

周慧, 章新平, 姚天次, 等. 我国暖半年降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽输送[J]. 第四纪研究, 2018, 38(2):314-326.

Zhou Hui, Zhang Xinping, Yao Tianci, et al. $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and water vapor transfer in the summer half year in China[J]. Quaternary Sciences, 2018, 38(2):314-326.

doi:10.11928/j.issn.1001-7410.2018.02.04

文章编号: 1001-7410(2018)02-314-13

我国暖半年降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽输送*

周慧^{1,2}, 章新平^{1,2}, 姚天次^{1,2}, 罗紫东^{1,2}, 华明权^{1,2}, 孙惠惠^{1,2}

(1. 湖南师范大学资源与环境科学学院, 湖南 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, 湖南 长沙 410081)

摘要: 利用 GNIP 提供的我国 32 个站 1961~2015 年暖半年(4~9 月)逐月降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 、NOAA 提供的 NCEP/NCAR 月平均再分析资料以及实测的月降水量(P)数据, 分析了各站点的 P、降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 分别与我国暖半年 4 条水汽通道的水汽输送强度(\bar{Q})之间的相关关系, 并对 6 个代表站 $\delta^{18}\text{O}$ 与其所在格点不同风向的水汽输送比例之间的关系进行了讨论和比较。结果表明, 与台站降水量相比, 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 可以更加明确地指示影响该站点的水汽通道和水汽输送的变化。 $\delta^{18}\text{O}$ 与西南通道 \bar{Q} 具有显著相关性的站点数最多, 达 18 个, 占总站点数的 56.3%, 这些站点主要位于华北、长江沿线及其以南地区; 受东南通道影响的站点集中分布于长江以南地区; 有 5 个站点的 $\delta^{18}\text{O}$ 与西北通道 \bar{Q} 的相关关系通过了 0.05 的信度检验; 与南海通道 \bar{Q} 密切相关的站点数最少, 仅有 4 个。不同来向的水汽输送对站点降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响差异显著, 平均而言, 西风水汽输送比例每增加 1%, 拉萨站 $\delta^{18}\text{O}$ 值将增加 0.22‰, 增幅高于昆明站的 0.10‰ 和武汉站的 0.09‰。南风水汽输送比例每增加 1%, 武汉、拉萨站的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别降低 0.15‰ 和 0.16‰, 降幅均高于昆明站的 0.09‰。天津和福州站降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 分别仅与南风、东风水汽输送比例的关系最为密切, 相关系数分别为 -0.57 和 -0.58。兰州站 $\delta^{18}\text{O}$ 与经(纬)向的水汽输送比例之间均不存在显著相关性。

关键词: 暖半年(4~9 月); 降水; 氧稳定同位素; 水汽通道; 水汽输送

中图分类号: K878, P92

文献标识码: A

0 引言

局地降水中的氢氧稳定同位素比率(δD 、 $\delta^{18}\text{O}$)主要受水汽来源^[1-5]、水汽运移过程^[6-9]以及区域气象条件的影响^[10-11]。通过对降水中稳定同位素比率的时空差异的分析, 能够获得包括大气温度、降水量、局地蒸发量、水汽输送路径和降水区与水汽源区的距离等诸多环境信息^[12-14], 同时也有助于了解不同地理区域的水汽来源^[15]。通常认为, 由西南季风携带的印度洋水汽、由东南季风带来的西太平洋水汽以及经由中纬度西风带送入我国的水汽是影响我国降水中稳定同位素变化的 3 个主要水汽来源, 且它们对降水中稳定同位素组成的影响各不相同^[15-17]。

以往的研究曾利用降水中过量氘($d = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$)的变化来追踪季风区降水的水汽来源^[18-20]。

由于过量氘主要受控于水汽源区的大气相对湿度、海水表面温度、风速及含盐度等^[21], 因而成为示踪水汽源区的一个重要参数。但季风水循环系统本身存在着复杂性和多变性, 仅仅依靠过量氘很难准确地追踪季风水汽来源。也有学者利用混合单粒子拉格朗日积分轨迹(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory, 简称 HYSPLIT)模型再现气块在一定时间内的运动路径, 借此来分析降水云团的水汽来源和输送过程^[22-25]。然而, 模拟结果很大程度上取决于模型的时空分辨率和模式参数化的有效性。还有学者根据稳定同位素瑞利分馏规律, 假设季风区可降水量/源区可降水量的比值 f 与降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 之间存在负相关关系, 认为相关系数为负的区域即为该站点降水的水汽源区^[26]。但该方法忽略了同位素分馏系数对降水中稳定同位素值的影响, 也未考虑水汽输送过程中外来水汽的加入混合或局

2017-06-29 收稿, 2017-10-22 收修改稿

* 国家自然科学基金项目(批准号:41571021)和湖南省重点学科建设项目(批准号:20160001)共同资助

第一作者简介: 周慧, 女, 23 岁, 硕士研究生, 自然地理学专业, E-mail: zhxy940602@163.com

通讯作者: 章新平, E-mail: zxp@hunnu.edu.cn

地水汽对降水有很大贡献时的情形,因而这一方法适用于受季风影响显著的内陆地区,而对“温度效应”显著的地区不适用,同时也无法避免“伪”水汽源区的存在。

随着对降水水汽来源研究的深入,学者们开始将降水中稳定同位素的变化与大尺度水汽输送相联系。柳鉴容等^[27]通过插值分析,得到我国南部地区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的等值线图,并发现 $\delta^{18}\text{O}$ 等值线的分布情况与夏季影响我国南部的3条季风路径基本一致,说明降水中稳定同位素可以作为季风降水水汽的运动路径反演的有力证据;宋献方等^[28]将北京22场连续降水的水汽输送划分为5种类型,发现其中14场连续降水的水汽输送类型发生了变化,而这一变化能被降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和过量氘值较好地反映出来;李泽霞等^[29]探讨了不同方向的水汽输送与降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系,指出德令哈1992~2001年降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的年降水量加权平均值与由东风、西风输送的水汽通量占总水汽通量的比值具有显著相关性,其中东风和西风水汽输送量每增加1%,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别升高0.37‰和下降0.27‰;田立德等^[30]计算了2001~2002年青藏高原东部玉树在500 hPa高度上的经向和纬向格点水汽通量,并与降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值进行比较,发现该地区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与经向水汽输送的变化存在直接的相关性,在夏季西南季风盛行期间,玉树降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 常出现极低值,而在夏季风活动间歇期受偏北方向的大陆性水汽输送或当地来源水汽的影响, $\delta^{18}\text{O}$ 表现为极高值。总体来看,前人对于水汽输送与降水中稳定同位素的研究多是对单一或某区域的少数几个站点进行的,代表性难免有限,且多为定性分析,量化的研究相对较少。我国大部分地区地处东亚季风区,暖半年水汽输送量大且来源复杂,本研究通过分析位于我国的GNIP站点暖半年降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与4条水汽通道水汽输送强度之间的相关关系,拟在空间上给出各水汽通道的影响范围,并利用降水中氧稳定同位素的丰度来反演不同源区水汽输送强度的变化,最后通过计算代表性站点所在格点的水汽通量进一步分析不同风向的水汽输送比例对降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响,研究结果将有助于明晰稳定同位素在示踪水汽来源方面的作用。

1 数据与方法

我国32个站的基本信息见表1。每个站点实测的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 记录及相应的气温(T)和降水量(P)

表1 我国32个GNIP站基本信息表

Table 1 Summary of the basic information for the 32 GNIP stations in China

站点	纬度 (°N)	经度 (°E)	海拔 (m)	$\delta^{18}\text{O}$ 记录数* (个)	取样时间 (年)
包头	40.67	109.85	1067	38	1986~1992
长春	43.90	125.22	237	14	1999~2001
长沙	28.20	113.07	37	29	1988~1992
成都	30.67	104.02	506	52	1986~1998
重庆	29.62	106.60	192	4	1992
福州	26.08	119.28	16	37	1986~1992
广州	23.13	113.32	7	21	1986~1989
桂林	25.07	110.08	170	48	1983~1990
贵阳	26.58	106.72	1071	30	1988~1992
哈尔滨	45.68	126.62	172	29	1986~1997
海口	20.03	110.35	15	37	1988~2000
和田	37.13	79.93	1375	27	1988~1992
香港	22.32	114.17	66	278	1961~2015
锦州	41.13	121.10	66	10	1987~1989
昆明	25.02	102.68	1892	86	1986~2003
兰州	36.05	103.88	1517	28	1985~1999
拉萨	29.70	91.13	3649	34	1986~1992
柳州	24.35	109.40	97	28	1988~1992
南京	32.18	118.18	26	33	1987~1992
平凉	35.53	106.70	1570	6	2003~2004
齐齐哈尔	47.38	123.92	147	28	1988~1992
石家庄	38.03	114.42	80	87	1985~2003
太原	37.78	112.55	778	14	1986~1988
天津	39.10	117.17	3	40	1988~2001
武汉	30.62	114.13	23	27	1986~1998
乌鲁木齐	43.78	87.62	918	68	1986~2003
西安	34.30	108.93	397	36	1985~1992
烟台	37.53	121.40	47	30	1986~1991
银川	38.48	106.22	1112	19	1988~2000
张掖	38.93	100.43	1483	51	1986~2003
郑州	34.72	113.65	110	32	1985~1992
遵义	27.70	106.88	844	37	1986~1992

