

海河流域降水稳定同位素的云底二次蒸发效应

赵诗坤¹, 庞朔光¹, 文 蓉², 刘忠方^{3*}

(1. 天津师范大学, 天津市水环境与水资源重点实验室, 天津 300387; 2. 中国科学院青藏高原研究所, 青藏高原环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100085; 3. 同济大学, 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

摘 要:云底二次蒸发导致的同位素动力分馏可显著影响观测的降水同位素组成和大气水线。本文利用海河流域7个监测站点的降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 数据,分析了云底二次蒸发对流域降水同位素的影响。结果表明:流域降水水样的大气水线为 $\delta^2\text{H}=7.19\delta^{18}\text{O}-0.74$,显著不同于降雪水样的大气水线($\delta^2\text{H}=8.42\delta^{18}\text{O}+15.88$);流域降雨,特别是小降雨($<5\text{ mm}$)事件,易受到云底二次蒸发的影响,导致其大气水线的斜率和截距均随着降雨量的减小而减小。流域降雨同位素的云底二次蒸发主要受气温和相对湿度控制,随着气温的升高和相对湿度的减小,云底二次蒸发加剧,导致观测的地面降雨富集重的同位素,同时伴随的同位素动力分馏导致流域降水过量氘(d)值以及大气水线的斜率和截距均减小。与平原地区相比较,流域山间盆地地区受“雨影效应”影响,气候相对干燥,其降雨同位素受更强的云底二次蒸发影响。观测期间,流域小的降雨事件占总降水事件的42%,故云底二次蒸发对流域降水同位素具有重要的影响。

关键词:降水; $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$;气温;相对湿度;云底二次蒸发;海河流域

1 引言

自然界水体中的氢氧稳定同位素组成($\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$)作为理想的示踪剂已广泛应用于水文与气候研究领域(Gat, 1996; Jouzel et al, 2000),这种应用主要基于对研究地区不同水体,特别是降水稳定同位素变化的认识。经典的瑞利分馏模型可以在很大程度上解释不同地区降水同位素的时空变化(Dansgaard, 1964),但由于其过分简化了复杂的降水过程,导致所预测的降水同位素值和实际观测值存在某些偏差(Hoffmann et al, 1998; Yoshimura et al, 2003)。例如,瑞利模型忽略了不同来源水汽混合对降水同位素的影响;同时,该模型假设水汽在云团中凝结一经形成便迅速离开系统,不再和系统发生交换(Jouzel et al, 1997),而实际上当雨滴从云底降至地面经过未饱和大气时,会受到再蒸发的影响,从而导致轻的同位素(H_2^{16}O)优先被蒸发,而剩余雨滴中则富集重的同位素(H_2^{18}O 和 HDO)(Friedman et al, 1962; Stewart, 1975; Risi et al, 2010);此

外,雨滴在经过饱和大气降落时,也会和周围大气发生同位素平衡交换,从而改变其同位素组成(Friedman et al, 1962; Lee et al, 2008)。因此,对于水汽来源相对稳定的降水,瑞利模型可以很好地预测云底降水同位素的演变,但是并不能充分解释地面所观测的降水同位素变化。

云底二次蒸发是影响凝结形成后降水同位素变化的一个重要因素(Stewart, 1975; Field et al, 2010),特别是在干旱半干旱地区,雨滴由云底降落经过干燥的空气时,导致雨滴再蒸发作用加强,从而使得周围大气水汽中重同位素贫化,而观测的降水中重同位素富集(Stewart, 1975)。同时,由于蒸发加剧了同位素动力分馏效应,导致其降水过量氘、大气水线的斜率和截距均明显降低(Peng et al, 2004, 2007)。Peng等(2004, 2007)在研究加拿大西南部城市卡尔加里降水同位素时,发现云底二次蒸发对该地区小的降雨事件具有显著影响。Froehlich等(2008)等通过对奥地利不同地区降水同位素的研究发现,由于雨滴降落至地面所经过的距离更

收稿日期:2014-12;修订日期:2015-05。

基金项目:国家自然科学基金项目(41171022);国家自然科学基金杰出青年基金项目(41025002)。

作者简介:赵诗坤(1989-),男,山东滕州人,硕士研究生,主要从事水文同位素方面研究,E-mail: zhaosk0815@gmail.com。

通讯作者:刘忠方(1975-),男,山西临汾人,教授,博导,水同位素与气候变化方面的研究,E-mail: liuzf406@gmail.com。

引用格式:赵诗坤, 庞朔光, 文蓉, 等. 2015. 海河流域降水稳定同位素的云底二次蒸发效应[J]. 地理科学进展, 34(8): 1031-1038. [Zhao S K, Pang S G, Wen R, et al. 2015. Influence of below-cloud secondary evaporation on stable isotope composition in precipitation in the Haihe River Basin, China[J]. Progress in Geography, 34(8): 1031-1038.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2015.08.010

