

王涛,李廷勇,张键. 大高加索山南部大气降水氧同位素的气候意义[J]. 中国岩溶, 2020, 39(3): 432-441.
DOI: 10. 11932/karst20200309

大高加索山南部大气降水氧同位素的气候意义

王涛^{1,2}, 李廷勇^{1,2,3}, 张键^{1,2}

(1. 西南大学地理科学学院岩溶环境重庆市重点实验室, 重庆 400715; 2. 西南大学西南山地生态循环农业国家级培育基地, 重庆 400715; 3. 云南师范大学旅游与地理科学学院, 昆明 650050)

摘要: 大高加索山脉位于黑海和里海之间, 是欧洲与亚洲的分界线, 该区域气候受到北大西洋涛动 (North Atlantic Oscillation, NAO) 的强烈影响。为了对该区域的大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^{18}\text{O}_p$) 与 NAO 的关系有更加深入的认识, 本文利用大高加索山以南 6 个全球降水同位素监测网 (Global Network of Isotope in Precipitation, GNIP) 站点的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 数据, 分析该区域 $\delta^{18}\text{O}_p$ 的季节变化规律, 以及 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与温度和降水量等气象要素及大气环流之间的关系。得到以下主要认识: ① 在月时间尺度上, $\delta^{18}\text{O}_p$ 与月平均温度之间有着显著的正相关关系 ($p < 0.01$), 表明该区域 $\delta^{18}\text{O}_p$ 主要受当地温度控制, 表现出“温度效应”。② 北大西洋涛动通过改变西风的强度和位置从而影响 $\delta^{18}\text{O}_p$ 的变化: 当 NAO 呈现负相位时, 此时西风输送较弱, 使得来自地中海的富含 ^{18}O 的水汽能够达到大高加索山以南, 该地区 $\delta^{18}\text{O}_p$ 偏正。而当 NAO 正相位时, 西风急流输送较强, 从北大西洋穿越黑海带来更多的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 偏轻的降水。因此, NAO 所导致的水汽输送路径的变化可能是影响大高加索山以南地区 $\delta^{18}\text{O}_p$ 的重要因素, 这一研究结果为利用该地区地质记录中的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录来重建过去的 NAO 变化提供了前提。

关键词: 大气降水; $\delta^{18}\text{O}$; 北大西洋涛动; 水汽源地; 大高加索山南部地区

中图分类号: P426 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2020)03-0432-10 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

大气降水稳定同位素 (δD 和 $\delta^{18}\text{O}$) 对气候变化十分敏感, 能够记录水循环的历史信息^[1], 已经成为研究全球水循环过程的重要手段。1961年, 世界气象组织 (WMO) 和国际原子能机构 (IAEA) 建立全球大气降水同位素观测网络 (Global Network of Isotope in Precipitation, GNIP), 开始对大气降水中氢氧稳定同位素组成进行观测, 为研究全球和局地大气环流及循环机制提供同位素资料数据^[2]。研究表明不同纬度地区影响降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化的主要因素不同, 在中高纬地区主要受温度影响, 在低纬地区主要

受降水量的影响^[1,3-7]。此外, 水汽源地的变化和大气环流模式的改变也影响着降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化^[8-9]。冰芯、树轮、海洋沉积物、洞穴石笋等地质载体中的 $\delta^{18}\text{O}$ 信号可以反映古气候信息, 但各种地质记录中 $\delta^{18}\text{O}$ 的指示意义目前仍然存在很大争议^[10]。因此, 针对现代大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^{18}\text{O}_p$) 的监测研究不仅可以帮助我们了解全球的水循环机理还可以帮助我们更好的理解各种地质载体中 $\delta^{18}\text{O}$ 指标的气候意义。

北大西洋涛动 (North Atlantic Oscillation, NAO) 是北半球最主要的大气环流模式之一, 作为北半球西风强度和位置的指标, 对地中海、欧洲西北部、格陵兰和亚洲等北半球中高纬地区的气候均有显著影

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41772170, 42011530078); 西南大学西南山地生态循环农业国家级培育基地项目 (5330200076); 中央高校基本科研业务费专项资金 (XDJK2017A010)

第一作者简介: 王涛 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事第四纪地质学的学习和研究。E-mail: 1479886278@qq.com。

通信作者: 李廷勇 (1978-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事第四纪地质学研究。E-mail: cdlty@swu.edu.cn。

收稿日期: 2019-06-24

响^[11-12]。欧洲的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 监测数据、气候模拟结果,以及古气候记录,都显示出与NAO的密切联系^[12-17]。然而,NAO和降水 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值之间在中欧呈现正相关,而在高纬度欧洲呈现负相关,其中西欧中部温度与 $\delta^{18}\text{O}_p$ 对NAO的响应最为显著,在西欧和地中海盆地的海洋区域,西风、水汽循环以及其他影响(降水量)可能会使 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与NAO的关系复杂化,从而降低该地区基于氧同位素的古气候研究进行NAO重建的适宜性^[13-14,18]。此外,春季的北大西洋涛动异常可以通过影响海表温度与亚洲夏季风产生遥相关,厘清NAO与季风的相互作用对于亚洲夏季风的预测具有重要意义^[19]。

大高加索山脉位于黑海和里海之间,是欧洲与亚洲的地理分界线,也是重要的气候分界线。冬季大高加索山脉使得其南部免受来自中亚地区的北极高压系统的侵袭,夏季南高加索山脉阻挡了来自东南部的干热气团。从黑海到里海的湿润气团受到苏拉米山脉的阻挡,导致研究区西部呈现高温潮湿的气候,研究区中部为大陆性气候,东部低地则表现出高温干燥的气候^[20-21]。此外,该地区是我国西部地区水汽来源的上游区域,西风强度及位置变化导致该地区大气降水同位素的变化势必对我国西北地区的

