

# 胶莱平原大气降水氢氧稳定同位素特征研究

王 莹，崔步礼<sup>\*</sup>，李东昇，王雅璇

鲁东大学 资源与环境工程学院，烟台 264025

**摘要：**区域大气降水稳定同位素组成是利用同位素技术研究区域水循环所必须的前提，对于深入了解水循环过程具有重要意义。本研究基于次降水样品，分析了胶莱平原及周边地区降水氢氧稳定同位素特征，探讨了降水同位素的环境效应，并通过对比分析不同水汽输送路径站点的降水同位素季节变化趋势，揭示了胶莱平原大气降水水汽来源。结果显示：胶莱平原大气降水线 LMWL 为  $\delta^2\text{H} = 6.38\delta^{18}\text{O} + 0.72$ ，胶莱平原大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  存在较显著的温度效应和降水量效应，高程效应不显著。6—9月，胶莱平原降水水汽主要受控于东亚季风，水汽主要来自相邻太平洋海域蒸发水汽；10月—次年5月，胶莱平原降水水汽主要受控于西风，水汽来源于局地蒸发，受极地水汽影响较小。本研究结果将为胶莱平原地表水—地下水—海水之间的相互转化及水循环研究提供基础。

**关键词：**稳定同位素；环境效应；降水；胶莱平原

## Stable isotopic characteristics of hydrogen and oxygen in precipitation in Jiaolai Plain

WANG Ying, CUI Buli\*, LI Dongsheng, WANG Yaxuan

School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China

**Abstract:** *Background, aim, and scope* Precipitation is a critical component of the water-cycle processes, and the main source of terrestrial water resources. A prerequisite for using isotopic techniques to study the regional water cycle is to examine the stable isotopic composition of its precipitation. The findings are of great significance for in-depth understanding of the water-cycle processes. The main purpose of this study is to explore the temporal and spatial changes of precipitation isotopes in the study area and determine the environmental impact of these precipitation isotopes. **Materials and methods** In this study, each event of precipitation was sampled and used to investigate the characteristics of stable isotopes ( $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$ , respectively) in precipitation on the Jiaolai Plain and its surrounding areas. The water vapor sources of precipitation over the plain were revealed through a comparative analysis of seasonal variations in precipitation isotopes among the stations located along different vapor transport paths. **Results** The results showed that the local meteoric water line (LMWL) was  $\delta^2\text{H} = 6.38\delta^{18}\text{O} + 0.72$ , with a gradient less than 8. The temperature effect of the  $\delta^{18}\text{O}$  of precipitation was significant ( $P < 0.001$ ). The amount effect of the  $\delta^{18}\text{O}$  of precipitation was significant ( $P < 0.05$ ). **Discussion** The precipitation

收稿日期：2021-01-27；录用日期：2021-03-22；网络出版：2021-04-05

**Received Date:** 2021-01-27; **Accepted Date:** 2021-03-22; **Online first:** 2021-04-05

基金项目：山东省自然科学基金项目（ZR2019MD040）；山东省高等学校青创科技支持计划（2019KJH009）

**Foundation Item:** Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2019MD040); Science and Technology Support Plan for Youth Innovation of Colleges and Universities in Shandong Province (2019KJH009)

通信作者：崔步礼，E-mail: cuibuli@163.com

**Corresponding Author:** CUI Buli, E-mail: cuibuli@163.com

引用格式：王 莹，崔步礼，李东昇，等. 2022. 胶莱平原大气降水氢氧稳定同位素特征研究 [J]. 地球环境学报, 13(2): 176–184.

**Citation:** Wang Y, Cui B L, Li D S, et al. 2022. Stable isotopic characteristics of hydrogen and oxygen in precipitation in Jiaolai Plain [J]. *Journal of Earth Environment*, 13(2): 176–184.

process was affected by non-equilibrium evaporation occurred when the drops fell below the cloud base. The relationship between the  $\delta^{18}\text{O}$  of the precipitation and the altitude on the Jiaolai Plain showed that the  $\delta^{18}\text{O}$  of the precipitation had an inverse relationship with altitude during the sapling period, meaning that it gradually depleted with altitude, although it was not significant. The  $\delta^{18}\text{O}$  of precipitation in Jiaolai Plain and other stations (Baotou, Shijiazhuang, Tokyo and Nanjing) were higher than Urumqi and Qiqihar, and their *d*-excess values were greater than 10, indicating that during the control period of the Westerlies (from October to May), the main water vapor source of plain precipitation was local evaporation, and the influence of polar water vapor was small. At the same time, during the period controlled by the East Asian Monsoon (from June to September), the *d*-excess value of the plain was similar to that of Tokyo and Qiqihar. Therefore, the precipitation in these three places has similar water vapor sources, that is, the water vapor evaporated from the adjacent Pacific Ocean. The water vapor source of the precipitation was controlled predominantly by the East Asian Monsoon from June to September, with the main source being evaporation from the adjacent Pacific Ocean. The plain was controlled by Westerlies from October through May, with the predominant vapor source being local evaporation. Water vapor from the polar region had minimal impact. **Conclusions** Significant temperature and amount effects existed in the  $\delta^{18}\text{O}$  of precipitation, although the altitude effect was not significant. The main water vapor source of the precipitation was evaporated from the adjacent Pacific Ocean from June to September, while the predominant vapor source was local evaporation from October through May, and water vapor from the polar region had minimal impact.

**Recommendations and perspectives** Several studies showed that the precipitation isotopes were significantly depleted when affected by the typhoon weather system. So it is necessary to further study the stable isotope characteristics of hydrogen and oxygen of precipitation during typhoon. These findings can serve as the basis for studying surface water—groundwater—seawater transformations, and the water-cycle in the Jiaolai Plain.

