craig, 1961),当水汽源地的相对湿度较高时, d 值较低,反之如果水汽源地的相对湿度较低,则降水中的 d 呈现高值。已有学者(Craig, 1961; Dansgaard, 1964)确定来自海洋水汽所形成的降水中氘盈余值接近 10‰,而在干旱条件下,蒸发使动

力分馏系数增加, d 值会增高,甚至大于 10‰。研究表明 d 值的大小受制于 4 个因素的影响:水汽形成时的 d 值,即初始值(Merlivat and Jouzel, 1979);动力分馏作用(Jouzel and Merlivat, 1984),其主要受水汽来源地的空气相对湿度和温度的影响(Jouzel *et al.*, 1982; 1997);水体蒸发水汽的补给(Gat *et al.*, 1994)以及云下二次蒸发效应(Dansgaard, 1964);水体蒸发的补给作用造成 d 值的升高,而二次蒸发效应则造成 d 值的降低。

张掖在冷季, d 值的变化范围大致在-17.28‰~33.2‰,平均值 15.27‰(图 5a),暖季时, d 值变化范围为-25.34‰~17.78‰,平均值为 3.11‰(图 5b)。多年降水 d 值(图 6)介于-2.26‰到 31.97‰,平均值为 10.58‰,与世界大部分地区雨水 d 值(10‰)接近。从 d 值变化的范围来看,河西走廊中部具有明显的季节变化特征,这与水汽来源和当地相对湿度的季节变化有关(赵良菊等,2011)。暖季 d 值明显小于冷季,且呈现一种先降后升的变化趋势,结合降

水量资料,分析造成此现象的原因为该地区地处干旱内陆,降雨多集中在暖季,一开始,降雨量较小,降雨过程中受到稳定同位素的二次蒸发效应强烈,5月份之后,随着降雨量的增加,大气水汽压增大且逐渐趋于饱和,云下二次蒸发逐渐减弱,降雨逐渐贫化重同位素,而使过量氘的值逐渐变大并趋于稳

定,此变化过程正好验证了孟玉川所分析的结论(孟玉川和刘国东,2010;马潜等,2012).从数值来看,暖季 d 值小于 10‰ 的次数较多,冷季 d 值大于 10‰ 的次数较多,说明冷季水汽在运行过程中受到地表水汽补给的作用明显.