*表示取样期间暖半年的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录数

的逐月数据下载自国际原子能机构与世界气象组织联合创建的全球降水稳定同位素监测网GNIP(Global Network of Isotopes in Precipitation)。由于GNIP提供的各站点月降水量的时间长度普遍较短,故在分析降水量与水汽输送的关系时,除香港站外,其余31个站点的逐月降水量均下载自中国气象科学数据共享服务网,时间序列为1961~2015年。根据我国的气候特点,将4~9月定义为暖半年,以下的分析均是基于这一时间尺度。

在求取整层的纬向水汽通量 Q_v 、经向水汽通量 Q_e 及经纬向合成的水汽通量 Q 时,采用了美国

NCEP/NCAR 提供的 1961~2015 年 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 月平均再分析资料, 包括风场(纬向风分量、经向风分量, 垂直方向共有 17 层)、比湿场(垂直方向共有 8 层)和地面气压场。水汽通量的计算公式如下:

$$Q_u = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} u q dp \quad (1)$$

$$Q_v = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} v q dp \quad (2)$$

$$Q = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} (u, v) q dp \quad (3)$$

公式 (1)~(3) 中, u 、 v 分别为各层大气的纬向、经向风分量; q 为比湿; p_s 为地面气压; p_t 为气柱顶气压, 本文取 300 hPa; g 是重力加速度。

2 暖半年我国的整层水汽输送特征

图 1 给出了东亚季风区 1961~2015 年暖半年平均的纬向、经向及经纬向矢量合成的整层水汽输送通量的分布。由图 1a 可知, 在暖半年, 东亚季风区较强的纬向水汽输送路径主要有 3 条: 第一条自西向东经阿拉伯海、孟加拉湾到达我国南海南部地区, 它由南北两个分支组成, 北支位于 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}N$ 之间, 南支横亘在 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}N$ 之间(图中箭头所示);

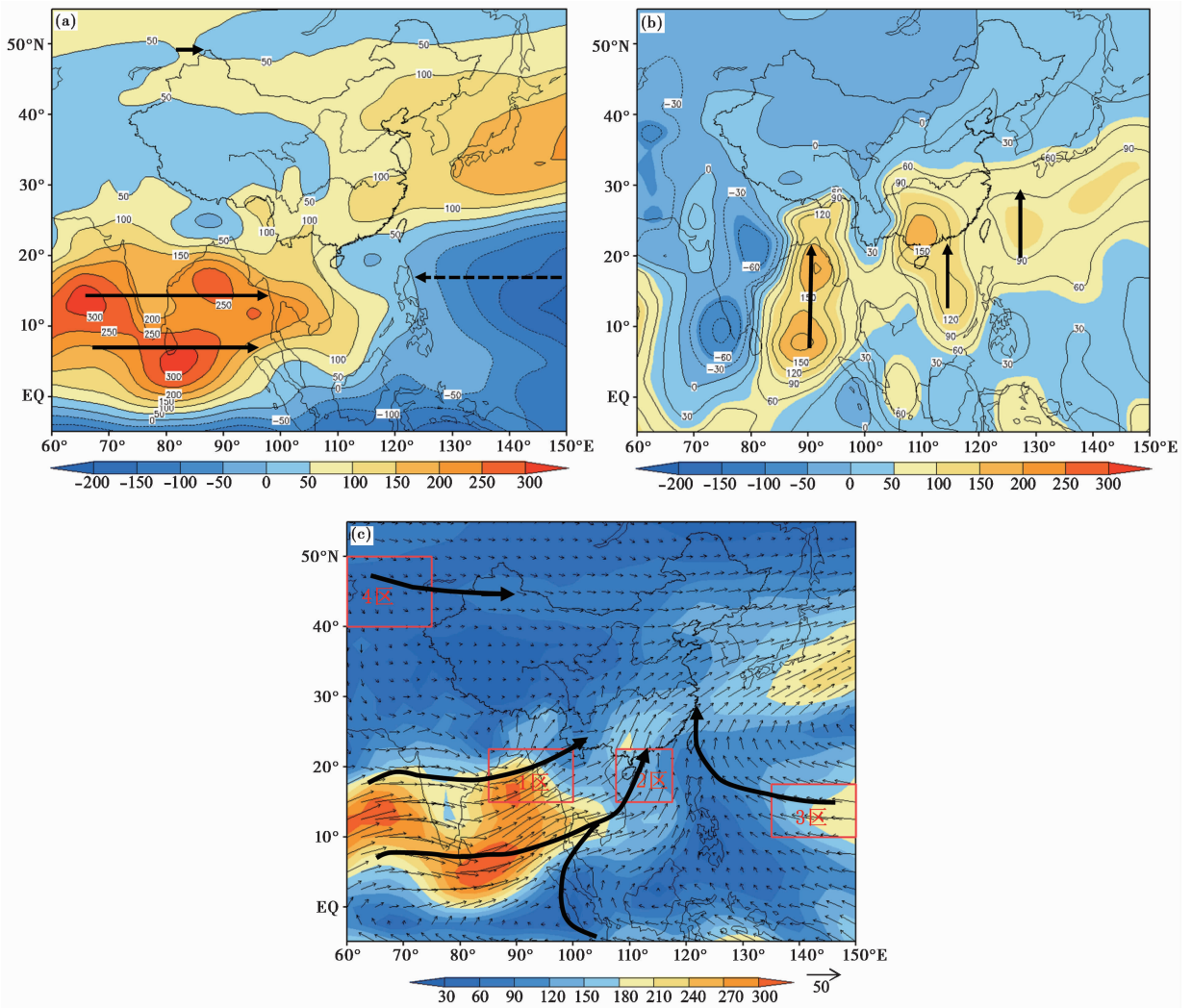


图 1 1961~2015 年我国暖半年平均整层水汽通量的空间分布(单位: $kg/m/s$)

(a) 纬向通量(Q_u); (b) 经向通量(Q_v); (c) 合成水汽通量(Q)

定义水汽自西向东、自南向北输送为正, 并用实线箭头表示, 反之为负并用虚线箭头表示

Fig. 1 Spatial distribution of mean summer half year vertical-integrated composite water vapor flux during 1961~2015 (unit: $kg/m/s$) for zonal water vapor flux (a), meridional water vapor flux (b) and water vapor flux vectors (c). The solid arrows indicate water vapor transport from west to east or from south to north, which are the positive directions, while the dotted arrow implies the opposite directions of water vapor transport

第二条是始于西太平洋副高南侧, 穿过菲律宾向西的东风输送; 第三条是位于 40°N 以北的西风水汽输送, 但该方向的水汽输送明显偏弱。在经向上 (图 1b), 东亚季风区暖半年在 30°N 以南存在 3 个正的高值区, 代表 3 支向北的水汽输送路径, 分别从孟加拉湾、南海及西太平洋副高西侧北上影响我国大陆, 其中孟加拉湾来向的水汽输送最强, 沿西太副高的水汽输送最弱。根据图 1a、1b 以及合成的水汽通量结果 (图 1c), 暖半年影响我国大陆的水汽输送通道主要有 4 条: 第一条沿着南亚季风位于 $10^\circ\sim 15^\circ\text{N}$ 之间的这一分支向东流经孟加拉湾和中南半岛到达我国西南边界, 该通道即体现南亚季风的西南通道; 第二条由南亚季风的南支与越赤道气流 (105°E 附近) 在南海南部汇合后向北到达我国南部边界, 该通道即反映南海季风的南海通道; 第三条携西太平洋水汽到达我国东南边界, 该通道即体现副热带季风的东南通道; 第四条将水汽从西北边境送入我国, 该通道即反映中纬度西风带的西北通道。以上 4 条通道的水汽到达我国南部和西北边界后, 继续向我国境内移动。

