应用生态学报 2019年7月 第30卷 第7期 http://www.cjae.net
Chinese Journal of Applied Ecology, Jul. 2019, 30(7): 2191-2200 DOI: 10.13287/j.1001-9332.201907.021

陕甘宁地区降水稳定同位素特征及水汽来源

刘洁遥[1,2] 张福平[1,2*] 冯 起[1,3] 魏永芬[4] 黄良红[5] 李宗省[3] 聂 硕[1,2] 李 玲[1,2]
([1]陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119; [2]陕西师范大学地理学国家级实验教学示范中心, 西安 710119; [3]中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; [4]日本国立岐阜大学流域圈科学研究中心, 岐阜 501-1193; [5]中国民用航空太原空中交通管理中心, 太原 030031)

摘 要 依据全球大气降水稳定同位素观测网络(GNIP)和已有研究中陕甘宁地区的大气降水氢氧稳定同位素资料,并结合相关气象数据,分析了陕甘宁地区大气降水氧稳定同位素的时空分布特征及其影响因子,并建立了大气降水线方程.结果表明: 3省大气降水线的斜率、截距由小到大依次为:甘肃、陕西、宁夏,且均小于全球大气降水线方程的斜率、截距,表明3省的降水过程受蒸发作用影响程度沿宁夏、陕西、甘肃增强;陕甘宁地区大气降水中$\delta^{18}O$值在时间变化上,表现为夏秋季节富集、冬春季节贫化,从空间分布来看,由西北至东南,加权平均$\delta^{18}O$值呈减小趋势;3省降水中$\delta^{18}O$温度效应显著,但不存在降水量效应,这体现了中高纬度大陆性气候的特征;高程效应的定量关系为$-0.12‰ \cdot (100\ m)^{-1}$,纬度效应更显著(纬度每增加1°,降水中$\delta^{18}O$相应贫化0.27‰);采用HYSPLIT模型对各站点的水汽来源进行追踪,气团聚类轨迹表明,夏半年主要有来自孟加拉湾的水汽、东南季风水汽和西风带水汽,冬半年以西风带水汽为主.

关键词 降水; 稳定同位素; 同位素效应; 气团轨迹; 陕甘宁地区

Stable isotopes characteristics of precipitation over Shaanxi-Gansu-Ningxia and its water vapor sources. LIU Jie-yao[1,2], ZHANG Fu-ping[1,2*], FENG Qi[1,3], WEI Yong-fen[4], HUANG Liang-hong[5], LI Zong-xing[3], NIE Shuo[1,2], LI Ling[1,2] ([1]*School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an* 710119, *China*; [2]*National Demonstration Center for Experimental Geography Education, Shaanxi Normal University, Xi'an* 710119, *China*; [3]*Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *China*; [4]*River Basin Research Center, Gifu University, Gifu* 501-1193, *Japan*; [5]*Taiyuan Air Traffic Management Center, Civil Aviation Administration of China, Taiyuan* 030031, *China*).

Abstract: Based on hydrogen and oxygen stable isotopes in precipitation and meteorological data over Shaanxi-Gansu-Ningxia provided by the Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP) and in previous literature, the spatial and temporal variations of oxygen stable isotopes in precipitation and their driving factors were analyzed, the local meteoric water line (LMWL) functions were established. The results showed that the slope and intercept of the LMWL changed in the order of Gansu<Shaanxi<Ningxia, with all of them being lower than slope and intercept of the Global Meteoric Water Line. The precipitation process of three provinces had been evaporated and fractionated to different degrees. The evaporation was enhanced along Ningxia, Shaanxi and Gansu. The $\delta^{18}O$ value in precipitation in the Shaanxi-Gansu-Ningxia region was enriched in summer and autumn but poor in winter and spring. For the spatial distribution, the weighted $\delta^{18}O$ value decreased from the northwest to the southeast. $\delta^{18}O$ in precipitation showed significant temperature effect, but was no precipitation effect, reflecting the characteristics of continental climate in the middle and high latitudes. The quantitative relation of elevation effect was $-0.12‰ \cdot (100\ m)^{-1}$, and latitude effect was more

本文由陕西省自然科学基金面上项目(2018JM4020)、国家重点研发计划项目(2017YFC0404300)、中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-DQC031)资助 This work was supported by the General Program of National Natural Science Foundation of Shaanxi (2018JM4020), the National Key Research and Development Program of China (2017YFC0404300), and the Key Research Program of Frontier Sciences Chinese Academy of Sciences (QYZDJ-SSW-DQC031).
2018-08-22 Received, 2019-05-24 Accepted.
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhang_fuping@163.com

significant by −0.27‰ per °. The water vapor source was tracked by HYSPLIT model. The cluster trajectory of air masses showed that water vapor from the Bay of Bengal, southeast monsoon and westerly zone were the main sources in summer half year, while it mainly transported by the westerly belt in winter half year.

Key words: precipitation; stable isotope; isotope effect; water vapor trajectory; Shaanxi-Gansu-Ningxia region.

氢氧稳定同位素是自然水体中的重要组成部分,虽然含量极低,却能非常敏感地响应自然环境的变化,蕴含着水循环演化的历史信息[1-2].由于同位素分馏作用的存在,不同物质或物相中的同位素比率不同,差异的存在使得稳定同位素在不同的水体中表现出不同的信号,人们可以借助这些不同的信号来推演和理解不同水体中稳定同位素的分馏机制和环境效应.此外,环境条件,如纬度、高程、季节、温度和降水量等的变化也会使稳定同位素的丰度发生改变,因而观测其丰度的变化可以帮助人们深入认识地球化学和水循环过程[3].大气降水作为陆地水资源的根本来源,也是指示气候变化的主要因子,更是干旱地区最主要的水资源输入,对其稳定同位素组成及比率大小的分析有利于判别不同区域的水汽来源[4],也可以反映大气水汽循环的整个历史[3,5],同时能够在一定程度上反映天气气候和区域性特征[6].

在国外,对于降水中稳定同位素的研究起步较早[7],全球降水同位素观测网(Global Network for Isotopes in Precipitation,GNIP)于 1961 年成立运行.自此,许多学者利用此网站的数据,开展了大量有关降水中稳定同位素的研究,但大多局限于对局部或单站点的研究.为了更详细地了解和研究降水中稳定同位素记载的水循环信息,越来越多的学者开始自行收集降水和气象数据等原始资料,使降水稳定同位素资料得以丰富和完善.许多学者利用多站点的实测数据分析了降水氢氧稳定同位素随时间的变化[8]、流域二次蒸发效应[9]、稳定同位素组成随海拔的变化规律[10]、环境效应[11]、不同水汽来源的比例[12]等,取得了丰富的研究成果.前人将降水中的氢氧同位素关系总结为大气降水线,并将稳定同位素的环境效应总结为温度效应、降水量效应、高程效应、纬度效应等.

