

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2017.12.018

黑龙江地区不同降水类型中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征 及与水汽输送的关系^①

温艳茹, 王建力

西南大学 地理科学学院, 重庆 400715

摘要: 根据全球降水中稳定同位素监测网络 GNIP 我国黑龙江地区监测站点(哈尔滨站和齐齐哈尔站)同位素及气象数据资料, 结合美国气象中心 NCEP\NCAR 逐月再分析数据, 讨论年际尺度和季节尺度下研究区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 、气温、降水量的变化规律, 探讨两站点不同降水类型下 $\delta^{18}\text{O}-\delta\text{D}$ 相关性以及同位素效应, 并利用水汽通量模型追踪季节上影响研究区的降水气团差异, 分析水汽输送过程中两站点间的关系. 结果表明: ① 黑龙江地区大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值总体较低, 并表现出冬季低值和夏季高值的变化; ② 两站点不同降水类型 $\delta^{18}\text{O}-\delta\text{D}$ 相关性如下: 齐齐哈尔站点($\delta\text{D}=7.58\delta^{18}\text{O}-0.14$, $R=0.98$, $n=50$), 哈尔滨站点($\delta\text{D}=5.52\delta^{18}\text{O}-19.42$, $R=0.83$, $n=30$), 降雪样品较降雨样品具有高的斜率和截距值(7.54, -3.15), 这主要和水汽相变过程中的再蒸发有关. 在年际尺度与年内尺度上, 大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度均表现出明显的正相关($\delta^{18}\text{O}=0.35T-16.26$, $R=0.53$, $n=80$; $\delta^{18}\text{O}=0.17T-13.09$, $R=0.27$, $n=10$; $\delta^{18}\text{O}=0.08P-19.34$, $R=0.42$, $n=12$), 与降水量相关性不显著; ③ 结合黑龙江地区水汽通量分析发现, 夏季降水受到来自太平洋的暖湿水汽影响, 冬季风期间降水形式以降雪为主, 受到蒙古—西伯利亚高压及西风带水汽和内陆水汽再蒸发的影响.

关键词: 大气降水; $\delta^{18}\text{O}$; δD ; 水汽输送; 黑龙江

中图分类号: P426.6

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2017)12-0119-08

降水中稳定同位素信息是研究局地 and 全球范围水分循环的重要载体, 也是运用冰芯、石笋等沉积物来重建古气候的重要依据^[1-3]. 降水过程作为水循环中的主要环节, 在地表圈层间物质、能量和信息交换过程中最为活跃, 降水中稳定同位素的组成在时空分布上呈现较大的变化, 主要是受到水汽蒸发与凝结、降水形式(雨雪雾等)以及大气环流的影响^[5-6]. 水汽相变过程中同位素的组成变化符合 Rayleigh 分馏模式, 降水较水汽富集重同位素, 剩下的水汽中重同位素贫化, 随着降水事件的发生, 同一云团影响下的降水和水汽中的重同位素逐渐贫化. Graig 曾大范围测定世界各区域的雨雪水和河湖水, 计算了降水中 $\delta^{18}\text{O}-\delta\text{D}$ 相关关系, 将其定义为全球大气降水线(GMWL): $\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10$ ^[7]. 因水汽源地和气象条件的差异, 局地大气降水线(LMWL): $\delta\text{D}=a\delta^{18}\text{O}+b$ 中, 斜率 a 和截距 b 会出现不同程度的偏离, 斜率表示相变过程的差异, 包括云团再蒸发或降雪等; 斜率变化受到海—气互相作用的影响^[6], 在输送过程中会保持平衡^[8]. 随着同位素数据的逐渐丰富, 我国众多学者对全国各区域尺度及流域尺度等的降水中稳定同位素陆续开展了完善而系统的研究^[9-13], 对氢氧同位素的分布特征其影响因素等均取得了一系列重要的认识^[14-20]. 对降水中氢氧同位素的连续跟踪监测并研究其变化规律和机制, 是定量恢复

① 收稿日期: 2016-10-16

基金项目: 西南大学教育科研基金项目(XDWJY201520700133).

作者简介: 温艳茹(1991-), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士研究生, 主要从事全球环境变化的研究.

重建古气候和研究区域水循环的基础.

1961 年起, 国际原子能机构(IAEA) 和世界气象组织(WMO) 共同成立了全球降水稳定同位素监测网络(GNIP), 对全球降水中稳定同位素及相关气象数据进行连续监测. 目前, 全球已建立 1 000 多个降水取样站点, 为研究全球及局部地区大气环流及水循环机理提供了丰富的同位素资料. 我国于 1983 年加入 GNIP, 黑龙江地区有 2 个监测站点: 哈尔滨站(45.68°N, 126.62°E, 172 m)和齐齐哈尔站(47.38°N, 123.92°E, 147 m). 基于科研需要, 2004 年我国以中国生态系统研究网络(CERN) 各野外台站为依托, 建立了中国大气降水同位素网络(CHNIP) 对 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 进行连续系统的观测, 黑龙江地区的站点有三江站(47.35°N, 133.3°E, 55 m)、海伦站(47.45°N, 126.93°E, 236 m)^[15]. 本文着重分析黑龙江地区两站点中大气降水中氢氧同位素时空变化特征及与降水量、气温的相关关系, 探讨大气降水中氢氧同位素与水汽输送的关系, 为中高纬度季风区水汽输送和水汽来源提供理论依据, 为古气候重建提供大气降水同位素监测的依据.