为了定量研究各个来向的水汽输送特征, 针对 4 条水汽通道分别选取计算区域。这里参照田红等^[31]的处理办法, 将各通道上水汽输送最强、水汽输送方向基本一致且水汽输送方差较大的区域作为相应通道的关键区。由此确定的 4 个关键区分别为: 西南通道 ($15^\circ\sim 22.5^\circ\text{N}$, $85^\circ\sim 100^\circ\text{E}$)、南海通道 ($15^\circ\sim 22.5^\circ\text{N}$, $107.5^\circ\sim 117.5^\circ\text{E}$)、东南通道 ($10^\circ\sim 17.5^\circ\text{N}$, $135^\circ\sim 150^\circ\text{E}$) 和西北通道 ($40^\circ\sim 50^\circ\text{N}$, $60^\circ\sim 75^\circ\text{E}$), 见图 1c 中 1~4 区。分别计算 4 个区域 1961~2015 年 4~9 月逐月的合成水汽通量的区域平均值, 并将它定义为 4 个通道相应月份的水汽输送强度 (\bar{Q})。 \bar{Q} 越大, 代表该通道的水汽输送越强; 反之, 则越弱。表 2 给出了暖半年 4 个通道水汽输送强度的多年月平均值及均方差, 平均来

表 2 1961~2015 年 4~9 月 4 条通道水汽输送强度的多年月平均值及均方差

Table 2 The multi-year monthly average and mean square error of the intensity of water vapor transfer from 4 vapor inflow corridors in the summer half year during 1961~2015

水汽通道	平均值 (kg/m/s)	均方差 (kg/m/s)
西南(SW)	215.96	94.20
南海(SCS)	170.64	57.92
东南(SE)	198.90	67.25
西北(NW)	57.10	20.58

看, 西南通道水汽输送最强, 东南通道次之, 再次是南海通道; 而在月际波动上也是如此, 西北通道的强度和逐月变化都最小。

3 水汽通道对我国降水量及降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响

3.1 水汽输送强度与降水的关系

为了了解 4 条水汽通道对我国不同地区降水的影响, 分别计算了 32 个 GNIP 站 1961~2015 年暖半年逐月降水量与各通道逐月水汽输送强度间的相关关系, 结果如图 2 所示。就各通道来看, 西南通道的影响范围最广, 除 5 个站点外, 其余站点的降水量均与该通道的 \bar{Q} 呈显著的正相关关系。南海通道的影响范围主要包括长江以南、华北以及东北地区, 位于黄河沿线的 5 个站点受南海通道水汽的影响较小。与东南通道的 \bar{Q} 具有显著相关性的站点数共 23 个, 这些站点散布于我国不同地区。与西北通道 \bar{Q} 的相关系数通过 0.05 信度检验的站点数最少, 有 21 个, 且这些站点集中分布于长江以北地区。比较同一站点的降水量与 4 条通道水汽输送强度之间的相关系数可以发现, 各站点与西南、南海和西北通道往往具有正相关关系, 而与东南通道多呈负相关关系, 这说明西南、南海及西北通道的水汽输送越强, 处在其影响范围内的站点的降水量就越多, 而东南通道水汽输送的增强则不然。

为了综合分析我国各站点暖半年降水受水汽通道的影响情况, 基于图 2, 统计了影响各站点的水汽通道的数量 (表格略)。根据统计, 共有 14 个站的降水量同时与 4 条通道的 \bar{Q} 具有显著相关性, 除武汉站外, 这些站点主要分布在我国东北、华北、西北及西南地区。同时受 3 个和两个通道影响的站点数分别有 10 个和 4 个。相比之下, 重庆、西安和福州站的降水量只与单一通道的水汽输送强度达到了显著相关性。全部站点中, 降水量与 4 个通道的 \bar{Q} 都缺少关联的仅有乌鲁木齐站, 这可能是由于该站深居内陆, 经向的水汽输送通常较弱, 而纬向的水汽输送量本来就比较小。此外, 该地区强烈的蒸发及局地再循环水汽的影响也不容忽视, 因而在分析乌鲁木齐站的降水量时仅考虑其与单一通道水汽输送强度的关系是并不充分的。

3.2 水汽输送强度与降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系

我国 32 个 GNIP 站暖半年逐月降水量与各通道

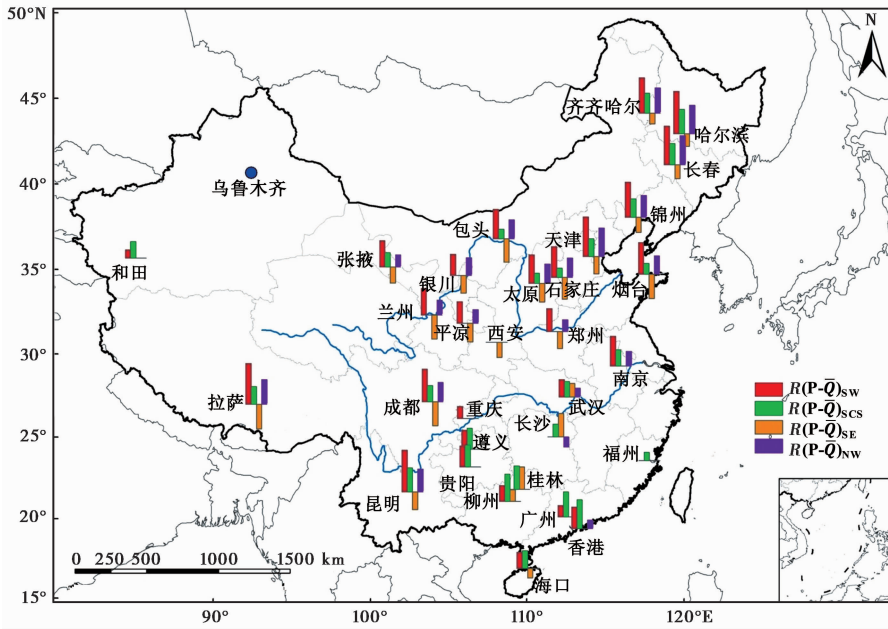


图2 我国32个GNIP站暖半年逐月降水量(P)与4条通道逐月水汽输送强度(Q)的相关系数(R)的空间分布。图中柱体表示通过0.05信度检验的相关系数及其数值大小,蓝色圆点代表与4条通道 Q 的相关系数均未通过显著性检验的站点。
 Fig. 2 Spatial distribution of correlation coefficients between monthly precipitation amount at 32 stations and the monthly intensity of water vapor transfer from 4 vapor inflow corridors in the summer half year in China. The columns denote the values of the correlation coefficient which are statistically significant ($p < 0.05$), and the blue circles indicate non-significant relationships ($p > 0.05$)

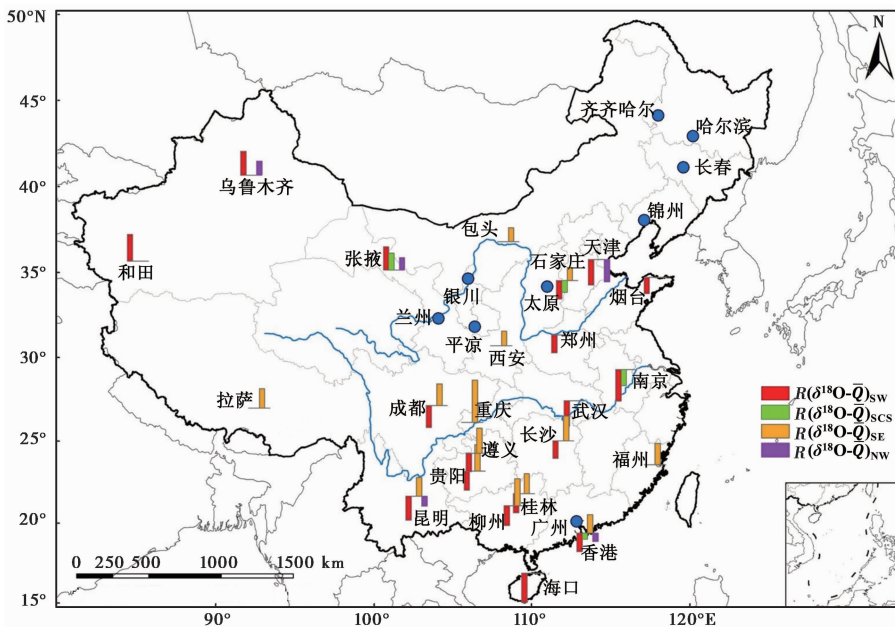


图3 我国32个GNIP站暖半年逐月降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与4条通道逐月水汽输送强度(Q)的相关系数(R)的空间分布(说明同图2)。
 Fig. 3 Spatial distribution of correlation coefficients between monthly $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation at 32 stations and the monthly intensity of water vapor transfer from 4 vapor inflow corridors in the summer half year in China