大气降水同位素产生至关重要的影响^[22-24]。

最近西班牙的研究认为当地降水 $\delta^{18}\text{O}_p$ 主要受温度、降水量与水汽源地的变化控制^[25],斯洛文尼亚的研究则认为当地降水 $\delta^{18}\text{O}_p$ 主要受温度控制而与降水量、水汽源地的变化及NAO无关^[9],亚美尼亚高原的研究表明当地降水 $\delta^{18}\text{O}_p$ 主要受温度控制并受到NAO变化引起的西风强度和位置的变化的显著影响^[26],克里米亚的研究认为在短时间尺度上并非受温度或降水量的持续控制,而是受到当地气候与大尺度环流的综合影响。欧洲不同区域 $\delta^{18}\text{O}_p$ 的控制因素有着较大的差异,因此,大高加索山脉以南地区大气降水同位素主要受何种因素控制,北大西洋涛动如何影响当地大气降水中的同位素组成,研究区大气降水的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 是否能记录NAO信号仍是值得深入研究的科学问题。对于以上这些科学问题的剖析,可以让我们更好的了解该地区大气降水同位素组成的影响因素及其气候环境意义。而且,深入了解该地区现代大气降水同位素变化的物理机制,也是利用该地区地质记录(例如石笋和冰芯记录)进行古气候重建的前提。

本文对位于 $39^\circ\sim 42^\circ\text{N}$, $40^\circ\sim 46^\circ\text{E}$ 范围内GNIP站点的大气降水稳定同位素观测数据进行统计分析

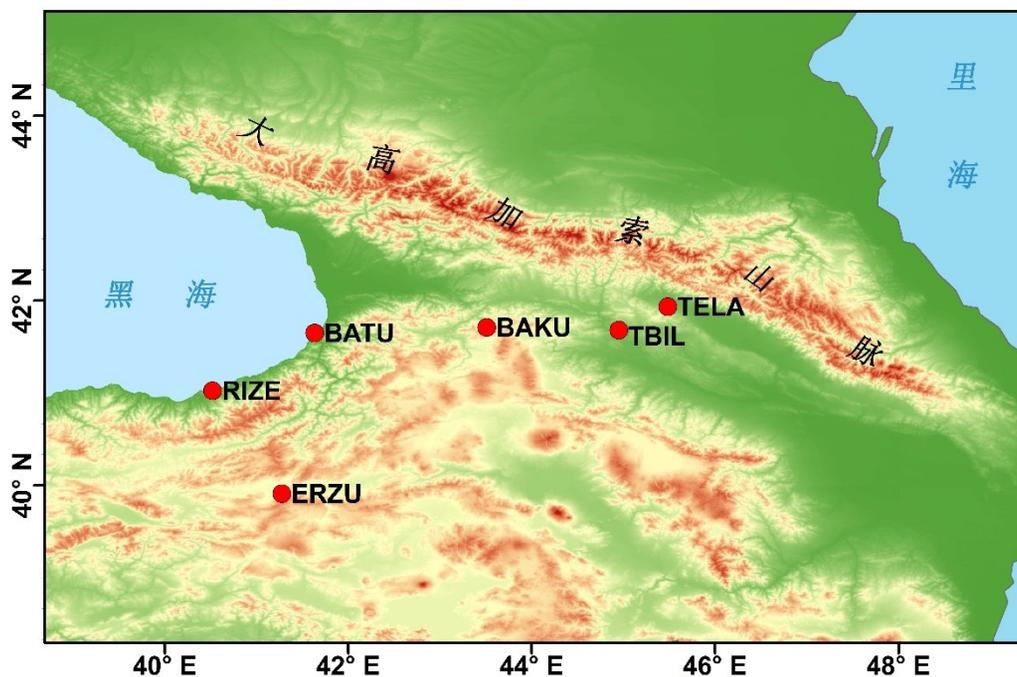


图1 本研究中的GNIP站点分布图

Fig. 1 Distribution of GNIP meteorological sites in this study

(图1),结合大气环流的变化模式,主要探讨了以下几个科学问题:

(1)大高加索山南部地区大气降水同位素在月一季节尺度上的变化特征及其影响因素;

(2)大高加索山南部降水同位素组成与北大西洋涛动的关系;

(3)探讨该地区大气降水稳定同位素组成的主要影响因素及其气候环境意义,为利用该地区地质载体中的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录进行古气候重建提供可靠的现代监测数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区位于大高加索山脉南部(39°N – 42°N , 40°E – 46°E),西临黑海,东临里海,南部为亚美尼亚高原(图1)。研究区西部属于亚热带湿润气候冬季温和夏季炎热,年平均气温为 $13\sim 15^{\circ}\text{C}$,年降水量较高($1\ 200\sim 2\ 400\text{ mm}$)。研究区东部由亚热带湿润气候向大陆性气候过渡,年降水量较低(低地区域为 $500\sim 600\text{ mm}$),平均气温在 $10\sim 13^{\circ}\text{C}$ 之间。山区的平

均气温在 $-5\sim 10^{\circ}\text{C}$ 之间,降水量在 $800\sim 1\ 400\text{ mm}$ 之间^[20–21]。研究区各站点海拔高度为 $6\sim 1\ 758\text{ m}$,年均温 $6\sim 15.4^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 $415\sim 2\ 798\text{ mm}$ 。

1.2 数据来源与方法

本文主要采用位于研究区内的6个站点的大气降水稳定同位素观测数据进行统计分析(图1,表1)。采用皮尔逊相关系数(Pearson product-moment correlation coefficient) r 和学生 t 检验(Student's test)来评估各变量之间的相关性。文中大气降水同位素(δD 、 $\delta^{18}\text{O}_p$)及温度、降水观测数据均来自GNIP,数据下载自国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)(<https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx/>),监测时间段为1980–2016年,部分年份的数据有缺失。北大西洋涛动指数(North Atlantic oscillation Index, NAOI)下载自美国海洋与大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)环境预报中心(NCEP)(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>)。对流层($1\ 000\sim 300\text{ hPa}$)整层积分水汽输送平均场所用数据为NCEP逐日大气环流资料,经纬度 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$,下载自中国气象局国家气候中心(<http://cmdp.ncc-cma.net/cn/monitoring.htm>)。

表1 本研究中用于对比分析的GNIP站点信息*

Table 1 The basic information of the meteoric stations from GNIP in this study

简称	站点	国家	纬度/ $^{\circ}\text{N}$	经度/ $^{\circ}\text{E}$	海拔/m	监测时段/年
BAKU	巴库里阿尼	格鲁吉亚	41.71	43.51	1 665	2008–2015
BATU	巴统	格鲁吉亚	41.65	41.63	6	1980–1990
TBIL	第比利斯	格鲁吉亚	41.68	44.95	490	2008–2015
TELA	泰拉维	格鲁吉亚	41.93	45.48	590	2012–2015
ERZU	埃尔祖鲁姆	土耳其	39.91	41.28	1 758	2008–2016
RIZE	里泽	土耳其	41.02	40.52	136	2008–2016