1 资料与方法

黑龙江省(121.18°E~135.08°E, 43.42°N~53.55°N) 位于我国东北部, 北隔黑龙江、东隔乌苏里江与俄罗斯相望, 西临内蒙古, 南邻吉林, 地形以平原、丘陵为主(图 1); 属温带大陆性季风气候, 夏季凉爽短促, 冬季寒冷而漫长; 年降水量 400~650 mm, 年均温 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 无霜期 100~150 d, 研究区的降水形式主要为降雨和降雪, 夏季降水量约占全年降水量的 60%, 集中降雪期为每年 11 月至次年 1 月(图 2). 黑龙江地区位于我国东部季风区的最北缘, 纬度较高, 不同季节水汽来源复杂, 不仅受到来自太平洋的暖湿水汽, 还受到西风带的水汽来源以及内陆水汽再蒸发. 因此探究该地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征及水汽来源, 对于中高纬度季风区大气环流和水循环机制的理解具有重要意义.

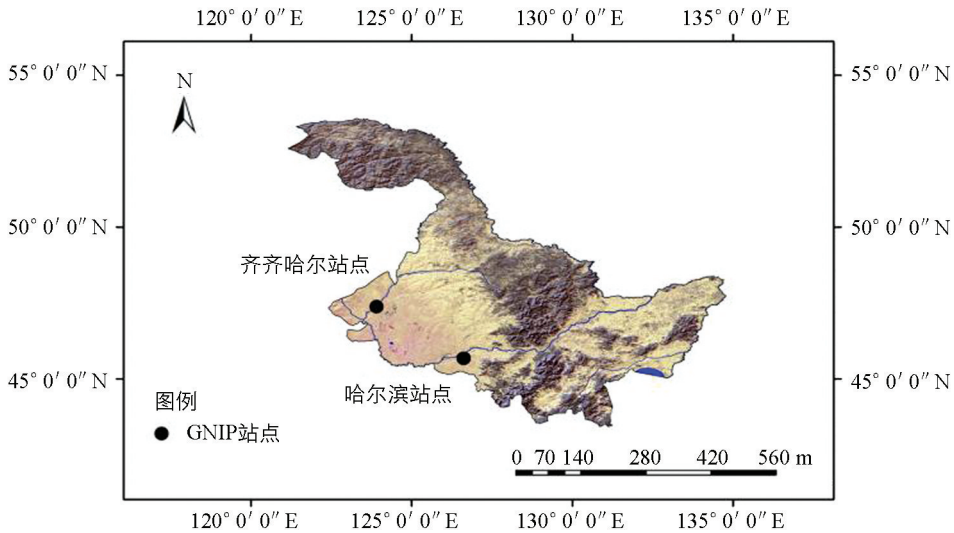


图 1 黑龙江地区 GNIP 站点地理位置图

根据 GNIP 黑龙江地区的 2 个站点数据: 哈尔滨站(监测时段 1986—1998 年, 样品数量 30 个, 采样单位: 石家庄水文与工程地质研究所)、齐齐哈尔站(监测时段 1988—1992 年, 样品数量 50 个, 采样单位: 未知), 由于部分样品数据缺失, 可用的完整数据样品有 80 个. 所有监测数据记录均为月平均值, 根据月平均气温差异, 研究区所有样品分为降雨样品和降雪样品, 降雪样品采集过程中在室温下将雪融化再收集起来. 研究区样品的降水形式包括降雨、降雪、雨夹雪等. 其中, 齐齐哈尔站有记录降水样品类型, 降雨样品 32 个, 雨夹雪样品 2 个, 降雪样品 16 个; 哈尔滨站降水样品类型的记录缺失, 本文根据月平均气温分别为 $-4.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-13.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的两个月为降雪样品, 判断哈尔滨站有降雨样品 28 个, 降雪样品 2 个.

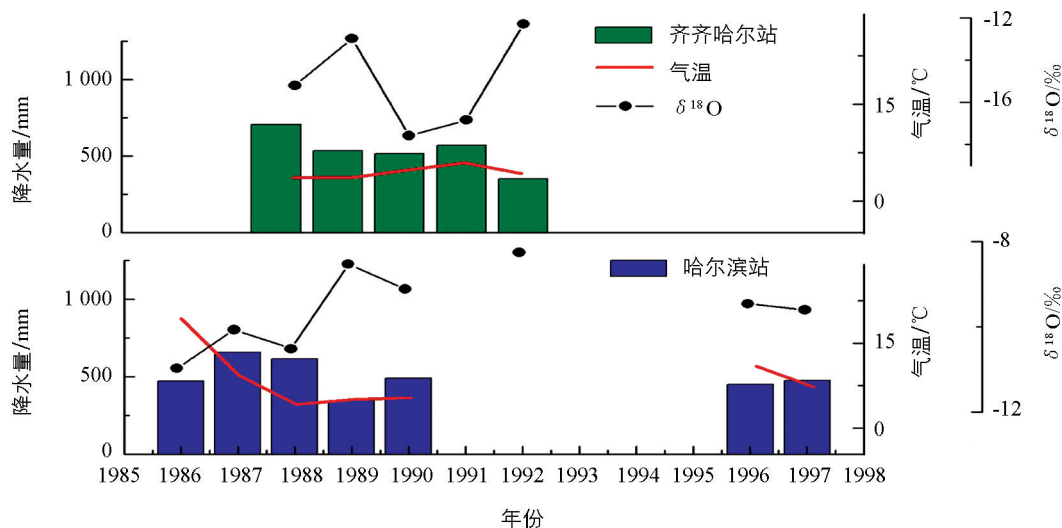


图 2 黑龙江地区齐齐哈尔站、哈尔滨站降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 、气温、降水量的年际变化