逐月水汽输送强度间的相关关系表明(图2):局地降水量的变化在一定程度上可指示不同通道水汽输送的强弱,但由于绝大多数站点并不仅受单一水汽通道的影响,因而仅利用降水量指标来反映水汽输

送的变化具有一定的局限性。图3给出了各站点暖半年逐月降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 分别与4条水汽通道逐月 Q 的相关分布。由图3可知,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与西南通道 Q 具有显著相关性的站点数最多,达18个,占总站点数

的 56.3%, 这些站点主要位于华北、长江沿线及其以南地区, 且所得相关系数均为负值。东南通道的影响范围稍小于西南通道, 受其影响的站点集中分布于长江以南地区, 且所得相关系数均为正值。至于西北通道, 只有 5 个站点的降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与该通道 \bar{Q} 的相关关系通过了 0.05 的信度检验。与南海通道 \bar{Q} 密切相关的站点数最少, 仅有 4 个。针对多数站点 $\delta^{18}\text{O}$ 与西南通道的 \bar{Q} 呈负相关关系, 而与东南通道表现为正相关性这一现象, 一种可能的解释是: 夏季影响我国的水汽包括由西南季风输送的远源印度洋水汽和由西太平洋副热带高压脊线西伸而引向中国大陆的近源太平洋水汽, 前者由于水汽输送量大且输送距离远, 稳定同位素因不断淋洗而逐渐贫化; 相对而言, 来自西太平洋的水汽输送量大且输送距离短, 故降水中稳定同位素相对富集^[32]。

进一步统计发现, 全部站点中, $\delta^{18}\text{O}$ 与 4 条通道的 \bar{Q} 均具有显著相关性的只有香港站。昆明、石家庄和张掖站同时受 3 个通道的影响, 但昆明和石家庄站与西南及东南通道 \bar{Q} 的相关性更强, 而张掖站则与西南和南海通道具有更显著的相关关系。受两个和单一水汽通道影响的站点数分别有 9 个和 10 个。但也有 9 个站点 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化与 4 条通道 \bar{Q} 的变化都无显著相关性, 这些站点中, 除太原和广州站外, 其他站点(兰州、平凉、银川、齐齐哈尔、哈尔滨、长春及锦州站)都位于我国西北及东北地区。

比较影响各站点的降水量和降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的水汽通道的数量发现, 降水量受两个及以上通道影响的站点数多达 28 个, 且受两个通道影响时所得相关系数均为正值。 $\delta^{18}\text{O}$ 受两个及以上通道影响的站点数仅有 13 个, 且在受到两个通道影响的 9 个站点中, 有 6 个站点(长沙、成都、贵阳、遵义、桂林和柳州站)与西南通道的 \bar{Q} 呈显著负相关关系, 而与东南通道表现为显著的正相关性。显然, 同降水量相比, 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 可以更加明确地指示影响该站点的水汽输送的变化。

3.3 不同类别站点水汽输送的差异

为了进一步探讨我国各站点降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与不同通道 \bar{Q} 之间的关系, 在剔除了 $\delta^{18}\text{O}$ 的记录数小于 20 条的站点的基础上, 对余下的 26 个站点进行了分类处理。分类主要依据暖半年各月降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与 4 条通道 \bar{Q} 间的相关系数、各站点 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节差(4~9 月与 10 月~翌年 3 月的降水量加权平均 $\delta^{18}\text{O}$ 值之差)以及站点的同位素环境效应(温度效应、降水量

效应), 分类结果见表 3。

总体而言, 可将 26 个站点分为 I 和 II 两类。第 I 类站点暖半年各月降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 均与西南通道水汽输送强度表现为负相关关系, 而与东南通道呈现为正相关性, 且其中有 70% 的站点具有显著的负温度效应, 有 65% 的站点表现出显著的降水量效应, 季节差有 75% 的站点为负值。第 I 类站点又可分为 5 个子类。第 I-1 类站点 $\delta^{18}\text{O}$ 与西南及东南通道 \bar{Q} 的相关系数均明显高于与南海及西北通道的相关系数。在空间分布上, 它们主要位于我国西南、华中及华北地区(图 4)。这些站点与西南及东南通道 \bar{Q} 的相关性表明: 暖半年降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的高值可能指示了同期的西南季风环流偏弱而东南通道的水汽输送偏强。第 I-2 类站点 $\delta^{18}\text{O}$ 均与西南通道 \bar{Q} 呈显著的负相关关系(相关系数的绝对值最大), 与南海通道相关系数的绝对值次之, 同时与东南通道表现为正相关性。该类站点暖半年降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的高值往往指示着同期的西南和(或)南海通道的水汽输送偏弱而西太平洋的水汽输送偏强。第 I-3 类站点仅包含包头和拉萨站, 这两个站点 $\delta^{18}\text{O}$ 均与东南通道的 \bar{Q} 呈显著的正相关关系, 与西北通道的负相关性稍强于西南通道, 说明该类别站点暖半年降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 更多地受东南及西北通道的影响。第 I-4 类天津站, 该站 $\delta^{18}\text{O}$ 与西南及西北通道 \bar{Q} 呈显著的负相关性, 而与东南通道呈正相关关系, 该站的季节差也是所有站点中最小的。第 I-5 类福州站的 $\delta^{18}\text{O}$ 主要受东南、南海及西南通道水汽输送的影响。第 II 类站点暖半年各月降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与西南通道 \bar{Q} 呈正相关关系, 而与东南通道显示为负相关性, 同时有 67% 的站点具有显著的温度效应, 除乌鲁木齐站外, 其余站点均无降水量效应, 且有 83% 的站点季节差为正值。第 II 类站点主要分布在我国西北及东北地区, 由于在空间上距离西南及东南这两个主要的水汽输送通道较远, 水汽在沿途经历了冷凝、混合等一系列复杂的变化, 因而暖半年降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与西南及东南通道水汽输送强度的相关性与第 I 类站点完全相反, 即这类站点暖半年 $\delta^{18}\text{O}$ 的高值常常是发生在同期西南通道水汽输送偏强而东南通道水汽输送偏弱时。

3.4 代表站暖半年降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽输送的关系

上述对于各站点暖半年各月降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与 4 条通道水汽输送强度关系的分析是基于大尺度环流进行的, 为了更加细致地分析实际到达每个站点的水

表 3 分类依据及各类别站点信息

Table 3 Classification basis and station information in different categories

类别	站点	$R(\delta^{18}\text{O}-\bar{Q})_{\text{SW}}$	$R(\delta^{18}\text{O}-\bar{Q})_{\text{SCS}}$	$R(\delta^{18}\text{O}-\bar{Q})_{\text{SE}}$	$R(\delta^{18}\text{O}-\bar{Q})_{\text{NW}}$	季节差(‰)	$R(\delta^{18}\text{O}-T)$	$R(\delta^{18}\text{O}-P)$
I-1	石家庄	-0.42		0.29		0.71	-0.41	-0.42
	郑州	-0.40		0.20*		-0.26	-0.42	-0.51
	西安	-0.21*		0.33		0.94	-0.28*	-0.38
	成都	-0.49		0.49		-3.74	-0.35	-0.63
	长沙	-0.39		0.56		-1.68	-0.61	0.07*
	遵义	-0.41		0.57		-2.71	-0.55	-0.34
	贵阳	-0.43		0.60		-1.79	-0.61	-0.32*
	桂林	-0.43		0.45		-2.52	-0.72	0.15*
	昆明	-0.54		0.42		-1.79	-0.29	-0.56
	柳州	-0.45		0.61		-3.16	-0.75	-0.24*
	香港	-0.41		0.42		-2.00	-0.59	-0.43
I-2	烟台	-0.37	-0.20*	0.11*		-0.14	-0.34*	-0.44
	南京	-0.72	-0.36	0.32*		-1.52	-0.59	-0.57
	武汉	-0.57	-0.31*	0.27*		-0.73	-0.53	-0.35*
	广州	-0.41*	-0.37*	0.29*		-1.20	-0.42*	-0.36*
	海口	-0.67	-0.28*	0.21*		-2.61	-0.63	-0.06*
	包头			0.32	-0.22*	3.59	-0.21*	-0.50
I-3	拉萨			0.44	-0.17*	3.85	-0.08*	-0.50
I-4	天津	-0.57		0.27*	-0.50	0.09	-0.58	-0.66
I-5	福州	-0.08*	0.15*	0.49		-1.91	-0.29*	-0.50
II	哈尔滨	0.23*		-0.08*		-0.91	0.35*	0.00*
	和田	0.61		-0.32*		12.98	0.70	-0.14*
	兰州	0.23*		-0.36*		3.45	0.35*	0.14*
	齐齐哈尔	0.19*		-0.33*		6.89	0.50	0.06*
	乌鲁木齐	0.54		-0.02*		8.58	0.61	-0.39
	张掖	0.53		-0.17*		8.49	0.56	0.07*

