

DOI: 10.5846/stxb201408251674

陈曦, 李志, 程立平. 黄土塬区大气降水的氢氧稳定同位素特征及水汽来源. 生态学报, 2016, 36(1): - .

Chen X, Li Z, Cheng L P, Liu W z, Wang R. Analysis of stable isotopic composition and vapor source of precipitation at the Changwu Loess Tableland. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(1): - .

黄土塬区大气降水的氢氧稳定同位素特征及水汽来源

陈 曦¹, 李 志^{1,2,*}, 程立平³, 刘文兆², 王 锐⁴

1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100

2. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

3. 平顶山学院资源与环境科学学院, 平顶山 467000

4. 河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 焦作 454000

摘要:降水是水资源的主要输入, 分析其氢氧稳定同位素特征可为水循环研究提供重要的背景信息。基于 4 年的降水样品采集, 测定和分析了黄土塬区降水氢氧同位素(²H, ¹⁷O 和 ¹⁸O)的组成特征, 进而分析了其水汽来源。降水同位素有明显的年内变化, 2—6 月富集而 7—11 月贫化; δD 和 δ¹⁸O 存在雨量效应和温度效应, 分别出现在 6—9 月和 10—5 月; 但这些组成特征受气候变异影响存在年际差异。综合分析降水方程线、D 盈余和 ¹⁷O 盈余, 发现黄土塬区 6—9 月降水来自海洋性气团, 10—5 月降水是局地水汽蒸发和大陆性气团起主导作用; 雨季少数降水事件直接来源于海洋性气团, 其他降水事件则是海洋性气团经再分配相对湿度达 90% 左右时才产生。全年至少 30% 的降水事件经历了严重的二次蒸发。

关键词:大气降水; 氢氧同位素; 水汽来源; 黄土塬区; ¹⁷O 盈余

Analysis of stable isotopic composition and vapor source of precipitation at the Changwu Loess Tableland

CHEN Xi¹, LI Zhi^{1,2,*}, CHENG Liping³, LIU Wenzhao², WANG Rui⁴

1 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Yangling 712100, China

3 College of Resource and Environment Science, Pingdingshan University, Pingdingshan 467000, China 4 School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China

Abstract: As important constituents of a water molecule, the stable hydrogen and oxygen isotopes are ideal conservative tracers for water source, and thus, have been widely used in water cycle research. Precipitation is the main input of water resources; therefore, analysis of its hydrogen and oxygen isotopic compositions can provide basic information for water cycle. Until now, some research has been carried out for the arid and semi-arid regions on the Loess Plateau; however, few studies have focused on the semi-humid region. The Changwu Loess Tableland, which is located in the southern part of the central Loess Plateau and is characterized by a warm temperate, semi-humid, continental monsoon climate (annual mean precipitation is 578 mm), has been studied. In this study, the hydrogen and oxygen isotopic compositions (²H, ¹⁸O and ¹⁷O) of precipitation and some climatic factors (temperature, precipitation amount, humidity) of four years (2005, 2010, 2012—2013) have been determined for the investigation of the vapor source of precipitation. Both seasonal and inter-annual variations were detected from the isotopic compositions of the precipitation. The isotopic compositions were more

基金项目:国家自然科学基金 (51179161&41401015); 陕西省科学技术研究发展计划 (2013KJXX-18); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2452015105)

收稿日期: 2014-08-25; 修订日期: 2015-01-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lizhibox@126.com

depleted from July to November, and the $\delta^{18}\text{O}$ and δD varied from -12.42‰ to -9.96‰ and from -88.62‰ to -65.18‰ , respectively; however, they were more enriched from February to June, and the ranges of $\delta^{18}\text{O}$ and δD were -7.89‰ to -5.08‰ and -50.08‰ to -27.90‰ , respectively. The most abundant depleted isotopic compositions were observed in July, which was considered to be the effect of marine air mass and precipitation amount. δD and $\delta^{18}\text{O}$ had a significant relationship with the precipitation amount from June to September, and while they correlated well with air temperatures from October to May. The inter-annual variations in isotopic compositions of precipitation were mainly due to the climate variability; for example, the temperatures in the summer of 2005 were the highest since 1951, and it would, thus, yield different seasonal patterns of isotopic compositions as compared to the other three years. Meanwhile, the isotopic compositions of precipitation in the Changwu Loess Tableland were different from those of the arid regions and similar to some of the humid monsoon regions. According to the analysis of isotopic compositions, meteoric water line, D-excess, and ^{17}O excess, the marine air mass was the dominant vapor source for precipitation from June to September, especially from July to September, while precipitation from October to May were significantly influenced by regional evaporation and continental air mass. Furthermore, the weighted average D-excess of most months was higher than the global average (10‰), which implied that the isotopic compositions were influenced by local evaporation throughout the year. In rainy season, a few precipitation events were directly associated with marine air mass, while the other events occurred only when the relative humidity exceeded 90% due to the reallocation of marine air mass. At least 30% of the precipitation events have experienced serious secondary evaporation. Analysis of the vapor source by ^{17}O is still at the preliminary stage and few researches have been done in China; therefore, studying ^{17}O concentrations can provide additional useful information to interpret the water cycle in future research.