注:*大气降水监测数据在部分年份有缺失。

2 结果与分析

2.1 季节变化

图2显示了研究区各站点温度、降水量、 $\delta^{18}\text{O}_p$ 以及 d -excess的季节变化。各站点多年月平均气温与 $\delta^{18}\text{O}_p$ 表现出同步的季节变化,即 $\delta^{18}\text{O}_p$ 在夏季偏正,冬季偏负。最高月均温出现在6–8月,最低月均温出现在1月;而 $\delta^{18}\text{O}_p$ 最大值则主要出现在5–6月,最小值出现在12月到2月之间(图2c)。BATU与RIZE站位于黑海沿岸,属于地中海气候范围内,降水主要集中

在冬季,且年降水量明显高于其他四个站点。BAKU、ERZU、TBIL、TELA站降水量最大值出现在5–6月,最小值出现在12月。Dansgaard将 d -excess定义为: d -excess= $\delta\text{D}-8.0\delta^{18}\text{O}$,认为该指标指示了水汽源地的蒸发状况^[1]。与温度、降水量以及 $\delta^{18}\text{O}_p$ 相比,研究区 d -excess的季节变化较为复杂,位于东部的BAKU、BATU站 d -excess显示出从春季到冬季不断升高的趋势,最小值分别出现在2月和4月,位于中部的RIZE与ERZU站 d -excess呈现“V”形的季节变化曲线,最小值分别出现在6月和8月,而位于东部的TBIL与TELA则未显示出明显的季节变化(图2d)。

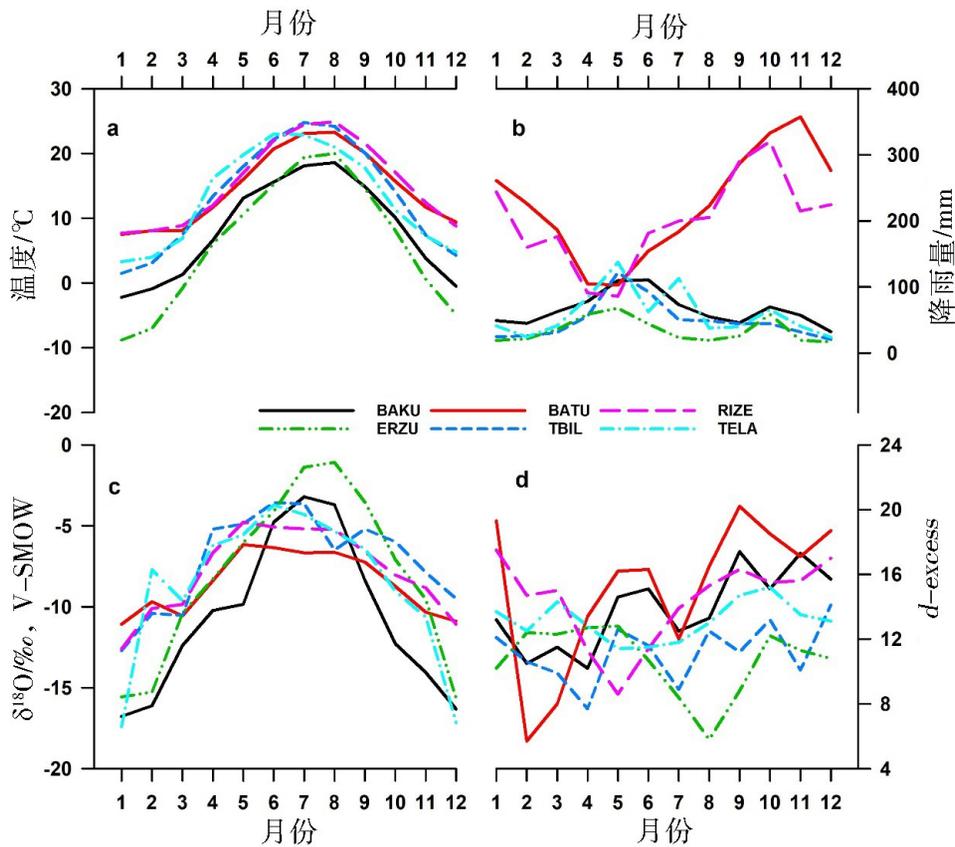


图2 研究区各站点的季节变化

Fig. 2 Seasonal variations of meteorological sites in the study area

a. 月平均温度 b. 月降水量 c. $\delta^{18}O_p$ d. $d-excess$

研究区 $d-excess$ 的季节变化可能反映了研究区东部、中部和西部不同的气候特征下水汽来源的不同^[20-21]。

2.2 降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 的关系

大气降水中 δD 与 $\delta^{18}O_p$ 之间存在的线性关系用大气降水线表示,全球大气降水线(Global Meteoric WaterLine, GMWL)方程为 $\delta D=8.0\delta^{18}O+10.0$,其斜率反映 δD 和 $\delta^{18}O_p$ 分馏速率的关系^[27]。我们利用 GNIP 中各站点月降水中的 δD 和 $\delta^{18}O_p$ 数据,求得研究区各站点大气降水线方程(Local Meteoric Water Line, LMWL)(图3)。结果显示6个站点的局地大气降水线的斜率均低于全球大气降水线(图3),这是由于内陆地区降水过程中受到云下二次蒸发的影响。研究表明,与D相比 ^{18}O 对于动力分馏更为敏感,因此研究区降水过程中的二次蒸发导致的动力分馏使D相对富集($d-excess$ 值更大),从而导致斜率较小的大气降水线方程^[1,28-31]。六个站点中BATU与RIZE的斜率偏离全球大气降水线的程度明显大于其它站点(图3),主要是由于这两个站点位于黑海沿岸,受黑海蒸发水

汽的影响较为强烈,而来自黑海的水汽大气降水线方程($\delta D=7.66\times\delta^{18}O+8.44$)的斜率低于地中海水汽和南方水汽大气降水线方程($\delta D=7.86\times\delta^{18}O+11.21$ 和 $\delta D=7.74\times\delta^{18}O+11.17$)的斜率^[26]。