* 表示相关系数未通过 0.05 的置信度检验

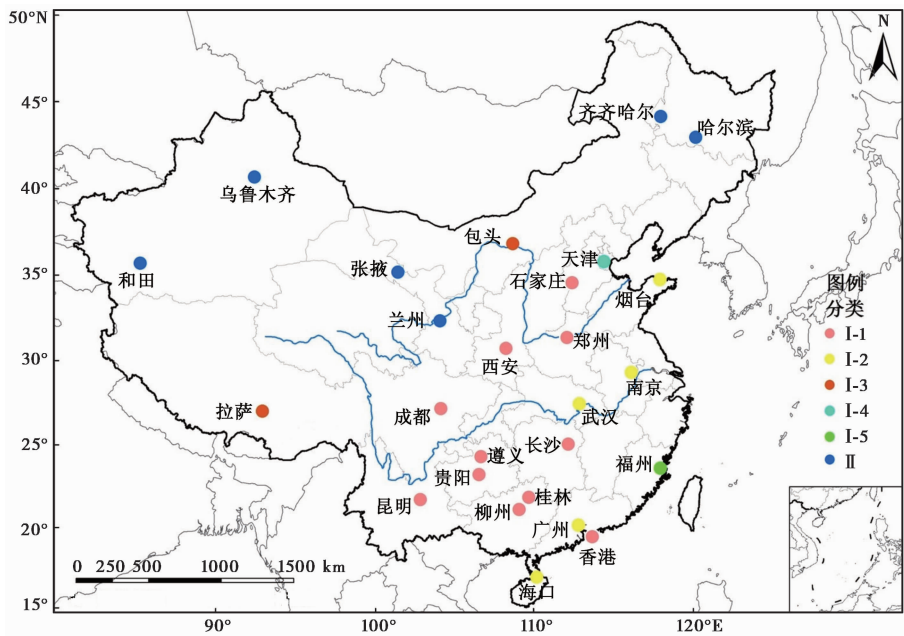


图 4 $\delta^{18}\text{O}$ 记录数大于 20 条的站点分类结果

Fig. 4 Classification result for stations with more than 20 $\delta^{18}\text{O}$ data records

汽输送情况,有必要在更小的空间尺度上展开进一步的研究。因此,在对站点分类的基础上,从每一类别的站点中各选出一个代表站。代表站选择的依据是:有相对较长的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录且入选的全部站点在空间分布上尽可能地均匀。共选出了昆明、武汉、拉萨、天津、福州和兰州这 6 个站点,分别作为第 I-1 至 I-5 类及第 II 类站点的代表站。利用 NCEP/NCAR 的月平均再分析数据,计算了各代表站整层的格点水汽通量 (Q)。图 5 和 6 分别给出了 6 个代表站逐年 4~9 月经向和纬向的格点水汽输送

通量,以及对应的降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 随时间的变化。

从经向格点水汽通量(图 5)的变化可以看出,暖半年南风 and 北风交替为 代表站所在地区提供水汽。其中昆明、拉萨、天津及兰州站经向水汽输送通量值的大小较为接近,但与武汉及福州站相比,它们的值明显偏小。在经向水汽通量的时间分布上,武汉、天津、福州和兰州站的最大值多出现在 6 月、7 月,拉萨站常出现在 9 月;武汉和拉萨站的最小值多出现在 4 月、5 月,福州站往往出现在 8 月,而天津及兰州站最小值出现的时间相对不稳

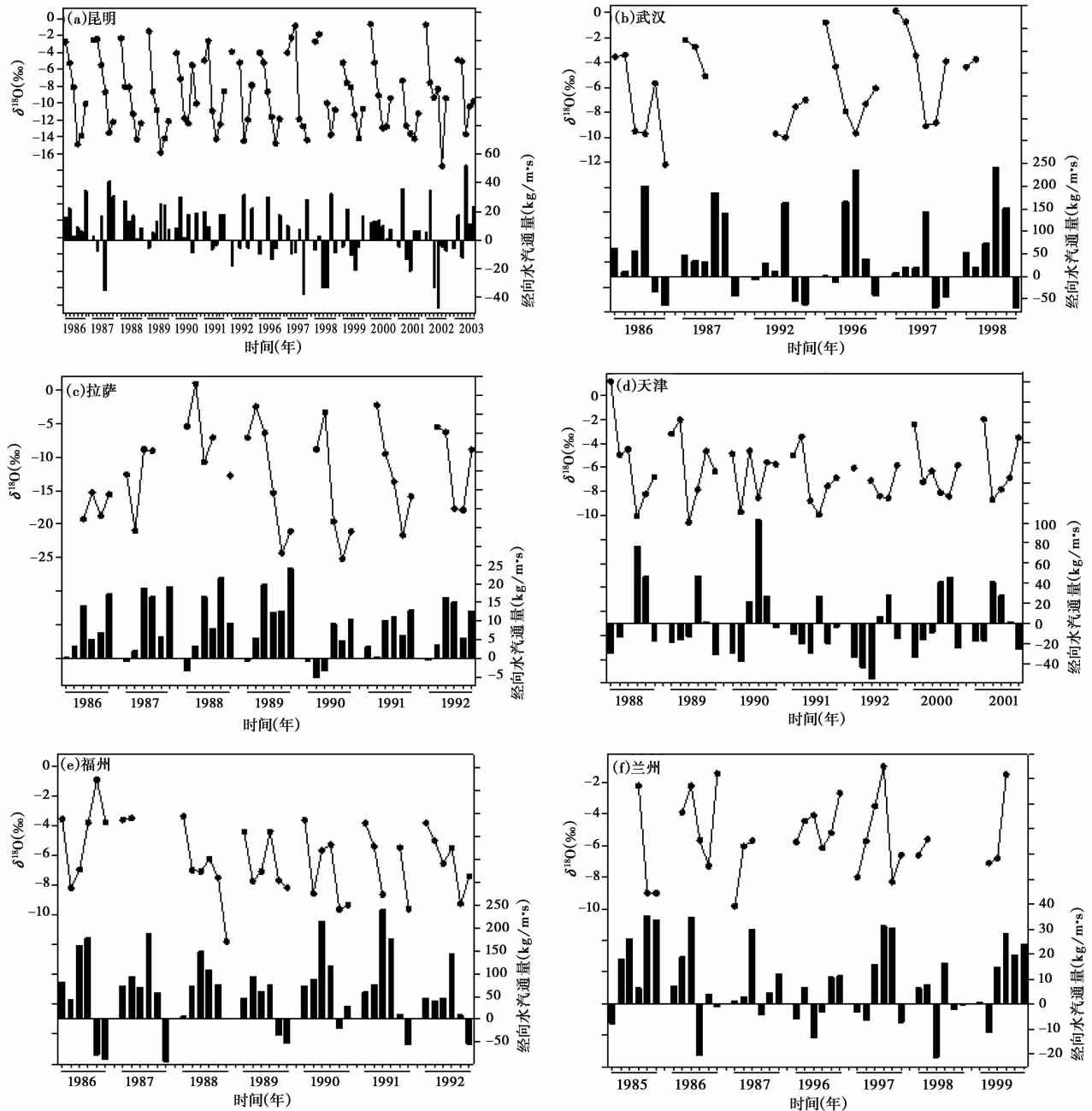


图 5 6 个代表站暖半年降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和经向水汽通量 (Q_y) 的逐月变化

Fig. 5 Monthly variations of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and meridional water vapor flux for 6 representative stations in the summer half year