陕甘宁地区(陕西、甘肃和宁夏的简称)属于西北地区,地处内陆,远离海洋,使得海洋水汽难以到达,气候以干旱为主,因此大气降水成为该区域重要的水资源来源.此外,该区既包含了生态环境脆弱及对气候变化敏感的陕甘宁边区,又涉及水土流失严重的黄土高原地区,特殊的地理位置和气候条件引发了很多学者的关注,且以干旱为主的气候特征使得明晰研究区的水汽来源成为非常重要的工作.分析大气降水氢氧稳定同位素特征,不仅能反映出大气降水与地理位置、气候条件等之间的关系,反演出研究区大气降水的水汽来源,更是研究区水循环机制研究的重要部分.以往涉及大气降水稳定同位素的研究以小研究区为主,且多是自行布设站点,数据时间序列较短,从而在分析年际间各种因素的影响时,容易产生隐含的错误信息.本研究为了避免由于实测数据的时间序列较短而造成分析结果的不准确,结合 GNIP 数据库中时间序列较长的站点数据进行分析.按照行政区划分析了陕甘宁地区大气降水中氢同位素(δD)和氧同位素($\delta^{18}O$)的相关关系及氧同位素在时间和空间上的变化规律,以及降水稳定同位素的环境效应,讨论各个因素对降水稳定同位素的影响,深入探讨降水稳定同位素对研究区水汽来源的指示意义,并利用混合单粒子拉格朗日积分轨迹模型(hybrid single particle Lagrangian integrated trajectory model,HYSPLIT)分析研究区的水汽来源.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区在行政区划上包括位于西北地区的陕西、甘肃、宁夏 3 省(图 1).陕西省南北延伸很长,境内气候差异很大,但整体上属于大陆性季风气候;受山地地形的影响,降水量由南向北递减,年降水量在 310~1274 mm[13];气温呈现由南向北降低的趋势,南北气候差异大.甘肃省呈西北-东南走向,气候类型多样,大部分地区以干旱气候为主,降水多集中在夏季,年平均气温在 0~14 ℃[14].宁夏属于典型的大陆性半湿润半干旱气候,雨季多集中在 6—9 月,气候干旱,年降水量在 300 mm 左右,年均气温在 4~9 ℃[15].3 省均处于西北内陆,地形较为复杂,兼有高原、盆地、平原、山地、沙漠和戈壁.近年来,陕甘宁地

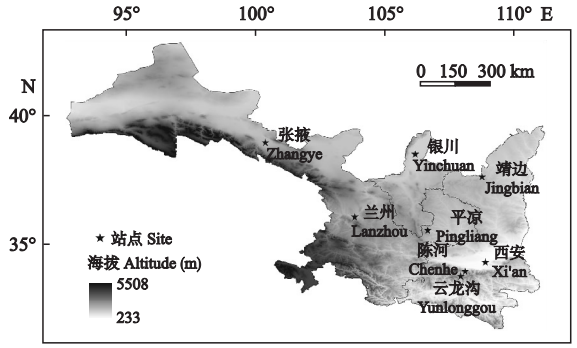


图 1　研究区概况和同位素观测站点分布

Fig.1　Locations of the study area and isotope sites.

区暖干化趋势明显[16]，森林覆盖率低，水土流失严重[17-18].

1.2　数据来源

大气降水中氢氧同位素数据主要来源于 GNIP (http://isohis.iaea.org)和实测数据.GNIP 站点包括陕西的西安、靖边，甘肃的张掖、兰州、平凉，宁夏的银川，其样品收集、运输的技术程序和标准数据均符合国际原子能机构标准.GNIP 站点的原始数据是将每月全部降水混合后测试，代表该月的稳定同位素值，提供了各个站点的编号、经纬度、高程、δD 和 $\delta^{18}O$的月平均值及降水量、温度等信息.实测资料是本研究团队于 2014 年 9 月—2016 年 8 月在秦岭北坡的陈河和云龙沟站点实地采集降水样品，利用IWA-45EP 液态水同位素分析仪(Los Gatos Research，美国)测定样品的氢氧稳定同位素[19].另外，本研究在分析陕甘宁地区大气降水 $\delta^{18}O$ 的空间分布时选取研究区周边的乌鲁木齐、成都、重庆、武汉、郑州、包头、太原、长沙、拉萨、乌兰巴托、西宁、延安和华山观测点资料[20]作为辅助.

1.3　研究方法

1.3.1 氢氧稳定同位素分析　氢氧稳定同位素比率用相对于标准平均海洋水(standard mean ocean water，SMOW)的千分差表示[20]：

$$\delta=(R_S/R_{SMOW}-1)\times 1000‰ \quad (1)$$

式中：R_S 和 R_{SMOW} 分别表示样品和标准平均海水的 D/H 或 $^{18}O/^{16}O$ 值.

降水中氧稳定同位素数据为一年或多年的加权平均值，其计算公式为[20]：

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

式中：$\delta_{(w)}$ 为加权平均值；P_i 为降水量；δ_i 为降水相应的同位素值.

1.3.2 基于 HYSPLIT 模型的水汽来源模拟　气团轨迹指大气气团在一定时间内的运动路径，可以用来分析降水气团的来源和传输途径[21].HYSPLIT 模型是美国国家海洋与大气管理局空气资源实验室开发的混合单粒子拉格朗日积分轨迹模型，用于分析大气污染物的输送和扩散轨迹.模型的气象资料来自于美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心的全球再分析资料，空间分辨率为 2.5°×2.5°.本研究利用该模型对研究区各站点在不同时段内的水汽来源进行后向轨迹的模拟和聚类.

1.3.3 过量氘值(d)的计算　降水过程中随着蒸发作用的影响，使得降水中的氢氧同位素的线性关系出现一个差值，Dansgaard[3] 将其定义为过量氘(d-excess，d)：$d=\delta D-8\delta^{18}O$.不同地区大气降水 d 值，可以较为直观地反映该地区大气降水蒸发、凝结过程的不平衡程度，实际上是大气降水的重要综合环境因素指标[22].在全球范围内，d 平均值为 10‰.一般而言，降水水汽来源于空气相对湿度越低的干燥地区，其不平衡蒸发越强烈，d 值越高；而水汽源地相对湿度越大的湿润地区，蒸发作用较弱，d 值越小.