**Key words:** stable isotopes; environmental effects; precipitation; Jiaolai Plain

降水中氢氧稳定同位素 ( $^2\text{H}$  和  $^{18}\text{O}$ ) 的组成与水汽来源及气象条件有关, 能敏感地响应环境变化, 促使降水中氢氧稳定同位素成为气候变化和水文过程研究的有效工具, 可用来示踪各类水体来源和演化机制 (Aravena and Suzuki, 1990; Clark and Fritz, 1997; Aggarwal et al, 2012; Kong et al, 2019)。因此, 水体中的氢氧稳定同位素常被称为水的“指纹”或DNA, 成为自然界水循环和气候的天然示踪剂 (Dansgaard, 1964; Rozanski et al, 1993; Gat, 1996; Uemura et al, 2012; Cui and Li, 2015)。章新平和姚檀栋 (1998) 通过分析 IAEA/WMO 在中国设立的 GNIP 站点的降水氢氧稳定同位素数据, 总结了中国大气降水中氧同位素比率的分布特征和影响因素以及氧同位素比率与温度、降水量之间的关系; Cui and Li (2015) 通过分析青海湖流域内降水氢氧稳定同位素的时空变化特征, 揭示了青藏高原东北部大气降水的主要来源, 并估算了青海湖湖面蒸发对青海湖流域降水的贡献率为 23.42%。Koeniger et al (2016) 通过分析 2011 年 3 月至 2012 年 7 月叙

利亚西部喀斯特反黎巴嫩山脉的大气降水和四个泉水的同位素数据, 揭示了该地泉水系统受到冰川融雪和冬末降雪的影响。上述相关研究均体现了氢氧稳定同位素在研究水汽来源及示踪不同尺度的水循环过程中的优越性。

胶莱平原地处中纬度欧亚大陆东缘, 中国山东半岛中东部 (图 1), 是山东省经济发展的核心区域之一 (方春洪等, 2012; 岳玲莉等, 2016)。胶莱平原处于山东半岛东部山地丘陵区, 无较大河流过境, 降水成为区域淡水资源的唯一输入源 (肖蓓等, 2019), 致使降水的时空分布直接影响胶莱平原的工农业生产活动。自 20 世纪 80 年代以来, 胶莱平原地区干旱事件发生频率和持续时间增加, 导致地表水资源紧缺, 加之农业生产活动过度开采地下水, 胶莱平原出现大范围的地下水平值漏斗区 (韩美, 1996), 进而引发了部分地区出现地面沉降、海水入侵、生态退化、农业减产及地方病加剧等一系列严重的地质和环境问题 (李道高等, 2000; Han et al, 2014; Hou et al, 2016), 给当地社会经济可持续发展带来极

大危害,引起了各级政府和学者的极大关注并开展了大量的研究工作。相关研究主要涉及地下水漏斗的成因、海水入侵的成因和交换率、地下水水体污染及水资源评价等 (Meng et al, 2002; 李瑜等, 2007; Ma et al, 2015; Hou et al, 2016), 而对唯一输入源的降水研究相对薄弱,特别是有关胶莱平原及相近区域大气降水同位素特征及其水汽来源的相关研究尚未见报道,致使区域内水体转化及水循环研究存在一定的局限性,同时限制了区域生态退化、地下水污染、地方病溯源等相关研究的深入开展。

因此,本研究以胶莱平原为研究区,依托区域内 6 个气象站开展次降水样品的采集,探究胶莱平原大气降水同位素时空变化特征,揭示胶莱平原大气降水同位素的环境效应,探讨胶莱平原大气降水水汽来源。该研究可为胶莱平原地表水—地下水—海水之间的相互转化及水循环研究提供基础数据,对区域水资源的合理利用提供策略和建议支撑。

## 1 研究区域、数据及方法

### 1.1 研究区概况

胶莱平原(亦称胶莱谷地,  $118^{\circ}34'55''$ — $120^{\circ}40'15''$ E,  $35^{\circ}38'38''$ — $37^{\circ}23'43''$ N)位于鲁中山丘区与胶东丘陵区之间(宽 30—80 km),海拔大部分在 50 m 以下,北达莱州湾,南抵胶州湾。胶莱平原主要由两侧丘陵区发育的河流冲积而成,主要涉及潍河、大沽河、胶莱河等河流。本研究拟从流域尺度分析胶莱平原的降水同位素特征,特将研究区范围扩展到各流域的分水岭,研究区涉及流域面积 17762.22 km<sup>2</sup>(图 1)。

研究区气候为暖温带季风气候,年平均气温为 12.9℃,年降水量为 626.7 mm(1981—2010 年),降水时空分布不均,时间上,降水多集中在 6—8 月(约占全年降水的 60%—65%);空间上,降水量表现为自东南向西北递减(肖蓓等,2019)。年平均蒸发量为 1665.1—2158.1 mm,年平均相对湿度 68%—72%,年内无霜期 190—210 d,最大冻结深度 40—50 cm。胶莱平原土壤类型主要为棕壤、潮土、砂姜黑土等;自然植被为暖温带落叶阔叶林和赤松,沿海盐土上分布翅碱蓬为主的一年生植物群落,海滩及河滩上则有砂生植被分布。