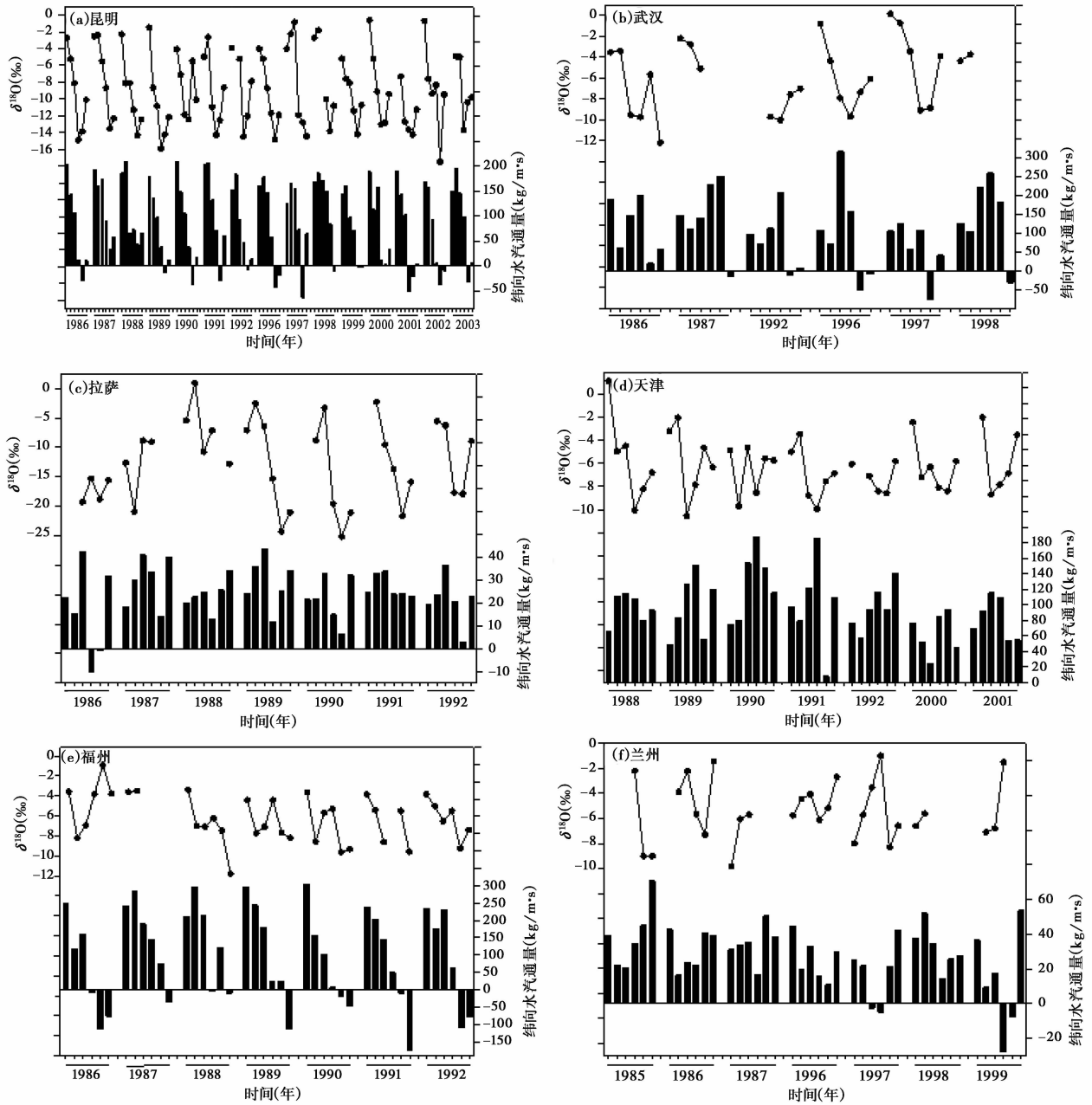


图 6 6 个代表站暖半年降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和纬向水汽通量 (Q_n) 的逐月变化

Fig. 6 Monthly variations of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and zonal water vapor flux for 6 representative stations in the summer half year

定, 昆明站的最大值和最小值出现的时间变率均较大。由于多数站点对降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的监测活动并不连续, 故除昆明和拉萨站暖半年 $\delta^{18}\text{O}$ 有明显且相似的季节变化特征外, 其余站点均未体现出。

纬向格点水汽通量的结果(图 6)显示, 暖半年 6 个代表站均以西风水汽输送为主, 拉萨和天津站几乎没有东风的水汽输送。相对而言, 昆明和福州站暖半年来自东风的水汽输送较为频繁, 但输送量都不大。从西风水汽输送通量的时间分布来看, 拉萨站的最大值多出现在 6 月, 昆明和福州站通常出

现在 4 月、5 月, 其余站点的最大值发生的时间则相对分散; 昆明、武汉、拉萨及福州站的最小值多分布在 7~9 月, 天津和兰州站最大值和最小值出现的时间均相对不稳定。

由于各代表站不同风向的水汽输送状况存在差异, 为了进行比较, 分别计算了 6 个站点暖半年各月经、纬向的水汽输送通量占该月总水汽量的比值(即不同风向水汽输送比例), 并给出了该比值与月均降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的相关散布(图 7)。由图 7 可知, 昆明站 $\delta^{18}\text{O}$ 与西风水汽输送比例呈显著($p < 0.001$)的

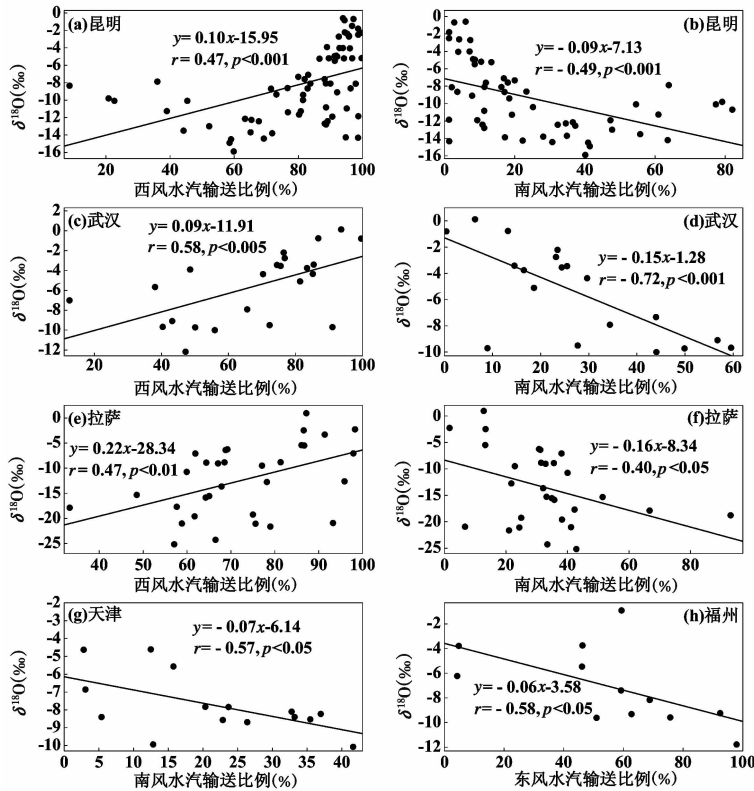


图 7 代表站暖半年逐月降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与各月纬向(东、西)、经向(南)风水汽输送比例的相关散布

Fig. 7 Correlated scatters between monthly $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and monthly proportions of zonal (east or west wind) and meridional (south wind) water vapor transfer for representative stations in the summer half year

正相关关系,而与南风水汽输送比例表现为显著 ($p < 0.001$) 的负相关性,具有类似特征的还有武汉和拉萨站。基于拟合的线性回归方程,西风水汽输送比例每增加 1%,拉萨站 $\delta^{18}\text{O}$ 值增加 0.22‰ ($p < 0.01$),高于昆明站的 0.10‰ 和武汉站的 0.09‰ ($p < 0.005$)。南风水汽输送比例每增加 1%,武汉、拉萨站的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别约降低 0.15‰ ($p < 0.001$)、0.16‰ ($p < 0.05$),两站降幅大致相当,均大于昆明站的 0.09‰。

与昆明、武汉、拉萨这 3 个深受西南季风影响的站点不同,天津站暖半年并未收入东风输送的水汽,但北向的水汽输送频率和强度均明显偏强。计算表明,天津站降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 仅与南风水汽输送的关系最为密切,相关系数为 -0.57,达到了 0.05 的信度水平。由于暖半年影响我国的纬向水汽输送带中有一条是沿着西太平洋副高南侧的东风输送,这使得在其影响范围内的福州站与东风水汽输送比例的相关系数高达 -0.58 ($p < 0.05$),而与其他通道水汽输送的相关性较差。