1.4　数据处理

基于回归分析法分析氢氧稳定同位素大气降水线方程并分析 $\delta^{18}O$ 和过量氘值(d)的季节变化，在此基础上，利用 ArcGIS 软件的样条函数法进行插值分析，并制作站点分布图及 $\delta^{18}O$ 的时空分布图.为了使插值结果更加合理准确，计算中增加了研究区周边的 13 个观测站点(GNIP 网站中的乌鲁木齐、成都、重庆、武汉、郑州、包头、太原、长沙、拉萨、乌兰巴托；文献[20]的西宁、延安和华山)作为辅助.

2　结果与分析

2.1　陕甘宁地区大气降水线方程的建立

大气降水线指一个地区某时段降水同位素 δD 与 $\delta^{18}O$ 的线性关系.由于气象条件、地理位置不同，从水汽源地至降雨形成的过程中影响同位素发生分馏的因素存在差异，因此各地的大气降水线具有不同的斜率和截距.大气降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[23].利用研究区各站点的降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 同位素数据，得到研究区各省的大气降水线方程.由图 2 可以看出，各省的降水氢氧同位素组成具有较高的相关性.与全球大气降水线($\delta D=8\delta^{18}O+10$)和中国大气降水线($\delta D=7.9\delta^{18}O+8.2$)[24]相比，斜率和截距均较小.较低的斜率和截

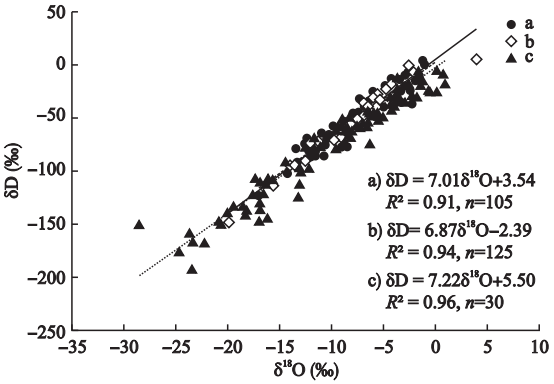


图 2 各省大气降水线

Fig.2 Local meteoric water line in each province.

a) 陕西 Shaanxi; b) 甘肃 Gansu; c) 宁夏 Ningxia.

距主要是由于雨滴降落过程中受到不平衡二次蒸发引起的同位素分馏导致,斜率和截距越小,降水过程受到的蒸发作用越强烈[25].3 省大气降水线的斜率和截距由小到大依次为:甘肃、陕西、宁夏.表明 3 省均处于内陆地区,水汽在输送过程中属于非平衡分馏,而降雨过程受到的云下二次蒸发作用沿宁夏、陕西、甘肃增强.

由表 1 可以看出,位于陕西省的站点中,处于关中平原地区的西安、陈河与云龙沟站点距离较近,三者的大气降水线方程的斜率和截距较相近,均大于位于陕西北部的靖边站.陕西省为南北走向,且延伸较长,跨越纬度较多,年降水量受山地地形的影响,由南向北递减.靖边所处的陕北地区较关中平原气候更为干旱,降雨过程经历的蒸发作用较强,造成斜率和截距降低.甘肃省各站点大气降水线的斜率和截距沿平凉-兰州-张掖呈降低趋势.这与甘肃省年降水量由东南向西北递减有关,空气相对湿度逐渐降低,使得蒸发作用逐渐增强.宁夏区内只有一个站点,未做省内分析.

表 1 各站点大气降水线方程参数

Table 1 Parameters of local meteoric water line of each site

省份 Province	站点 Site	斜率 Slope	截距 Intercept	R^2
陕西	西安 Xi'an	7.49	6.13	0.92
Shaanxi	靖边 Jingbian	4.51	−19.08	0.96
	陈河 Chenhe	7.06	6.70	0.95
	云龙沟 Yunlonggou	7.05	6.40	0.94
甘肃	张掖 Zhangye	6.76	−4.50	0.94
Gansu	兰州 Lanzhou	7.01	1.53	0.94
	平凉 Pingliang	8.10	6.97	0.99
宁夏 Ningxia	银川 Yinchuan	7.22	5.50	0.96

2.2 陕甘宁地区大气降水 $\delta^{18}O$ 的时空变化

2.2.1 降水中 $\delta^{18}O$ 的时间变化 研究区降水的氢氧稳定同位素组成存在较好的线性关系,以下以 $\delta^{18}O$ 为主进行分析.甘肃省站点降水 $\delta^{18}O$ 变化范围最大,在−23.7‰~−2.1‰;宁夏次之,$\delta^{18}O$ 在−20.0‰~−3.1‰;陕西省 $\delta^{18}O$ 变化范围最小,在−13.5‰~−2.3‰.此外,3 省的降水 $\delta^{18}O$ 随时间的变化具有一定的周期性,即夏秋季节富集,冬春季节贫化(图 3).陕西省除靖边站外,其余站点 $\delta^{18}O$ 表现为 1—5 月逐渐富集,6—12 月逐渐贫化;靖边站的最大值出现在 7 月,较其他站点有一定滞后,这是由于靖边站地理位置偏北,温度升高迟缓.甘肃省的张掖和兰州站点的降水 $\delta^{18}O$ 变化具有较高的相似性,均表现为 1—7 月不断富集,8—12 月逐渐贫化;平凉地区缺少 1—3 月数据,5—9 月的数据明显低于张掖和兰州站点,原因有两点:1)平凉位于六盘山区[26],海拔较高,达 1570 m,显著高于张掖和兰州站点,高程效应使得同位素值较低;2)平凉属于小城市,热岛效应对降水的影响较小,雨滴降落过程经历的蒸发作用较小,使得同位素值偏小[26].宁夏的银川站点,降水 $\delta^{18}O$ 表现为 1—5 月逐渐增大,6—12 月波动减小.

从 3 省各站点降水 $\delta^{18}O$ 随时间的变化可以看出,在进入雨季之前,$\delta^{18}O$ 与温度有着较好的对应关系,即随着温度的升高,降水 $\delta^{18}O$ 逐渐增大.首次波峰的出现是由于温度的升高而引起的同位素值增大.进入雨季后,降水 $\delta^{18}O$ 逐渐减小,降水量为影响同位素值变化的主导因素.银川站最大值(首次波峰)出现在 5 月,虽然 6 月温度较 5 月有升高,但 $\delta^{18}O$ 并没有随着温度的上升而继续升高,而是出现了下降,表明雨季降水量取代温度成为控制降水稳定同位素变化的主要因素[26].各站点降水 $\delta^{18}O$ 随时间的变化普遍出现第二次波峰,这是降水量减小、雨季结束的标志.之后出现的降水 $\delta^{18}O$ 持续减小,是由于研究区进入冬季,温度下降所致[26].