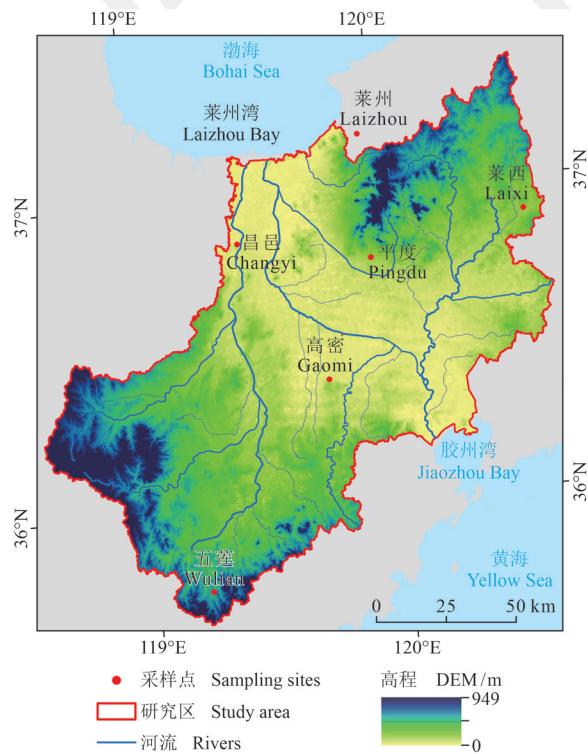


图 1 胶莱平原地理位置及采样点分布

Fig. 1 Location of the Jiaolai Plain and sites for sampling precipitation

### 1.2 数据来源及研究方法

#### 1.2.1 降水样品采集及测试

根据研究区地形与海拔高度分布特征,在研究区内布设降水采集点 6 处(图 1),分别位于昌邑、高密、莱西、莱州、平度、五莲 6 个气象局。2018 年 10 月—2019 年 9 月,共收集次降水样品 254 个,其中降雨 232 个,降雪 22 个。采样期间同时观测降水量。

表 1 研究区内气象观测站经纬度及海拔

Tab. 1 Latitude, longitude and altitude of meteorological stations in the study area

气象站点 Weather station	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude/m
昌邑 Changyi	$119^{\circ}25'18''$ E	$36^{\circ}51'32''$ N	23.5
高密 Gaomi	$119^{\circ}44'03''$ E	$36^{\circ}23'03''$ N	51.5
莱西 Laixi	$120^{\circ}33'32''$ E	$36^{\circ}54'03''$ N	76.9
莱州 Laizhou	$119^{\circ}56'38''$ E	$37^{\circ}11'03''$ N	48.4
平度 Pingdu	$119^{\circ}56'49''$ E	$36^{\circ}46'17''$ N	62.2
五莲 Wulian	$119^{\circ}12'18''$ E	$35^{\circ}44'59''$ N	148.2

降水样品中的氢氧稳定同位素在西北农林科技大学采用 LGR 液态水同位素分析仪(IWA-45-

EP) 测定, 以 VSMOW 作为标样,  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  的测试精度分别为  $\pm 0.5\text{\textperthousand}$  和  $\pm 0.2\text{\textperthousand}$ 。

### 1.2.2 研究方法

本研究选取温度效应、降水量效应和高程效应来分析胶莱平原的大气降水同位素环境效应 (Dansgaard, 1964; Bortolami et al, 1979; Cook and Herzeg, 2000)。为反映胶莱平原的降水来源及水汽运移路径特征, 通过对比分析不同降水路径的全球大气降水同位素网络 GNIP (global network of isotopes in precipitation) 站点的降水同位素季节变化特征, 验证胶莱平原水汽来源结果。自西向东包括: 乌鲁木齐、包头、石家庄、东京; 自南向北包括: 香港、南京和齐齐哈尔。其中, 香港位于中国东南部, 受控于东南季风; 乌鲁木齐位于中国西北部, 受控于西风; 包头和石家庄 (研究区的西北方向)、东京 (研究区的东部方向)、南京 (研究区的南部方向) 及齐齐哈尔 (研究区的北部方向) 5 个站点的湿季受控于东南季风, 干季受控于西风 (图 1; Araguás-Araguás et al, 1998; Ma et al, 2012)。各站点的降水同位素数据下载自全球大气降水同位素网络 GNIP (<http://www.iaea.org>)。

## 2 结果分析

### 2.1 大气降水同位素特征

胶莱平原大气降水中的  $\delta^2\text{H}$  介于  $-89.76\text{\textperthousand}$ — $-0.54\text{\textperthousand}$ , 平均值为  $-34.43\text{\textperthousand}$ ;  $\delta^{18}\text{O}$  介于  $-13.85\text{\textperthousand}$ — $-0.05\text{\textperthousand}$ , 平均值为  $-5.51\text{\textperthousand}$  (图 2)。各值均处于中国大气降水氢氧稳定同位素的波动范围 ( $\delta^2\text{H}$ :  $-280.0\text{\textperthousand}$ — $-24.0\text{\textperthousand}$ ;  $\delta^{18}\text{O}$ :  $-35.5\text{\textperthousand}$ — $2.5\text{\textperthousand}$ ) 之内 (Tian et al, 2001)。 $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^2\text{H}$  在时间上的分布规律相似, 均呈现双峰状 (“M”型): 1—5月,  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  逐渐富集; 5—8月逐渐贫化; 8—9月逐渐富集; 9—12月逐渐贫化 (图 2)。总体表现出夏冬低、春秋高的季节变化特征, 这主要与不同季节水汽来源以及降水期间的气象条件有关。其中,  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值在 5 月开始贫化, 其原因可能是东亚季风自 5 月开始影响胶莱平原的降水, 致使同位素相对贫化 (Ding and Chan, 2005; Kong and Pang, 2016)。