Key Words: precipitation; oxygen and hydrogen isotope; water vapor trajectory; loess tableland; ^{17}O - excess

氢氧稳定同位素是水分子重要的构成成分,作为示踪元素广泛应用于水循环的研究^[1-3]。大气降水是陆地水资源的基本来源^[4],是水循环的一个重要环节,对降水中氢氧同位素进行研究是利用同位素技术研究区域水循环的前提^[5]。大量研究证明降水中稳定同位素组成存在很大的时空差异,受到多种因素的影响,如水汽源地、纬度、降雨量、温度和与海岸线距离等^[3-4,6]。研究降水同位素的变化特征,对揭示水汽源地、降水形成气象条件,深入了解区域水循环过程具有重要的意义。

1966年在珠穆朗玛峰的科学考察为我国的降水稳定同位素研究拉开了序幕^[7],至今已有50年历史,在此期间开展了不同规模的取样工作。在全国范围,柳鉴容和宋献方^[8]等依据 GNIP 与 CHNIP 的数据对中国大气降水的同位素特征进行分析,将全国分为不同区域进行了比较。区域范围上,李小飞、张明军^[9]等通过降水同位素分析并结合 HYSPLIT 模型,得出东北地区水汽来源于大西洋和北冰洋的冷湿水汽与太平洋的暖湿水汽;章新平、刘晶淼等^[10]发现西南地区旱季水汽来源于西风带输送和内陆再补给水汽,雨季来源于低纬度海洋。流域尺度上也有不少研究,如东台沟流域^[11]、锡林河流域^[12]、乌鲁木齐河流域^[5]、岔巴沟流域^[2]。

黄土高原地形复杂地理条件恶劣,水资源先天不足且分布不均,土壤水分经常处于亏缺状态,土壤干层、地下水位下降等问题日益严重。同位素示踪法在研究这些问题时具有极大的优势,但需要明确该区的大气输入情况。目前有少数研究评估了黄土高原的降水同位素特征,如干旱半干旱区的延安地区^[13]、兰州及周边区域^[14]和榆林市岔巴沟流域^[2]。在岔巴沟流域,刘鑫等进一步结合地下水同位素数据,发现地下水主要来源于降水,并且大部分降水经历了强烈的蒸发作用。比较而言,对于半湿润区的大气降水同位素特征分析很少。为此,本研究选取黄土塬区的长武塬作为研究区域,结合多年降水同位素数据与气象数据,从同位素变化特征、氘盈余、 ^{17}O 盈余等方面,深入探讨黄土塬区的降水水汽来源,以期能够为黄土高原的水循环研究提供基本的参考信息。

1 样品采集与数据分析

1.1 区域概况

研究区域为黄土高原中南部的长武塬区(图1),海拔1220m,处于黄土高原半湿润区。研究区属于暖温带半湿润大陆性季风气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥。多年平均降水量578mm,年均气温9.1℃,>10℃积温3029℃,无霜期171d。全年降水分布极不均匀,集中于7—9月,其间的降水量占全年降水量的55%以上,且多以中到暴雨的形式落下,而其他月份的降雨多以小到中雨形式落下。长武塬区为典型的雨养农业区,黄土堆积深厚,土地利用方式主要为农地、草地、林地、果园及非生产地(居民用地、道路利用及难利用地等),绝大部分生产可利用地都分布在塬面和梁顶上。土壤主要是黑垆土和黄壤土,母质为中壤质马兰黄土,土壤容重在1.23—1.44g/cm³之间,主要变化在0—1m土层^[15-16]。黄土塬区非饱和层深厚,地下水埋深40—80m。

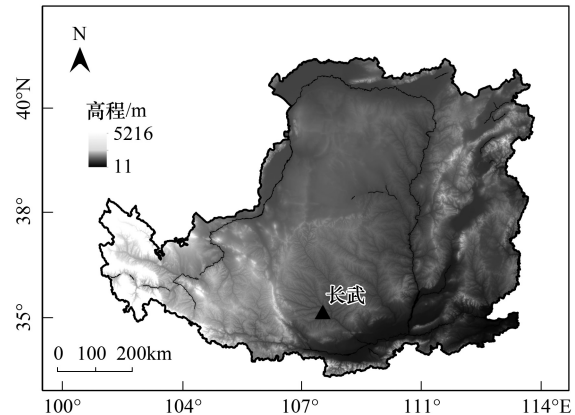


图1 研究区域地理位置

Fig.1 Location of research area

1.2 降水样采集与测定

在中国科学院长武农业生态试验站(35°14'30"N、107°41'17"E)对历次降水事件的雨水进行收集,密封于100 mL的聚乙烯塑料瓶中,低温保存;同时对长历时降雨事件进行了雨水过程样的收集,取样的年份为2005年、2010年和2012—2013年。其中,2012年降水样仅包括7—10月。氢氧稳定同位素使用LGR LIWA V2进行测定, δD 和 $\delta^{18}O$ 的精度分别为0.5‰和0.1‰(2013年水样采用LGR IWA-45EP进行测定,能同时分析 δD 、 $\delta^{17}O$ 和 $\delta^{18}O$,精度分别为0.5‰、0.1‰和0.1‰)。

此外,文中所用降水量、气温等气象数据来源于长武农业生态试验站观测资料,气象站采用的是人工记录与自动记录结合的方法采集数据。降雨量采用RG13型雨量计观测,温度与湿度采用HMP45D温湿度传感器观测,在自动监测数据缺失情况下,日降雨量通过SMI-A雨量器人工观测,取每日8时至次日8时雨量和。

1.3 数据分析

首先分析降水氢氧同位素的基本特征,氢氧同位素含量随时间的变化;其次,分析降水同位素组成的影响因子,主要从降水量效应和温度效应两个方面进行;最后,建立区域降水方程线、计算D盈余和 ^{17}O 盈余,分析水汽来源。需要注意的是,2012年仅收集了4个月的降水样,分析年际变化时不采用; ^{17}O 仅有2013年的数据,分析时可能存在一定的局限。