长,平原降水所受的云底二次蒸发要强于高山地区。云底二次蒸发对中国夏季降水也具有重要的影响(孟玉川等, 2010),特别是在西北干旱地区(Kong et al, 2013; Ma et al, 2014)和青藏高原北部地区(Liu et al, 2008)。最近基于卫星观测的大气水汽 $\delta^2\text{H}$ 数据和大气环流模拟均表明,云底二次蒸发是导致中国夏季水汽(同位素由东南向西北递减)和降水(同位素由东南向西北递增)同位素空间分布差异的主要因素(Lee et al, 2012; Liu et al, 2014)。

海河流域地处中国半干旱与半湿润气候区,受自然和人为因素影响(王中根等, 2008),其水资源与水环境问题日趋严峻,已成为中国可持续发展研究的热点地区(夏军, 2002)。在该流域开展降水同位素研究,不仅可以揭示其主要的水文气候过程,也有助于科学解释华北地区树轮、湖泊和洞穴沉积物同位素记录。如卫克勤等(1982)研究了北京地区降水同位素的变化,发现其季节变化很小,且与温度和降水关系不明显,这一结果与Liu等(2011)的研究一致,被归为复杂的水汽来源控制;而Wen等(2010)的研究则表明其变化和水汽的同位素变化一致,春季最高,随后的夏季则有所降低。刘相超等(2005)通过对潮白河流域降水氧同位素的研究,发现其同位素变化具有明显的降水量效应。最近,基于网络的流域同位素监测站点(10个站点)研究发现,海河流域南部地区降水同位素存在显著的降水量效应,而北部地区则存在显著的温度效应(庞朔光等, 2015)。尽管上述研究在不同程度上揭示了流域降水同位素的变化特征,但关于流域降水蒸发,特别是云底二次蒸发对流域降水同位素影响的研究却非常有限。受全球气候变暖影响,海河流域气候渐趋暖干,一方面流域降水减少,另一方面暖干的气候也加剧了流域蒸发。降水过程中雨滴的再蒸发是导致流域变干的一个重要因素,但利用传统的气象观测难以评价云底再蒸发的影响。降水同位素对蒸发—凝结相变环节具有敏感响应,可用于示踪降水过程中所发生的云底再蒸发现象。本文利用所获得的海河流域降水同位素观测数据,研究了云底二次蒸发对该流域降水同位素的影响。

2 研究区概况

海河流域(图1)地处 $35^{\circ}\sim 43^{\circ}\text{N}$ 和 $112^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 之间,流域面积约 $32\times 10^4\text{ km}^2$,其中,山地面积约 $19\times 10^4\text{ km}^2$,占流域总面积的60%,主要分布在流域

的西部和北部地区;平原面积 $13\times 10^4\text{ km}^2$,占流域总面积的40%,分布在地带以东以南地区。海河流域属于温带大陆性季风气候区,平均气温为 $1.5\sim 14^{\circ}\text{C}$,年平均降水量539 mm(Chu et al, 2010)。流域降水主要受东南季风控制,多发生在夏季;冬季受西伯利亚大陆性气团控制,寒冷少雪;春秋二季气候相对干燥,蒸发量大。流域年平均相对湿度50%~70%,属中国半干旱与半湿润气候区。

3 水样收集与分析方法

为揭示海河流域降水同位素的变化规律及其影响机制,在流域不同气候和地形区布设了7个观测点,使其和流域2个全球降水同位素监测网络(GNIP)站点(天津和石家庄)在空间上大致均匀地覆盖整个流域(图1)。所有收集的水样均为基于降水事件的样品。其中,对于降雨样品,待降雨停止后,直接倒入10 ml的塑料瓶中密封保存。对于降雪样品,待雪在室温下融化后,再将融化后的水样倒入塑料瓶中密封保存。在收集水样的同时,按照气象观测规范要求,记录气温、降水量、相对湿度、风速、风向等气象要素。本文利用目前所获取的2012年7月-2013年1月期间245个水样(其中一个水样气象数据不全,未予以分析)的同位素观测数据(表1),研究了云底二次蒸发对流域降水同位素的影响。需要说明的是,由于无法对云底气象要素进行直接观测,故本文用地表气温和相对湿度近似代表云底观测结果。

所有水样的氢氧同位素分析在中国科学院青藏高原研究所环境与地表过程实验室用Picarro液

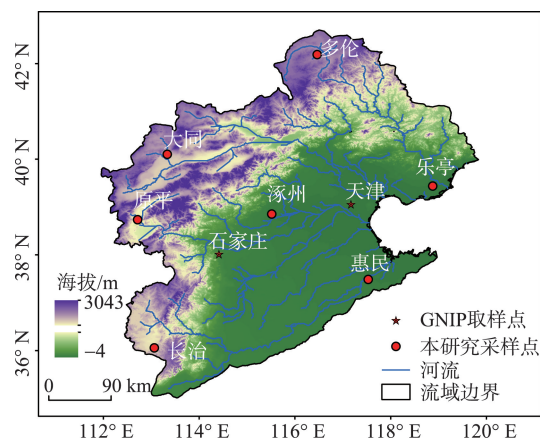


图1 海河流域位置及采样点分布图

Fig.1 Haihe River Basin and the precipitation sampling sites

表1 海河流域不同站点降水样品收集信息
Tab.1 Location and number of sampling sites in the Haihe River Basin