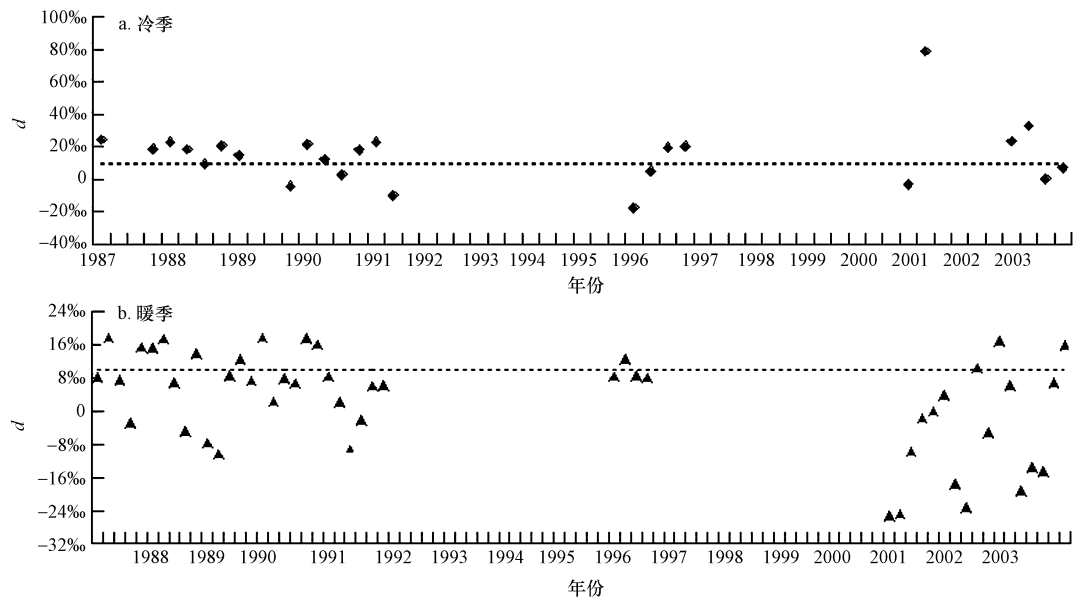


图5 张掖站冷暖季大气降水过量氘分布图

Fig.5 Excess deuterium of each precipitation in different seasons in Zhangye

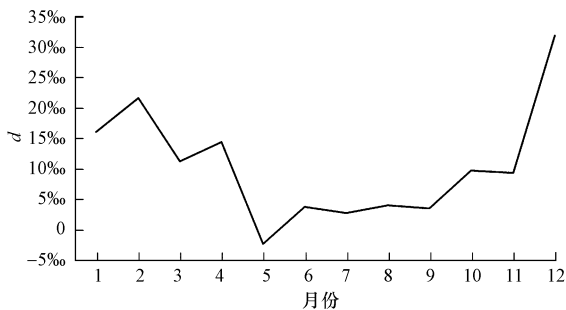


图6 张掖站大气降水过量氘的季节变化

Fig.6 Seasonal variability of excess deuterium in precipitation in Zhangye

4.2 水汽输送的变化

水汽输送通量的数值和方向表示水汽的来源,水汽输送通量散度表征水汽的净收支情况.图7为1971—2010年多年平均冬夏季水汽输送通量(图7a、c)和水汽输送通量散度(图7b、d),可以看出河西走廊中部地区水汽主要来源于西风带来的水汽.从数值上看,冬季水汽输送通量散度大于夏季,水汽辐散强,水汽来源的温度与相对湿度较低,对于

干燥的气候条件,水份蒸发的动力分馏作用也强,形成的降水的 d 值也高(侯典炯等,2011).夏季水汽辐合较强,在西北干旱区干燥气候条件下形成的降雨,雨滴在降落过程中蒸发强烈,也会改变降水中 d 的值,使其值偏低,这与 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化和 d 值的变化相吻合.因此, d 值与水汽输送通量散度呈明显的正相关关系.冬季大气输送通量散度为正值,即水汽输送为辐散,输入的水汽又被扩散出去,夏季水汽输送为辐合,这正是形成河西走廊中部地区的水汽原因.

5 结论(Conclusions)

1)河西走廊中部地区大气降水氢氧同位素多年 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 变幅较大,总体表现为,1—7月不断富集,8—12月逐渐贫化.最大值出现在夏季,最小值出现在冬季.

2)河西走廊中部地区局地大气水线方程斜率和常数项较低,说明降水主要来源于大尺度水汽循环.该地区地处内陆,气候干燥少雨,降水量少,空气湿度低,雨水在降落过程中经历了一定程度的二次