2 大气降水氢氧稳定同位素组成特征

2.1 时间变化

所有降水事件中的 δD 、 $\delta^{17}O$ 和 $\delta^{18}O$ 变化范围较大,分别介于-142.01‰—-0.51‰、-9.12‰—-0.84‰和-19.62‰—-1.17‰;月均加权值波动变小,分别介于-88.62‰—-27.90‰、-6.97‰—-2.28‰和-12.42‰—-5.08‰。降水中的氢氧同位素组成存在明显的年内变化,7—11月同位素贫化($\delta^{18}O$: -12.42‰—-9.96‰、 δD : -88.62‰—-65.18‰)而2—6月富集($\delta^{18}O$: -7.89‰—-5.08‰、 δD : -50.08‰—-27.90‰);最小值多出现在7月,重同位素含量明显低于其他月份;而富集月份的同位素组成相对稳定, $\delta^{18}O$ 基本在-6‰微弱变化, $\delta^{17}O$ 基本在-4‰左右(图2)。全年整体呈现夏低冬高的特点,与西北干旱区^[17]、乌鲁木齐河流域^[5]、黄河上游区域^[18]的降水同位素组成特点相反,而与云南地区^[19]、长江流域^[20]的特点相似,表明了黄土塬区不同

季节水汽来源的不同,且水汽源地与受季风影响的长江流域、西南地区更接近。同时,相较于长江流域(6月),黄土塬区7月降水同位素贫化,也表明了水汽在输送过程中时间上的推移。

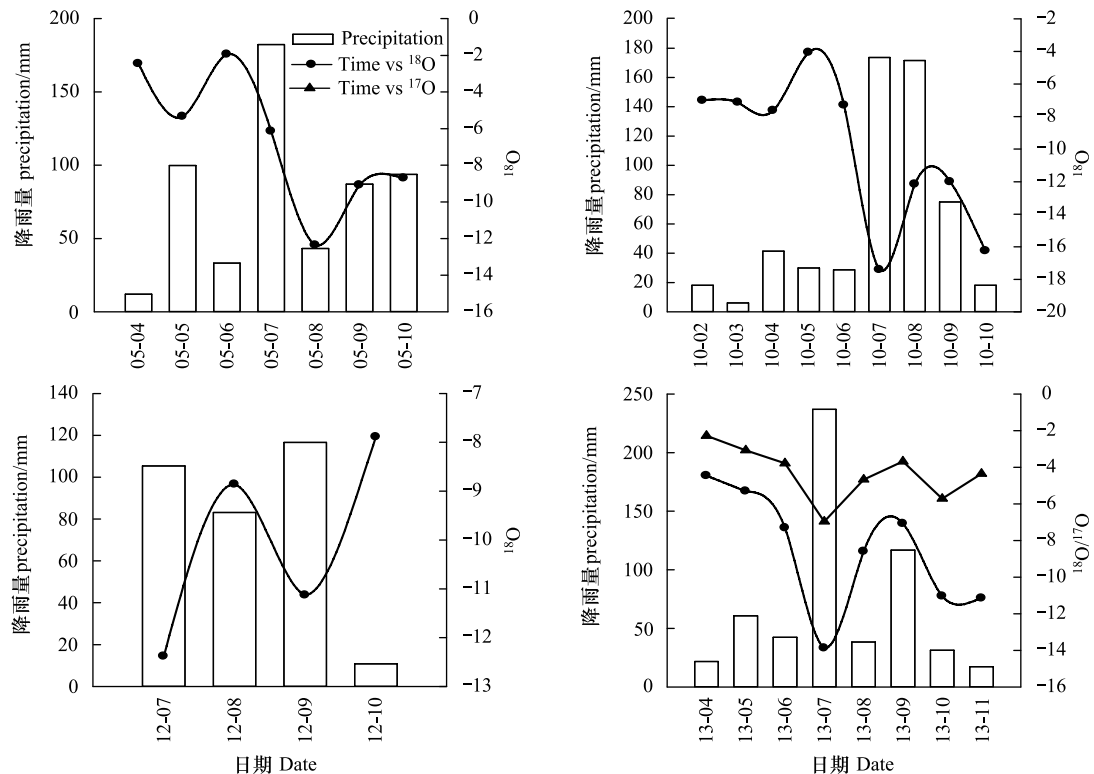


图2 月降水量与月均加权 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$

Fig.2 Monthly precipitation amount and the volume-weighted $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{17}\text{O}$

δD 、 $\delta^{17}\text{O}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的年均加权平均值为 -72.33‰ 、 -5.89‰ 和 -10.38‰ ; 但存在年际变化, 2005 年明显高于 2010 和 2013 年(表 2)。2005 年 $\delta^{18}\text{O}$ 的最小值没有出现在降水量最充足的 7 月, 且 3—7 月明显较其他年份富集。而 2005 年 5 月的降水量达到 99.8 mm, 远高于多年平均值 (52.9 mm)。2005 年夏季和秋季气温是 1951 年以来同期最高和第二高, 这导致了更强的蒸发和同位素分馏; 冬季气温偏低甚至出现了突袭全球的暴雪^[21]。因此, 受气候变异的影响, 2005 年同位素组成偏高。同时, 东亚夏季季风在 2005 年较常年偏强, 导致我国降雨带北移^[22], 这可能是 5 月降水较常年偏高的原因, 进而影响到降雨中稳定同位素的组成。