大气降水中  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  的关系构成胶莱平原的本地大气降水线 LMWL (图 3) ( $\delta^2\text{H}=6.38\delta^{18}\text{O}+0.72$ , VSMOW,  $n=254$ ,  $R=0.89$ ), 此大气降水线略偏离全球大气降水线 (GMWL) ( $\delta^2\text{H}=8\delta^{18}\text{O}+$

10

), 这是因为局地环流系统在时空尺度上的水汽来源及蒸发模式不同 (Clark and Fritz, 1997; Cui and Li, 2015)。胶莱平原大气降水线与石家庄地区大气降水线 ( $\delta^2\text{H}=6.39\delta^{18}\text{O}-3.75$ ,  $R^2=0.88$ ) (朱艺文等, 2017)、天津地区大气降水线 ( $\delta^2\text{H}=6.57\delta^{18}\text{O}+0.31$ ,  $R^2=0.88$ ) (徐涛等, 2014) 以及相邻的国际原子能机构 GNIP 站点烟台站和天津站大气降水线 (分别为  $\delta^2\text{H}=6.29\delta^{18}\text{O}-3.63$ ,  $R^2=0.81$ ;  $\delta^2\text{H}=6.57\delta^{18}\text{O}+0.31$ ,  $R^2=0.94$ ) 的斜率相近, 表明胶莱平原与这些相邻区域的大气降水来源具有相似性。同时, 各大气降水线的斜率均低于全球大气降水线的平均值 8, 表明降水过程可能受到了云下二次蒸发的影响, 氢氧稳定同位素发生部分分馏, 使得大气降水线斜率变小 (Dansgaard, 1964; Clark and Fritz, 1997)。

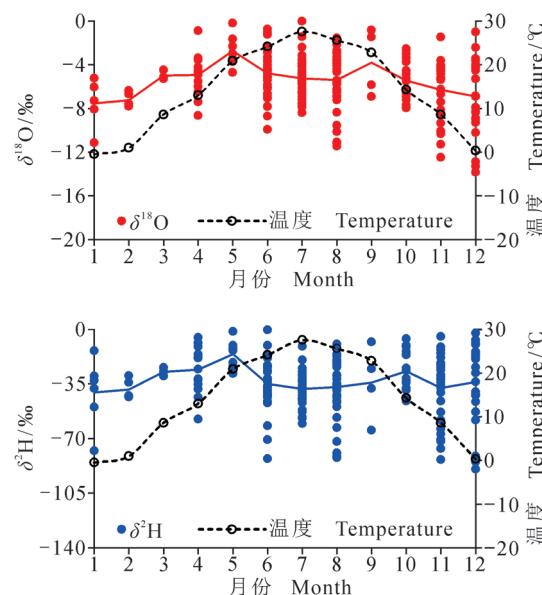


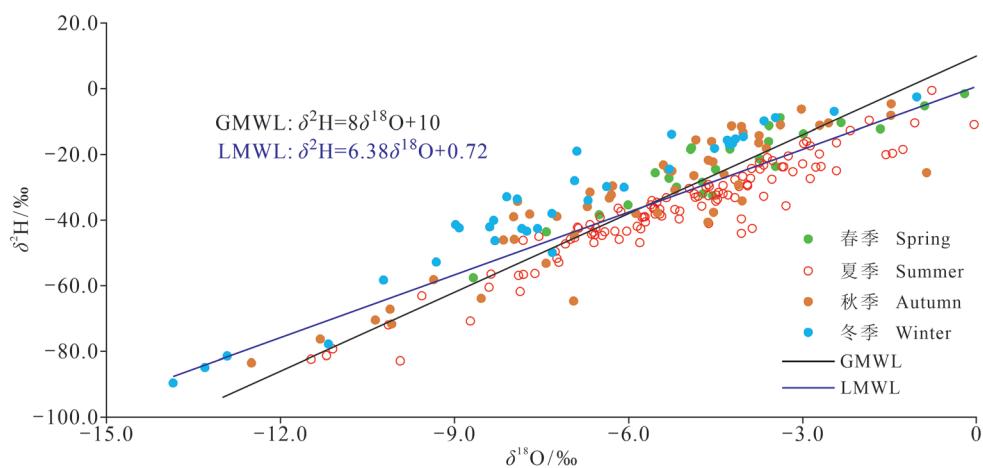
图 2 胶莱平原大气降水同位素及气温的年内变化特征

Fig. 2 Contents of  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation and temperature of the Jiaolai Plain

胶莱平原大气降水的氘盈余介于  $-23.32\text{\textperthousand}$ — $36.00\text{\textperthousand}$ , 平均值为  $7.56\text{\textperthousand}$  (图 4)。其中, 10 月—次年 4 月降水中的大部分  $d$  值均大于  $10\text{\textperthousand}$  (图 4), 表明降水的水汽源区湿度较低; 同时, 此时段 (春季、秋季、冬季) 的降水氢氧稳定同位素点多位于本地大气降水线左上方 (图 3), 表明胶莱平原 10 月—次年 4 月的降水主要来源于西风带气团以及局地蒸发水汽, 并具有明显的陆地蒸发水汽再循环 (Gat et al, 1994; Araguás-Araguás et al, 1998; Froehlich et al, 2008; Pang et al,

2011; Pang et al., 2017)。5—9 月降水中的大部分  $d$  值均小于 10‰ (图 4)，表明降水水汽源区湿度较高 (王海静等, 2012)，即降水可能来源于相邻沿海区域或东亚季风携带的低纬度太平洋海域水汽 (Yamanaka et al., 2004)；同时，此时段的降水氢氧稳定同位素点多位于本地大气降水线右

下方 (图 3)，表明胶莱平原夏季降水受到云下二次蒸发影响 (Friedman et al., 1992; Cui and Li, 2015)。由此表明：胶莱平原大气降水中氘盈余存在明显的季节变化，这种季节性主要源于大气环流模式的逆转，致使胶莱平原不同时期的降水水汽来源不同 (Araguás-Araguás et al., 1998)。



LMWL: 本地大气降水线；GMWL: 全球大气降水线。

LMWL: local meteoric water line; GMWL: global meteoric water line.