| 站点 | 纬度/°N | 经度/°E | 海拔/m | 记录时间 | 样品数量 | 数据来源 |
|-----|-------|--------|--------|---------------------|------|------|
| 长治 | 36.05 | 113.07 | 991.8 | 2012.7-2013.1 | 24 | 本研究 |
| 惠民 | 37.43 | 117.53 | 11.7 | 2012.7-2013.1 | 33 | 本研究 |
| 原平 | 38.03 | 112.72 | 828.2 | 2012.7-2013.1 | 36 | 本研究 |
| 涿州 | 38.85 | 115.52 | 17.2 | 2012.7-2013.1 | 29 | 本研究 |
| 乐亭 | 39.43 | 118.88 | 10.5 | 2012.7-2013.1 | 42 | 本研究 |
| 大同 | 40.10 | 113.33 | 1067.2 | 2012.7-2013.1 | 33 | 本研究 |
| 多伦 | 42.18 | 116.47 | 1245.4 | 2012.7-2013.1 | 47 | 本研究 |
| 石家庄 | 38.03 | 114.42 | 80.0 | 1985-1991,1995-2003 | 90 | GNIP |
| 天津 | 39.10 | 117.17 | 3.0 | 1988-1922,2000-2001 | 64 | GNIP |

态水同位素分析仪完成。氢、氧稳定同位素的比率 δ 用相对于 Vienna“平均标准海洋水”(VSMOW)的千分差 $\delta(\text{‰})$ 来表示:

$$\delta(\text{‰})=\left(\frac{R_{\text{sa}}}{R_{\text{st}}}-1\right)\times 1000 \tag{1}$$

式中: R_{sa} 和 R_{st} 分别为降水样品和 VSMOW 中 D/H ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)的比值,测得的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 误差分别小于 0.6‰ 和 0.1‰ 。

降水同位素的月平均值均为降水量加权的平均值($\overline{\delta_w}$),其计算方法如下:

$$\overline{\delta_w}=\frac{\sum_{i=1}^n P_i \delta_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \tag{2}$$

式中: n 表示总的降水次数, P_i 和 δ_i 分别为第 i 次降水事件的降水量和相应的同位素值。

本文中,两条回归直线的比较可通过检验总体斜率之间是否具有显著性差异,其显著性($p<0.05$)采用两个独立样本的 t 检验,所有分析均用 SPSS 统计分析软件来完成。

4 结果与分析

4.1 流域降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系

Craig(1961)通过对全球降水与河水同位素研究发现,其氢氧稳定同位素存在一定的线性关系,即: $\delta^2\text{H}=8\delta^{18}\text{O}+10$,并将其称为全球大气水线(Global Meteoric Water Line, GMWL)。由于水汽来源、输送方式、气温和相对湿度等的差异,不同地区具有反映本地区气候和降水同位素特征的大气水线,可称之为地区大气水线(Local Meteoric Water Line, LMWL)。尽管各地区 LMWL 的斜率和截距不同,但其差异主要与水体蒸发—凝结过程中所发生的同位素分馏有关。前人研究表明,云底二次蒸发所导致的同位素动力分馏可以显著降低 LMWL 的斜率和截距(Peng et al, 2004, 2007)。

根据观测期间流域 7 个站点降水事件 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 及其月加权平均值,分别得出流域 LMWL(图 2)为:

$$\delta^2\text{H}=7.61\delta^{18}\text{O}+2.76 \left(R^2=0.93, n=224\right) \tag{3}$$

$$\delta^2\text{H}=8.23\delta^{18}\text{O}+13.26 \left(R^2=0.94, n=43\right) \tag{4}$$

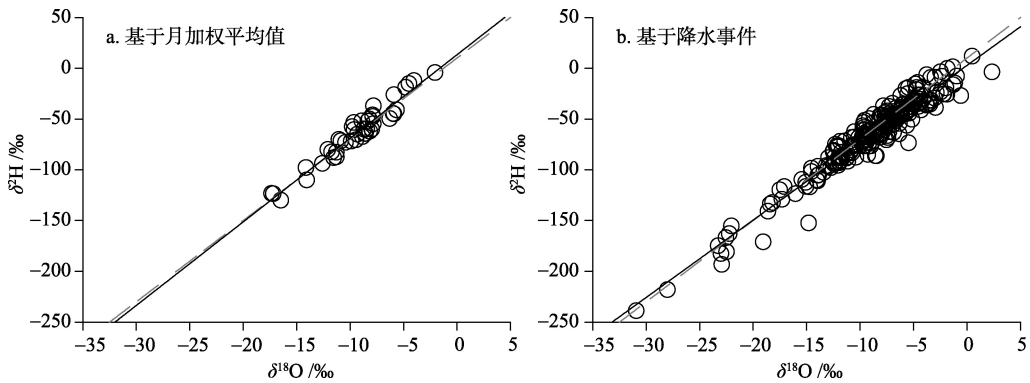


图2 海河流域大气降水 $\delta^2\text{H}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 关系(LMWL)(虚线表示 GMWL)