表 1 年降水量和年均加权的同位素值

Table 1 Annual precipitation amount and volume-weighted isotopic compositions

年 Year	$\delta\text{D} / \text{‰}$		$\delta^{17}\text{O} / \text{‰}$		$\delta^{18}\text{O} / \text{‰}$		年降雨量 Annual precipitation/mm
	算术平均 Arithmetic average	加权平均 Weighted average	算术平均 Arithmetic average	加权平均 Weighted average	算术平均 Arithmetic average	加权平均 Weighted average	
2005	-45.17	-50.09			-6.35	-7.16	527
2010	-62.62	-87.67			-9.16	-12.65	568
2013	-54.67	-79.26	-4.75	-5.89	-8.04	-11.4	574

2.2 降水量效应与温度效应

对降水量与同位素组成进行回归分析(图 3), 发现在年尺度上仅 2005 年不存在雨量效应, 将全年分成 6—9 月(雨季)和 10—5 月(干季)进一步分析, 分别进行回归分析(图 2), 发现 2005 年 10—5 月、2010 和 2013 年 6—9 月降水量与 $\delta^{18}\text{O}$ 显著负相关: $\delta^{18}\text{O} = -0.073P - 3.09$ ($R^2 = 0.65$), $\delta^{18}\text{O} = -0.093P - 8.19$ ($R^2 =$

0.38), $\delta^{18}\text{O} = -0.091 P - 6.79$ ($R^2 = 0.40$)。2010 与 2013 年的雨量效应均发生在雨季且线性方程相似,而 2005 年的雨量效应出现在干季,这进一步体现了降水同位素的年际变异。另外,与前人研究比较发现,黄土塬区降水同位素组成与降水量的关系(不考虑 2005 年)与柳鉴容^[17]等在西北干旱半干旱地区的研究一致,均在雨季具有明显的雨量效应,但黄土塬区斜率约为 $-0.09\text{‰}/\text{mm}$,变化幅度为西北地区的 225%,进一步说明黄土塬区与西北内陆干旱半干旱区在雨季有着不同的水汽来源。

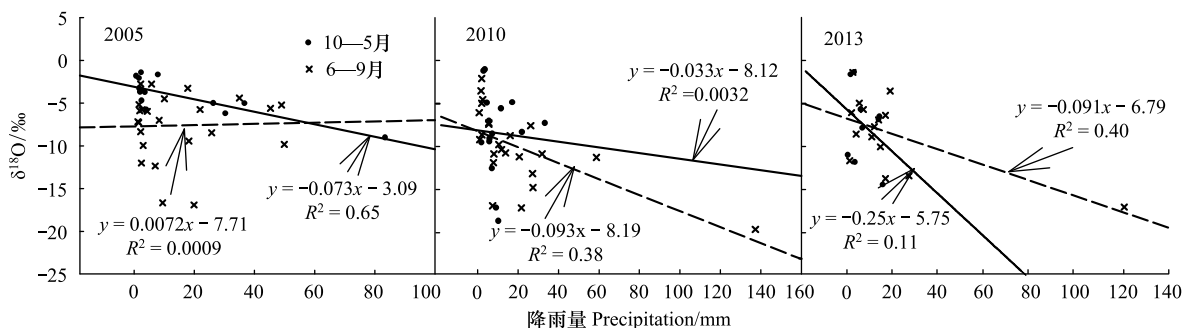


图3 降水量与 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系

Fig.3 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and precipitation amount

对日降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与日均气温进行分析发现(图 5),数据散布范围较大,在年尺度上没有相关性。但将数据按照雨季与干季分别统计后发现,2005 年的雨季、2010 与 2013 年的干季降水 $\delta^{18}\text{O}$ 具有较为明显的温度效应: $\delta^{18}\text{O} = 0.36T - 14.77$ ($R^2 = 0.11$)、 $\delta^{18}\text{O} = 0.21T - 9.31$ ($R^2 = 0.13$)和 $\delta^{18}\text{O} = 0.52T - 11.48$ ($R^2 = 0.36$),而在西北干旱半干旱区,降水同位素在年尺度上温度效应十分显著。表明了雨季温度效应被雨量效应所掩盖,也验证了随着向内陆的延伸,温度逐渐代替降水量而成为影响 $\delta^{18}\text{O}$ 变化的主要因子^[23]。

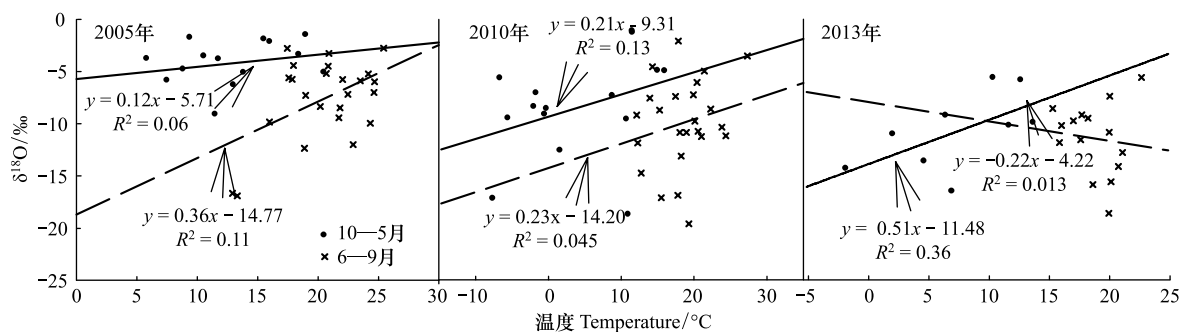


图4 降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的关系

Fig.4 Relationship between isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$) of precipitation and temperature

