

南京大气降水氧同位素变化及水汽来源分析

王涛¹, 张洁茹², 刘笑¹, 姚龙³

(1.南京信息工程大学大气科学学院, 江苏 南京 210044; 2.扬州市气象局, 江苏 扬州 225000;
3.解放军 94783 部队 61 分队, 浙江 长兴 313111)

摘要: 研究结论有助于了解南京地区的水汽输送以及水汽循环过程。在全球大气降水同位素观测网(GNIP)南京站点的大气降水氢氧同位素资料基础上, 并结合相关气象资料, 分析了南京地区大气降水稳定同位素时间分布特征及其影响因素, 并建立了局地大气降水线方程。结果表明: 南京地区大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 春季最为富集、夏季最为贫化; 年尺度下降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度之间不存在正相关, 而与降水量之间存在负相关; 季节尺度下, 冬季的 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度、降水量的关系与年尺度结果相反, 皆呈现出正相关关系。采用 HYSPLIT 模型对站点水汽来源进行追踪, 并结合季风活动分析得出: 全年中南京大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化主要受亚洲夏、冬季风及其带来的水汽影响, 在季风交替时节(春、秋季)虽降水源于局地蒸发水汽, 但仍为季风带来降水的影响。

关键词: $\delta^{18}\text{O}$; 南京地区; 大气降水线; 气团轨迹

中图分类号: P332.8, P426.6, X142

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2013)04-0025-07

稳定同位素是自然水体的重要组成, 同位素以不同的比值分配到两种物质或物相中的同位素分馏现象, 发生在自然界水循环的每一个环节中, 且非常敏感地响应环境的变化。降水是水循环过程中一个重要环节, 降水中稳定同位素不仅受到大尺度天气气候变化约束, 而且还受局地气象和地理条件的影响, 使其呈现出一定的时间、空间变化规律性^[1-4]。通过对大气降水中氢氧稳定同位素组成及其比率大小研究可以辨别水汽来源的不同地域, 也能反映大气水循环的历史信息^[5,6]。

国外对降水中稳定同位素的观测和研究起步较早。1953年, Dansgaard 就开始对水循环过程中稳定同位素的研究^[5]。1961年国际原子能机构 IAEA(International Atomic Energy Agency) 与世界气象组织 WMO(World Meteorological Organization) 合作, 建立全球大气降水同位素网络 GNIP (Global Network of Isotope in Precipitation), 正式开始在全球范围内系统地收集降水中环境同位素组成数据以及相关的气象要素^[7]。1966年珠穆朗玛峰的科学考察拉开了我国降水氧稳定同位素研究的序幕^[8], 1983年开始加入 GNIP 研究计划^[9]。2004年建立中国大气降水同位素网络 CHNIP(Chinese Network of Isotopes in Precipitation),

系统地对 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 进行观测和研究^[10]。此外, 一系列科学研究^[11-19]对我国大气降水稳定同位素分布特征、同位素效应、水汽输送过程等的变化规律和机制都取得了重要认识。

大范围地区的盛行风随季节而有显著改变的现象称为季风。世界上季风区域分布甚广, 我国位于著名的东亚季风区^[20]。季风系统通过影响大尺度水汽输送的分布和水汽收支情况对季风区域的降水产生影响, 同时又是水汽输送的重要载体, 直接控制降水空间分布和季节分布特征^[21-24], 因此脱离季风孤立地讨论我国降水是不科学的。

南京市处于我国长江中下游苏南地区, 大部为低山丘陵地形, 平均海拔高度 26m。气候属于北亚热带季风气候, 四季分明, 冬夏长而春秋短, 年平均气温 15.4℃, 年平均降水量 1 048mm, 降水 6~8 月居多。此外, 苏南地区还是我国经济发达、城镇化迅速的地区, 随着经济快速增长, 人口密集增加, 该地区自然生态环境进一步脆弱化, 工农业等水资源利用问题进一步突出; 同时天气气候复杂多变使气候、环境灾害呈现高风险性, 种种因素交织在一起, 使得南京、苏南地区经济, 特别是城市群经济社会面临更多挑战。本文分析南京

收稿日期: 2012-12-18

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(40701013)黔西南全新世季风突变与水汽源变化的洞穴沉积诊断

作者简介: 王涛 (1984-), 男, 江苏徐州人, 在读博士研究生, 主要从事气候系统与全球变化的研究。E-mail: 4341250@qq.com

地区大气降水中稳定同位素的季节变化特征,对温度、降水量及水汽来源等影响南京地区大气降水稳定同位素的因素进行讨论,可以对了解南京地区的水汽输送以及水汽循环过程有所帮助。对南京四季的划分结合张静^[25]、缪启龙^[26]等的研究结果分为:春季4月~5月;夏季6月~9月;秋季10月~11月;冬季12月~次年3月。