Fig.2 Correlation between $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in the Haihe River Basin precipitation (LMWL, shown as dashed lines for reference)

方程(4)的斜率和截距均略高于全球平均值(图2a),但统计上显著($p < 0.01$)不同于基于流域内两个GNIP站点(石家庄和天津,图1)历年同期(7月~翌年1月)的LMWL($\delta^2\text{H} = 6.49\delta^{18}\text{O} - 0.68$),也显著($p < 0.01$)不同于基于降水事件的方程(3)(图2b)。导致方程(3)和方程(4)差异显著的原因显然并不能用简单的瑞利模型来解释。个别降水事件,特别是小的降水事件,在从云底降落经过非饱和的大气时,会受到蒸发的影响,从而导致其斜率和截距减小,故方程(3)所代表的流域LMWL可能受到了云底二次蒸发的影响。而基于月加权平均值的计算可能在很大程度掩盖了云底二次蒸发的影响,因此,方程(4)的斜率和截距均高于全球平均值。上述假设似乎也为流域内的GNIP站点数据所证明,其更低的斜率和截距也表明流域降水受到了云底二次蒸发的影响。

为分析方程(3)和方程(4)产生差异的原因,将244个水样按降雨和降雪分成两组(表2)。其中,降雪样品33个,降雨样品211个。根据其 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 数据计算出它们的LMWL分别为:

$$\delta^2\text{H} = 8.42\delta^{18}\text{O} + 15.88 \quad (R^2 = 0.96, n = 33) \quad (5)$$

$$\delta^2\text{H} = 7.19\delta^{18}\text{O} - 0.74 \quad (R^2 = 0.89, n = 211) \quad (6)$$

方程(5)与(3)相比,其斜率和截距均显著增加,甚至高于基于月加权平均值的LMWL(方程(4))。其主要原因:降雪事件主要发生在冬季,平均气温只有 $-8.08\text{ }^\circ\text{C}$,寒冷的气候,加之固态形式的降水,很大程度上抑制了蒸发作用的发生,故云底二次蒸发对流域冬季降雪影响有限;而和总的降水事件(方程(3))相比,流域降雨事件LMWL(方程(6))的斜率和截距均明显降低,是因为降雨事件主要发生在夏秋季节,气温较高(平均温度 $18.01\text{ }^\circ\text{C}$),雨滴降落经过未饱和和大气时更易于受到云底二次蒸发的

影响,从而导致其同位素发生动力分馏,降低了其LMWL的斜率和截距。

为进一步分析云底二次蒸发对流域降水同位素的影响,将211个降雨样品根据降雨量分为4组,对比了每组LMWL的斜率、截距、过量氘、 $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 相关系数(表2)。流域LMWL的变化不仅同降水类型有关,也受降雨量的影响,其斜率和截距均随着降雨量的减少而变小,这一趋势对于小的降水事件(降雨量 $< 5\text{ mm}$)尤其明显(图3),其斜率从 $7.61(2\sim 5\text{ mm})$ 减至 $6.73(0\sim 1\text{ mm})$,相应的截距从 5.28‰ 降至 -11.04‰ 。可见,对于小的降水事件,雨滴从大气降落到地面所经过的大气更加干燥(平均相对湿度 75%),云底再蒸发引起同位素动力分馏更强,故其斜率和截距较低;而对于大的降雨($> 5\text{ mm}$)或持续降雨,由于雨滴降落所经过的大气更趋于饱和(平均相对湿度 84%),受到云底再蒸发影响较弱,其斜率和截距相对较大(图3)。

观测期间共收集降水样品244个,累计降水总量为 2866.3 mm 。其中降雨事件211次,约占总降水事件的 86% ,贡献了总降水量的 98% ;而降雪事件33次,仅占总降水事件的 14% 。在总的降雨事件中,小的降水事件虽然仅贡献了总降水量雨量的 7% ,但却占了总降雨事件的 49% ,故云底二次蒸发对流域降水具有重要的影响。

4.2 气温和相对湿度对云底二次蒸发的影响

前人研究表明,云底二次蒸发对降水同位素的影响主要受控于降水时的气温和相对湿度,气温升高和相对湿度降低均可加剧雨滴降落过程中的再蒸发作用(Clark et al, 1982; Liu et al, 2008)。流域气

表2 海河流域降雪及不同降雨量的样品数、降水量、过量氘及 $\delta^2\text{H} \sim \delta^{18}\text{O}$ 相关关系参数

Tab.2 Number of samples, total precipitation, d -excess and $\delta^2\text{H} \sim \delta^{18}\text{O}$ correlation parameters for snow and rain (different ranges of amount) collected in the Haihe River Basin

| 样品 | 样品数 | 降水量 | 斜率 | 截距/ ‰ | 相关系数 | 过量氘 |
|--------|-----|--------|------|----------------|------|-------|
| 全部样品 | 244 | 2866.3 | 7.61 | 2.76 | 0.93 | 6.97 |
| 降雪样品 | 33 | 55 | 8.42 | 15.88 | 0.96 | 13.63 |
| 降雨样品 | 211 | 2811.3 | 7.19 | -0.74 | 0.89 | 6.84 |
| 0~1 mm | 31 | 14.3 | 6.73 | -11.04 | 0.83 | -3.29 |
| 1~2 mm | 30 | 41.9 | 7.46 | 1.62 | 0.94 | 6.01 |
| 2~5 mm | 42 | 136 | 7.61 | 5.28 | 0.88 | 8.24 |
| >5 mm | 108 | 2619.1 | 7.65 | 4.20 | 0.91 | 6.84 |