2.2.2 降水中 $\delta^{18}O$ 的空间变化 由图 4 可以看出,陕甘宁地区大气降水中加权平均 $\delta^{18}O$ 的空间分布,整体上呈现由西北至东南降低的趋势.地处我国西北的陕甘宁地区大气降水的主要水汽来源为西风带水汽输送,水汽从新疆进入西北地区,向东输送[27].随着水汽输送路径的增大,重同位素优先分离,沿途不断的降水使得剩余水汽中 $\delta^{18}O$ 逐渐贫化.陕西省的西安、陈河和云龙沟站点相距较近,但受海拔的影响,云龙沟的降水中 $\delta^{18}O$ 明显低于西安和陈河站点,是海拔效应的体现.甘肃省的兰州站降水中 $\delta^{18}O$

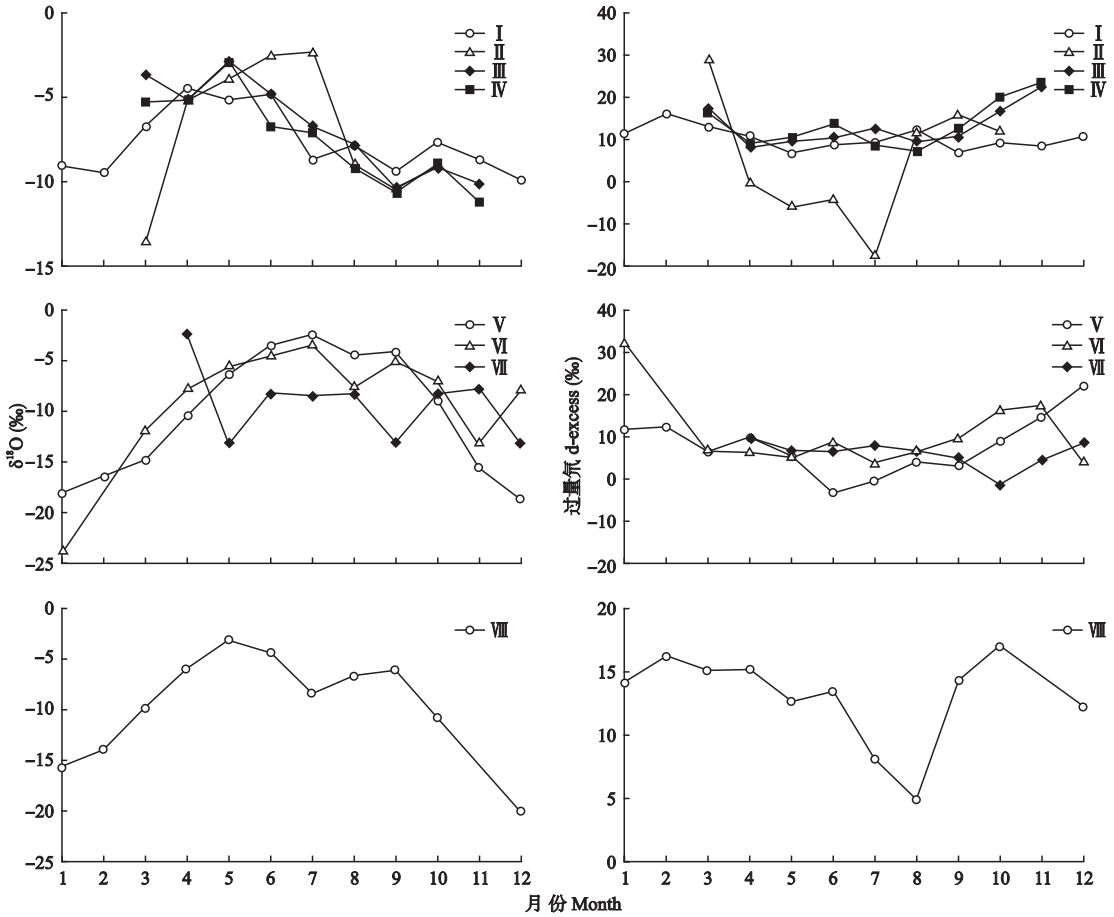


图 3　各站点降水 $\delta^{18}O$ 和过量氘(d-excess)随时间的变化

Fig.3　Temporal variations of $\delta^{18}O$ and d-excess in precipitation of each site.

Ⅰ：西安 Xi'an；Ⅱ：靖边 Jingbian；Ⅲ：陈河 Chenhe；Ⅳ：云龙沟 Yunlonggou；Ⅴ：张掖 Zhangye；Ⅵ：兰州 Lanzhou；Ⅶ：平凉 Pingliang；Ⅷ：银川 Yinchuan. 下同 The same below.

最高，这与内陆循环有关，干燥的大陆气团产生的降水通常会富集^{18}O，而且干燥的气候条件加剧了雨滴降落过程经历的蒸发作用，两种因素的叠加作用加剧了其降水中^{18}O的富集[25].

2.3　陕甘宁地区大气降水氧同位素组成的影响机制

2.3.1 $\delta^{18}O$ 的温度效应　大气降水氧同位素的组成与多种气象因子之间存在相关关系.影响降水中稳定同位素组成的主要因素有：水汽源地的情况、温度效应、降水量效应、大陆效应、高程效应和纬度效应等[28].在众多影响降水同位素变化的气象因素中，温度效应的重要性尤为突出，这是由于同位素的分馏作用主要受制于相变过程中的温度[25,29].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[30].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 $\delta^{18}O$ 越低[31].



图 4　陕甘宁地区大气降水中加权平均 $\delta^{18}O$ 的空间分布

Fig.4　Spatial variation of the weighted $\delta^{18}O$ in precipitation over Shaanxi-Gansu-Ningxia.

通过对陕西、甘肃、宁夏月降水平均 $\delta^{18}O$ 与月平均温度之间的回归关系，获得各省的降水 $\delta^{18}O$ 与温度的关系(表2).其中，甘肃省降水中 $\delta^{18}O$ 与温度的回归方程的斜率较大，且相关性也最大，表明甘肃省降水中 $\delta^{18}O$ 受温度的影响最明显，宁夏次之，陕西最弱.3 省均存在显著的温度效应，且通过了不同置信水平的检验.出现此现象的原因在于，研究区位

表 2 各省降水中 $\delta^{18}O$ 与温度和降水量的关系

Table 2 Correlation of $\delta^{18}O$ in precipitation with air temperature and precipitation amount in each province

省份 Province	温度效应 Temperature (T) effect				降水量效应 Precipitation (P) effect			
	方程 Equation	r	R^2	n	方程 Equation	r	R^2	n
陕西 Shaanxi	$\delta^{18}O=0.08T-8.49$	0.192*	0.037	105	$\delta^{18}O=-0.01P-6.70$	−0.138	0.019	105
甘肃 Gansu	$\delta^{18}O=0.49T-14.14$	0.794**	0.630	125	$\delta^{18}O=0.06P-10.13$	0.276**	0.076	125
宁夏 Ningxia	$\delta^{18}O=0.30T-12.21$	0.637**	0.406	30	$\delta^{18}O=0.10P-12.05$	0.489**	0.239	30

* $P<0.05$; ** $P<0.01$.