需要指出的是,此处并未给出兰州站经(纬)向

的水汽输送比例与 $\delta^{18}\text{O}$ 的相关散布,这是因为基于所有的水汽输送情形所计算的 4 个相关系数均未通过 0.05 的显著性检验。与兰州站归属同一类别的其他 5 个站点,情况相同,这佐证了前文分类结果的合理性。另外,我们发现所求出的这类站点降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值与西风水汽输送比例的相关系数均为负,与南风为正。这一结果与第 I 类站点正好相反,说明影响我国西北及东北地区的气团性质和水汽输送特征与影响我国南部、华中及华北地区的存在显著差异。

对比发现,计算的在局地范围内降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与站点所在格点不同风向的水汽输送比例间的相关关系和在大尺度环流条件下 $\delta^{18}\text{O}$ 与 4 条通道 \bar{Q} 间的相关关系既存在共性也存在差异性。但总的来看,两种相关关系在多数站点是一致的。少数站点(如福州站)的不一致性可能与站点所处的地理位置(距离水汽源区的远近)以及暖半年源区水汽输送强度的年际变化有关,在这种情况下,究竟何种关系能准确反映站点降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化的水汽输送影响,还需结合其他手段(如 HYSPLIT 模型、过量氙等)进

行综合分析。

4 结论和讨论

对我国 32 个 GNIP 站暖半年降水量、降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽输送关系的分析,初步得到以下主要结论:

暖半年影响我国大陆的水汽输送通道主要有 4 条:西南、南海、东南和西北通道,分别代表了南亚季风、南海季风、副热带季风以及中纬度西风带对我国暖半年降水的影响。这 4 条通道的水汽输送强度关系为:西南通道>东南通道>南海通道>西北通道。

与降水量相比,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的丰度可以更加明确地指示区域水汽来源及输送强度的变化。如集中分布在我国西南、华中及华北地区的第 I-1 类站点,它们降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与西南通道 \bar{Q} 具有显著负相关,而与东南通道 \bar{Q} 呈显著正相关,这类站点暖半年降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的高值很可能指示了同期的西南季风环流偏弱而东南通道的水汽输送偏强。

4 条水汽通道对我国暖半年降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响主要表现为:与西南通道 \bar{Q} 具有显著相关性的站点数最多,达 18 个,占总站点数的 56.3%,这些站点主要位于华北、长江沿线及其以南地区。东南通道的影响范围稍小于西南通道,受其影响的站点集中分布在长江以南地区。有 5 个站点的 $\delta^{18}\text{O}$ 与西北通道 \bar{Q} 呈显著相关关系。与南海通道 \bar{Q} 密切相关的站点数最少,仅有 4 个。

不同来向的水汽输送对站点降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响差异显著,平均而言,西风水汽输送比例每增加 1%,拉萨站 $\delta^{18}\text{O}$ 值将增加 0.22‰,高于昆明站的 0.10‰ 和武汉站的 0.09‰。南风水汽输送比例每增加 1%,武汉、拉萨站的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别降低 0.15‰、0.16‰,两站的降幅大致相当,均大于昆明站的 0.09‰。天津和福州站降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 分别仅与南风、东风水汽输送比例显著相关,相关系数分别为 -0.57 和 -0.58。兰州站降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与经(纬)向水汽输送比例均不存在显著相关性。总体而言,第 I 类站点降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与西风水汽输送比例均呈正相关,与南风呈负相关,第 II 类站点与之正好相反,说明影响我国南部、华中及华北地区的气团性质和水汽输送特征与影响我国西北及东北地区的明显不同。

当然,降水量或降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽通道 \bar{Q} 的相关性可能并不能准确反映所有站点暖半年的水汽输送实况,尤其是当根据这个关系来识别远离水汽源区的站点的水汽输送时,可能导致误读。如西藏的

拉萨站,该站降水量和降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 均与东南通道 \bar{Q} 呈显著相关性,这似乎表明该站点受东南通道水汽的影响较大。事实上,东南水汽能否到达站点所在地区尚不确定,计算的显著相关或许仅是由于拉萨站暖半年降水量(降水中 $\delta^{18}\text{O}$)与东南通道 \bar{Q} 的月变化具有反位相(同步性)的变化关系。因此,东南通道的水汽是否能影响拉萨站暖半年的降水量(降水中 $\delta^{18}\text{O}$)有待进一步地研究。此外,导致降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化的因素复杂而多样,源区水汽输送的变化可能仅是其中的一个不可忽视的原因。故在利用降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化来反演不同源区水汽输送的强弱变化时还需综合考虑地理因子(经纬度、高程)和气象因子(温度、降水量、风速、相对湿度等)的变化,以保证反演的精度。尽管如此,以上分析表明,利用降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽通道的水汽输送强度、不同风向的水汽输送比例间的相关关系来分析在大尺度环流以及区域尺度下 $\delta^{18}\text{O}$ 对于不同来向的水汽的响应,是利用稳定同位素技术来研究水汽来源的新尝试。对于认识降水中稳定同位素的时空变化规律,获得季风强度信息,并最终服务于古气候的恢复和大气环流型的诊断等都将提供参考和依据。

致谢:感谢审稿专家和编辑部老师建设性的修改意见。

参考文献 (References):

- [1] Rozanski K, Araguás-Araguás L, Gonfiantini R. Isotopic patterns in modern global precipitation [M] // Swart P K, Lohmann K C, McKenzie J, et al. Climate Change in Continental Isotopic Records. Washington D C: American Geophysical Union, 1993: 1-36.
- [2] 田立德,姚檀栋,余武生,等. 青藏高原水汽输送与冰芯中稳定同位素记录[J]. 第四纪研究, 2006,26(2):145-152.
Tian Lide, Yao Tandong, Yu Wusheng, et al. Stable isotopes of precipitation and ice core on the Tibetan Plateau and moisture transports [J]. Quaternary Sciences, 2006,26(2):145-152.
- [3] 谭明,南素兰. 中国季风区降水氧同位素年际变化的“环流效应”初探[J]. 第四纪研究, 2010,30(3):620-622.
Tan Ming, Nan Sulan. Primary investigation on interannual changes in the circulation effect of precipitation oxygen isotopes in monsoon China [J]. Quaternary Sciences, 2010, 30(3): 620-622.
- [4] 陶涛,谭明,段武辉. 最短时间尺度环流效应:单场降水 $\delta^{18}\text{O}$ 对复合水汽来源的示踪[J]. 第四纪研究, 2013,33(3): 615-617.
Tao Tao, Tan Ming, Duan Wuhui. Circulation effect on the shortest time scale: Multiple water sources traced by $\delta^{18}\text{O}$ during single precipitation event [J]. Quaternary Sciences, 2013,33(3): 615-617.