本文采用的气象资料为美国国家环境预报中心(NCEP/NCAR)提供的逐月再分析格点资料,空间分辨率为水平 2.5×2.5 网格点,下载地址为 <http://www.esrl.noaa.gov>.用到的数据资料有:地面到 300 hPa 高度场经向风速 v_{wnd} 、纬向风速 u_{wnd} 、比湿 $shum$ 、通量气压 $pres. sfc$. GrADS 气象软件建立模型模拟水汽通量,追踪降水气团输送影响降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化. GrADS 使用过程大致包括以下环节:下载数据资料文件及前期处理;编写及检查数据描述文件(*.ctl);设定编写脚本文件(*.gs);进行图形绘制及展示;保存描述文件及图像.

降水中稳定同位素比值($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 或 $^2\text{H}/^1\text{H}$)用相对于维也纳标准平均海洋水(V-SMOW)的千分差来表示:

$$\delta = (R_{\text{水样}}/R_{\text{V-SMOW}}) \times 1000$$

式中 $R_{\text{水样}}$ 和 $R_{\text{V-SMOW}}$ 分别代表水样中氧或氢的稳定同位素比值和 V-SMOW 中的稳定同位素比值. 降水中稳定同位素比值的加权平均值计算公式为

$$\delta = \sum P_i \delta_i / \sum P_i$$

式中, δ 为加权平均值, P_i 为降水量, δ_i 为其相应的稳定同位素值.

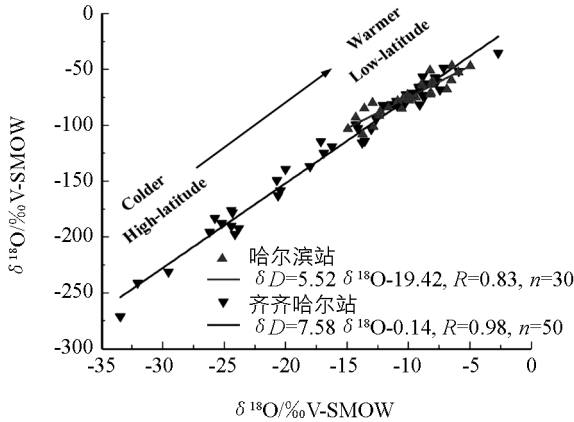
2 结果与分析

2.1 区域大气降水线

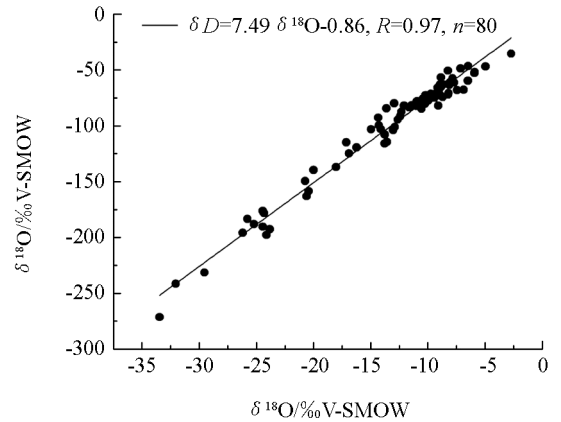
大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 之间的关系被定义为全球大气降水线(GMWL): $\delta D = 8\delta^{18}\text{O} + 10$, 其斜率和截距受到水汽来源、输送方式、水汽凝结温度以及降水期间的温度、湿度等的影响^[33], 使得局地大气降水线(LMWL)的斜率和截距有所偏离. 根据 GNIP 在研究区两站点监测的稳定同位素数据, 计算得出两站点大气降水线方程, 齐齐哈尔站点: $\delta D = 7.58\delta^{18}\text{O} - 0.14$, $R = 0.98$, $n = 50$, 哈尔滨站点: $\delta D = 5.52\delta^{18}\text{O} - 19.4$, $R = 0.83$, $n = 30$ 如图 3(a). 综合所有样品数据得到的研究区域大气降水方程为 $\delta D = 7.49\delta^{18}\text{O} - 0.86$, $R = 0.97$, $n = 80$ 如图 3(b). 在大气降水线方程中, 斜率 a 表现出较低值, 而斜率值也较低, 主要是由于哈尔滨站点较齐齐哈尔纬度偏低, 年平均气温高, 且位置更靠近海洋, 在夏半年季风影响下有更多湿润水汽输送.