3 讨论

3.1 $\delta^{18}O_p$ 与温度、降水量的关系

对 $\delta^{18}O_p$ 与月平均气温、月降水量的相关性分析结果显示,各站点的 $\delta^{18}O_p$ 均与月平均气温有显著的正相关关系($P<0.01$)(图4),显示出明显的“温度效应”^[1]。然而 $\delta^{18}O_p$ 与降水量之间在BAKU、TBIL、TELA站显著正相关($P<0.05$),在BATU与RIZE显著负相关($P<0.01$),在ERZU站不具有显著的相关关系。 $\delta^{18}O_p$ 与降水量之间的负相关关系可以用“雨量效应”来解释^[1],在BAKU、TBIL、TELA站 $\delta^{18}O_p$ 与降水量之间显著正相关($P<0.05$)的现象则无法从物理机制上解释。由于 $\delta^{18}O_p$ 、温度与降水量均存在明显的季节

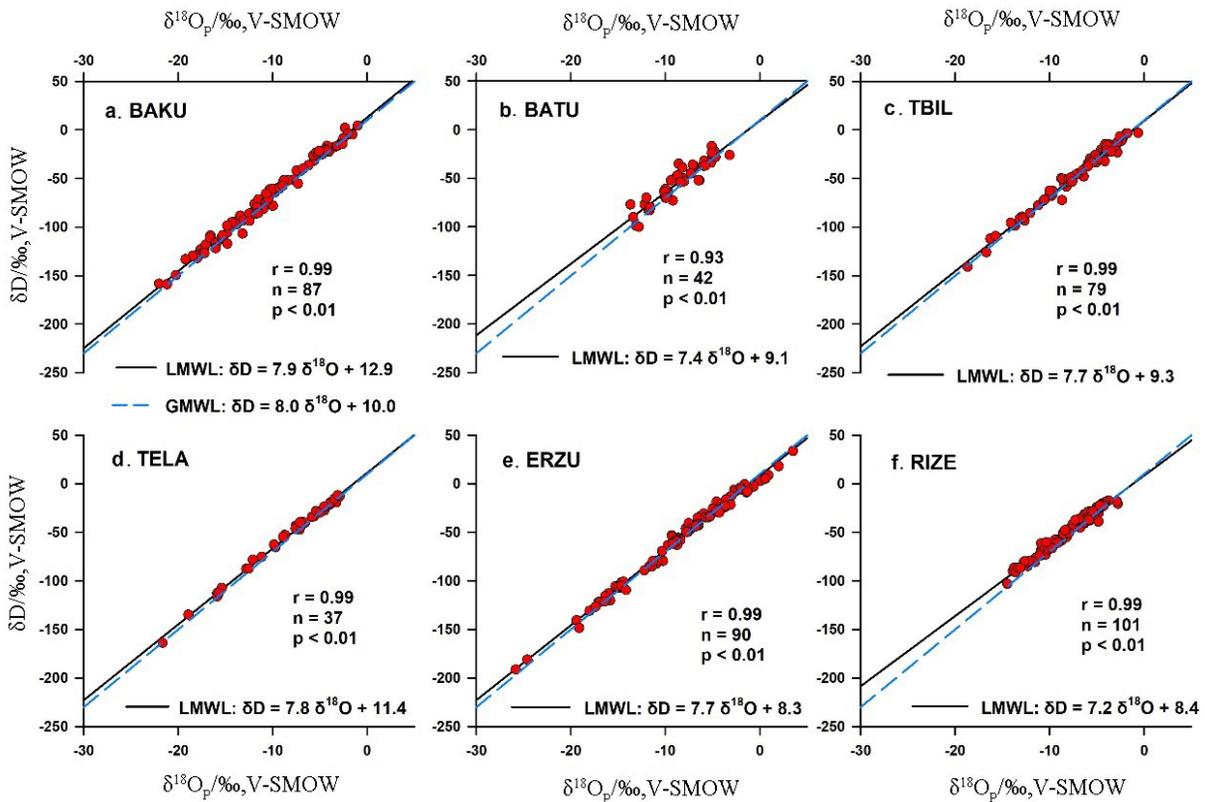


图3 研究区各站点区域大气降水线(LMWL)(黑色实线)与全球大气降水线(GMWL)(蓝色虚线)的对比

Fig. 3 Comparison of Local Meteoric Water Line (LMWL) (black solid line) and the Global Meteoric Water Line (GMWL) (blue dashed line) in the monitoring region

变化(图2),我们认为 $\delta^{18}O_p$ 与降水量之间在BAKU、TBIL、TELA站的显著正相关关系($P < 0.05$)是由 $\delta^{18}O_p$ 、温度与降水量相似的季节变化导致的,而在BA-

TU与RIZE站二者之间的显著负相关关系($P < 0.01$)除了“雨量效应”外可能还要归因于 $\delta^{18}O_p$ 、温度与降水量之间相反的季节变化。

表2 月降水量(P)、月平均气温(T)多元回归分析得到的 $\delta^{18}O_p$ 标准回归系数(R)

Table 2 Standard regression coefficients (R) for $\delta^{18}O_p$ from multivariate regression analysis of Precipitation (P) & Air Temperature (T)

简称	月降水量/P		月平均气温/T	
	标准回归系数(R)	显著性(P)	标准回归系数(R)	显著性(P)
BAKU	-0.03	>0.1	0.78	<0.01
BATU	-0.20	>0.1	0.53	<0.01
TBIL	0.07	>0.1	0.66	<0.01
TELA	0.12	>0.1	0.67	<0.01
ERZU	-0.04	>0.1	0.81	<0.01
RIZE	-0.32	<0.01	0.81	<0.01

为了进一步了解该地区月平均气温、月降水量对 $\delta^{18}O_p$ 的影响,我们以月平均气温、月降水量为自变量, $\delta^{18}O_p$ 为因变量进行回归分析。表2显示,所有站点月平均气温的标准回归系数(R)的绝对值均大于月降水量的标准回归系数(R)的绝对值,此外,所有站点月平均气温的标准回归系数(R)均通过显著性

检验,月降水量的标准回归系数(R)仅在RIZE站通过显著性检验($P < 0.01$)。根据以上数据分析,我们认为研究区 $\delta^{18}O_p$ 主要由温度控制, $\delta^{18}O_p$ 与降水量之间的正相关不具有实际意义,在BAKU、BATU、TBIL、TELA、ERZU站 $\delta^{18}O_p$ 的变化与降水量无关,仅RIZE站在一定程度上受到降水量的影响。