1 数据与方法

1.1 数据来源

文中所选用的降水同位素数据资料来自全球降水同位素观测网 GNIP,观测网中各个站点观测的项目包括 δD , $\delta^{18}O$, 3H , 温度和降水量以及水汽压,所有观测项目数据记录均为月平均值,其样品收集、运输的技术程序和标准数据均由国际原子能机构 IAEA 严格制定,各站点的降水同位素信息由 IAEA 制定成册定期发表,并可在国际原子能机构网站 (<http://www.iaea.org/water>) 上直接下载。氧稳定同位素的比率 $R(^{18}O/^{16}O)$ 相对于标准平均海洋水 SMOW (Standard Mean Ocean Water) 的千分差表示:

$$\delta^{18}O(‰) = (R_{\text{样品}}/R_{\text{SMOW}} - 1) \times 1000$$

式中: $R_{\text{样品}}$ 为样品中的 $^{18}O/^{16}O$ 比值; R_{SMOW} 为 SMOW 中的 $^{18}O/^{16}O$ 比值。

分析国际原子能机构 IAEA 的 GNIP 数据库中我国站点的大气降水稳定同位素与气象数据,部分气象数据是缺失的。为此,根据我国气象数据库资料进行补充,GNIP 南京站点数据记录时间为 1987 年至 1992 年。

降水中 $\delta^{18}O$ 的降水加权平均值为:

$$\delta_w = \frac{\sum p_i \delta_i}{\sum p_i}$$

式中: p_i 为月降水量; δ_i 为月降水的 ^{18}O 浓度。

1.2 轨迹模式简介

文中空气轨迹模型采用美国海洋大气研究中心 (NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration) 空气资源实验室 (ARL, Air Resources Laboratory) 开发的混合单粒子拉格朗日积分轨迹模型 HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model), 该模型常用于气团运动的模拟分析。模型所使用的气象资料来自美国国家环境预报中心 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 的全球再分析资料 (Global Reanalysis), 为 GBL 资料, 可在 NOAA 网站 (<ftp://arlftp.arl.hq.noaa.gov/pub/>

archives) 上直接下载获得。

2 南京大气降水同位素的季节变化

南京大气降水同位素值的变化范围: $\delta^{18}O$ 为 $-11.83‰$ ~ $-2.58‰$, 平均值 $-7.49‰$; δD 为 $-83.5‰$ ~ $-6.1‰$, 平均值 $-45.1‰$ 。IAEA/WMO 给出的全球降水平均稳定同位素组成^[27]为: $\delta^{18}O$ 在 $-50‰$ ~ $+10‰$ 之间, δD 在 $-350‰$ ~ $+50‰$ 之间; 我国大气降水中 $\delta^{18}O$ 和 δD 的变化范围^[28]分别为 $-24‰$ ~ $+2‰$, $-210‰$ ~ $+20‰$, 可以看出南京大气降水同位素变化范围处在我国与全球的大气降水同位素变化之中。

南京春季大气降水同位素的变化范围: $\delta^{18}O$ 为 $-6.82‰$ ~ $-2.58‰$, 平均值 $-4.1‰$, 降水加权平均值 $-4.39‰$; δD 为 $-44.6‰$ ~ $-6.1‰$, 平均值 $-19.5‰$, 降水加权平均值 $-22.4‰$ 。夏季大气降水同位素的变化范围: $\delta^{18}O$ 为 $-11.83‰$ ~ $-6.58‰$, 平均值 $-9.18‰$, 降水加权平均值 $-9.5‰$; δD 为 $-83.5‰$ ~ $-41.5‰$, 平均值 $-62‰$, 降水加权平均值 $-64.8‰$ 。秋季大气降水同位素的变化范围: $\delta^{18}O$ 为 $-10.82‰$ ~ $-4.79‰$, 平均值 $-6.88‰$, 降水加权平均值 $-7.34‰$; δD 为 $-72‰$ ~ $-23.8‰$, 平均值 $-41.2‰$, 降水加权平均值 $-46.5‰$ 。冬季大气降水同位素的变化范围: $\delta^{18}O$ 为 $-10.77‰$ ~ $-4.25‰$, 平均值 $-7.25‰$, 降水加权平均值 $-7.15‰$; δD 为 $-71.6‰$ ~ $-16.3‰$, 平均值 $-40.5‰$, 降水加权平均值 $-40.4‰$ 。

随着四季的变化, 南京大气降水同位素组成也发生变化, 表现为: 春季为大气降水同位素富集时期, 夏季为贫化时期; 以夏秋季节代表夏半年、冬春季节代表冬半年, 则冬半年降水同位素富集偏正, 夏半年降水同位素贫化偏负。