3 水汽来源

3.1 降水线方程

受大尺度海洋大气环流以及近地面气象条件影响,不同地区都有反映其降水规律的区域降水线(LMWL)^[19]。根据所有水样的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 求得大气降水线方程(图 6)为: $\delta\text{D} = 7.36\delta^{18}\text{O} + 3.59$ ($R^2 = 0.94$)。该方程与 Craig^[24]于 1961 首次提出的全球降水线方程(GMWL) $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ 、郑淑慧^[25]等于 1983 年首次提出的中国降水线方程 $\delta\text{D} = 7.9\delta^{18}\text{O} + 8.2$ 相比较,斜率与截距均偏小。较低的斜率和截距表明雨滴降落过程受到了二次蒸发的影响,同位素发生了不平衡分馏。孟玉川、刘国东^[26]研究表明小降雨事件的雨滴在降水过程中受云下二次蒸发的影响而发生强烈的同位素动力分馏效应,使降水线的斜率和截距变小,本研究监测的各场次降雨事件绝大多数属于 0—20 mm 的小降雨事件。同时,斜率小于 8 表明该区降水的来源于具有不同

稳定同位素比率的源地^[7];图6中GMWL与LMWL的交点($\delta D = -70.16\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -10.02\text{‰}$),可近似反映出水汽源的原始平均同位素组成^[18]。

黄土塬区LMWL为 $\delta D = 7.36 \delta^{18}\text{O} + 3.59$ ($R^2 = 0.94$),与榆林市岔巴沟流域2004—2006年 $\delta D = 7.57 \delta^{18}\text{O} + 3.9$ ($R^2 = 0.94$)^[2]和GNIP西安站1985—1992年 $\delta D = 7.49 \delta^{18}\text{O} + 6.1$ ($R^2 = 0.92$)相似,但与西北地区^[17]2005年 $\delta D = 7.05 \delta^{18}\text{O} - 2.17$ ($R^2 = 0.95$)、GNIP兰州站1985—1999年的 $\delta D = 7.01 \delta^{18}\text{O} + 1.53$ ($R^2 = 0.94$)差异较大。沿西安—长武—兰州,LMWL的斜率和截距都在不断下降,表明西安—长武—兰州处于同一水汽路径上,水汽输送过程中,水汽蒸发强烈,越往内陆同位素分馏越严重。

3.2 氘盈余

氘盈余($d = \delta D - 8\delta^{18}\text{O}$)受水汽源地的温度、相对湿度、风速等气象条件以及水汽路径中大陆蒸发水汽的影响^[27],直观反映地区降水蒸发凝结过程的不平衡程度,是示踪水汽源区的一个重要参数^[18]。研究区域 d 值介于 -18.75‰ — 28.73‰ ,平均值为 10.8‰ ,接近全球平均的 10‰ ,表明该区的水汽来源应该是海洋气团主导;但从月变化上看(图7), d 值除了雨季几个月份低于 10‰ 外,多数月份高于全球平均水平的 10‰ ,而局地蒸发水汽参与水分循环是氘盈余偏大的一个重要因素^[28-29],说明局地蒸发水汽在降水起到了重要的作用。

按照月降水量加权平均(图7),6—9月降水的 d 值较同年其他月份低,而低纬度地区的海洋性气团具有高湿度,低 d 值的特点,说明其降水主要受海洋气团影响,而10—5月主要受局地蒸发与大陆性气团影响。 $\delta^{18}\text{O}$ 07—11月含量较低,与低 d 值的6—9月的在7—9月重叠,说明海洋气团在7—9月起到主导作用,这也与当地降水量在7—9月最大表现一致。2013年5月氘盈余出现了极低值 5.89‰ ,在这个月的三场降雨(5.6、5.24、5.26)中,其氘盈余分别为 13.88‰ 、 -2.67‰ 、 8.76‰ ,5.6日降雨的氘盈余接近4月份的值,而5.24与5.26的两场降雨氘盈余较低,说明造成5月氘盈余出现极低值的原因可能是海洋气团于5月下旬提前到来,而此时大气温度不高,空气湿度较高,海洋气团在水汽传输过程中,未发生强烈的不平衡分馏,使得氘盈余在5月能够保持较低的水平。

3.3 ^{17}O 盈余分析

按照质量分馏原理, $\delta^{18}\text{O}$ 变化应接近 $\delta^{17}\text{O}$ 变化的两倍^[30],故不能为水循环提供更多的信息,且 ^{17}O 在自然界的含量远较 ^{18}O 低(0.038‰ 和 0.2‰)而难以测量,因此, ^{17}O 常常被忽略。但1973年Clayton等发现了非质量氧同位素分馏效应^[31],2002年Miller进而推导出了量化非质量氧同位素分馏的公式。基于上述研究, ^{17}O 的全球大气降水方程线(GMWL)和 ^{17}O 盈余的概念被陆续提出,并且发现 ^{17}O 盈余不受温度影响而与海洋大气的相对湿度(RH)显著负相关^[32]。这些研究表明 ^{17}O 可为水循环研究提供了一种重要的信息来源。

^{17}O 同位素 GMWL: $\delta^{17}\text{O} = 0.5288 \delta^{18}\text{O} + 0.000033$ ($R^2 = 0.99999$)

^{17}O 盈余计算公式: $^{17}\text{O-excess} = \delta^{17}\text{O} - 0.5288 \delta^{18}\text{O}$

式中, $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$ 分别代表水体中 ^{18}O 和 ^{17}O 组成,而 $\delta' = \ln(\delta + 1)$ 。由于 $^{17}\text{O-excess}$ 的量级非常小,所以最终结果乘以 10^6 。