图 3 胶莱平原大气降水氢氧稳定同位素及本地大气降水线  
Fig. 3 The relationship between  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  of precipitation in the Jiaolai Plain

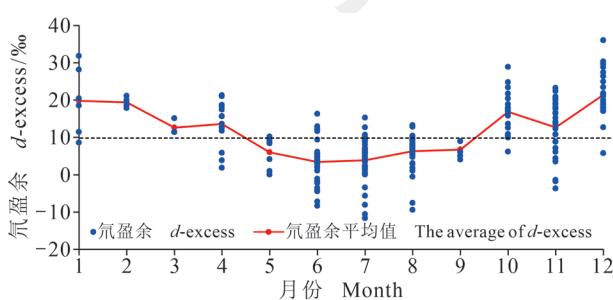


图 4 胶莱平原大气降水的氘盈余特征

Fig. 4 Values of  $d$ -excess in precipitation of the Jiaolai Plain

## 2.2 大气降水稳定同位素环境效应

### 2.2.1 温度效应

天然水体在蒸发或凝结过程中，氢氧稳定同位素的分馏强度与温度成反比，致使降水中氢氧稳定同位素  $\delta$  值与气温之间存在线性关系，称之为温度效应 (Dansgaard, 1964)。胶莱平原大气降水中的氢氧稳定同位素表现较强的季节性变化 (图 2)，1—5 月，逐渐富集；9—12 月逐渐贫化，即除夏季 (6—8 月) 外，其他季节的降水氢氧稳定同位素与气温变化趋势一致，表明胶莱平原大气降水氢氧稳定同位素存在较强的温度效应。

(图 2)，1—5 月，逐渐富集；9—12 月逐渐贫化，即除夏季 (6—8 月) 外，其他季节的降水氢氧稳定同位素与气温变化趋势一致，表明胶莱平原大气降水氢氧稳定同位素存在较强的温度效应。

降水同位素  $\delta^{18}\text{O}$  与温度的关系显示：降水中  $\delta^{18}\text{O}$  随温度升高而逐渐富集，富集幅度为  $0.093\text{‰} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  (表 1)，温度效应较显著 (显著水平在 0.001 以上)，与相邻区域石家庄地区的温度效应相近 (朱艺文等, 2017)。

### 2.2.2 降水量效应

雨量的大小对降水同位素组成也产生影响，通常雨量越大， $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^2\text{H}$  越小 (Dansgaard, 1964)。胶莱平原降水同位素  $\delta^{18}\text{O}$  与降水量的关系显示：降水中  $\delta^{18}\text{O}$  随降水量增加而逐渐贫化，贫化幅度为  $0.02\text{‰} \cdot \text{mm}^{-1}$  (表 1)，降水量效应较显著 (显著水平在 0.05 以上)。其原因可能是受东亚季风影响的结果 (陈中笑等, 2010)，受季风影响较大的香港、南京都有明显的雨量效应，天津则较弱，齐齐哈尔和内陆区域的降水量效应不显著 (Araguás-Araguás et al., 1998; Kong et al., 2019)。

### 2.2.3 高程效应

高程 (高度) 效应是指在地形起伏比较大的地区当水汽团从地面升起发生绝热冷凝 (通过扩散) 时都会出现地形降水，从而使得大气降水的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^2\text{H}$  值随着高程增加而降低的现象

(Bortolami et al, 1979)。胶莱平原大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与高程的关系显示(表2): 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与高

程呈反比关系, 即降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 随海拔升高逐渐贫化, 呈现高程效应, 但不显著。

表2 胶莱平原大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的环境效应

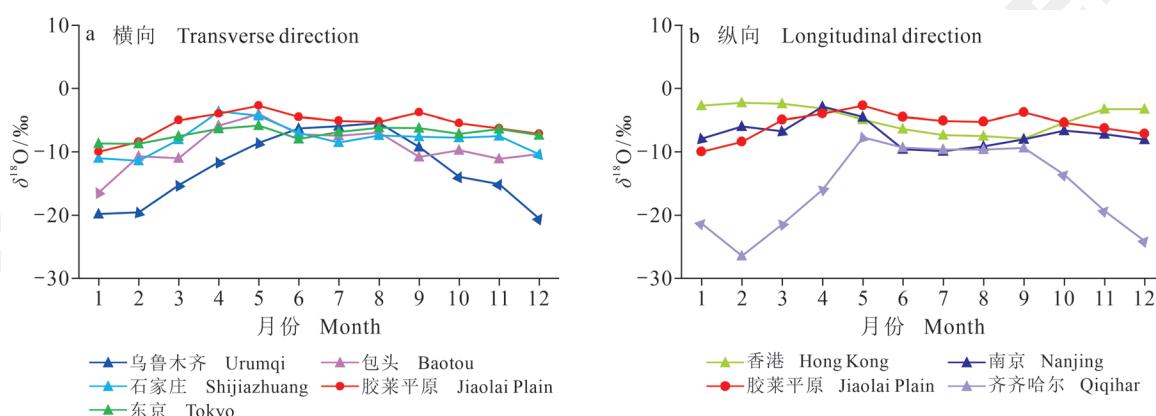
Tab. 2 Environmental effects of the stable isotopes in precipitation of the Jiaolai Plain