3 南京地区大气降水线与氡盈余

3.1 大气降水线方程

大气降水线是一个地区某个阶段内降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 之间的线性关系, 对于研究降水过程中稳定同位素比率之间的关系具有重要意义。Craig^[29]研究全球范围内降水样品中的氢氧同位素组成后, 用数学式表示了 δD 和 $\delta^{18}O$ 之间的线性规律: $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$, 它是一条斜率为 8, 截距为 10 的直线, 又称为全球大气降水线 GMWL (Global Meteoric Water Line)。GMWL 这个关系式揭示在全球平均状况下, 水汽在其源地非平衡蒸发以及水汽在凝结过程中平衡分馏条件下降水水中稳定同位素比率 δD 和 $\delta^{18}O$ 之间的对比关系^[1,30]。国内学

者也根据全球降水同位素观测资料对我国的大气降水特征作了大量的研究,郑淑蕙^[28]等提出了我国的降水方程: $\delta D=7.9\delta^{18}O+8.2$ 。

根据实测降水氢氧同位素数据,用最小二乘法拟合得到南京地区大气降水线方程(如图1)为: $\delta D=8.47\delta^{18}O+17.52(R^2=0.96)$ 。

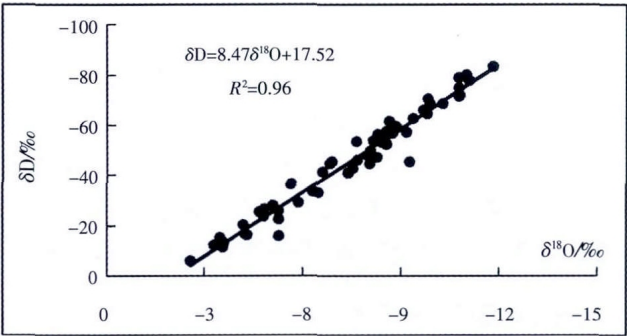


图1 南京地区大气降水线
Fig.1 The local meteoric water line of Nanjing area

由于局地环流中水汽来源及蒸发模式的不同会使得局地大气降水线 LMWL 发生偏离全球大气降水线的现象。同样,对南京四个季节中大气降水同位素数据进行拟合得到各个季节的大气降水线方程(如图2)。

春季: $\delta D=9.28\delta^{18}O+18.57(R^2=0.98)$
夏季: $\delta D=8.11\delta^{18}O+12.56(R^2=0.87)$
秋季: $\delta D=7.65\delta^{18}O+11.43(R^2=0.98)$
冬季: $\delta D=8.85\delta^{18}O+23.72(R^2=0.98)$

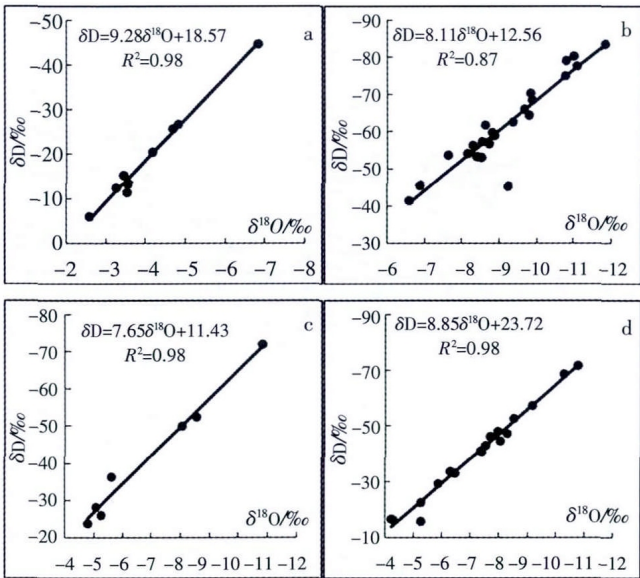


图2 南京地区四季节的大气降水线(a:春季;b:夏季;c:秋季;d:冬季)
Fig.2 The local meteoric water line of Nanjing area in four seasons
(a: spring; b: summer; c: autumn; d: winter)

由南京四季大气降水线方程可看:春、冬季节(冬半年)大气降水线的斜率和截距都显著偏高,夏、秋季(夏半年)大气降水线的斜率和截距较为接近平均数值8和10;这说明在夏半年中,南京地区大气降水主要受到源于海洋水汽的影响,而冬半年大气降水的影响则比较复杂。

3.2 降水氕盈余

水体在蒸发过程中的动力分馏作用使氢和氧稳定同位素的平衡分馏被破坏,在降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 的关系中会出现一个差值,Dansgaard^[1]定义它为氕盈余(d -excess): $d=\delta D-8\delta^{18}O$,全球降水中 d 的平均值在10‰左右。有学者^[31-32]的研究指出, d 值取决于形成降水时水汽源地的相对湿度,水汽源地相对湿度较低时, d 值较高;反之,若水汽源地相对湿度较高则 d 值较低。