研究区2013年 $\delta^{17}\text{O}$ 介于 -9.12‰ — -0.84‰ ,平均值为 -4.34‰ 。对氧同位素(^{17}O 、 ^{18}O)数据进行回归(图8),建立了氧同位素的LMWL为 $\delta^{17}\text{O} = 0.5258 \delta^{18}\text{O} + 0.0003$ ($R^2 = 0.996$)。氧同位素GMWL在海面上海水蒸发达到平衡分馏(RH=100%)时其斜率是0.529,但扩散到干空气后斜率会逐渐降低至0.518^[33]。研究区氧同位素LMWL的斜率介于海面水汽斜率0.529与干空气0.518之间,这表明该区处于海洋气团向内陆干旱

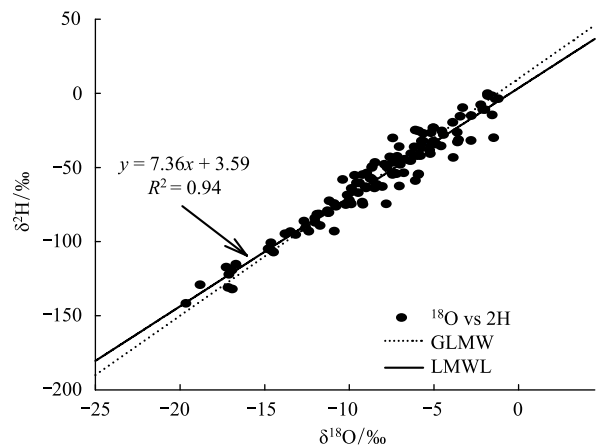


图5 大气降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系

Fig.5 Relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$

区迁移的路径上,大气降水主要来自海洋气团。

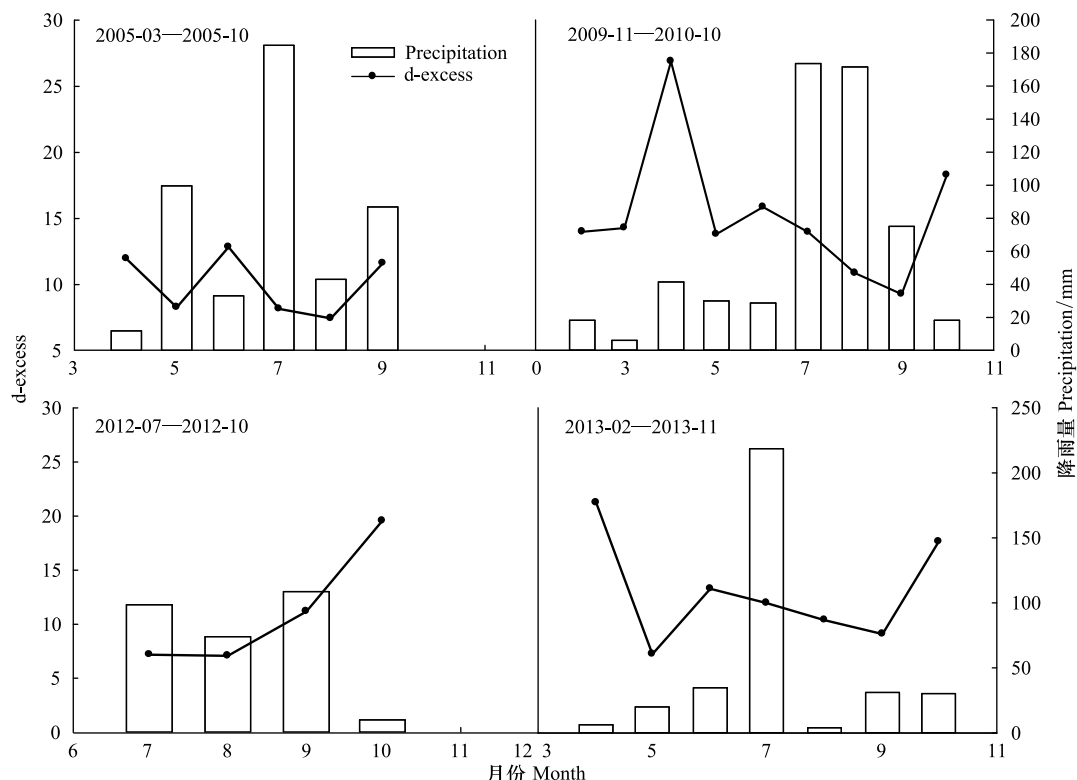


图 6 氘盈余的年内变化

Fig.6 Variations of deuterium excess in precipitation

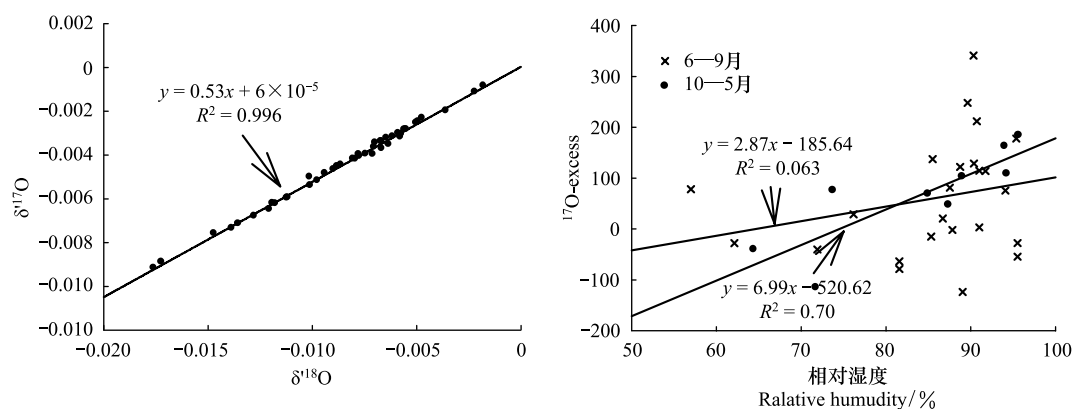


图 7 氧同位素降水方程线与 ^{17}O 盈余和相对湿度的关系

Fig.7 The local meteoric water line of oxygen isotopes and the relationship between ^{17}O -excess and relative humidity