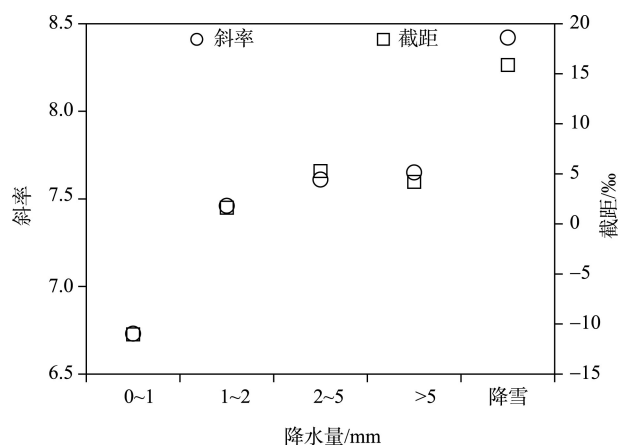


图3 降雪和不同范围降雨对其 $\delta^2\text{H}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 关系的影响
Fig.3 Slope and intercept for linear regressions of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ for snow and rain events (subdivided in different amount categories)

温和相对湿度对小降雨事件(<5 mm)LMWL的影响显著(图4),其LMWL的斜率和截距均随着气温的升高而减小(图4a),特别是在气温大于20℃时,其斜率(6.85)和截距(-9.89‰)均显著($p<0.01$)低于全球平均值。海河流域的降雨事件主要发生在夏季(<5 mm的降雨事件夏季占69.9%),且期间温度最高,因此,流域云底二次蒸发主要发生在夏季。相对于气温的影响,相对湿度与LMWL的斜率和截距似乎存在一定的正相关(图4b),但这种关系并非线性的;当流域相对湿度小于90%时,其降水同位素受到云底二次蒸发的影响,但强烈云底二次蒸发作用主要发生在相对湿度<60%与80%~90%之间。当相对湿度<60%时,干燥的大气导致雨滴在降至地面过程中发生强烈的蒸发,由此产生同位素动力分馏使得流域LMWL的斜率和截距显著变小。但对于相对湿度在80%~90%之间云底二次蒸发强的具体原因尚不清楚,可能与这一时期较高的气温(平均为18℃)有关。另外,前人研究(刘春蓁等,2004)表明,春季期间,由于气温回升快,风速大,气候干燥,流域蒸发作用最强,但限于目前所获得的数据,本文尚无法进行进一步的研究。

4.3 降水过量氘与云底二次蒸发

降水中过量氘($d=\delta^2\text{H}-8\delta^{18}\text{O}$)是描述降水同位素特征的一个重要参数(Dansgaard, 1964),其全球平均值为10‰左右。一个地区降水中 d 值的变化主要与降水水汽源地的气象状况(如气温、相对湿度、风速等)有关(Merlivat et al, 1979)。另外,一些当地的气象状况和降水过程也可显著地改变降水中 d 值的变化,如在于旱半干旱地区,云底二次蒸发

过程可以导致其 d 值显著降低(Dansgaard, 1964; Araguás-Araguás et al, 1998; Peng et al, 2004);而在寒冷气候条件下,降雪过程中的同位素非平衡分馏则会导致其 d 值显著升高(Jouzel et al, 1984)。海河流域降雨样品 d 的加权平均值为6.8‰,不仅低于全球平均值,也显著低于冬季降雪样品的加权平均值($d=13.6‰$),且对于小的降雨事件(<5 mm)其 d 值均随着降雨量的减少而变小(表2)。这一结果与上述分析是一致的,表明流域降雪很少受到云底二次蒸发的影响,而降雨,尤其是小的降雨事件易受到云底二次蒸发的影响。

海河流域小的降雨事件中 d 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值均同相对湿度显著相关(图5),不同范围平均相对湿度的变化分别解释了94%的 d 变化和95%的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化。但相对于流域相对湿度的变化, d 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈现完全相反的变化趋势,进一步表明了流域小的降水事件受到强烈的云底二次蒸发影响,在这一过程中,重同位素在剩余雨滴中富集,以致地面观测到的降水同位素值偏高,而伴随的动力分馏则导致其 d 值降低。

4.4 云底二次蒸发效应的空间变化

云底二次蒸发不仅与气象条件和降水类型有关,也受到降水地点地形的影响,在纬度大致相同的区域,平原站点一般比山区站点受到更强烈的云底再蒸发影响,这是因为平原地区雨滴降落至地面所经过的距离要比山区更长(Froehlich et al, 2008)。海河流域地处中国季风与非季风、半湿润与半干旱气候地区,山地与平原分布又加剧了气候的复杂性,故云底二次蒸发对流域降水同位素的影响可能存在空间差异。流域南部季风区4个站点(原平、涿