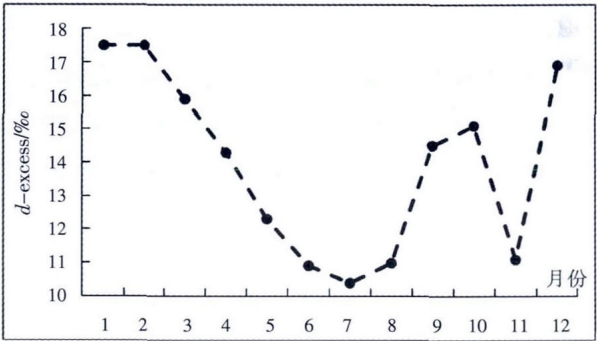


图3 南京地区降水氕盈余多年月平均变化趋势
Fig.3 Variation trend of monthly mean d -excess in Nanjing area

南京地区大气降水氕盈余多年月平均变化(图3)显示,夏季降水氕盈余数值低,冬季降水氕盈余数值高,反映出南京夏季大气降水水汽源于空气湿度较高的湿润地区,而冬季则源于空气湿度较低干燥地区。综合大气降水线方程,可认为南京地区夏季降水水汽主要来自低纬度的热带海洋,冬季则来自干燥的大陆内部地区。

4 降水同位素的温度效应与降水量效应

Dansgaard^[1]讨论了影响降水中同位素组成季节分布和地理分布的因素,根据瑞利模型总结了大气降水氧同位素的纬度效应、温度效应、高度效应、降水量效应、大陆效应。这些效应主要考虑采样点本身的气象数据和地理要素。通常降水中稳定同位素比率与温度、降水量之间的关系最受关注。温度效应指同位素的组成成分与温度成正相关关系,降水量效应则指同位素的组成成分与降水量成反相关关系。

4.1 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的关系

全年尺度下,对南京降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度全部实测数值的线性拟合(如图4)得: $\delta^{18}\text{O}=-0.071T-6.38$ ($R^2=0.08$)。

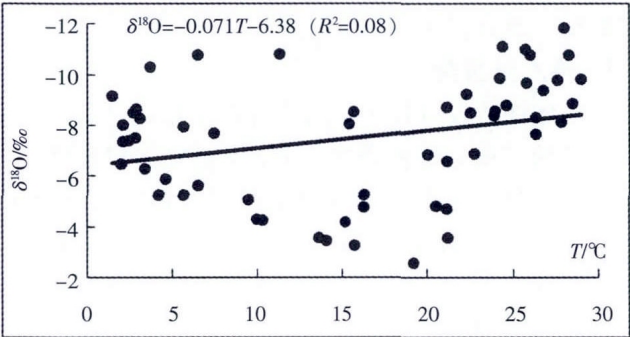


图4 南京地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的相关关系
Fig.4 Correlation between $\delta^{18}\text{O}$ and monthly temperature

季节尺度下,得到的拟合方程为:春季: $\delta^{18}\text{O}=-0.15T-1.4$ ($R^2=0.15$);夏季: $\delta^{18}\text{O}=-0.26T-2.53$ ($R^2=0.23$);秋季: $\delta^{18}\text{O}=-0.03T-6.48$ ($R^2=0.003$);冬季: $\delta^{18}\text{O}=0.32T-8.66$ ($R^2=0.21$)。

表1 南京地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度相关系数表
Table1 The correlation coefficient between $\delta^{18}\text{O}$ and temperature in Nanjing area

$\delta^{18}\text{O}$ 与 温度	春季	夏季	秋季	冬季	全年
相关系数	-0.386	-0.476*	-0.053	0.453	-0.282*

(**为显著性水平0.01; *为显著性水平0.05。下同)

全年与季节尺度下,大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度间的相关系数计算结果(如表1)所示。从线性拟合和相关系数的计算结果显示,全年尺度中,南京地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度之间并不存在正相关关系;而在四个季节中,只有冬季有“温度效应”的表现,其余三季节,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度间也没有正相关关系。张琳^[19]等研究表明我国低纬度地区显示降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的负向相关关系,反映出在季节尺度上,温度效应不明显,甚至不存在。南京地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的关系与之类似。