研究区降水的 ^{17}O 盈余变幅很大,介于 -123.66 — 341.12 meg,平均值为 71.63 meg,远较海水的 ^{17}O 盈余(一般为负值)大,说明海洋气团到达该区过程中同位素经历了严重的富集。 ^{17}O 盈余的负值和正值分别占总数的 30%和 70%,但 Luz and Barkan 的研究中来自世界 52 个场次降水中 ^{17}O 盈余的负值仅有 2 个^[33]。此种差异可以通过蒸发实验的结果解释,蒸发导致水残留比率降低, $\delta^{18}\text{O}$ 不断增加而 ^{17}O 盈余降低并下降为负值^[33]。 ^{17}O 盈余为负的降水事件的 RH 为 79%,低于 ^{17}O 盈余为正的降水事件(88%)。而干季和雨季都存在 ^{17}O 盈余为负的情况,可见,该区降水形成过程中普遍经历了严重的二次蒸发,其比例可能大于 ^{17}O 盈余为负的 30%。

2013 年降水的 ^{17}O 盈余在干季随 RH 增高而显著升高 ($y = 6.99x - 520.62$, $R^2 = 0.70$), 在湿季和全年也都存在不显著的正相关趋势, 而相关研究表明 ^{17}O 盈余与海面大气的 RH 显著负相关^[34]。雨季少数降水事件的 ^{17}O 盈余在 RH 增加过程中 (57%—82%) 确实降低, 但其他降水的 ^{17}O 盈余基本都在 RH = 90% 这条直接上, 这表明雨季少数降水可能直接来源于海洋气团, 而其他降水则是海洋气团经历了复杂的重新分配过程导致 RH 达到 90% 左右时才能发生降水。而干季降水 ^{17}O 盈余与 RH 显著正相关, 说明其水汽来源是内陆; 具体来说, RH 大时蒸发能力弱故 ^{17}O 盈余大, 而 RH 小时需要过度蒸发以形成降水而导致 ^{17}O 盈余小甚至是负值。

4 结论

黄土塬区降水稳定同位素在观测期间表现出明显的年际变化。受气候变异的影响, 2005 年的降水同位素组成明显偏高, 进而使得温度、雨量与同位素组成之间关系与其他年份相反, 6—9 月降水同位素受温度控制, 9 月后受降雨量影响。同时, 同位素组成存在年内变化, 2—6 月富集, 7—11 月贫化。研究结果显示, 黄土塬区降水同位素的变化特征与西北干旱半干旱地区研究结果相反, 而与受东亚季风影响的长江流域相似。这是由于西北地区干旱半干旱区几乎常年处于西风带中^[35], 而黄土塬区处于季风非季风过渡区, 水汽来源主要受东亚季风影响。

通过建立黄土塬区降水线方程发现, 西安—长武—兰州一线, 斜率与截距逐步减小, 说明其处于同一水汽路径上, 在水汽输送过程中, 越往内陆经历了越强的同位素分馏效应。氘盈余计算结果也表明在雨量最充足的 7—9 月, 水汽来源于低纬度地区的海洋性气团, 雨季过后则主要受大陆性气团及区域水汽的影响。

利用 ^{17}O 同位素进行进一步分析发现, 黄土塬区至少 30% 降水事件经历了严重的二次蒸发, 雨季少数降水事件直接来源于海洋性气团, 其他降水事件则是海洋性气团经再分配相对湿度达 90% 左右时才产生。利用 ^{17}O 进行水汽来源分析尚处初步应用阶段, 数据分析可能不够充分。如何充分利用 ^{17}O 同位素, 对传统氢氧同位素 (^{18}O 和 ^2H) 进行补充, 是今后的研究重点之一。

致谢:感谢本文气象数据的提供单位: 中国科学院长武农业生态试验站。本文关于氢氧同位素的测定工作, 得到了中国旱区节水农业研究院的帮助。在此表示深深的感谢! 同时对长武农业生态试验站的李玉成师傅及西北农林科技大学张志强、向伟同学在水样采集中的热心帮助表示谢意!