黑龙江地区大气降水线方程 $\delta D = 7.49\delta^{18}\text{O} - 0.86$ 与柳鉴容^[21]通过 GNIP 和 CHNIP 的 928 个样品得出的中国东部季风区大气降水线方程 $\delta D = 7.48\delta^{18}\text{O} + 1.01$ 相比, 斜率和截距十分接近. 并与 CHNIP 的三江站 $\delta D = 7.29\delta^{18}\text{O} - 6.71$, 海伦站 $\delta D = 7.71\delta^{18}\text{O} + 2.58$ 对比^[29], 斜率非常相近. 首先, 降水线方程的相关系数能够说明大气降水中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 具有很好的相关性; 其次, 该方程的斜率和截距与全国大气降水

线接近,这说明东部季风区大气降水过程中的水汽源地基本都来自于海洋蒸发。黑龙江地区位于东部季风区内纬度较高地区,仅考虑海表面水的蒸发和凝结物降落时 2 个非平衡蒸发过程对 δD 和 $\delta^{18}O$ 的影响时,由于凝结物降落过程中的蒸发速率与温度成正比, δD 和 $\delta^{18}O$ 与温度增大的方向相同,即大气水线将沿着稳定同位素比率增大的方向逐渐偏离^[22];因此温度越高,湿度越小,偏离程度就越大,大气水线的截距值也将随着偏离的程度而偏向小值^[23]。因此,黑龙江地区大气水线的斜率和截距值可以较好的反映中高纬度东部季风区的自然地理状况和气象条件。



(a) 两站点大气降水线方程



(b) 区域大气降水线方程

图 3 黑龙江地区两站点(齐齐哈尔站、哈尔滨站)大气降水线和区域大气降水线方程

为了深入探究研究区不同降水类型对降水中稳定同位素变化的影响,本文根据降水类型的差异将两站点的样品分为 5 组,试图分别进行 δD 、 $\delta^{18}O$ 值相关性分析,结果如表 1。

表 1 不同降水类型下 $\delta D - \delta^{18}O$ 相关性分析

样品类型	样品数量	斜率	截距	R^2
哈尔滨站降雨	28	5.38	-20.58	0.82
齐齐哈尔站降雨	32	7.18	-3.75	0.96
齐齐哈尔站降雪	16	7.54	-3.15	0.96

由于哈尔滨站降雪样品和齐齐哈尔站雨夹雪样品数量不足,没有进行相关性分析,根据 3 组计算结果,16 个齐齐哈尔降雪样品与同站点降水样品相比,斜率值较高(7.54),截距值较高(-3.15)。与哈尔滨站点降雨样品值对比,差距较大并且都偏高值^[6]。这和水汽来源和相变过程中的气象条件有很大关系,降雪主要集中在冬半年,降水水汽干燥,降水过程中经过了多次再蒸发,使得降水中 δ 值偏低,斜率值较高^[24]。与哈尔滨站点的差异变化则主要是受到纬度较高导致的月平均气温较低和水汽输送距离的不同^[24]。

2.2 降水中 $\delta^{18}O$ 、气温、降水量的年际变化特征及相关性分析

GNIP 监测时间段内,黑龙江地区降水中 $\delta^{18}O$ 、气温、降水量的年际变化特征如图 2 所示,其中哈尔滨站年平均气温变化范围是 4.17~10.97 °C,年降水量变化范围是 347~655 mm, $\delta^{18}O$ 的变化范围是 -8.26‰~-10.97‰。齐齐哈尔站年平均气温变化范围是 3.63~5.94 °C,年降水量变化范围是 350~705 mm, $\delta^{18}O$ 的变化范围是 -12.27‰~-17.58‰。可以看出,两监测站降水量变化不大,但年平均气温有 0.5~5 °C 差异, $\delta^{18}O$ 、 δD 均在全球降水的变化范围之内,但 $\delta^{18}O$ 、 δD 值总体偏低,且纬度越高, δ 值越低,齐齐哈尔站较哈尔滨站 δ 值偏低,体现了明显的纬度效应^[5],即重同位素随着纬度的升高而逐渐贫化的现象,这主要是瑞利分馏在温度变化和水汽输送过程的体现。

根据监测时段 2 个站点的 $\delta^{18}O$ 值与气象资料,对 $\delta^{18}O$ 与该月气温及降水量分别进行回归检验,得出 $\delta^{18}O=0.35T-16.26$, $R=0.53$, $n=80$; $\delta^{18}O=0.04P-16.04$, $R=0.19$, $n=80$ 。可见,在年际尺度上, $\delta^{18}O$ 表现出明显的温度效应,即温度是在中高纬度地区影响大气降水中稳定同位素组成的主要因素, $\delta^{18}O$ 表现为与温度正相关,随着纬度升高,相关性越明显^[4, 26];但 $\delta^{18}O$ 与降水量相关性不显著,研究表明,降

水量效应往往出现在低纬度的沿海地区, 这可能与水汽来源有关, 但在中高纬度地区, 温度效应大大掩盖了降水量效应^[18], 使得黑龙江地区 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量没有表现出显著的相关性。