于西北内陆,气候较干旱,雨滴易受到云下二次蒸发的影响,而二次蒸发的强度受雨滴降落过程的温度影响较大,降水中 $\delta^{18}O$ 随二次蒸发强度的增大而升高,进而表现出明显的温度效应[25].

2.3.2 $\delta^{18}O$ 的降水量效应 降水量效应指降水中的稳定同位素组成与同期的降水量呈负相关关系.由表 2 可以看出,除陕西省降水中 $\delta^{18}O$ 与降水量表现出微弱的负相关外,甘肃、宁夏降水中 $\delta^{18}O$ 并没有随着降水量的增大而贫化,但仍可用一次方程对其进行拟合.

全年尺度下,陕甘宁地区 $\delta^{18}O$ 不存在降水量效应.这一现象符合经典的同位素理论:降水量效应往往发生在中低纬度海岸和海岛地区,它的产生与强对流现象相联系,在内陆区通常不显著[6,28,32].中高纬度大陆内部地区降水中 $\delta^{18}O$ 受温度的影响较大[33-34].陕甘宁地区显著的温度效应掩盖了降水量效应,表明陕甘宁地区全年主要的气候特征为中高纬度大陆性气候.且在内陆干旱区,降水并不是决定降水中 $\delta^{18}O$ 的根本性因素[31].

2.3.3 $\delta^{18}O$ 的高程和纬度效应 大气降水中 $\delta^{18}O$ 的高程效应指同位素值随着海拔的增加而降低,即负相关关系.根据陕甘宁地区大气降水 $\delta^{18}O$ 与海拔的相关关系,发现随着海拔(Alt)的增加,$\delta^{18}O$ 呈降低趋势,用一次方程拟合为:$\delta^{18}O=-0.0012Alt-6.47$ ($R^2=0.301$),因此大气降水 $\delta^{18}O$ 与海拔定量关系为 $-0.12‰\cdot(100\ m)^{-1}$,即高度每增加 100 m,降水中 $\delta^{18}O$ 相应贫化 0.12‰(图 5).这一垂直递减率与刘忠方等[35]计算的我国大气降水 $\delta^{18}O$ 的垂直递减率[$-0.16‰\cdot(100\ m)^{-1}$]接近.

纬度效应指随着纬度的升高,降水中的重同位素逐渐贫化.大气降水中的稳定同位素受多种因素的综合影响,即使在纬度相近的地区,稳定同位素值也可能会有一定差异.但宏观上,当纬度跨度足够大时,纬度效应会十分显著[36].通过分析研究区内 8 个站点的降水中 $\delta^{18}O$ 与纬度的相关关系,发现随着纬度的升高,$\delta^{18}O$ 显著贫化(图 6).研究区存在显著的纬度效应,且显著性高于高程效应,表明在远离海洋,地处内陆的陕甘宁地区,纬度是影响降水中 $\delta^{18}O$ 组成的主要因素.将降水中 $\delta^{18}O$ 与纬度进行拟合,方程为 $\delta^{18}O=-0.273Lat+1.97$ ($R^2=0.354$),纬度每增加 1°,降水中 $\delta^{18}O$ 相应贫化 0.27‰.

2.4 陕甘宁地区大气降水中过量氚值的季节变化

由图 3 可以看出,陕西过量氚值(d)的变化范围最大,在 −17.6‰ ~ 29.0‰;甘肃次之,d 值在 −3.2‰~32.4‰;宁夏 d 值的变化范围最小,在 4.8‰~17.1‰.陕甘宁三省 d 值的平均值分别为 10.6‰、8.5‰和 13.0‰.整体上,陕甘宁地区大气降水氚盈余表现为冬半年高、夏半年低的趋势.陕西省除靖边外,其余站点均位于关中地区,d值的变化规

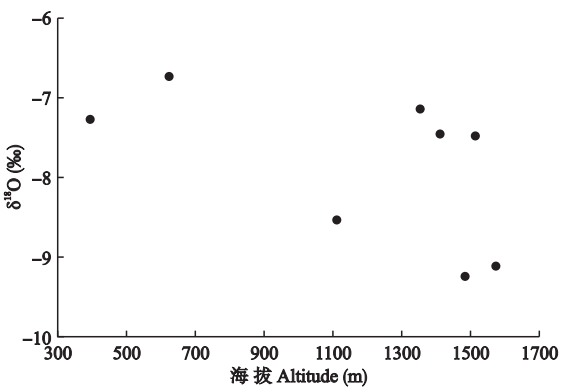


图 5 陕甘宁地区大气降水中 $\delta^{18}O$ 与海拔的相关关系

Fig.5 Correlations between $\delta^{18}O$ in precipitation and altitude over Shaanxi-Gansu-Ningxia.

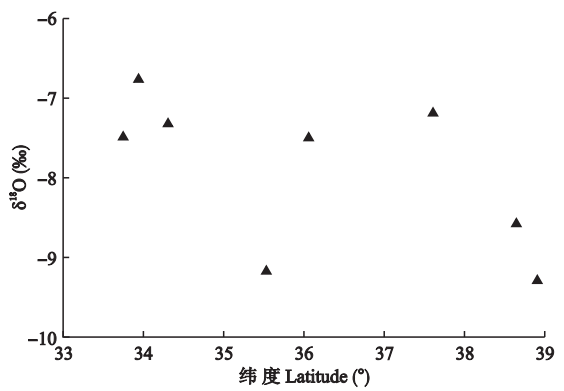


图 6 陕甘宁地区大气降水中 $\delta^{18}O$ 与纬度的相关关系

Fig.6 Correlations between $\delta^{18}O$ in precipitation and latitude over Shaanxi-Gansu-Ningxia.

律基本保持一致，且夏冬半年 d 值变幅较小，说明虽然两个时段水汽来源不同，但来源都相对稳定[37]. 位于陕北的靖边站的 d 值大多数位于全球平均值 10‰以下，究其原因是因为陕北地区干旱的气候条件使得降落雨滴经历较强的蒸发作用而导致 d 值偏小.甘肃省 3 个站点的 d 值变化不大，说明水汽来源比较稳定.另外，甘肃省 d 平均值小于 10‰，说明甘肃省降水的水汽来源地相对湿度较大.宁夏的银川站点的 d 值变化范围最小，说明多年尺度下水汽来源较稳定.而 7、8 月 d 值明显降低，可能是由于当地处于夏季，温度较高，雨滴降落过程受到蒸发作用影响所致.