4.2 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量的关系

同样,对南京降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量全部实测数据拟合得: $\delta^{18}\text{O}=-0.01P-6.33$ ($R^2=0.20$)。在四个季节中的拟合关系为:春季: $\delta^{18}\text{O}=-0.02P-2.78$ ($R^2=0.28$);夏季: $\delta^{18}\text{O}=-0.004P-8.36$ ($R^2=0.15$);秋季: $\delta^{18}\text{O}=-0.01P-6.33$ ($R^2=0.06$);冬季: $\delta^{18}\text{O}=+0.004P-7.45$ ($R^2=0.006$)。两数据间的相关系数计算结果表2所示。

表2 南京地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量相关系数表
Table2 The correlation coefficient between $\delta^{18}\text{O}$ and precipitation amount in Nanjing area

$\delta^{18}\text{O}$ 与 降雨量	春季	夏季	秋季	冬季	全年
相关系数	-0.528	-0.389	-0.239	0.08	-0.449**

全年中,南京地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量之间呈现负相关关系。在季节尺度上,春、夏、秋季也表现出“降水量效应”的负相关关系,而冬季两者之间则是正相关关系。

综上,南京地区大气降水同位素与温度、降水量的关系在全年尺度下皆是负相关的,只体现“降水量效应”的存在。在季节尺度下,春、夏、秋三季与温度、降水量关系也都是负相关,而冬季表现出与温度、降水量的正相关关系,“温度效应”只在冬季有所体现。

5 水汽来源轨迹模拟

气团轨迹是指大气气团在一定时间内的运动路径,是可以用来分析降水水汽团的来源和输送路径^[33-34]。应用 HYSPLIT 模型分别计算四个季节每天 00:00、06:00、12:00 和 18:00 点到达南京站点的气团轨迹,并进行聚类分析。聚类分析是一种多元统计方法,对大量资料进行分组,原则是达到组间差异极大,组内差异极小,该方法根据气团水平移动速度和方向对大量轨迹进行分组,得出不同的输送轨迹组。本文使用 ArcGIS 软件对聚类分析结果做进一步处理,得出四个季节南京站点的空气后向轨迹,见图5。

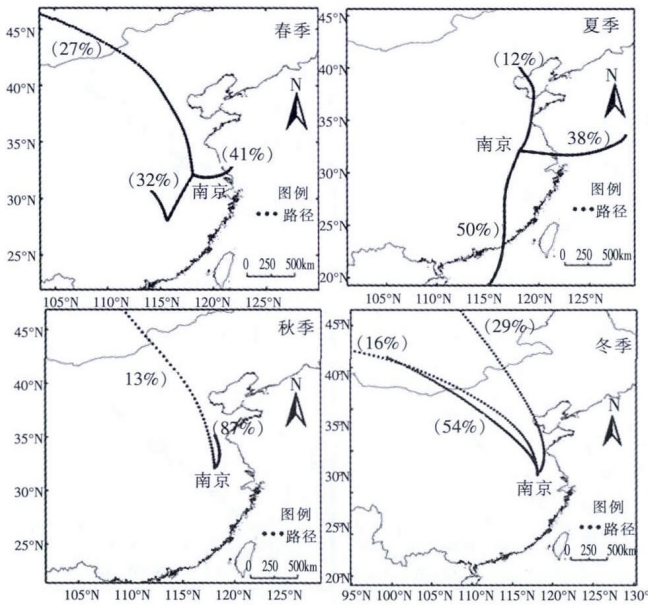


图5 南京站点不同季节空气后向轨迹示意图
(图中百分比为该方向轨迹气团来源所占总数的百分比)
Fig.5 Cluster of backward trajectory from Nanjing during different seasons

一般而言我国的季风演变,2月中旬到4月中旬是冬季风减弱的时期,4月中旬到6月中旬是夏季风出现和加强的时期,6月中旬到8月中旬是夏季风全盛稳定时期,8月中旬到9月中旬是夏季风减弱的时期,9月中旬到12月上旬是冬季风出现加强的时期,12月上旬到2月中旬则是我国大陆冬季风强盛且稳定的时期。

南京春季(4~5月)是冬季风减弱,夏季风未到时期,从图5中可以看到,春季到达南京的水汽由两支近源水汽和一只来自于北方亚洲大陆内部的水汽组成,其中近源水汽比例达到73%,近源局地水汽蒸发所形成降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 常呈现高值,这应该是南京春季降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 最为富集的原因。夏季(6~9月)是我国境内夏季风全盛时期,到达南京的水汽主要来自于低纬度南海方向和西太平洋地区,这与周长艳、何金海、黄荣辉^[35,36]等对夏季东亚上空水汽输送的研究相符,表明热带夏季风、副热带夏季风对我国东部的影响。南京夏季大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的偏负是与远距离海洋水汽输送以及此过程中稳定同位素不断贫化有关。南京秋季(10~11月)则是夏季风南撤,冬季风逐渐加强时期,水汽来源方向为北方地区,水汽轨迹显示也以近源为主,此季节近源水汽应为夏季降水汇集蒸发形成,因夏季降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 较为贫化,所以导致秋季降水 $\delta^{18}\text{O}$ 数值有所偏低,这也许是春秋季节南京降水主要源于近源水汽蒸发而降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 有所差异的原因。冬季(12~3月),该季中我国大陆为冬季风控制,到达南京的水汽皆来自亚洲大陆内部方向,由高纬度西风带输送的大西洋、北冰洋和俄罗斯、蒙古的水汽混合,由于远洋水汽沿途通过降水过程使水汽中的 $\delta^{18}\text{O}$ 不断贫化,又冬季环境温度低、蒸发弱、沿途水汽补充少,使得南京冬季降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 偏低。