- [5] Liu X K, Rao Z G, Zhang X J, et al. Variations in the oxygen isotopic composition of precipitation in the Tianshan Mountains region and their significance for the Westerly circulation [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(7): 801-816.
- [6] 靳晓刚, 张明军, 王圣杰, 等. 基于氧氢稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应 [J]. *环境科学*, 2015, 36(4): 1241-1248.
Jin Xiaogang, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Effect of below-cloud secondary evaporation in precipitation over the Loess Plateau based on the stable isotopes of hydrogen and oxygen [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(4): 1241-1248.
- [7] Li Z X, Qi F, Wang Q J, et al. Contributions of local terrestrial evaporation and transpiration to precipitation using $\delta^{18}\text{O}$ and D-excess as a proxy in Shiyang inland river basin in China [J]. *Global and Planetary Change*, 2016, 146: 140-151.
- [8] Hua L J, Zhong L H, Ke Z J. Characteristics of the precipitation recycling ratio and its relationship with regional precipitation in China [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 127(3-4): 513-531.
- [9] 王圣杰, 张明军. 新疆天山降水稳定同位素的时空特征与影响因素 [J]. *第四纪研究*, 2017, 37(5): 1119-1130.
Wang Shengjie, Zhang Mingjun. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of stable isotopes in precipitation across the Chinese Tianshan Mountains [J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37(5): 1119-1130.
- [10] 赵华标, 徐柏青, 王宁练. 青藏高原冰芯稳定氧同位素记录的温度代用性研究 [J]. *第四纪研究*, 2014, 34(6): 1215-1226.
Zhao Huabiao, Xu Baiqing, Wang Ninglian. Study on the water stable isotopes in Tibetan Plateau ice cores as a proxy of temperature [J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(6): 1215-1226.
- [11] 蔡忠银, 田立德. 季风区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与云顶气压关系 [J]. *第四纪研究*, 2015, 35(6): 1450-1457.
Cai Zhongyin, Tian Lide. The relationship between $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and cloud top pressure in monsoon regions [J]. *Quaternary Sciences*, 2015, 35(6): 1450-1457.
- [12] Celle J H, Travi Y, Blavoux B. Isotopic typology of the precipitation in the western Mediterranean region at three different time scales [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(7): 1215-1218.
- [13] Liotta M, Bellissimo S, Favara R, et al. Isotopic composition of single rain events in the central Mediterranean [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2008, 113(D16): 280-288.
- [14] 吴夏, 朱晓燕, 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.
Wu Xia, Zhu Xiaoyan, Zhang Meiliang, et al. High-resolution stable isotope record of atmospheric precipitation in Guilin [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, 22(2): 182-188.
- [15] Araguás Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over Southeast Asia [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1998, 103(D22): 28721-28742.
- [16] 章新平, 田立德, 刘晶森, 等. 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*, 2005, 25(2): 190-196.
Zhang Xinping, Tian Lide, Liu Jingmiao, et al. Variations of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation along three vapor transport paths [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(2): 190-196.
- [17] 章新平, 刘晶森, 田立德, 等. 亚洲降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 沿不同水汽输送路径的变化 [J]. *地理学报*, 2004, 59(5): 699-708.
Zhang Xinping, Liu Jingmiao, Tian Lide, et al. Variations of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation along vapor transport paths over Asia [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(5): 699-708.
- [18] Kondoh A, Shimada J. The origin of precipitation in Eastern Asia by deuterium excess [J]. *Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources*, 2009, 10(6): 627-629.
- [19] 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.
- [20] Yamanaka T, Shimada J, Miyaoka K. Footprint analysis using event-based isotope data for identifying source area of precipitated water [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2002, 107(D22): 1-6.
- [21] Merlivat L, Jouzel J. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1979, 84(C8): 5029-5033.
- [22] 李广, 章新平, 吴华武, 等. 云南大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与气象要素及水汽来源之间的关系 [J]. *自然资源学报*, 2014, 29(6): 1043-1052.
Li Guang, Zhang Xinping, Wu Huawu, et al. Stable oxygen isotope in precipitation in relation to the meteorological factors and the moisture sources in Yunnan [J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(6): 1043-1052.
- [23] 陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 等. 厦门地区大气降水氢氧同位素组成特征及水汽来源探讨 [J]. *环境科学学报*, 2016, 36(2): 667-674.
Chen Yanting, Du Wenjiao, Chen Jinsheng, et al. Composition of hydrogen and oxygen isotopic of precipitation and source apportionment of water vapor in Xiamen area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(2): 667-674.
- [24] 吴华武, 章新平, 关华德, 等. 不同水汽来源对湖南长沙地区降水中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响 [J]. *自然资源学报*, 2012, 27(8): 1404-1414.
Wu Huawu, Zhang Xinping, Guan Huade, et al. Influences of different moisture sources on δD and $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in Changsha, Hunan Province [J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(8): 1404-1414.
- [25] 李小飞, 张明军, 马潜, 等. 我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源 [J]. *环境科学*, 2012, 33(9): 2924-2931.
Li Xiaofei, Zhang Mingjun, Ma Qian, et al. Characteristics of stable isotopes in precipitation over Northeast China and its water vapor sources [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(9): 2924-2931.
- [26] 庞洪喜, 何元庆, 张忠林, 等. 季风降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与季风水汽来源 [J]. *科学通报*, 2005, 50(20): 2263-2266.
Pang Hongxi, He Yuanqing, Zhang Zhonglin, et al. $\delta^{18}\text{O}$ in monsoonal precipitation and its monsoonal water vapor source [J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 2005, 50(20): 2263-2266.
- [27] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 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*, 2007, 22(6): 1004-1012.
Liu Jianrong, Song Xianfang, Yuan Guofu, et al. Stable isotope

- evidence of vapor sources in summer monsoonal precipitation over Southern China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2007,22(6): 1004-1012.
- [28] 宋献方, 唐瑜, 张应华, 等. 北京连续降水水汽输送差异的同位素示踪[J]. *水科学进展*, 2017,28(4):488-495.
Song Xianfang, Tang Yu, Zhang Yinghua, et al. Using stable isotopes to study vapor transport of continuous precipitation in Beijing[J]. *Advances in Water Science*, 2017,28(4):488-495.
- [29] 李泽霞, 姚檀栋, 田立德, 等. 德令哈降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 年际变化与水汽输送[J]. *地学前缘*, 2006,13(5):330-334.
Li Zexia, Yao Tandong, Tian Lide, et al. Variation of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in annual timescale with moisture transport in Delingha region [J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(5): 330-334.
- [30] 田立德, 马飞龙, 余武生, 等. 青藏高原东部玉树降水中稳定同位素季节变化与水汽输送[J]. *中国科学(D 辑)*, 2008,38(8):986-992.
- Tian Lide, Ma Linglong, Yu Wusheng, et al. Stable isotope seasonal variations in precipitation and water vapor transport in Yushu, eastern Tibetan Plateau[J]. *Science in China(Series D)*, 2008,38(8):986-992.
- [31] 田红, 郭品文, 陆维松. 中国夏季降水的水汽通道特征及其影响因子分析[J]. *热带气象学报*, 2004,20(4):401-408.
Tian Hong, Guo Pinwen, Lu Weisong. Characteristics of vapor inflow corridors related to summer rainfall in China and impact factors[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2004,20(4):401-408.
- [32] 谭明, 南素兰, 段武辉. 中国季风区大气降水同位素的季节尺度环流效应[J]. *第四纪研究*, 2016,36(3):575-580.
Tan Ming, Nan Sulan, Duan Wuhui. Seasonal scale circulation effect of stable isotope in atmospheric precipitation in the monsoon regions of China [J]. *Quaternary Sciences*, 2016, 36(3): 575-580.

$\delta^{18}\text{O}$ IN PRECIPITATION AND WATER VAPOR TRANSFER IN THE SUMMER HALF YEAR IN CHINA

Zhou Hui^{1,2}, Zhang Xinping^{1,2}, Yao Tianci^{1,2}, Luo Zidong^{1,2}, Hua Mingquan^{1,2}, Sun Huihui^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, Hunan;

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

Abstract

Based on the monthly $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation provided by GNIP at 32 stations, the monthly mean reanalysis dataset from NCEP/NCAR offered by NOAA, as well as the monthly precipitation data observed at corresponding stations in the summer half year (from April to September) during 1961~2015 in China, this study analyzes the correlations between the precipitation amount, the $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation at every station and the intensity of water vapor transfer (\bar{Q}) from 4 vapor inflow corridors in the summer half year in China, discusses and compares the relationships between $\delta^{18}\text{O}$ at 6 representative stations and the proportions of water vapor transfer of different wind directions at corresponding grid. The results suggest that $\delta^{18}\text{O}$ value in precipitation can explicitly indicate the changes of vapor inflow corridors and the water vapor transfer compared with the precipitation amount in stations. In particular, the number of stations which have significant correlations between $\delta^{18}\text{O}$ and \bar{Q} of southwest corridor are the most with 18 stations in total, which account for 56.3% of all stations. These stations mainly centralize in north China, along the Changjiang River and areas south of it. The stations controlled by southeast corridor are largely in areas south of the Changjiang River. There are 5 stations whose correlations between $\delta^{18}\text{O}$ and \bar{Q} of northwest corridor pass the reliability testing by 0.05. Only 4 stations that their $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation are closely related to the \bar{Q} of South China Sea corridor. The water vapor transfer of different direction has distinct impact on the $\delta^{18}\text{O}$ value in precipitation. On average, there will be 0.22‰ increase in $\delta^{18}\text{O}$ per 1% increase in the proportions of west wind water vapor transfer at Lhasa Station, which is higher than Kunming Station (0.10‰) and Wuhan Station (0.09‰). While each 1% increase in the proportions of south wind water vapor transfer, there will be 0.15‰ decrease at Wuhan Station and 0.16‰ at Lhasa Station in $\delta^{18}\text{O}$, respectively, both of them are higher than Kunming Station (0.09‰). The $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation at Tianjin and Fuzhou stations are merely closely related to the proportions of south and east wind water vapor transfer, the correlation coefficients are -0.57 and -0.58, respectively. Whereas it is absent of statistically significant correlation between $\delta^{18}\text{O}$ and the proportions of meridional or zonal water vapor transfer at Lanzhou Station.

Key words: summer half year (from April to September); precipitation; oxygen stable isotopes; vapor inflow corridor; water vapor transfer