2.5　陕甘宁地区大气降水水汽来源轨迹模拟

为了更清楚地了解陕甘宁地区大气降水的水汽来源，本研究利用 HYSPLIT 气团轨迹模型模拟研究区各站点降水前的气团运输轨迹.西北地区降水多集中在 4—10 月，其他月份降水量较少，且 4—10 月平均温度都在 0 ℃以上[28].鉴于此，将研究时段分为夏半年（4—10 月）和冬半年（11 月至次年 3 月）.通过 HYSPLIT 模型分别对各站点逐年每天的大气降水来源轨迹进行计算，回溯时间为 10 d，并将夏冬半年的气团轨迹分别进行聚类平均.

由图 7 可以看出，陕西省的站点中，西安、陈河、云龙沟夏半年的水汽来源相似（选西安站点作为 3 个站点代表），大气降水水汽源包括西北方向的水汽、大量的局地循环水汽和东南方向的水汽.说明陕西地区夏半年水汽来源较复杂，除了西风带输送外，还受到东南季风和局地再循环水汽的影响.季风带来的水汽使得陕西省各站点夏半年的 d 值降低，8 月，东南季风到达，d 值降低，降雨量增大，直到 10 月，东南季风退去，d 值逐渐回升[26].靖边站夏半年的水汽来源主要为东南方向水汽和来自蒙古的西北方向水汽.冬半年陕西省站点水汽来源较一致，主要来自西风带的水汽输送和局地再循环水汽.由于西风带水汽在经过长距离的输送后，$\delta^{18}O$ 值不断贫化，加之冬季气温较低，蒸发较少，沿途水汽补充较少，使得剩余水汽中 $\delta^{18}O$ 值相对较低[28].这与前文冬半年 $\delta^{18}O$ 值较低相一致.甘肃省 3 个站点冬半年的水汽来源较单一，主要来自于西风带的水汽输送.张掖站点夏半年除西面的水汽源外，还有东面的水汽输送；又因为所处位置距海岸较远，因此局地水汽再循环的贡献不可忽略[25].兰州地区夏半年除了西风带运送的水汽外，还会接收到来自南方的季风水汽，水汽源地相对湿度较高，使得夏半年的 d 值较低.平凉站点位于六盘山区，与宁夏的银川站夏半年水汽源相似，除了南部孟加拉湾的季风水汽和六盘山局地再循环水汽外，还有西北方向的水汽输送.冬半年的银川站点水汽大部分来自西风带水汽、西北方向水汽，少部分是西南方向的季风水汽.

陕甘宁地区夏半年的水汽来源主要有来自南部孟加拉湾的水汽、东南季风水汽和西风带水汽.夏半年温度较高且较干旱，混入了一定量的局地再蒸发水汽，使得夏半年 $\delta^{18}O$ 值较高.冬半年的水汽来源相对单一，以西风带水汽为主，因此冬半年的降水中 $\delta^{18}O$ 较贫化.

3　结　　论

陕甘宁地区的地理位置特殊，气候干旱，降水资源尤为珍贵.因此，明晰研究区的水汽来源具有重要意义.为了避免 GNIP 数据库中的数据时间较早及自行采集的数据时间序列较短而造成分析结果的不准确，本研究利用网上获取的数据结合实地采集数据，探讨了降水稳定同位素对陕甘宁地区水汽来源的指示意义，并利用 HYSPLIT 模型明晰了陕甘宁地区的水汽来源，得到以下结论：

1）陕甘宁 3 省的大气降水线的斜率和截距均低于全球大气降水线，且斜率和截距由小到大依次为：甘肃、陕西、宁夏.表明蒸发作用沿宁夏、陕西、甘肃增强.陕西省内的站点除靖边站外，其他站点的斜率、截距接近.靖边站所处的地区气候条件更为干旱，雨滴经历的蒸发作用更强，造成斜率和截距偏低.甘肃省受降水量区域差异影响，其斜率和截距沿平凉-兰州-张掖呈降低趋势.

2）陕甘宁地区降水中 $\delta^{18}O$ 均表现出夏秋季节富集、冬春季节贫化的规律；空间上呈现出从西北到东南降低的趋势.这是由于随着水汽输送路径的增大，同位素逐渐消耗，使得剩余水汽中的 $\delta^{18}O$ 逐渐贫化.

3）陕甘宁 3 省大气降水中 $\delta^{18}O$ 与温度的线性关系显著，均存在显著的温度效应，但不存在降水量效应.研究区高程效应的定量关系为 $-0.12‰\cdot(100\ m)^{-1}$.纬度效应更显著（纬度每增加 1°，降水中 $\delta^{18}O$ 相应贫化 0.27‰）.

4）研究区大气降水中的 d 值表现出夏半年低、冬半年高的规律.陕甘宁地区夏半年的水汽来源主要有来自南部孟加拉湾的水汽、东南季风水汽和西风带水汽.夏半年温度较高且较干旱，混入了一定量的局地再蒸发水汽，使得 $\delta^{18}O$ 值较高.冬半年的水