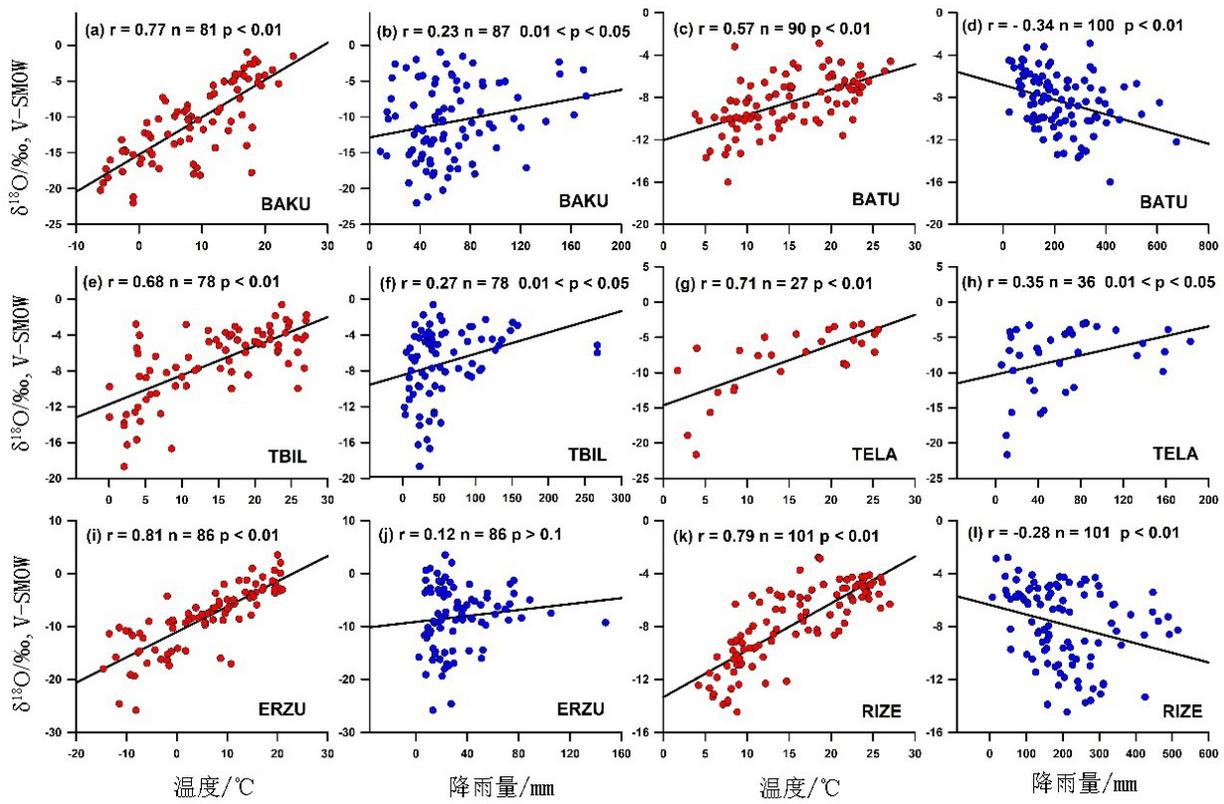


图 4 研究区各站点月降水 $\delta^{18}O_p$ 与月平均温度、月降水量的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between monthly precipitation $\delta^{18}O_p$ and monthly mean temperature and monthly precipitation in the study area

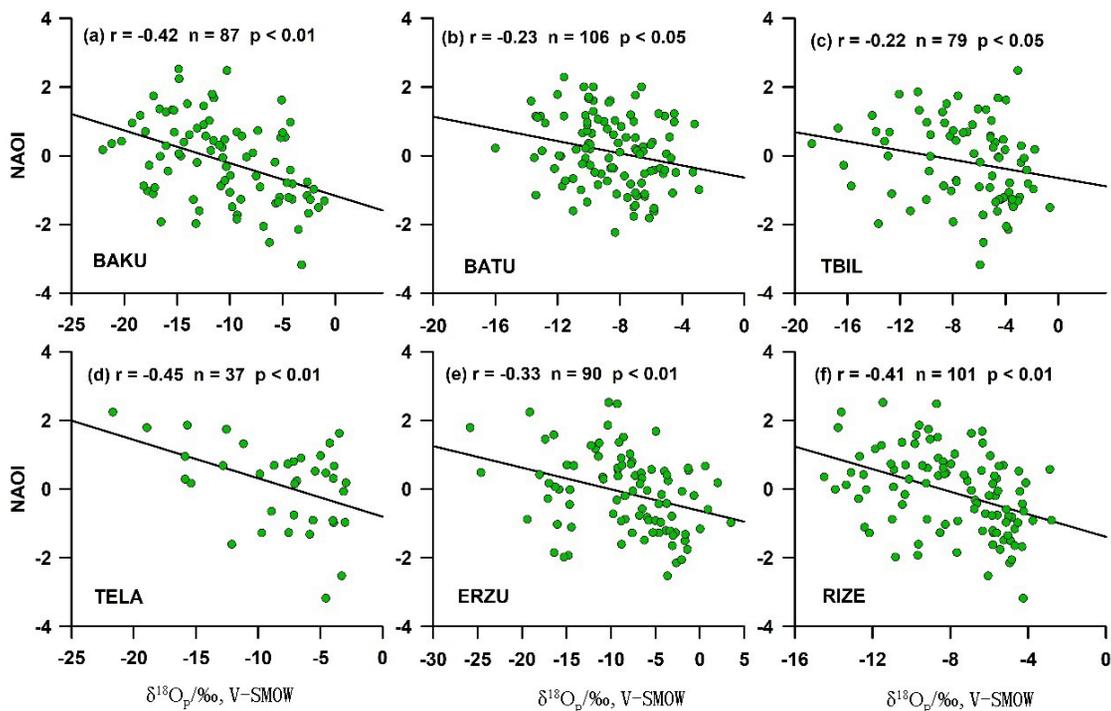


图 5 研究区各站点月降水 $\delta^{18}O_p$ 与北大西洋涛动指数(NAOI)的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of monthly $\delta^{18}O_p$ and North Atlantic Oscillation Index (NAOI) in the study area