环境效应 Environmental effects	方程 Linear equation	样本数及相关系数 Samples and correlation coefficient	显著水平 Significant level
温度效应 Temperature effect	$\delta^{18}\text{O} = 0.093T - 7.114$	$n=254, R=0.346$	$P < 0.001$
降水量效应 Precipitation effect	$\delta^{18}\text{O} = -0.020P - 5.316$	$n=254, R=-0.144$	$P < 0.05$
高程效应 Altitude effect	$\delta^{18}\text{O} = -0.005\text{Alt} - 5.561$	$n=254, R=-0.200$	$P > 0.05$

### 2.3 胶莱平原大气降水来源

为了分辨胶莱平原大气降水水汽来源, 选取不同季风区内GNIP站点的降水同位素进行对比分析(图1、图5、图6)。乌鲁木齐降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温变化呈正相关, 表现为夏季相对富集, 冬季相对贫化(Tian et al, 2007; Yao et al, 2013)。香港的降水主要受东亚季风携带的海洋水汽影响, 夏季温度高、降水量大, 水汽主要来源于较远海域的蒸发水汽, 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 相对贫化; 冬季降水水汽主要来源于近海域及本地的蒸发水汽, 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 相对富集(Araguás-Araguás et al, 1998; Xie et al, 2011)。图5显示: 在10月一次年5月, 胶莱平原降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与包头、石家庄、东京、

南京的大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化趋势相似, 此时间段各站点降水均受控于西风。6—9月, 胶莱平原降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与香港、东京、南京、石家庄降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化趋势相似, 此时段各站点降水均受控于东亚季风。与之相反, 胶莱平原降水 $\delta^{18}\text{O}$ 在6—9月与乌鲁木齐降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化趋势相反(图5a), 此时段乌鲁木齐降水受控于西风(冯芳等, 2017); 在10月一次年5月, 胶莱平原降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与香港降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化趋势相反(图5b), 此时段香港降水受控于东亚季风(Araguás-Araguás et al, 1998)。由此说明, 6—9月, 胶莱平原降水水汽受控于东亚季风, 10月一次年5月, 受控于西风。

图5 胶莱平原及相关站点中降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 年内变化特征Fig. 5 Seasonal variation of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation in the Jiaolai Plain and other stations derived from GNIP network

同时, 在西风控制时段(10月一次年5月), 乌鲁木齐和齐齐哈尔的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 贫化程度最高(图5), 其原因主要是两个站点降水均受西风环流携带的大西洋水汽和极地水汽共同作用, 水汽沿途凝结降水且陆地蒸发补充较少, 使得降水 $\delta^{18}\text{O}$ 贫化程度高(李小飞等, 2012; 冯芳等, 2017)。乌鲁木齐降水同位素氘盈余( $d$ )大于

10, 而齐齐哈尔降水 $d$ 小于10(图6), 表明齐齐哈尔降水来源于北冰洋冷湿水汽的比例较高, 乌鲁木齐降水来源于沿途陆地蒸发水汽的比例较高(李小飞等, 2012; 冯芳等, 2017; Pang et al, 2017)。胶莱平原与其他站点(包头、石家庄、东京、南京)的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 均高于乌鲁木齐和齐齐哈尔, 且氘盈余大于10, 表明胶莱平原降水水

汽在西风控制时段主要来源于局地蒸发，受极地水汽影响较小。同时，图 6 显示，胶莱平原与东京和齐齐哈尔的  $d$  值在东亚季风控制时段（6—

9 月）相近，表明其降水水汽来源一致，均为湿度较高的相邻太平洋海域蒸发水汽（Kurita et al, 2015）。

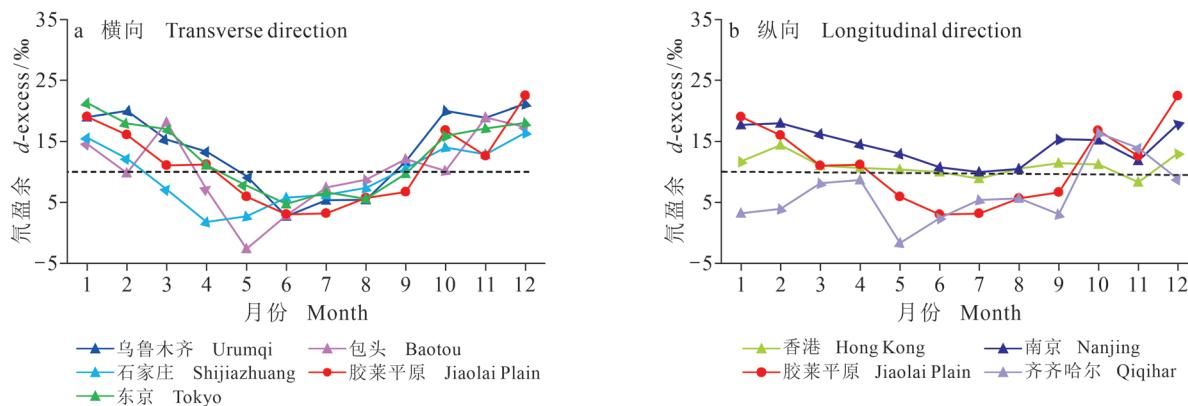


图 6 胶莱平原及相关站点中降水中氘盈余年内变化特征

Fig. 6 The  $d$ -excess in precipitation in the Jiaolai Plain and other stations derived from GNIP network