综上所述,南京夏、冬季节的降水主要由亚洲夏、冬季风输送来的水汽形成,不同的水汽来源导致大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化;而春、秋季节降水主要由周边地区局地水汽蒸发形成,但由于春、秋季节地表水是冬、夏季降水汇集而成,所以再蒸发形成降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 也有差异。

6 结论

(1)南京大气降水氧同位素组成季节变化明显:春季降水中 ^{18}O 最为富集、夏季降水中 ^{18}O 最为贫化,平均而言,冬半年偏正、夏半年偏负。

(2)拟合的南京大气降水线显示全年降水水汽多

变,夏半年多受海洋水汽影响,而冬半年影响因素较多变;降水水汽盈余也表明夏半年降水水汽源地相对湿度较高,冬半年相对湿度较低。

(3)全年中南京降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度、降水量的关系皆为负相关,呈现“降水量效应”;季节中,春、夏、秋三季也呈现负相关关系,而冬季则是正相关关系,表现“温度效应”。

(4)降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、水汽轨迹及季风活动的综合分析显示:南京地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化主要受到季风活动及其带来降水的影响,这种影响在夏、冬季节尤其显著;而在亚洲夏、冬季风交替时节(春、秋季),虽降水水源以近源蒸发水汽为主,但地表水多是上一季节降水汇集而成,仍为季风带来降水的影响。

参考文献:

- [1] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tell Us, 1964, 16(4):436-468.
- [2] HE Yuanqing, PANG Hongxi, Theakstone W H, et al. Isotopic variations in precipitation at Bangkok and their climatological significance[J]. Hydrol. Process, 2006, 20: 2873-2884.
- [3] Jeanton HC, Confiantini R, Travi Y, et al. Oxygen-18 variations of rainwater during precipitation: application of the rayleigh model to selected rainfalls in southern France[J]. Jour. of Hydrol., 2004, 289: 165-177.
- [4] 姚檀栋, 孙维贞, 蒲健辰, 等. 内陆河流域系统降水的稳定同位素—乌鲁木齐河流域降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度关系的研究[J]. 冰川冻土, 2000, 22(1):15-22. (YAO Tandong, SUN Weizhen, PU Jianchen, et al. Characteristics of stable isotope in precipitation in the inland—A case study of the relation between $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and temperature in Urumqi River, China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(1): 15-22. (in Chinese))
- [5] Dansgaard W. The abundance of $\delta^{18}\text{O}$ in atmospheric water and water vapor[J]. Tell Us, 1953, 5(4):461-469.
- [6] Aragués-Aragués L, Froehlich K, Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103:28721-28742.
- [7] IAEA. Environmental Isotope Data. World survey of isotope concentrations in precipitation[R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, Technical Report Series No. 69, 117, 129, 147, 165, 192, 226, 264, 311, 331, 1969, 1970, 1971, 1973, 1975, 1979, 1983, 1986, 1990, 1992.
- [8] 章申, 于维新, 张青莲, 等. 我国西藏南部珠穆朗玛峰地区冰雪水中氘和重氧的分布[J]. 中国科学A辑, 1973(4):430-433. (ZHANG Shen, YU Weixin, ZHANG Qinglian, et al. The distribution of deuterium and heavy oxygen in snow and ice, in the Jolmo Lungma regions of the southern Tibet[J]. Science in China (SeriesA), 1973, (4): 430-433. (in Chinese))
- [9] 章新平, 姚檀栋. 我国降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布特点[J]. 地理学报,