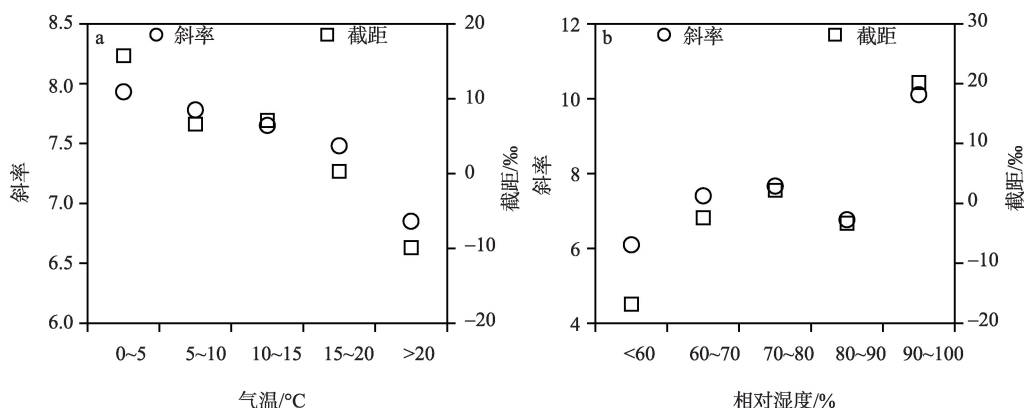


图4 温度(a)和相对湿度(b)对小降雨事件中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系的影响

Fig.4 Slope and intercept of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ correlation equations versus temperature (a) and relative humidity (b) for small amount rainfall samples

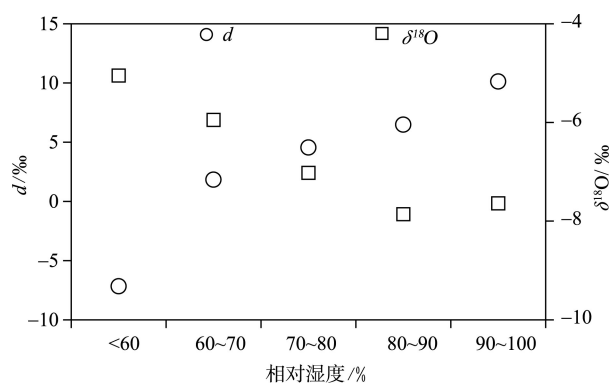


图5 相对湿度对小的降雨事件中的 d 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响

Fig.5 d and $\delta^{18}\text{O}$ values versus relative humidity for small amount rainfall samples

州、惠民和长治)的平均 LMWL 为 $\delta^2\text{H}=7.19\delta^{18}\text{O}-3.29$ ($R^2=0.89, n=57$), 其斜率和截距与北部非季风区的 3 个站点(多伦、大同和乐亭)的平均值(斜率=7.06, 截距=-2.41‰)并没有显著的差异, 但这种差异有可能被流域地形的差异所掩盖。流域 4 个山区站点(多伦、大同、原平和长治)平均 LMWL 的斜率和截距分别为 6.77 和 -6.55‰, 均明显低于流域 3 个平原站点(惠民、涿州和乐亭)的平均值(斜率=7.16, 截距=0.35‰), 表明流域山地降水同位素受到更强的云底二次蒸发影响, 这与以前的研究结论(Froehlich et al, 2008)相反。其原因可能与山区站点多位于山间盆地, 受“雨影效应”影响, 降水较少, 空气更干燥, 平均相对湿度比平原地区减少约 10%, 导致降水同位素具有更强的云底二次蒸发效应。

5 结论与讨论

基于对现有的数据分析, 本文探讨了云底二次蒸发对海河流域降水稳定同位素的影响, 得出以下主要结论:

(1) 基于降水事件和月加权平均值的海河流域大气水线方程(LMWL)分别为 $\delta^2\text{H}=7.61\delta^{18}\text{O}+2.76$ 和 $\delta^2\text{H}=8.23\delta^{18}\text{O}+13.26$, 云底二次蒸发是造成这种差异的主要原因之一。

(2) 流域降雨, 特别是小的降雨事件($<5\text{ mm}$), 其同位素易受到云底二次蒸发影响, 受其影响, LMWL 的斜率和截距均随着降水量的减少而减小。

(3) 随着气温的升高和相对湿度的减小, 流域降水同位素的云底二次蒸发作用加剧, 导致观测地面降雨同位素值升高, 而过量氘(d)与 LMWL 的斜

率和截距均减小。

(4) 与平原地区相比较, 流域山间盆地受“雨影效应”影响, 降雨较少, 空气干燥, 降雨同位素受到更强的云底二次蒸发影响。

通过对现有观测数据的定性分析, 本文对海河流域降水稳定同位素云底二次蒸发效应取得了一些初步认识, 但由于所获取的降水稳定同位素数据并未包含一个完整的水文年, 其中一些结果仍需进一步验证。例如, 流域春季气温回升快, 空气干燥, 云底二次蒸发作用强, 但本文并没有该季节的同位素数据对其进行验证。目前这一工作仍在进行, 下一步期望能利用更长时间记录的降水稳定同位素数据, 用定量的方法, 进一步分析云底二次蒸发对流域降水稳定同位素的影响。