### 3 结论

胶莱平原大气降水氢氧稳定同位素在时间上呈现双峰状（“M”型）变化特征，总体表现出夏冬季节低、春秋季节高。本地大气降水线 LMWL 为  $\delta^2\text{H} = 6.38\delta^{18}\text{O} + 0.72$ 。胶莱平原大气降水的氢氧稳定同位素具有显著的温度效应和较显著的降水量效应，高程效应不显著。

对比分析 GNIP 网点的同位素及氘盈余值，获取胶莱平原水汽来源特征：6—9 月，胶莱平原降水水汽受控于东亚季风，水汽主要来自相邻太平洋海域蒸发水汽；10 月一次年 5 月，受控于西风，水汽来源于大面积地表水体蒸发水汽与大气水汽（上风向水汽）混合参与降水过程，受极地水汽影响较小。

### 参考文献

- 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. [Chen Z X, Cheng J, Guo P W, et al. 2010. Distribution characters and its control factors of stable isotope in precipitation over China [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 33(6): 667—679.]
- 方春洪, 梁湘波, 刘容子. 2012. 基于海湾空间的海洋经济差异分析——以辽东湾、渤海湾、莱州湾为例 [J]. 中国人口·资源与环境, 22(2): 170—174. [Fang C H, Liang X B, Liu R Z. 2012. Comparative analysis of marine economic difference based on geospatial gulfs: a case study of Liaodong

Bay, Bohai Bay, Laizhou Bay [J]. *China Population, Resources and Environment*, 22(2): 170—174.]

冯芳, 冯起, 刘贤德, 等. 2017. 祁连山排露沟流域降水  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  特征及水汽来源 [J]. 中国沙漠, 37(5): 997—1005. [Feng F, Feng Q, Liu X D, et al. 2017. Characteristics of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  in precipitation and moisture sources of Pailugou catchment in the Qilian Mountains [J]. *Journal of Desert Research*, 37(5): 997—1005.]

韩美. 1996. 莱州湾地区海水入侵与地貌的关系 [J]. 海洋与湖沼, 27(4): 414—420. [Han M. 1996. Realationship between the seawater intrusion and landforms in Laizhou Bay area [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 27(4): 414—420.]

李瑜, 郭聚江, 杨淑华, 等. 2007. 山东省地下水超采漏斗发展演变分析 [J]. 地下水, 29(4): 36—39. [Li Y, Guo J J, Yang S H, et al. 2007. Analysis on the development and evolvement of water table depression cone in Shandong Province [J]. *Ground Water*, 29(4): 36—39.]

李道高, 赵明华, 韩美, 等. 2000. 莱州湾南岸平原浅埋古河道带研究 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 20(1): 23—29. [Li D G, Zhao M H, Han M, et al. 2000. A study of the shallowly-buried paleochannel zones in the South Coast Plain of the Laizhou Bay [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 20(1): 23—29.]

李小飞, 张明军, 马潜, 等. 2012. 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*, 33(9): 2924–2931. [Li X F, Zhang M J, Ma Q, et al. 2012. Characteristics of stable isotopes in precipitation over northeast China and its water vapor sources [J]. *Environmental Science*, 33(9): 2924–2931.]
- 王海静, 张金流, 刘再华. 2012. 四川黄龙降水氢、氧同位素对气候变化的指示意义 [J]. *中国岩溶*, 31(3): 253–258. [Wang H J, Zhang J L, Liu Z H. 2012. Indications of the hydrogen and oxygen isotopes in precipitation for climate change in Huanglong, Sichuan [J]. *Carsologica Sinica*, 31(3): 253–258.]
- 肖 蓓, 崔步礼, 姜宝福, 等. 2019. 山东省不同地形区降雨侵蚀力时空变化特征 [J]. *地球环境学报*, 10(3): 267–280. [Xiao B, Cui B L, Jiang B F, et al. 2019. Spatial and temporal variations of rainfall erosivity in different topographic regions of Shandong Province [J]. *Journal of Earth Environment*, 10(3): 267–280.]
- 徐 涛, 刘国东, 邢 冰. 2014. 天津地区大气降水中氢氧稳定同位素特征及影响因素研究 [J]. *西南民族大学学报(自然科学版)*, 40(3): 421–427. [Xu T, Liu G D, Xing B. 2014. Variation characteristics and influencing factors of hydrogen-oxygen stable isotope in precipitation of Tianjin area [J]. *Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 40(3): 421–427.]
- 岳玲莉, 高会旺, 刘明君, 等. 2016. 利用胶州湾水环境指标分析青岛市环境经济关系 [J]. *海洋环境科学*, 35(1): 106–112. [Yue L L, Gao H W, Liu M J, et al. 2016. The relationships between environment and economy of Qingdao City by using water quality parameters in Jiaozhou Bay [J]. *Marine Environmental Science*, 35(1): 106–112.]
- 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. [Zhang X P, Yao T D. 1998. Distributional features of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 53(4): 356–364.]
- 朱艺文, 张福平, 王虎威, 等. 2017. 石家庄地区大气降水氢氧同位素特征分析 [J]. *山东农业科学*, 49(5): 116–123. [Zhu Y W, Zhang F P, Wang H W, et al. 2017. Analysis on characteristics of stable hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in Shijiazhuang [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 49(5): 116–123.]
- Aggarwal P K, Alduchov O A, Froehlich K O, et al. 2012. Stable isotopes in global precipitation: a unified interpretation based on atmospheric moisture residence time [J]. *Geophysical Research Letters*, 39(11): L11705. DOI: 10.1029/2012GL051937.
- Araguás-Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. 1998. Stable isotope composition of precipitation over Southeast Asia [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D22): 28721–28742.
- Aravena R, Suzuki O. 1990. Isotopic evolution of river water in the northern Chile region [J]. *Water Resources Research*, 26(12): 2887–2895.
- Bortolami G C, Ricci B, Susella G F, et al. 1979. Hydrogeochemistry of the Corsaglia Valley, Maritime Alps, Piedmont, Italy [J]. *Journal of Hydrology*, 44(1/2): 57–79.
- Clark I, Fritz P. 1997. Environmental isotopes in hydrogeology [M]. Boca Raton: CRC Press.
- Cook P G, Herczeg A L. 2000. Environmental tracers in subsurface hydrology [M]. New York: Springer Science.
- Cui B L, Li X Y. 2015. Stable isotopes reveal sources of precipitation in the Qinghai Lake Basin of the northeastern Tibetan Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 527/528: 26–37.
- Dansgaard W. 1964. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 16(4): 436–468.
- Ding Y H, Chan J C L. 2005. The East Asian summer monsoon: an overview [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 89(1/2/3/4): 117–142.
- Friedman I, Smith G I, Gleason J D, et al. 1992. Stable isotope composition of waters in southeastern California 1. modern precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D5): 5795–5812.
- Froehlich K, Kralik M, Papesch W, et al. 2008. Deuterium excess in precipitation of Alpine regions-moisture recycling [J]. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 44(1): 61–70.
- Gat J R. 1996. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 24: 225–262.
- 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.
- Han D M, Song X F, Currell M J, et al. 2014. Chemical