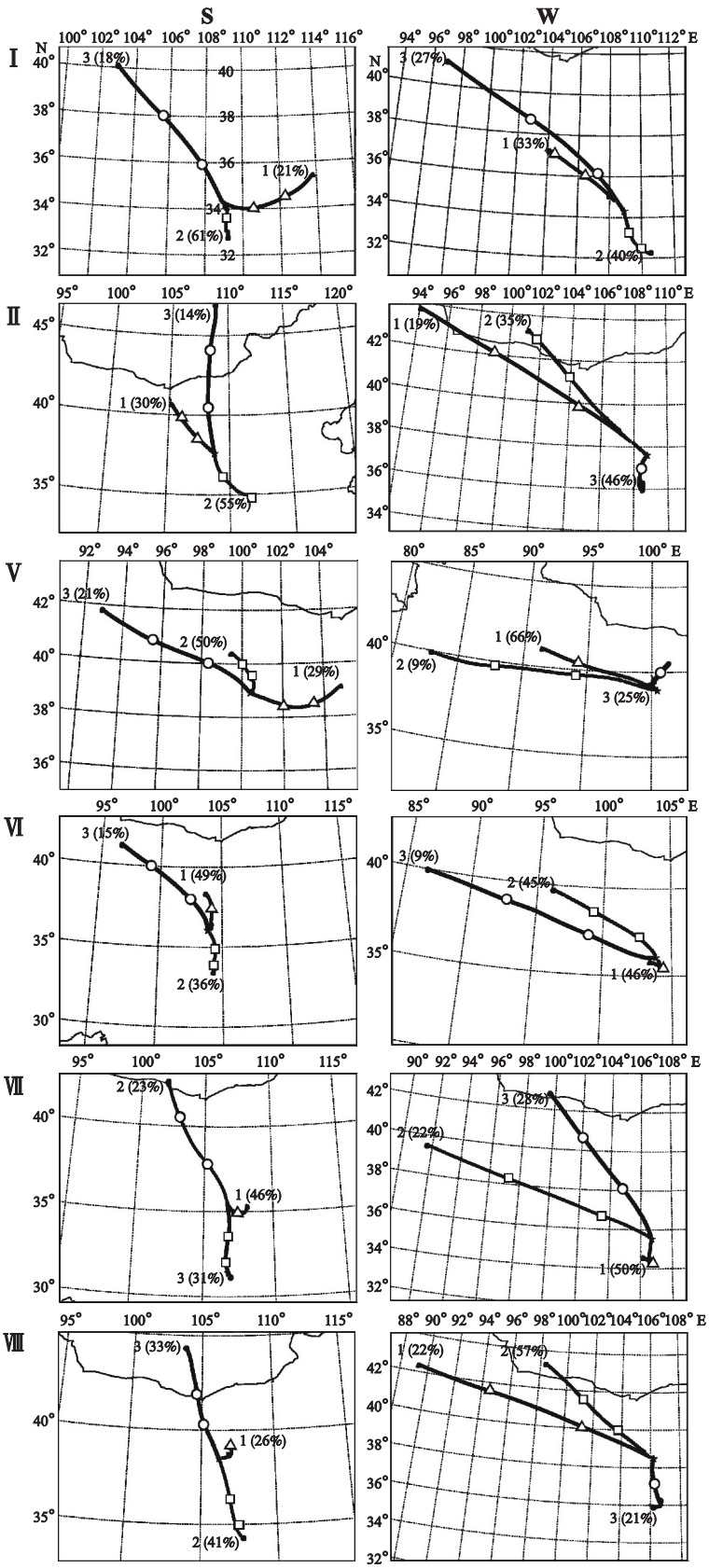


图 7 气团后向轨迹聚类图

Fig.7 Backward trajectory clustering graphs of air mass.

S: 夏半年 Summer half year; W: 冬半年 Winter half year. 线条的指向表示水汽来源的方向,线条的不同形状区分了不同的水汽来源,线条的百分比表示水汽输送路径占总输送路径的比重 The direction of the line indicated the source of water vapor, different shapes of the line distinguish different sources of water vapor, and the percentage of the line indicated the proportion of water vapor transport path to total transport path.

汽来源以西风带水汽为主，因此降水中 $\delta^{18}O$ 较贫化.

已有的有关水汽来源的研究多涉及降水稳定同位素对研究区水汽来源的指示意义[31,36]，而二次蒸发效应和水汽再循环的存在，会使降水稳定同位素值产生不同程度的改变[38].因此，二次蒸发效应的量化和水汽再循环的研究是明确研究区水循环的关键内容.此外，除研究区大尺度的水汽来源外，研究区内部的水循环模式也在稳定同位素值上有所体现，且局地的水循环模式对研究区域内水循环有着重要意义，因此，这些内容将成为今后的研究方向.

参考文献

[1] Li X-F (李小飞), Zhang M-J (张明军), Li Y-J (李亚举), *et al*. Characteristics of $\delta^{18}O$ in precipitation and moisture transports over the arid region in Northwest China. *Environmental Science* (环境科学), 2012, **33** (3): 711-719 (in Chinese)

[2] Liu J-R (柳鉴容), Song X-F (宋献方), Yuan G-F (袁国富), *et al*. Characteristics of $\delta^{18}O$ in precipitation over Northwest China and its water vapor sources. *Acta Geogrephica Sinica* (地理学报), 2008, **63**(1): 12-22 (in Chinese)

[3] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 1964, **6**: 436-468

[4] Araguás-Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over Southeast Asia. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**: 28721-28742

[5] Dansgaard W. The abundance of $\delta^{18}O$ in atmospheric water and water vapour. *Tellus*, 1953, **5**: 461-469

[6] Zhang X-P (章新平), Yao T-D (姚檀栋). World spatial characteristics of oxygen isotope ratio in precipitation. *Journal of Glaciology and Geocryology* (冰川冻土), 1994, **16**(3): 202-210 (in Chinese)

[7] Song X-F (宋献方), Liu J-R (柳鉴容), Sun X-M (孙晓敏), *et al*. Establishment of Chinese network of isotopes in precipitation (CHNIP) based on CERN. *Advances in Earth Science* (地球科学进展), 2007, **22** (7): 738-747 (in Chinese)

[8] Zhu J-J (朱建佳), Chen H (陈　辉), Gong G-L (巩国丽), *et al*. Hydrogen and oxygen isotopic compositions of precipitation and its water vapor sources in Eastern Qaidam basin. *Environmental Science* (环境科学), 2015, **36**(8): 2784-2790 (in Chinese)

[9] Zhao S-K (赵诗坤), Pang S-G (庞朔光), Wen R (文　蓉), *et al*. Influence of below-cloud secondary evaporation on stable isotope compositionin precipitation in the Haihe River Basin, China. *Progress in Geography* (地理科学进展), 2015, **34**(8): 1031-1038 (in Chinese)

[10] Wu J-K (吴锦奎), Yang Q-Y (杨淇越), Ding Y-J (丁永健), *et al*. Variations and simulation of stable isotopes in precipitation in the Heihe River basin. *Environmental Science* (环境科学), 2011, **32**(7): 1857-1866 (in Chinese)

[11] Chen Y-T (陈衍婷), Du W-J (杜文娇), Chen J-S (陈进生), *et al*. Composition of hydrogen and oxygen isotopic of precipitation and source apportionment of water vapor in Xiamen Area. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学), 2016, **36**(2): 667-674 (in Chinese)

[12] He J-Q (贺建桥), Zhang W (张　伟), Zhou J (周剑), *et al*. The impact of mountain range orientation on the lapse rate of precipitation $\delta^{18}O$ in the upper reaches of the Heihe River Basin in the Qilian Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology* (冰川冻土), 2016, **38**(2): 359-367 (in Chinese)

[13] Fan J-Z (范建忠), Li D-K (李登科), Gao M-S (高茂盛). Spatio-temporal variations of evapotranspiration in Shaanxi Province using MOD16 products. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2014, **23** (9): 1536-1543 (in Chinese)

[14] Liu C-Y (刘春雨), Dong X-F (董晓峰), Liu Y-Y (刘英英), *et al*. Spatial differences of net primary productivity in Gansu Province. *China Population, Resources and Environment* (中国人口·资源与环境), 2014, **24**(1): 163-170 (in Chinese)