参考文献(References)

- 刘春泰, 刘志雨, 谢正辉. 2004. 近 50 年海河流域径流的变化趋势研究[J]. 应用气象学报, 15(4): 385-393. [Liu C Z, Liu Z Y, Xie Z H. 2004. Study of trends in runoff for the Haihe River Basin in recent 50 years[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 15(4): 385-393.]
- 刘相超, 宋献方, 夏军, 等. 2005. 东台沟实验流域降水氧同位素特征与水汽来源[J]. 地理研究, 24(2): 196-205. [Liu X C, Song X F, Xia J, et al. 2005. A study on oxygen isotope in precipitation of Dongtaigou Basin in Chao and Bai River Basin[J]. Geographical Research, 24(2): 196-205.]
- 孟玉川, 刘国东. 2010. 长江流域降水稳定同位素的云下二次蒸发效应[J]. 水科学进展, 21(3): 327-334. [Meng Y C, Liu G D. 2010. Effect of below-cloud secondary evaporation on the stable isotopes in precipitation over the Yangtze River basin[J]. Advances in Water Science, 21(3): 327-334.]
- 庞朔光, 赵诗坤, 文蓉, 等. 2015. 海河流域大气降水中稳定同位素的时空变化[J]. 科学通报, 60(13): 1218-1226. [Pang S G, Zhao S K, Wen R, et al. 2015. Spatial and temporal variation of stable isotopes in precipitation in the Haihe River basin[J]. Chinese Science Bulletin, 60(13): 1218-1226.]
- 王中根, 朱新军, 夏军, 等. 2008. 海河流域分布式 SWAT 模型的构建[J]. 地理科学进展, 27(4): 1-6. [Wang Z G, Zhu X J, Xia J, et al. 2008. Study on distributed hydrological model in Hai River Basin[J]. Progress in Geography, 27(4): 1-6.]
- 卫克勤, 林瑞芬, 王志祥. 1982. 北京地区降水中的氕、氧-18、氟含量[J]. 中国科学: 化学, 12(8): 754-757. [Wei K Q,

- Lin R F, Wang Z X. 1982. Beijing diqu jiangshui zhong de dao, yang- 18, chuan hanliang[J]. Science China: Chemistry, 12(8): 754-757.]
- 夏军. 2002. 华北地区水循环与水资源安全: 问题与挑战[J]. 地理科学进展, 21(6): 517-526. [Xia J. 2002. A perspective on hydrological base of water security problem and its application study in North China[J]. Progress in Geography, 21(6): 517-526.]
- Araguás-Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. 1998. Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia [J]. Journal of Geophysical Research, 103(D22): 28721-28742.
- Chu J T, Xia J, Xu C Y, et al. 2010. Spatial and temporal variability of daily precipitation in Haihe River basin, 1958-2007[J]. Journal of Geographical Sciences, 20(2): 248-260.
- Clark I D, Fritz P, Michel F A, et al. 1982. Isotope hydrogeology and geothermometry of the Mount Meager geothermal area[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 19(7): 1454-1473.
- Craig H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 133: 1702-1703.
- Dansgaard W. 1964. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 16(4): 436-468.
- Field R D, Jones D B A, Brown D P. 2010. Effects of postcondensation exchange on the isotopic composition of water in the atmosphere[J]. Journal of Geophysical Research, 115(D24), doi: 10.1029/2010JD014334.
- Friedman I, Machta L, Soller R. 1962. Water-vapor exchange between a water droplet and its environment[J]. Journal of Geophysical Research, 67(7): 2761-2766.
- 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(1): 225-262.
- Hoffmann G, Werner M, Heimann M. 1998. Water isotope module of the ECHAM atmospheric general circulation model: a study on timescales from days to several years [J]. Journal of Geophysical Research, 103(D14): 16871-16896.
- Jouzel J, Alley R B, Cuffey K M, et al. 1997. Validity of the temperature reconstruction from water isotopes in ice cores[J]. Journal of Geophysical Research, 102(C12): 26471-26487.
- Jouzel J, Hoffmann G, Koster R D, et al. 2000. Water isotopes in precipitation: data/model comparison for present-day and past climates[J]. Quaternary Science Reviews, 19(1-5): 363-379.
- Jouzel J, Merlivat L. 1984. Deuterium and oxygen 18 in precipitation: modeling of the isotopic effects during snow formation[J]. Journal of Geophysical Research, 89(D7): 11749-11757.
- Kong Y L, Pang Z H, Froehlich K. 2013. Quantifying recycled moisture fraction in precipitation of an arid region using deuterium excess[J]. Tellus B, 65: 19251.
- Lee J E, Fung I. 2008. "Amount effect" of water isotopes and quantitative analysis of post-condensation processes[J]. Hydrological Processes, 22(1): 1-8.
- Lee J E, Risi C, Fung I, et al. 2012. Asian monsoon hydrometeorology from TES and SCIAMACHY water vapor isotope measurements and LMDZ simulations: implications for speleothem climate record interpretation[J]. Journal of Geophysical Research, 117(D15), doi: 10.1029/2011JD017133.
- Liu J R, Song X F, Fu G B, et al. 2011. Precipitation isotope characteristics and climatic controls at a continental and an island site in Northeast Asia[J]. Climate Research, 49 (1): 29-44.
- Liu Z F, Tian L D, Yao T D, et al. 2008. Seasonal deuterium excess in Nagqu precipitation: influence of moisture transport and recycling in the middle of Tibetan Plateau [J]. Environmental Geology, 55(7): 1501-1506.
- Liu Z F, Yoshimura K, Kennedy C D, et al. 2014. Water vapor δ D dynamics over China derived from SCIAMACHY satellite measurements[J]. Science China: Earth Sciences, 57(4): 813-823.
- Ma Q, Zhang M J, Wang S J, et al. 2014. An investigation of moisture sources and secondary evaporation in Lanzhou, Northwest China[J]. Environmental Earth Sciences, 71 (8): 3375-3385.
- Merlivat L, Jouzel J. 1979. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012), 84 (C8): 5029-5033.
- Peng H D, Mayer B, Harris S, et al. 2004. A 10-yr record of stable isotope ratios of hydrogen and oxygen in precipitation at Calgary, Alberta, Canada[J]. Tellus B, 56(2): 147-159.
- Peng H D, Mayer B, Harris S, et al. 2007. The influence of below-cloud secondary effects on the stable isotope composition of hydrogen and oxygen in precipitation at Calgary, Alberta, Canada[J]. Tellus B, 59(4): 698-704.
- Risi C, Bony S, Vimeux F, et al. 2010. Evolution of the stable water isotopic composition of the rain sampled along Sa-