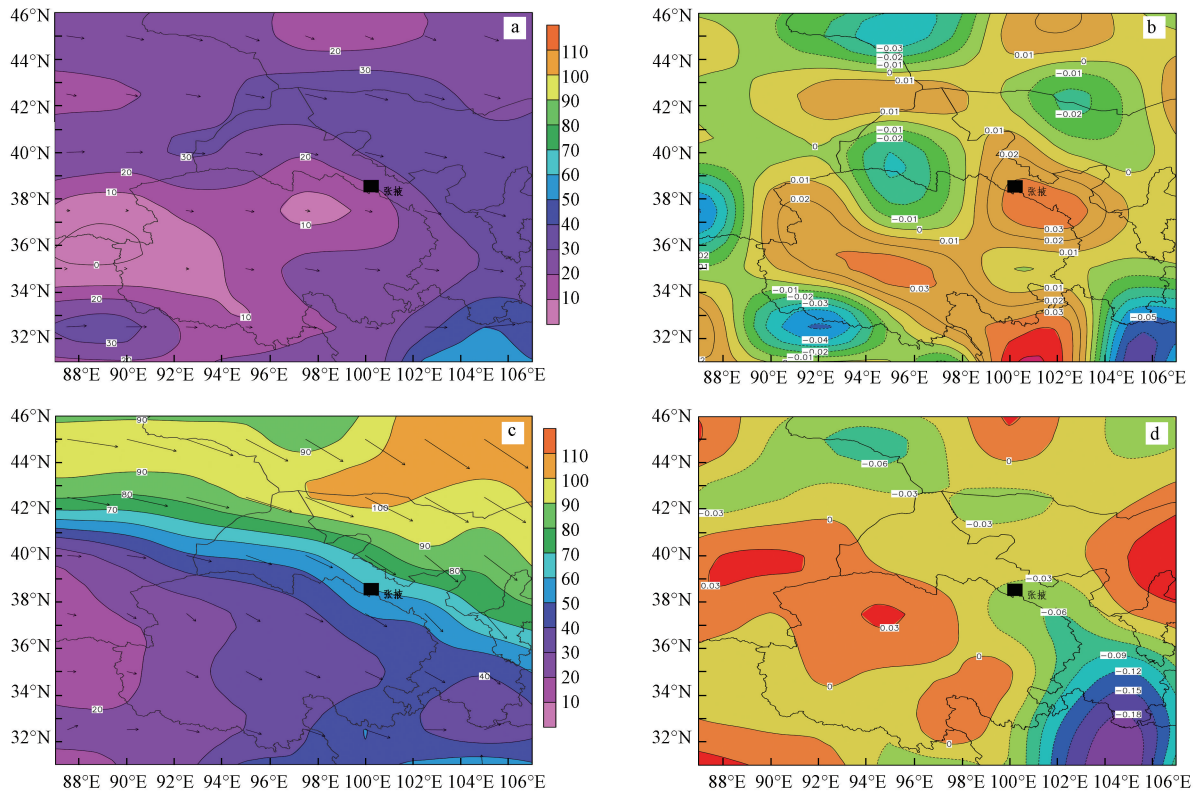


图7 河西走廊中部 1971—2010 年冬季水汽输送通量 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) 与水汽输送通量散度 ($10^{-6}\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) (a、b) 和夏季水汽输送通量与水汽输送通量散度分布 (c、d) (箭头表示水汽输送量的大小和方向)

Fig.7 Atmospheric water vapor transport flux and divergence during winter and summer (1971—2010)

蒸发,重同位素在雨水中大量富集,致使斜率与大气水线的截距降低,张掖站点的斜率低于其他站点的现象说明降水过程中张掖的蒸发作用强于其他站点。

3)河西走廊中部地区大气降水中的氢氧同位素组成呈明显的温度效应和水汽压效应;在全年尺度下,无法观察到明显的降水量效应,由于该地区降水主要集中在气温较高的月份,在暖季,温度效应掩盖了降水量效应,因而使得降水量效应无法体现。

4)河西走廊中部地区 d 值具有明显的季节变化特征,在暖季 d 值呈现先降后增的变化趋势,该地区地处干旱内陆,降雨多集中在暖季,一开始,降雨量较小,降雨过程中受到稳定同位素的二次蒸发效应强烈,5 月份之后,随着降雨量的增加,大气水汽压增大且逐渐趋于饱和,云下二次蒸发逐渐减弱,降雨逐渐贫化重同位素,而使过量氘的值逐渐变大并趋于稳定;冷季水汽在运行过程中受到地表水汽补给的作用明显,其全年大气降水来源于西风带和局地再循环水汽源区,主要为大陆性气团。

责任作者简介:石培基 (1961—),男,教授,博士生导师。主要研究方向为生态环境评价与政策分析。

参考文献 (References):

- Aragués-Aragués L, Froehlich K, Rozanski K. 1998. Stable isotope composition of precipitation over Southeast Asia [J]. *Journal of Geophysical Research*, 103(D22): 28721-28742
- 陈中笑,程军,郭品文,等. 2010. 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*, 33(6): 667-679
- Craig H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 133(3465): 1702-1703
- Dansgaard W. 1953. The abundance of $\delta^{18}\text{O}$ in atmospheric water and water vapour [J]. *Tellus*, 5(4): 461-469
- Dansgaard W. 1964. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 16(4): 436-468
- Gat J R, Matsui E. 1991. Atmospheric water balance in the Amazon basin: An isotopic evapotranspiration model [J]. *Journal of Geophysical Research*, 96(D7): 13179-13188
- Gat J R, Bowser C J, Kendall C. 1994. The contribution of evaporation from the Great Lakes to the continental atmosphere; Estimate based on stable isotope data [J]. *Geophysical Research Letters*, 21(7): 557-560
- 侯典炯,秦翔,吴锦奎,等. 2011. 乌鲁木齐大气降水稳定同位素与