- and isotopic constraints on evolution of groundwater salinization in the coastal plain aquifer of Laizhou Bay, China [J]. *Journal of Hydrology*, 508: 12–27.
- Hou L J, Li H L, Zheng C M, et al. 2016. Seawater-groundwater exchange in a silty tidal flat in the south coast of Laizhou Bay, China [J]. *Journal of Coastal Research*, 74: 136–148.
- Kong Y L, Pang Z H. 2016. A positive altitude gradient of isotopes in the precipitation over the Tianshan Mountains: effects of moisture recycling and sub-cloud evaporation [J]. *Journal of Hydrology*, 542: 222–230.
- Kong Y L, Wang K, Li J, et al. 2019. Stable isotopes of precipitation in China: a consideration of moisture sources [J]. *Water*, 11(6): 1239. DOI: 10.1029/2006JD007718.
- Kurita N, Fujiyoshi Y, Nakayama T, et al. 2015. East Asian Monsoon controls on the inter-annual variability in precipitation isotope ratio in Japan [J]. *Climate of the Past*, 11(2): 339–353.
- Ma J Z, Zhang P, Zhu G F, et al. 2012. The composition and distribution of chemicals and isotopes in precipitation in the Shiyang River system, northwestern China [J]. *Journal of Hydrology*, 436/437: 92–101.
- Ma Q, Li H L, Wang X J, et al. 2015. Estimation of seawater—groundwater exchange rate: case study in a tidal flat with a large-scale seepage face (Laizhou Bay, China) [J]. *Hydrogeology Journal*, 23(2): 265–275.
- Meng G L, Han Y S, Wang S Q, et al. 2002. Seawater intrusion types and regional divisions in the southern coast of Laizhou Bay [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 20(3): 277–284.
- Pang Z H, Kong Y L, Froehlich K, et al. 2011. Processes affecting isotopes in precipitation of an arid region [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 63(3): 352–359.
- Pang Z H, Kong Y L, Li J, et al. 2017. An isotopic geoindicator in the hydrological cycle [J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 17: 534–537.
- Koeniger P, Toll M, Himmelsbach T. 2016. Stable isotopes of precipitation and spring waters reveal an altitude effect in the Anti-Lebanon Mountains, Syria [J]. *Hydrological Processes*, 30(16): 2851–2860.
- Rozanski K, Araguás-Araguás L, Gonfiantini R. 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation [M]// Swart P K, Lohmann K C, McKenzie J, et al. Climate change in continental isotopic records. Washington: American Geophysical Union: 1–36.
- Tian L D, Yao T D, MacClune K, et al. 2007. Stable isotopic variations in west China: a consideration of moisture sources [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D10). DOI: 10.1029/2006JD007718.
- Tian L D, Yao T D, Sun W Z, et al. 2001. Relationship between  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  in precipitation on north and south of the Tibetan Plateau and moisture recycling [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 44(9): 789–796.
- Uemura R, Yonezawa N, Yoshimura K, et al. 2012. Factors controlling isotopic composition of precipitation on Okinawa Island, Japan: implications for paleoclimate reconstruction in the East Asian Monsoon region [J]. *Journal of Hydrology*, 475: 314–322.
- Xie L H, Wei G J, Deng W F, et al. 2011. Daily  $\delta^{18}O$  and  $\delta D$  of precipitations from 2007 to 2009 in Guangzhou, South China: implications for changes of moisture sources [J]. *Journal of Hydrology*, 400(3/4): 477–489.
- Yamanaka T, Shimada J, Hamada Y, et al. 2004. Hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in the northern part of the North China Plain: climatology and inter-storm variability [J]. *Hydrological Processes*, 18(12): 2211–2222.
- Yao T D, Masson-Delmotte V, Gao J, et al. 2013. A review of climatic controls on  $\delta^{18}O$  in precipitation over the Tibetan Plateau: observations and simulations [J]. *Reviews of Geophysics*, 51(4): 525–548.