3.2 δ¹⁸O_p与NAO的关系

NAO是由亚速尔高压和冰岛低压之间的压力差决定的:当亚速尔高压高于正常值冰岛低压低于正常值,NAO呈现正相位,西风增强并向北移动;当亚速尔高压低于正常值冰岛低压高于正常值,NAO呈现负相位,西风减弱并向南移动^[11]。图5显示各站点δ¹⁸O_p与北大西洋涛动指数NAOI之间呈现显著的负相关关系($P<0.01$)。2008–2016年期间BAKU、TBIL、ERZU、RIZE站点δ¹⁸O_p相对完整,我们选择典型

的NAO负相位年2010年(NAOI=-1.16)与NAO正相位年2015年(NAOI=0.40)为例进行对比(图6)。2010年BAKU、TBIL、ERZU、RIZE加权平均δ¹⁸O_p值(剔除有数据缺失的月份)分别为-10.01‰、-4.83‰、-9.39‰、-7.66‰(单位,V-SMOW),2015年BAKU、TBIL、ERZU、RIZE加权平均δ¹⁸O_p值分别为-10.44‰、-6.35‰、-10.18‰、-8.45‰(单位,V-SMOW)。研究区加权平均δ¹⁸O_p值在2015年明显偏负于2010年,显示出与NAOI负相关的规律(与图5一致)。

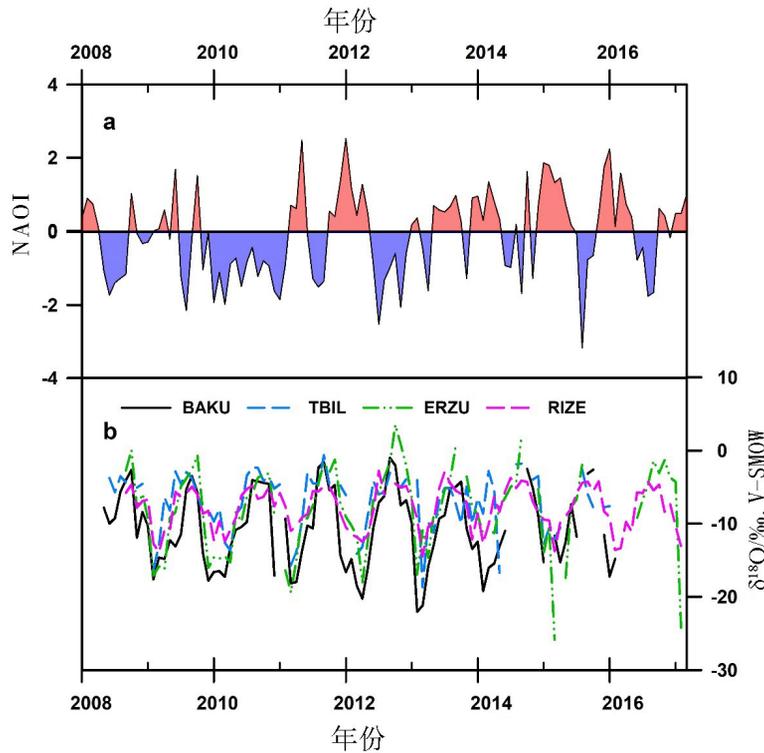


图6 2008–2016年NAOI和气象站点δ¹⁸O_p的对比

Fig. 6 Comparison of δ¹⁸O_p and NAOI during 2008–2016

a. NAOI变化的变化趋势 b. δ¹⁸O_p的变化趋势

为了研究NAO影响研究区δ¹⁸O_p的机制,我们对2010与2015年研究区对流层(1 000~300 hPa)整层积分水汽输送平均场进行了对比(图7)。图7显示2010年西风水汽输送的最大值位于35°~40°N,0°~20°E,西风将来自于这一范围的水汽带到研究区,而2015年西风水汽输送的最大值位于50°~55°N,0°~20°E,研究区水汽受该区域的影响较大。

NAO不同相位的大气环流模式决定了北半球西风急流的强度和位置,从而影响δ¹⁸O_p变化^[11,14,18,32](图8)。NAO负相位的西风急流较弱并南移^[11,33],使得来自地中海(表层水体δ¹⁸O=2‰)的富含¹⁸O的水汽能够

输送到大高加索山以南,导致δ¹⁸O_p偏正。而NAO正相位的西风急流较强并向北移动,从北大西洋途径黑海(表层水体δ¹⁸O=-2.5‰)带来更多的δ¹⁸O_p偏负的水汽,导致δ¹⁸O_p偏负^[11,26,33]。NAO变化引起的西风位置和强度的变化导致研究区上空的大气环流发生改变从而影响δ¹⁸O_p。

4 结论

本文选取大高加索山脉以南地区的大气降水氧同位素数据进行对比研究,结合大气环流模式变化,

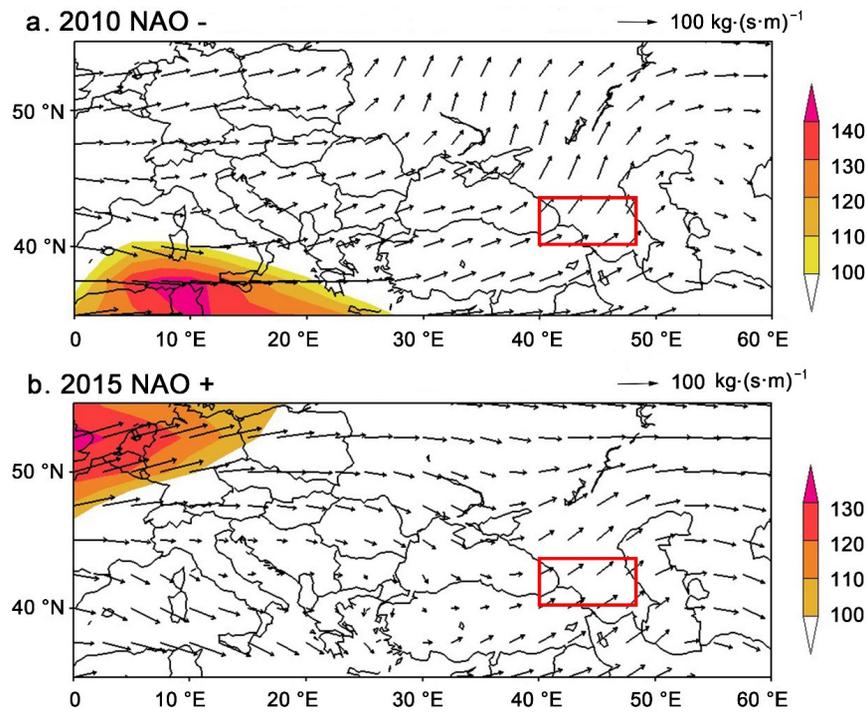


图 7 典型 NAO 不同相位下,对流层(1 000~300 hPa)整层积分水汽输送平均场对比。红色方框中为本研究区,图中矢量为水汽输送 $q \cdot v$, 阴影区为水汽输送大小,单位为 $kg \cdot (s \cdot m)^{-1}$