- 水汽来源关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 25(10): 136-142
- IAEA/WMO. 2001. Global network for isotopes in precipitation [OL]. 2014-11-01. <http://isohis.iaea.org>
- Jouzel J, Merlivat L, Lorius C. 1982. Deuterium excess in an East Antarctic ice core suggests higher relative humidity at the oceanic surface during the last glacial maximum [J]. *Nature*, 299(5885): 688-691
- Jouzel J, Merlivat L. 1984. Deuterium and oxygen 18 in precipitation: Modeling of the isotopic effects during snow formation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 89(D7): 11749-11757
- Jouzel J, Froehlich K, Schotterer U. 1997. Deuterium and oxygen-18 in present-day precipitation: data and modelling [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 42(5): 747-763
- 李小飞, 张明军, 李亚举, 等. 2012. 西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送[J]. *环境科学*, 33(3): 711-719
- 李亚举, 张明军, 王圣杰, 等. 2011. 我国大气降水中稳定同位素研究进展[J]. *冰川冻土*, 33(3): 624-633
- 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 2006. 中国生态系统研究网络大气降水的稳定同位素特征分析[A]//高丹盈, 左其亭. 人水和谐理论与实践—中国水论坛第四届学术研讨会论文集[C]. 北京: 中国水利水电出版社. 287-291
- 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 2007. 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*, 22(6): 1004-1012
- 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 2008. 西北地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源[J]. *地理学报*, 63(1): 12-22
- Liu J R, Song X F, Yuan J F, *et al.* 2010. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over eastern monsoon China and the water vapor sources [J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(2): 200-211
- 马潜, 张明军, 王圣杰, 等. 2012. 中国西部局地蒸发水汽贡献率探讨[J]. *地理科学进展*, 31(11): 1452-1459
- 马潜, 张明军, 王圣杰, 等. 2013. 基于氢氧同位素的我国东南部降水局地蒸发水汽贡献率[J]. *地理科学进展*, 32(11): 1712-1720
- 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
- Merlivat L, Jouzel J. 1979. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 84(C8): 5029-5033
- 庞洪喜, 何元庆, 张忠林, 等. 2004. 季风降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与高空风速关系[J]. *科学通报*, 49(9): 905-908
- 庞洪喜, 何元庆, 张忠林, 等. 2005. 季风降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与季风水汽来源[J]. *科学通报*, 50(20): 2263-2266
- Petit J R, White J W C, Young N W, *et al.* 1991. Deuterium excess in recent Antarctic snow [J]. *Journal of Geophysical Research*, 96(D3): 5113-5122
- 宋献方, 柳鉴容, 孙晓敏, 等. 2007. 基于 CERN 的中国大气降水同位素观测网络[J]. *地球科学进展*, 22(7): 738-747
- 田立德, 姚檀栋, 蒲健辰, 等. 1997. 拉萨夏季降水中氧稳定同位素变化特征[J]. *冰川冻土*, 19(4): 295-301
- 王宁练, 张世彪, 蒲健辰, 等. 2008. 黑河上游河水中 $\delta^{18}\text{O}$ 季节变化特征及其影响因素研究[J]. *冰川冻土*, 30(6): 914-920
- 王瑞久, 王怀颖. 1990. 太原东山岩溶地下水的补给[J]. *中国岩溶*, 9(1): 1-6
- 王仕琴, 宋献方, 肖国强, 等. 2009. 基于氢氧同位素的华北平原降水入渗过程[J]. *水科学进展*, 20(4): 495-501
- 卫克勤, 林瑞芬. 1994. 论季风气候对我国雨水同位素组成的影响[J]. *地球化学*, 23(1): 33-41
- 吴锦奎, 杨淇越, 丁永建, 等. 2011. 黑河流域大气降水稳定同位素变化及模拟[J]. *环境科学*, 32(7): 1857-1866
- 张洁, 白青华, 马鸿勇. 2013. 气候变化对河西走廊中部地区主要农作物的影响[J]. *干旱气象*, 31(2): 303-308
- 张明军, 马潜, 李亚举, 等. 2011. 季风边缘区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及水汽来源分析——以兰州市为例[J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 47(6): 80-86
- 章新平, 姚檀栋. 1994. 全球降水中氧同位素比率的分布特点[J]. *冰川冻土*, 16(3): 202-210
- 章新平, 姚檀栋. 1998. 我国降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布特点[J]. *地理学报*, 53(4): 356-364
- 张应华, 仵彦卿, 温小虎, 等. 2006. 环境同位素在水循环研究中的应用[J]. *水科学进展*, 17(5): 738-747
- 张应华, 仵彦卿. 2007a. 黑河流域中上游地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征[J]. *冰川冻土*, 29(3): 440-445
- 张应华, 仵彦卿. 2007b. 黑河流域中上游地区降水中氢氧同位素与温度关系研究[J]. *干旱区地理*, 30(1): 16-21
- 赵良菊, 尹力, 肖洪浪, 等. 2011. 黑河源区水汽来源及地表径流组成的稳定同位素证据[J]. *科学通报*, 56(1): 58-67
- 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 1983. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. *科学通报*, 28(13): 801-806