为了探究年际尺度上研究区水汽相变及与气象要素的关系, 本文分别对两监测站点的不同降水类型样品与气温、降水量的相关性做回归分析. 齐齐哈尔站 32 个降雨样品与降水量和气温的相关关系为: $\delta^{18}\text{O}=0.01P-12.18$, $R=0.01$, $n=32$, $\delta^{18}\text{O}=0.39T-16.85$, $R=0.32$, $n=32$. 齐齐哈尔站 16 个降雪样品与降水量和气温的相关关系如下: $\delta^{18}\text{O}=0.20P-23.39$, $R=0.04$, $n=16$, $\delta^{18}\text{O}=0.17T-19.86$, $R=-0.03$, $n=16$. 哈尔滨站 28 个降雨样品与降水量、气温的回归分析如下: $\delta^{18}\text{O}=-0.003P-9.33$, $R=-0.03$, $n=28$; $\delta^{18}\text{O}=0.05T-10.58$, $R=-0.02$, $n=28$. 其中, 降雨和降雪样品和降水量均没有体现出相关性, 监测样品和气温的相关性也不显著, 只有齐齐哈尔站点的降雨样品和气温表现出相关性, 这可能是由于高纬度地区降雨量效应不明显, 温度效应在降雪样品中体现也不显著。

2.3 大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 、气温、降水量的季节变化及相关性分析

黑龙江地区全年内 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围是 $-26.40\text{‰}\sim-8.02\text{‰}$, 平均值为 -14.58‰ ; δD 的变化范围是 $-207.40\text{‰}\sim-62.95\text{‰}$, 平均值为 -110.35‰ , 表现出夏高冬低的季节变化特征. 其中哈尔滨站月平均气温最高月为 7 月 ($23.7\text{ }^{\circ}\text{C}$), 月平均气温最低月为 1 月 ($-18.2\text{ }^{\circ}\text{C}$), 降水量变化范围为 $3.4\sim 151.4\text{ mm}$, 分别出现在 1 月和 7 月. $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围为 $-5.88\text{‰}\sim-17.81\text{‰}$, 和月均温呈现出显著的正相关, $\delta^{18}\text{O}$ 最低值 -17.81‰ 出现在 1 月如图 4(a). 齐齐哈尔站最低月气温为 1 月 ($-18\text{ }^{\circ}\text{C}$), 月均温最高月为 7 月 ($21.9\text{ }^{\circ}\text{C}$) 和 8 月 ($21.8\text{ }^{\circ}\text{C}$), 月降水量变化范围为 $1.4\sim 175.6\text{ mm}$, 分别为 1 月和 7 月. $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围为 $-7.70\text{‰}\sim-26.42\text{‰}$, 最低 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 2 月 (-26.42‰) 和 12 月 (-24.11‰), 如图 4(b). 与哈尔滨站相比, 齐齐哈尔站的降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著偏低, 月平均气温较低, 且降水量季节变化大。

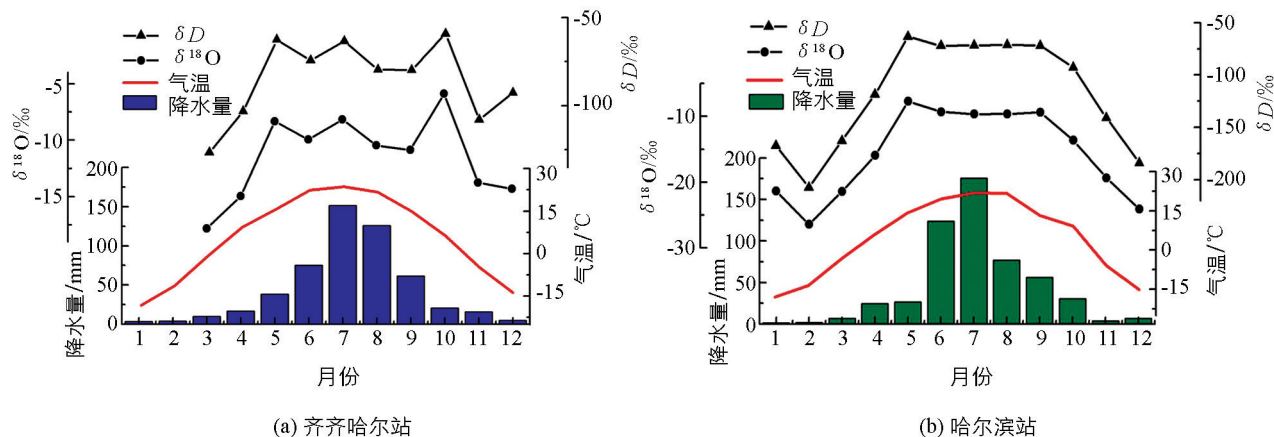


图 4 黑龙江地区齐齐哈尔站、哈尔滨站降水中稳定同位素与气温、降水量的年内季节变化

根据黑龙江地区两个站点年内 $\delta^{18}\text{O}$ 值与相关气象监测数据, 分别计算 $\delta^{18}\text{O}$ 与月均温 (T)、月降水量 (P) 的回归方程: 哈尔滨站: $\delta^{18}\text{O}=0.17T-13.09$, $R=0.27$, $n=10$; $\delta^{18}\text{O}=0.03P-13.28$, $R=0.15$, $n=10$. 齐齐哈尔站: $\delta^{18}\text{O}=0.42T-17.40$, $R=0.87$, $n=12$; $\delta^{18}\text{O}=0.08P-19.34$, $R=0.42$, $n=12$. 可以看出, 在年内尺度上, 黑龙江地区存在显著的温度效应, $\delta^{18}\text{O}$ 与气温表现出明显的正相关; 降水量效应却不显著, 但是 $\delta^{18}\text{O}$ 表现出与月降水量正相关, 即夏半年, 降水量偏多, $\delta^{18}\text{O}$ 偏高。