- 1998,53(7):356–364. (ZHANG Xinping, YAO Tandong. Distributional features of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1998,53(7): 356–364. (in Chinese))
- [10] 宋献方,柳鉴容,孙晓敏,等.基于 CERN 的中国大气降水同位素观测网络[J].地球科学进展,2007,(22): 738–747. (SONG Xianfang, LIU Jianrong, SUN Xiaomin, et al. Establishment of Chinese network of isotopes in precipitation (CHNIP) based on CERN [J]. *Advance in Earth Science*,2007,(22): 738–747. (in Chinese))
- [11] Tian L D, Masson-Delmotte V, Stievenard M, et al. Tibetan Plateau summer monsoon northward extent revealed by measurements of water stable isotopes [J].*Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D22): 28081–28088.
- [12] 章新平, 中尾正义, 藤田耕史, 等. 喜马拉雅山朗塘流域降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化 [J]. 中国科学 D 辑, 2001, 31 (3): 206–213. (ZHANG Xinping, Masayoshi Nakawo, Koji Fujita, et al. Variation of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ in Langtang Valley, Himalayas[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2001, 31(3): 206–213. (in Chinese))
- [13] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 西北地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源 [J]. 地理学报, 2008, 63 (1):12–22.(LIU Jianrong, SONG Xianfang, YUAN Guofu, et al. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over northwest China and its water vapors sources [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(1):12–22. (in Chinese))
- [14] 章新平, 孙维贞, 刘晶淼. 西南水汽通道上昆明站降水中的稳定同位素 [J]. 长江流域资源与环境, 2005,14 (5):665–669. (ZHANG Xinping, SUN Weizhen, LIU Jingmiao. Stable isotopole in precipitation in the vapor transport path in Kunming of southwest China. [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005,14(5): 665–669. (in Chinese))
- [15] 章新平, 刘晶淼, 孙维贞, 等. 中国西南地区降水中氧稳定同位素比率与相关气象要素之间关系的研究 [J]. 中国科学 D 辑 地球科学, 2006,36 (9):850–859. (ZHANG Xinping, LIU Jingmiao, SUN Weizhen, et al. The oxygen isotope ratio in precipitation and relationship with meteorological factors in southwest China [J]. *Science in China(Series D: Earth Sciences)*, 2006,36(9): 850–859. (in Chinese))
- [16] 于津生, 虞福基, 刘德平. 中国东部大气降水氢、氧同位素组成[J]. 地球化学,1987,1:22–26. (YU Jinsheng, YU Fuji, LIU Deping. The oxygen and hydrogen isotopic compositions of meteoric water in the eastern part of China[J]. *Geochimica*,1987,1:22–26. (in Chinese))
- [17] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 中国东部季风区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源[J].科学通报,2009,(54): 3521–3531. (LIU Jianrong, SONG Xianfang, YUAN Guofu, et al. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over eastern monsoon China and the water vapors sources[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 2009,(54): 3521–3531. (in Chinese))
- [18] 地矿部水文地质工程地质研究所,等. 我国大气降水稳定同位素背景值的研究[J]. 勘察科学技术,1989, (6):6–12. (Research Group, Institute Hydro., and Engg-geology. Study on the background value of stable isotopes in precipitations of China [J]. *Site Investigation Science and Technology*, 1989, (6):6–12. (in Chinese))
- [19] 张琳, 陈宗宇, 聂振龙, 等. 我国不同时间尺度的大气降水同位素与气温的相关性分析[J]. 核技术, 2008,9 (31):715–720. (ZHANG Lin, CHEN Zongyu, NIE Zhenlong, et al. Correlation between $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and surface air temperature on different time-scale in China[J]. *Nuclear Techniques*, 2008,31 (9):715–720. (in Chinese))
- [20] 周淑珍. 气象学与气候学 [M]. 北京: 高等教育出版社,2005:179. (ZHOU Shuzhen. *Meteorology and Climatology*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005:179. (in Chinese))
- [21] 任美铎. 中国自然地理纲要 [M]. 北京: 商务印书馆, 1982:47–56. (REN Meie. *Outline of Physical Geography in China* [M]. Beijing: Commerical Press, 1982:47–56. (in Chinese))
- [22] 卫克勤, 林瑞芬. 论季风气候对我国雨水同位素组成的影响[J]. 地球化学,1994,23(1):33–40. (WEI Keqin, LIN Ruifen. Influence of the monsoon on the isotope of precipitation in China[J]. *Geochimica*, 1994, 23 (1):33–41. (in Chinese))
- [24] 庞洪喜, 何元庆, 张忠林. 重要海-气-天文事件与新德里季风季水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系[J]. 冰川冻土, 2004, 26: 42–47. (PANG Hongxi, HE Yuanqing, ZHANG Zhonglin. Correlation between $\delta^{18}\text{O}$ in the monsoonal precipitation and some astronomy-atmosphere-ocean events[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*,2004, 26: 42–47. (in Chinese))
- [25] 张静, 吕军, 项瑛, 等. 江苏省四季变化的分析 [J]. 气象科学, 2008,28(5):568–572. (ZHANG Jing, LU Jun, XIANG Ying, et al. The analysis of Jiangsu province's four seasons [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2008,28(5):568–572. (in Chinese))
- [26] 缪启龙, 王勇. 中国四季的划分及其变化特征分析 [A]. 中国气象学会 2007 年年会气候变化分会场论文集 [C].(MIAO Qilong, WANG Yong. Four seasons classification and change characteristics in China [A]. *Proceedings of 2007 Annual Conference of China Meteorological Society*[C].(in Chinese))
- [27] IAEA/WMO. Global network for isotopes in precipitation (EB/OL). <http://isohis.iaea.org>.
- [28] 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 [J]. 科学通报,1983,(13): 801–806. (ZHENG Shuhui, HOU Fagao, NI Baoling. The studies of hydrogen and oxygen stable isotopes in atmospheric precipitation in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1983,(13): 801–806. (in Chinese))
- [29] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, (133):1702–1703.
- [30] 章新平, 姚檀栋. 青藏高原东北地区现代降水中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系[J]. 冰川冻土, 1996,18(4):360–365. (ZHANG Xinping, YAO Tandong. Relations between δD and $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation at present in the northeast Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*. 1996,18(4):360–365. (in Chinese))
- [31] Merlivat L, Jouzel J. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen-18 relationship for precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1979,84(C8):5029–5033.
- [32] Jouzel J, Merilvat L. Deuterium and oxygen-18 in precipitation: modeling of the isotope effects during snow formation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984,89(D7):11749–11757.