- helian squall lines[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 136(S1): 227-242.
- Stewart M K. 1975. Stable isotope fractionation due to evaporation and isotopic exchange of falling waterdrops: applications to atmospheric processes and evaporation of lakes [J]. Journal of Geophysical Research, 80(9): 1133-1146.
- Wen X F, Zhang S C, Sun X M, et al. 2010. Water vapor and precipitation isotope ratios in Beijing, China[J]. Journal of Geophysical Research, 115(D1): D01103, doi: 10.1029/2009JD012408.
- Yoshimura K, Oki T, Ohte N, et al. 2003. A quantitative analysis of short-term ^{18}O variability with a Rayleigh-type isotope circulation model[J]. Journal of Geophysical Research, 108(D20), doi: 10.1029/2003JD003477.

Influence of below-cloud secondary evaporation on stable isotope composition in precipitation in the Haihe River Basin, China

ZHAO Shikun¹, PANG Shuoguang¹, WEN Rong², LIU Zhongfang^{3*}

(1. Tianjin Key Laboratory of Water Resources and Environment, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 2. Key Laboratory of Tibetan Environmental Changes and Land Surface Processes, Institute of Tibetan Plateau Research, CAS, Beijing 100085, China; 3. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Measurement of stable water isotopes ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) at the watershed scale can provide a diagnostic indication for hydrological processes and water cycling of the watershed. Kinetic isotope fractionation associated with below-cloud secondary evaporation can significantly affect the observed precipitation isotopic composition and local meteoric water line. Stable isotope composition of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation was investigated in the Haihe River Basin, northern China based on observations at seven stations from July 2012 to January 2013. Linear regression between $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of rain samples yielded a correlation equation of $\delta^2\text{H}=7.19\delta^{18}\text{O}-0.74$, which is significantly different from that based on snow samples ($\delta^2\text{H}=8.42\delta^{18}\text{O}+15.88$). Due to the influence of below-cloud secondary evaporation on rain isotopes, the slope and intercept of correlation between $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ for small amount rainfall samples (<5 mm) progressively decreased with decreasing precipitation, varying from 6.73 to 7.61 and 5.28‰ to -11.04‰, respectively. Correlation of isotope values with local temperature, relative humidity, and precipitation amount provides evidence that small amount rainfall samples underwent secondary evaporation accompanied by mass dependent isotope fractionation during their descent from the cloud base to the ground. Compared to sites in the plain areas, rain stable isotopes at sites in the mountainous areas tended to be influenced by below-cloud secondary evaporation due to the dry atmosphere caused by the rain shadow effect. Since about half of the precipitation events in the observation period were rain samples with amount less than 5 mm, below-cloud secondary evaporation had an important influence on isotope composition of precipitation in the Haihe River Basin. Our study suggests that analysis of isotope composition of individual rainfall events can provide some valuable insight into below-cloud secondary evaporation effect, which is masked to a large extent by analysis of monthly precipitation isotope data.

Key words: precipitation; $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$; temperature; relative humidity; below-cloud secondary evaporation; Haihe River Basin