2.4 水汽输送与 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系

我们利用 NCEP/NCAR 逐月再分析资料计算了 1990—1991 年的夏季 (a—c)、冬季 (d—f) 逐月整层水汽输送场, 结果见图 5, 可以看出, 6—8 月, 影响我国季风区的水汽主要来源于印度洋的西南季风和太平洋的东南季风, 但影响黑龙江地区的大气降水则主要以东南季风带来的太平洋水汽为主^[27], 水汽来源于较近的海洋性气团, 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 表现为高值; 12 月至次年 2 月, 受蒙古—西伯利亚高压控制, 降水较少, 且主要是降雪为主, 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 表现为低值。

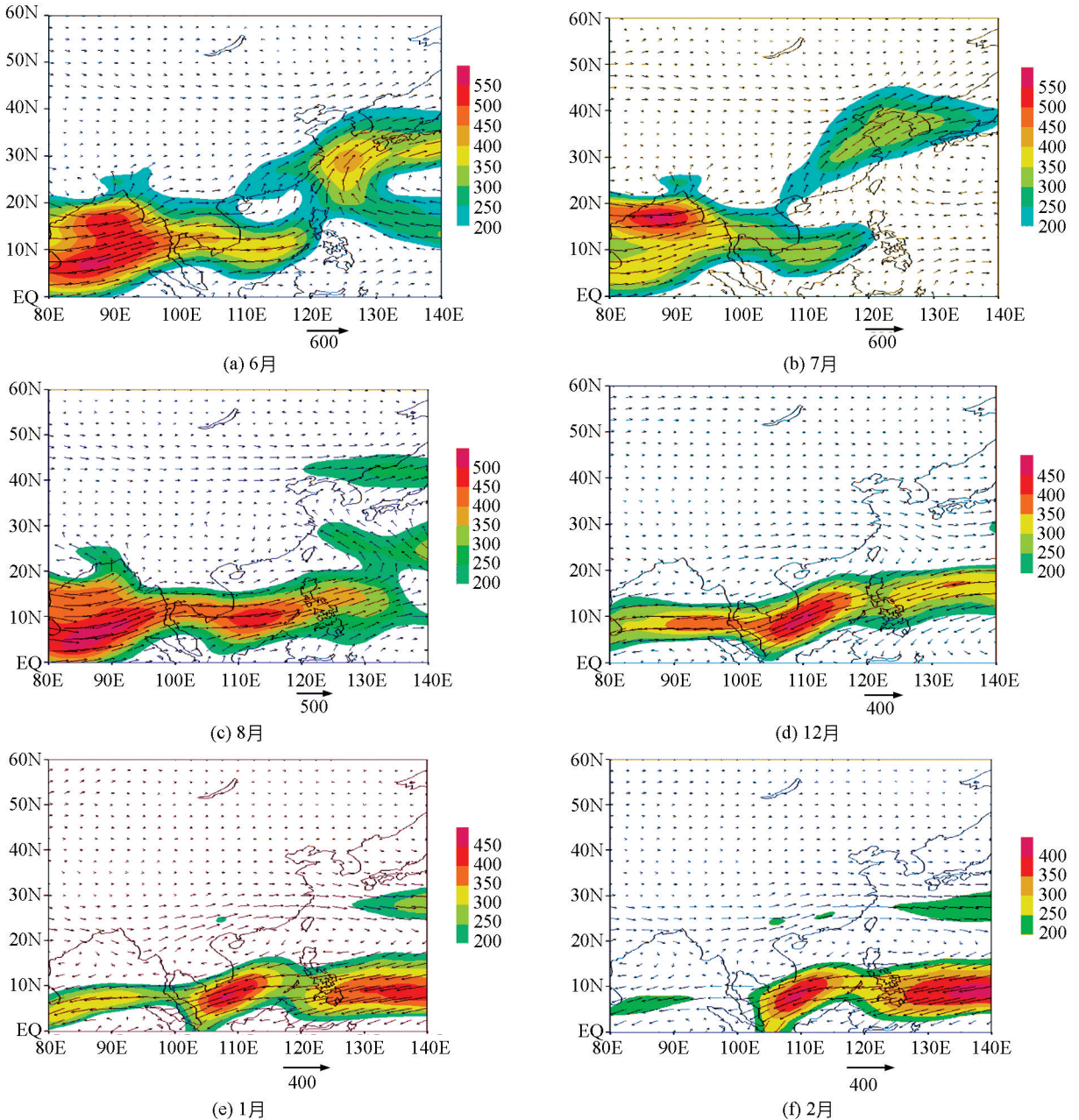


图 5 1990—1991 年夏季、冬季整层大气平均水汽通量

3 结 论

研究基于黑龙江地区 GNIP 两站点降水中稳定同位素以及美国 NECP/NCAR 逐月再分析数据, 分析了黑龙江地区年际尺度和季节尺度下降水中稳定同位素的变化特征, 计算两站点不同降水类型下 $\delta^{18}\text{O}-\delta\text{D}$ 相关性, 以及雨样、雪样中的稳定同位素效应, 并利用水汽通量模型追踪季节上影响研究区的降水气团差异, 分析了水汽输送过程中两站点间的关系, 得出以下结论:

1) 黑龙江地区大气降水线为 $\delta\text{D}=7.49\delta^{18}\text{O}-0.86$, $R=0.97$, $n=80$, 其中哈尔滨站点: $\delta\text{D}=5.52\delta^{18}\text{O}-19.42$, $R=0.83$, $n=30$, 齐齐哈尔站点: $\delta\text{D}=7.58\delta^{18}\text{O}-0.14$, $R=0.98$, $n=50$. 哈尔滨站点斜率 a 表现出较低值, 而斜率值也较低, 主要是由于哈尔滨站点较齐齐哈尔纬度偏低, 年平均气温高, 且位置更靠近海洋, 在夏半年季风影响下有更多湿润水汽输送, 反映了黑龙江地区的自然地理状况和气象条件.

2) 研究区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值总体偏低, 且纬度越高 δ 值越低, 齐齐哈尔站较哈尔滨站 δ 值偏低, 年内尺度上 $\delta^{18}\text{O}$ 表现出夏高冬低的季节变化特征. 通过分析两站点不同降水类型中 $\delta^{18}\text{O}-\delta\text{D}$ 相关性, 降雪

样品与降水样品相比, 斜率值较高(7.54), 截距值较高(-3.15), 这和水汽来源和相变过程中的气象条件有很大关系, 降雪主要集中在冬半年, 降水水汽干燥, 降水过程中经过了多次再蒸发, 使得降水中 δ 值偏低, 斜率值较高。

3) 年际尺度上, $\delta^{18}\text{O}$ 与温度线性关系显著($\delta^{18}\text{O}=0.35T-16.26$, $R=0.53$, $n=80$), 表现出明显的温度效应, 但降水量效应不显著($\delta^{18}\text{O}=0.04P-16.04$, $R=0.19$, $n=80$), 通过两监测站点的不同降水类型样品做回归分析, 发现温度效应和降水量效应均不显著。在年内尺度上, 哈尔滨站: $\delta^{18}\text{O}=0.17T-13.09$, $R=0.27$, $n=10$; $\delta^{18}\text{O}=0.03P-13.28$, $R=0.15$, $n=10$, 齐齐哈尔站: $\delta^{18}\text{O}=0.42T-17.40$, $R=0.87$, $n=12$; $\delta^{18}\text{O}=0.08P-19.34$, $R=0.42$, $n=12$, 存在显著的温度效应, $\delta^{18}\text{O}$ 与气温表现出明显的正相关; 降水量效应却不显著, 但是 $\delta^{18}\text{O}$ 表现出与月降水量正相关, 即夏半年, 降水量偏多, $\delta^{18}\text{O}$ 偏高。

4) 运用逐月再分析资料模拟水汽输送场, 结果表明, 夏季黑龙江地区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 呈现出高值, 大气降水主要来源于低纬度太平洋的暖湿水汽和局地水汽; 冬季风期间降水形式以降雪为主, $\delta^{18}\text{O}$ 值偏低, 主要是受到蒙古—西伯利亚高压和高纬度水汽及云团内水汽再蒸发的影响。

参考文献:

- [1] DANSGAARD W. Stable Isotopes in Precipitation [J]. *Tellus*, 1964, 16(4): 436—468.
- [2] 王建力, 王 丽, 何 潇, 等. 重庆地区末次冰期气候变化的石笋记录研究 [J]. *地理科学*, 2006, 26(5): 580—585.
- [3] YUAN Dao-xian, CHENG Hai, EDWARDS R L, et al. Timing, Duration, and Transitions of the Last Interglacial Asian Monsoon [J]. *Science*, 2004, 304(5670): 575—578.
- [4] DANSGAARD W. The Abundance of $\delta^{18}\text{O}$ in Atmospheric Water and Water Vapour [J]. *Tellus*, 1953, 5(4): 461—469.
- [5] 朱大运, 王建力. 青藏高原冰芯重建古气候研究进展分析 [J]. *地理科学进展*, 2013, 32(10): 1535—1544.
- [6] SMITH K L, KUSHNER P J. Linear Interference and the Initiation of Extratropical Stratosphere-Troposphere Interactions [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2012, 117(D13): 13107.
- [7] TIAN Li-de, YAO Tan-dong, SCHUSTER P F, et al. Oxygen-18 Concentrations in Recent Precipitation and Ice Cores on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D9): 4293—4302.
- [8] ZHANG Xin-ping, MASAYOSHI N, YAO T D, et al. Variations of Stable Isotopic Compositions in Precipitation on the Tibetan Plateau and Its ARegions [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2002, 45(6): 481—493.
- [9] 王建力, 何 潇, 王昕亚, 等. 重庆金佛山石笋的同位素年龄和古气候信息 [J]. *中国岩溶*, 2005, 24(4): 265—269.
- [10] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 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*, 2008, 63(1): 12—22.
- [11] LIU Jian-rong, SONG Xian-fang, SUN Xiao-min, et al. Isotopic Composition of Precipitation Over Arid Northwestern China and Its Implications for the Water Vapor Origin [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 19(2): 164—174.
- [12] YAO Tan-dong, MASSON-DELMOTTE V, GAO J, et al. A Review of Climatic Controls on $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation Over the Tibetan Plateau: Observations and Simulations [J]. *Reviews of Geophysics*, 2013, 51(4): 525—548.
- [13] YIN Chang-liang, YAO Tan-dong, TIAN Li-de, et al. Temporal Variations of $\delta^{18}\text{O}$ of Atmospheric Water Vapor at Delingha [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(7): 966—975.
- [14] ZHANG Xin-ping, LIU Jian-rong, SUN Wei-zheng, et al. Relations Between Oxygen Stable Isotopic Ratios in Precipitation and Relevant Meteorological Factors in Southwest China [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(4): 571—581.
- [15] LIU Jian-rong, SONG Xian-fang, YUAN Guo-fu, et al. Characterisycs of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation Over Eastern Monsoon China and the Water Vapor Sources [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(2): 200—211.
- [16] 王建力, 何 潇, 李 清, 等. 重庆新崖洞 4.5ka 以来气候变化的石笋微量元素记录及环境意义 [J]. *地理科学*, 2010, 30(6): 910—915.
- [17] 黄一民, 章新平, 孙 葭, 等. 长沙大气水汽、降水中稳定同位素季节变化及与水汽输送关系 [J]. *地理科学*, 2015, 35(4): 498—506.
- [18] 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.
- [19] 郑琰明, 钟 巍, 彭晓莹, 等. 粤西云浮市大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽来源的关系 [J]. *环境科学*, 2009, 30(3): 637—643.
- [20] 姚檀栋, 秦大河, 田立德, 等. 青藏高原冰芯高分辨率气候环境记录研究 [J]. *中国科技成果*, 2016(10): 44—45.
- [21] LIU Jian-rong, SONG Xian-fang, YUAN Guo-fu et al. Stable Isotopic Compositions of Precipitation in China [J]. *Tellus Series B-Chemical & Physical Meteorology*, 2014, 66(1): 39—44.