Fig. 7 Comparison of the average intensity of integral water vapor transportation in the troposphere (1 000~300 hPa) under the phase of NAO of different typical year (2010 and 2015). The vector in the figure is moisture transportation using the expression of equation $q \cdot v$, and the shaded area is the intensity of water vapor transportation using the equation $kg \cdot (s \cdot m)^{-1}$

a. 2010 年 NAO 负相位 (NAOI = -1.16) b. 2015 年 NAOI 正相位 (NAOI = 0.40)

注:所用数据为 NCEP 逐日大气环流资料,经纬度 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。

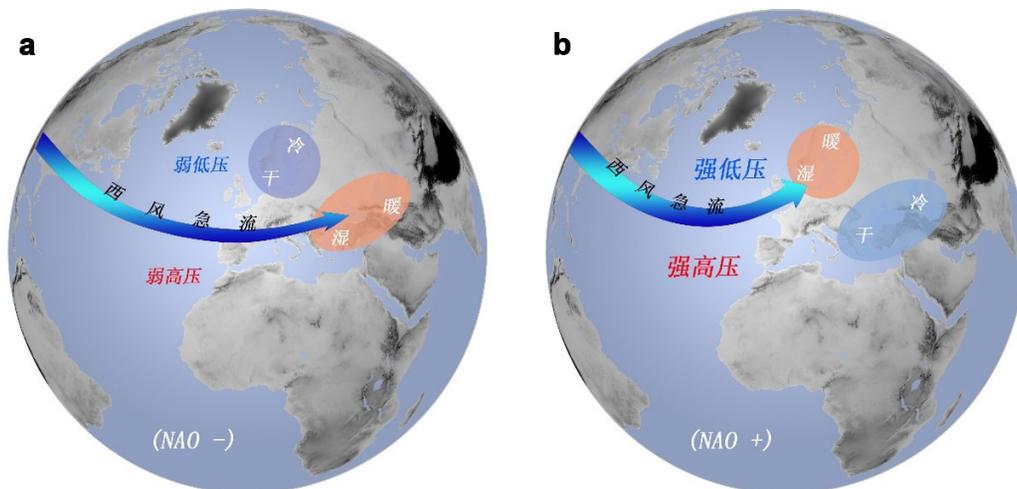


图 8 北大西洋涛动不同相位西风位置和强度变化及其对欧洲气候的影响示意图

Fig. 8 Schematic diagrams of the changes in the position and intensity of the westerly winds in different phases of NAO and its impact on the European climate.

a. NAO 负相位 b. NAO 正相位

得出以下主要结论:

(1)该地区夏季 $\delta^{18}\text{O}_p$ 偏重,冬季 $\delta^{18}\text{O}_p$ 偏轻,表现出“温度效应”。 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与月平均气温之间具有显著的正相关关系($p<0.01$),主要受温度控制,而 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与月降水量之间显著的正相关关系($p<0.05$)是由温度与降水量相同的季节变化导致的,不具有实际意义;

(2) $\delta^{18}\text{O}_p$ 与北大西洋涛动指数显著负相关,NAO通过改变西风的位置从而改变水汽输送的路径,进而影响 $\delta^{18}\text{O}_p$ 。负NAO相位的西风急流较弱且南移,来自地中海的富含 ^{18}O 的水汽能够输送到大高加索山以南,导致研究区 $\delta^{18}\text{O}_p$ 偏重,正NAO相位的西风急流较强且位置偏北,从北大西洋经过黑海带来更多的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 偏轻的降水,导致研究区 $\delta^{18}\text{O}_p$ 偏轻。

总之,基于现有的GNIP数据资料,我们认为大高加索山以南大气降水 $\delta^{18}\text{O}_p$ 在月一季节时间尺度上主要由温度控制,同时受到NAO的显著影响。因此,利用该地区地质记录中的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录(例如洞穴石笋)与温度记录进行对比,可以帮助我们重建过去NAO的变化。