参考文献 (References):

- [1] Warriar C U, Babu M P. A study on the spatial variations in stable isotopic composition of precipitation in a semiarid region of Southern India. *Hydrological Processes*, 2012, 26(25): 3791-3799.
- [2] Liu X, Song X F, Zhang Y H, Yu J J, Long D, Li F D, Zhang B. Spatio-temporal variations of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and shallow groundwater in the Hilly Loess Region of the Loess Plateau, China. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 63(5): 1105-1118.
- [3] Peng H D, Mayer B, Harris S, Krouse H R. A 10-yr record of stable isotope ratios of hydrogen and oxygen in precipitation at Calgary, Alberta, Canada. *Tellus B*, 2004, 56(2): 147-159.
- [4] Peng T R, Wang C H, Huang C C, Fei L Y, Chen C T, Hwang J L. Stable isotopic characteristic of Taiwan's precipitation: A case study of western Pacific monsoon region. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 289(3/4): 357-366.
- [5] 冯芳, 李忠勤, 金爽, 冯起, 刘蔚. 天山乌鲁木齐河流域山区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 特征及水汽来源分析. *水科学进展*, 2013, 24(5): 634-641.
- [6] Wu J K, Ding Y, Ye B, Yang Q, Zhang X, Wang J. Spatio-temporal variation of stable isotopes in precipitation in the Heihe River Basin, Northwestern China. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 61(6): 1123-1134.
- [7] 章新平, 姚檀栋. 我国降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布特点. *地理学报*, 1998, 53(4): 70-78.
- [8] Liu J R, Song X F, Yuan G F, Sun X M, Yang L H. Stable isotopic compositions of precipitation in China. *Tellus B*, 2014, 66: 22567, doi:10.3402/tellusb.v66.22567.
- [9] 李小飞, 张明军, 马潜, 李亚举, 王圣杰, 汪宝龙. 我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源. *环境科学*, 2012, 33(9): 2924-2931.
- [10] 章新平, 刘晶淼, 中尾正义, 谢自楚. 我国西南地区降水中过量氘指示水汽来源. *冰川冻土*, 2009, 31(4): 613-619.

- [11] 刘相超, 宋献方, 夏军, 于静洁, 杨聪, 李发东. 东台沟实验流域降水氧同位素特征与水汽来源. 地理研究, 2005, 24(2): 196-205.
- [12] Wu J K, Ding Y J, Ye B S, Yang Q Y, Hou D J, Xue L Y. Stable isotopes in precipitation in Xilin River Basin, northern China and their implications. Chinese Geographical Science, 2012, 22(5): 531-540.
- [13] 张生春. 陕西省现代大气降水氢氧同位素组成特征研究. 陕西地质, 1989, 7(2): 57-66.
- [14] 陈粉丽, 张明军, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲. 兰州及其周边区域大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 特征及其水汽来源. 环境科学, 2013, 34(10): 3755-3763.
- [15] 李志, 刘文兆, 王秋贤. 黄土塬区不同地形部位和土地利用方式对土壤物理性质的影响. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1303-1308.
- [16] 程立平, 刘文兆, 李志. 黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征. 生态学报, 2014, 34(8): 1975-1983.
- [17] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 孙晓敏, 刘鑫, 陈锋, 王志民, 王仕琴. 西北地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源. 地理学报, 2008, 63(1): 12-22.
- [18] 李小飞, 张明军, 王圣杰, 马雪宁, 李菲. 黄河流域大气降水氢、氧稳定同位素时空特征及其环境意义. 地质学报, 2013, 87(2): 269-277.
- [19] 章新平, 关华德, 孙治安, 孙广禄, 张新主, 吴华武. 云南降水中稳定同位素变化的模拟和比较. 地理科学, 2012, 32(1): 121-128.
- [20] 吴华武, 章新平, 孙广禄, 申林, 黄一民, 王红红. 长江流域大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化与水汽来源. 气象与环境学报, 2011, 27(5): 7-12.
- [21] 叶殿秀, 张强, 肖风劲. 2005 年中国气候特点. 气候变化研究进展, 2006, 2(2): 71-73.
- [22] 宋文玲. 2005 年北半球大气环流特征及其对中国气候异常的影响. 气象, 2006, 32(4): 68-73.
- [23] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富. 中国东部季风区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源. 科学通报, 2009, 54(22): 3521-3531.
- [24] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. Science, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [25] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究. 科学通报, 1983, (13): 801-806.
- [26] 孟玉川, 刘国东. 长江流域降水稳定同位素的云下二次蒸发效应. 水科学进展, 2010, 21(3): 327-334.
- [27] Vodila G, Palcsu L, Futó I, Szántó Z. A 9-year record of stable isotope ratios of precipitation in Eastern Hungary: Implications on isotope hydrology and regional palaeoclimatology. Journal of Hydrology, 2011, 400(1/2): 144-153.
- [28] 马潜, 张明军, 王圣杰, 等. 基于氢氧同位素的中国东南部降水局地蒸发水汽贡献率. 地理科学进展, 2013, 32(11): 1712-1720.
- [29] Hughes C E, Crawford J. Spatial and temporal variation in precipitation isotopes in the Sydney Basin, Australia. Journal of Hydrology, 2013, 489: 42-55.
- [30] 马红梅, 李院生, 姜苏, 安春雷. 非质量氧同位素分馏效应研究进展. 地球与环境, 2010, 38(1): 91-97.
- [31] Clayton R N, Grossman L, Mayeda T K. A component of primitive nuclear composition in carbonaceous meteorites. Science, 1973, 182(4111): 485-488.
- [32] Angert A, Cappa C D, DePaolo D J. Kinetic O^{17} effects in the hydrologic cycle: Indirect evidence and implications. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2004, 68(17): 3487-3495.
- [33] Luz B, Barkan E. Variations of $\text{O}^{17}/\text{O}^{16}$ and $\text{O}^{18}/\text{O}^{16}$ in meteoric waters. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2010, 74(22): 6276-6286.
- [34] Uemura R, Barkan E, Abe O, Luz B. Triple isotope composition of oxygen in atmospheric water vapor. Geophysical Research Letters, 2010, 37(4): L04402, doi: 10.1029/2009GL041960.
- [35] 王秀荣, 徐祥德, 姚文清. 西北地区干、湿夏季的前期环流和水汽差异. 应用气象学报, 2002, 13(5): 550-559.