- [22] TAN Ming. Circulation Effect; Response of Precipitation $\delta^{18}\text{O}$ to the ENSO Cycle in Monsoon Regions of China [J]. *Climate Dynamics*, 2014, 42(3-4): 1067-1077.
- [23] 田立德, 姚檀栋. 青藏高原冰芯高分辨率气候环境记录研究进展 [J]. *中国科技成果*, 2015(10): 44-45.
- [24] 温艳茹, 王健力. 重庆地区大气场降水中氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系 [J]. *环境科学*, 2016, 37(7): 2462-2469.
- [25] YU Wu-sheng, MA Yao-ming, SUN Wei-zhen, et al. Climatic Significance of Delta O-18 Records from Precipitation on the Western Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(16): 2732-2741.
- [26] LI De-shuai, SUN Jian-hua, FU Shen-ming, et al. Spatiotemporal Characteristics of Hourly Precipitation Over Central Eastern China During the Warm Season of 1982 - 2012 [J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 36(8): 3148-3160.
- [27] ISHIZAKI Y, YOSHIMURA K, KANAE S, et al. Interannual Variability of H_2^{18}O in Precipitation Over the Asian Monsoon Region [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(16): 68-68.

Stable Isotope Oxygen-18 ($\delta^{18}\text{O}$) in Rainfall and Snowfall in Heilongjiang and Their Relationship with Moisture Transport

WEN Yan-ru, WANG Jian-li

School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Based on the original data from two Chinese GNIP observation stations (in Harbin and Qiqihar) and the reanalysis data of National Centers for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) of NOAA, this study investigated the variations of stable isotopes, temperature and precipitation amount in interannual and seasonal patterns, and then explained the amount effect and temperature effect of $\delta^{18}\text{O}$ in rainfall and snowfall. Using a vapor flux model and wind vector analysis to monitor the precipitation air masses in the two study areas, we analyzed the differences in water vapor transport between Harbin and Qiqihar. The results suggested that variations of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in Heilongjiang exhibited a significant seasonal variability and was generally lower than in other monsoon regions. The Local Meteoric Water Line (LMWL) of Qiqihar ($\delta D = 7.58\delta^{18}\text{O} - 0.14$, $R = 0.98$, $n = 50$) and Harbin ($\delta D = 5.52\delta^{18}\text{O} - 19.42$, $R = 0.83$, $n = 30$) were calculated. We found that the snowfall samples had a higher slope and intercept than rainfall samples, indicating an isotopic fractionation pattern induced by a non-equilibrium secondary evaporation during the process of falling, which occurred as a result of rayleigh distillation. In interannual and seasonal patterns, $\delta^{18}\text{O}$ was in a significant positive correlation with temperature ($\delta^{18}\text{O} = 0.35T - 16.26$, $R = 0.53$, $n = 80$; $\delta^{18}\text{O} = 0.17T - 13.09$, $R = 0.27$, $n = 10$; $\delta^{18}\text{O} = 0.08P - 19.34$, $R = 0.42$, $n = 12$) and in an insignificant correlation with precipitation amount. According to the wind vector field and the moisture flux vector analysis, we found that the moisture sources during summer were mainly influenced by warm watervaper of the Pacific Ocean, while the form of precipitation was mainly snowfall during winter seasons, which moisture sources were closely related to the cold waper-vaper from the Mongolia and Siberian High, westerly vapor transportation and local re-evaporation.

Key words: precipitation; $\delta^{18}\text{O}$; δD ; moisture transport; Heilongjiang