参考文献

- [1] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 1964,16(4): 436-468.
- [2] Rozanski K, Araguás-Araguás L, Gonfiantini R. Isotopic Patterns in Modern Global Precipitation[M]. Washington: American Geophysical Union, 1993:1-36.
- [3] Rozanski K, Araguás-Araguás L, Gonfiantini R. Relation between long-term trends of oxygen-18 isotope composition of precipitation and climate [J]. *Science*, 1992, 258 (5084): 981-985.
- [4] Hoffmann G, Heimann M. Water isotope modeling in the Asian monsoon region[J]. *J Quaternary International*, 1997,37(2): 115-128.
- [5] Araguafis-Araguafis L, Froehlich K, Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1998,103(D22): 28721-28742.
- [6] Yamanaka T, Tsujimura M, Oyumbaatar D, et al. Isotopic variation of precipitation over eastern Mongolia and its implication for the atmospheric water cycle[J]. *Journal of Hydrology*, 2007,333(1): 21-34.
- [7] Tang Y, Pang H, Zhang W, et al. Effects of changes in moisture source and the upstream rainout on stable isotopes in summer precipitation—a case study in Nanjing, East China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015,12(4): 3919-3944.
- [8] Wang S, Zhang M, Crawford J, et al. The effect of moisture source and synoptic conditions on precipitation isotopes in arid central Asia [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017,122(5): 2667-2682.
- [9] Krklec K, Domínguez-Villar D, Lojen S. The impact of moisture sources on the oxygen isotope composition of precipitation at a continental site in central Europe [J]. *Journal of Hydrology*, 2018,561: 810-821.
- [10] Cai Y, Chiang J C H, Breitenbach S F M, et al. Holocene moisture changes in western China, Central Asia, inferred from stalagmites[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017,158: 15-28.
- [11] Hurrell J W, Kushnir Y, Ottersen G, et al. An overview of the North Atlantic Oscillation [M]. Washington: American Geophysical Union, 2003.
- [12] Casado M, Ortega P, Masson-Delmotte V, et al. Impact of precipitation intermittency on NAO-temperature signals in proxy records[J]. *Climate of the Past*, 2013,9(2): 871-886.
- [13] Baldini L M, McDermott F, Foley A M, et al. Spatial variability in the European winter precipitation $\delta^{18}\text{O}$ —NAO relationship: Implications for reconstructing NAO-mode climate variability in the Holocene [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(4).
- [14] Field R D. Observed and modeled controls on precipitation $\delta^{18}\text{O}$ over Europe: From local temperature to the Northern Annular Mode [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115 (D12).
- [15] Sidorova O V, Siegwolf R T W, Saurer M, et al. Spatial patterns of climatic changes in the Eurasian north reflected in Siberian larch tree-ring parameters and stable isotopes [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(3): 1003-1018.
- [16] Mischel S A, Scholz D, Spötl C. $\delta^{18}\text{O}$ values of cave drip water: a promising proxy for the reconstruction of the North Atlantic Oscillation? [J]. *Climate Dynamics*, 2015, 45 (11-12): 3035-3050.
- [17] Wassenburg J A, Dietrich S, Fietzke J, et al. Reorganization of the North Atlantic Oscillation during early Holocene deglaciation [J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(8): 602-605.
- [18] Langebroek P M, Werner M, Lohmann G. Climate information imprinted in oxygen-isotopic composition of precipitation in Europe [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 311 (1-2): 144-154.
- [19] Wu Z, Wang B, Li J, et al. An empirical seasonal prediction model of the east Asian summer monsoon using ENSO and NAO [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2009, 114(D18).
- [20] Keggenhoff I, Elizbarashvili M, King L. Recent changes in Georgia's temperature means and extremes: Annual and seasonal trends between 1961 and 2010 [J]. *Weather and Climate Extremes*, 2015,8: 34-45.
- [21] Elizbarashvili M, Chartolani G, Khardziani T. Variations and trends of heating and cooling degree-days in Georgia for 1961—1990 year period [J]. *Annals of Agrarian Science*, 2018, 16 (2): 152-159.

- [22] 田立德,姚檀栋,White J W C,等.喜马拉雅山中段高过量氘与西风带水汽输送有关[J].科学通报,2005,50(7): 669-672.
- [23] 李佳芳,石培基,朱国锋,等.河西走廊中部大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及水汽输送[J].环境科学学报,2015,35(4): 947-955.
- [24] Liu X, Rao Z, Zhang X, et al. Variations in the oxygen isotopic composition of precipitation in the Tianshan Mountains region and their significance for the Westerly circulation[J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(7): 801-816.
- [25] Krklec K, Dominguez-Villar D., Quantification of the impact of moisture source regions on the oxygen isotope composition of precipitation over Eagle Cave, central Spain[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2014, 134(134): 39-54.
- [26] Brittingham A, Petrosyan Z, Hepburn J C, et al., Influence of the North Atlantic Oscillation on δD and $\delta^{18}\text{O}$ in meteoric water in the Armenian Highland[J]. Journal of Hydrology, 2019, 575: 513-522.
- [27] Craig H. Isotopic Variations in Meteoric Waters[J]. Science, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [28] Stewart M K. 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, 1975, 80(9): 1133-1146.
- [29] Peng H, Mayer B, Norman A-L, et al. Modelling of hydrogen and oxygen isotope compositions for local precipitation[J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2005, 57(4): 273-282.
- [30] Pang Z, Kong Y, Froehlich K, et al. Processes affecting isotopes in precipitation of an arid region[J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2011, 63(3): 352-359.
- [31] Chen F, Zhang M, Wang S, et al. Relationship between sub-cloud secondary evaporation and stable isotopes in precipitation of Lanzhou and surrounding area[J]. Quaternary International, 2015, 380-381: 68-74.
- [32] Hurrell J W. Decadal trends in the north atlantic oscillation: regional temperatures and precipitation [J]. Science, 1995, 269 (5224): 676-679.
- [33] Clarke M L, Rendell H M. Effects of storminess, sand supply and the North Atlantic Oscillation on sand invasion and coastal dune accretion in western Portugal [J]. The Holocene, 2006, 16(3): 341-355.

Climatology interpretation of rainfall $\delta^{18}\text{O}_p$ across the southern Greater Caucasus region

WANG Tao^{1,2}, LI Tingyong^{1,2,3}, ZHANG Jian^{1,2}

(1. Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. State Cultivation Base of Eco-agriculture for Southwest Mountainous Land, Southwest University, Chongqing 408435, China;

3. College of Tourism and Geography, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650050, China)

Abstract Located between the Black sea and Caspian sea, the Great Caucasus are the boundary between Europe and Asia, where the climate is strongly influenced by the north Atlantic Oscillation (NAO). Based on data of six stations of the Global Network of Isotope in Precipitation (GNIP) in the south of the Great Caucasus, we analyzed seasonal variations of $\delta^{18}\text{O}_p$ as well as the relationship between $\delta^{18}\text{O}_p$ and local temperature, precipitation, and atmospheric circulation. Results show that, (1) On the monthly time scale, there is a significant positive correlation between the average monthly temperature and $\delta^{18}\text{O}_p$ ($P < 0.01$), which indicates that $\delta^{18}\text{O}_p$ in this region is mainly controlled by the local temperature, exhibiting a “temperature effect”. (2) The north Atlantic Oscillation (NAO) exerts influence on the variation of $\delta^{18}\text{O}_p$ by changing the intensity and position of the westerly wind. When the NAO is in a negative phase, the westerly wind transport is weaker, making $\delta^{18}\text{O}_p$ -rich from the Mediterranean able to arrive in the south of the Great Caucasus where the $\delta^{18}\text{O}_p$ value showing positive. While when NAO is in a positive phase, the westerly wind conveys strongly, bringing more precipitation with lighter $\delta^{18}\text{O}_p$ from the Black Sea. Therefore, the change of moisture transport path caused by NAO may be an important factor affecting the regional $\delta^{18}\text{O}_p$ in the south of the Great Caucasus, which should be taken into consideration when reconstructing the past NAO changes by using the geological $\delta^{18}\text{O}_p$ records in the region.

Key words atmospheric precipitation, $\delta^{18}\text{O}_p$, north Atlantic Oscillation, water vapor source, southern Great Caucasus region

(编辑 张玲)