[15] Gao Y (高　阳), Jin J-W (金晶炜), Cheng J-M (程积民), *et al*. Carbon sequestration status of forest ecosystems in Ningxia Hui Autonomous Region. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25** (3): 639-646 (in Chinese)

[16] Yan J-H (闫军辉), Liu D-M (刘冬梅), Yan J-P (延军平). The spatial structure of climate change in Shaanxi-Gansu-Ningxia region. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), 2009, **23**(9): 67-71 (in Chinese)

[17] Li S-S (李双双), Yan J-P (延军平), Wan J (万佳). The spatial-temporal changes of vegetation restoration on Loess Plateau in Shaanxi-Gansu-Ningxia region. *Acta Geogrephica Sinica* (地理学报), 2012, **67**(7): 960-970 (in Chinese)

[18] Wang X-D (王晓东). Climate change in Shaanxi-Gan-Ning area and its impacts analysis. *Arid Land Geography* (干旱区地理), 2004, **27**(1): 25-28 (in Chinese)

[19] Liu J-Y (刘洁遥), Zhang F-P (张福平), Feng Q (冯起), *et al*. Influence of below-cloud secondary evaporation on stable isotope composition in precipitation in Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2018, **29**(5): 1479-1488 (in Chinese)

[20] Tian C (田　超), Meng P (孟　平), Zhang J-S (张劲松), *et al*. Seasonal characteristics of δD and $\delta^{18}O$ in precipitation and its water vapor sources in the Xiaolangdi Reservoir area of Yellow River, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(12): 3579-3587 (in Chinese)

[21] Zhang Y-M (郑琰明), Zhong W (钟　巍), Peng X-Y (彭晓莹), *et al*. Correlation of $\delta^{18}O$ in precipitation

and moisture sources at Yunfu, western Guangdong Province, China. *Environmental Science* (环境科学), 2009, **30**(3): 637-643 (in Chinese)

[22] Zhang Y-H (张应华), Wu Y-Q (仵彦卿), Wen X-H (温小虎), *et al*. Application of environmental isotopes in water cycle. *Advances in Water Science* (水科学进展), 2006, **17**(5): 738-747 (in Chinese)

[23] Zhang M-J (张明军), Ma Q (马 潜), Li Y-J (李亚举), *et al*. Research of isotopic characteristic in precipitation and water vapor origin at the edge of monsoon region: A case study of Lanzhou City. *Journal of Northwest Normal University* (Natural Science) (西北师范大学学报: 自然科学版), 2011, **47**(6): 80-86 (in Chinese)

[24] Zheng S-H (郑淑蕙), Hou F-G (侯发高), Ni B-L (倪葆龄). Studies on stable deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation in China. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 1983, **28**(13): 801-806 (in Chinese)

[25] Li X-F (李小飞), Zhang M-J (张明军), Wang S-J (王圣杰), *et al*. Spatial and temporal variations of hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in Yellow River Basin and its environmental significance. *Acta Geologica Sinica* (地质学报), 2013, **87**(2): 269-277 (in Chinese)

[26] Huang J-Z (黄锦忠), Tan H-B (谭红兵), Wang R-A (王若安), *et al*. Hydrogen and oxygen isotopic analysis of perennial meteoric water in Northwest China. *Journal of China Hydrology* (水文), 2015, **35**(1): 33-50 (in Chinese)

[27] Wang K-L (王可丽), Jiang H (江 灏), Zhao H-Y (赵红岩). Atmospheric water vapor transport from westerly and monsoon over the northwest China. *Advances in Water Science* (水科学进展), 2005, **16**(3): 432-438 (in Chinese)

[28] Li X-F (李小飞), Zhang M-J (张明军), Ma Q (马 潜), *et al*. Characteristics of stable isotopes in precipitation over Northwest China and its water vapor sources. *Environmental Science* (环境科学), 2012, **33**(9): 2924-2931 (in Chinese)

[29] Liu JR, Song XF, Yuan GF, *et al*. Characteristics of $\delta^{18}O$ in precipitation over eastern monsoon China and the water vapor sources. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**: 200-211

[30] Wei K-Q (卫克勤), Lin R-F (林瑞芬). The influence of the monsoon climate on the isotopic composition of precipitation in China. *Geochimica* (地球化学学报), 1994, **23**(1): 33-41 (in Chinese)

[31] Li J-F (李佳芳), Shi P-J (石培基), Zhu G-F (朱国锋), *et al*. Characteristics of $\delta^{18}O$ in precipitation and moisture transports in the central Hexi Corridor. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2015, **35**(4): 947-955 (in Chinese)

[32] Zhang X-P (章新平), Yao T-D (姚檀栋). Distributional features of $\delta^{18}O$ in precipitation in China. *Acta Geogrephica Sinica* (地理学报), 1998, **53**(4): 356-363 (in Chinese)

[33] Kohn MJ, Welker JM. On the temperature correlation of $\delta^{18}O$ in modern precipitation. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, **231**: 87-96

[34] Yu WS, Yao TD, Tian LD, *et al*. Relationships between $\delta^{18}O$ in precipitation and air temperature and moisture origin on a south-north transect of the Tibetan Plateau. *Atmospheric Research*, 2008, **87**: 158-169

[35] Liu Z-F (刘忠方), Tian L-D (田立德), Yao T-D (姚檀栋), *et al*. Spatial distribution of $\delta^{18}O$ in precipitation over China. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2009, **54**(6): 804-811 (in Chinese)

[36] Hu K (胡 可), Chen H-S (陈洪松), Nie Y-P (聂云鹏), *et al*. Characteristics of seasonal variation of deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation in karst peak-cluster depression area, northwest Guangxi of China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2013, **29**(5): 53-62 (in Chinese)

[37] Zhang X-P (章新平), Liu J-M (刘晶淼), Masayoshi Nakawo (中尾正义), *et al*. Vapor origins revealed by deuterium excess in precipitation in southwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology* (冰川冻土), 2009, **31**(4): 613-619 (in Chinese)

[38] Peng TR, Wang CH, Huang CC, *et al*. Stable isotopic characteristic of Taiwan's precipitation: A case study of western Pacific monsoon region. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, **289**: 357-366

作者简介 刘洁遥, 女, 1993 年生, 硕士研究生. 主要从事生态水文学研究. E-mail: 1145335438@qq.com

责任编辑 杨 弘

刘洁遥, 张福平, 冯起, 等. 陕甘宁地区降水稳定同位素特征及水汽来源. 应用生态学报, 2019, **30**(7): 2191-2200
Liu J-Y, Zhang F-P, Feng Q, *et al*. Stable isotopes characteristics of precipitation over Shaanxi-Gansu-Ningxia and its water vapor sources. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(7): 2191-2200 (in Chinese)