- [33] Brimelow C J, Reuter W G. Transport of atmospheric moisture during three extreme rainfall events over the Mackenzie River Basin[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2005, 6(4):423–440.
- [34] 马京津,于波,高晓清,等.大尺度环流变化对华北地区夏季水汽输送的影响[J]. *高原气象*, 2008, 27(3): 517–523. (MA Jingjin, YU Bo, GAO Xiaoqing, et al. Change of large scale circulation and its impact on the water vapor over north China[J]. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(3): 517–523. (in Chinese))
- [35] 周长艳, 何金海, 李薇, 等. 夏季东亚地区水汽输送的气候特征[J]. *南京气象学院学报*, 2005, 28 (1): 18–27. (ZHOU Changyan, HE Jinhai, LI Wei, et al. Climatological characteristics of water vapor transfer over east Asia in summer[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2005, 28(1): 18–27. (in Chinese))
- [36] 黄荣辉, 陈际龙. 我国东、西部夏季水汽输送特征及其差异[J]. *大气科学*, 2010, 34(6):1035–1045. (HUANG Ronghui, CHEN Jilong. Characteristics of the summertime water vapor transports over the eastern part of China and those over the western part of China and their difference [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, 34(6):1035–1045. (in Chinese))

Variations of Stable Isotopes in Precipitation and Water Vapor Sources in Nanjing Area

WANG Tao¹, ZHANG Jieru², LIU Xiao¹, YAO Long³

(1. *Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;*

2. *Yangzhou Meteorological Bureau, Yangzhou 225000, China;* 3. *Unit 61, No. 94783 of PLA, Changxing 31311, China)*

Abstract: This study can help know water vapor transports and moisture cycle of Nanjing area. Based on the data of the hydrogen and oxygen stable isotopes in precipitation in Nanjing provide by the Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP) and the meteorological statistics, the temporal variations of stable isotopes in precipitation and their influencing factors were analyzed and the Local Meteoric Water Line (LMWL) was established. The results were as follows: $\delta^{18}\text{O}$ value was high in spring and low in summer. As to the annual scale, the relationship between $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and temperature was not positive correlated, $\delta^{18}\text{O}$ was negative related to precipitation amount. To the seasonal scale, positive correlation was found for temperature and precipitation amount only in winter. The water vapor source of Nanjing was tracked by HYSPLIT model, the modeled trajectory of vapor source indicated that the variation of stable isotopes was influenced by Asian summer, winter monsoon and its vapor.

Key words: $\delta^{18}\text{O}$; Nanjing area; meteoric water line; water vapor trajectory

(上接第 15 页)

Research and Application of Double-layer Snowmelt Runoff Model Based on Grid Scale

MENG Xianying^{1,2}, QIAO Peng³, LIU Zhihui^{2,4,5}, CHEN Kai⁶

(1. *School of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;*

2. *Key Laboratory of Oasis Ecology Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;*

3. *Water Management Center for Turpan Region, Turpan 838000, China;*

4. *Institute of Arid Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;*

5. *International Center for Desert Affairs—Research on Sustainable Development in Arid and Semi-arid Lands, Urumqi 830046, China;*

6. *Jiangxia District Urban Planning Design and Research Institute, Wuhan 430012, China)*

Abstract: The Juntanghu River Basin in the north Tianshan Mountain was chosen as the study area. A double-layer distributed snowmelt runoff model based on the principle of energy balance and mass balance was developed through digital elevation model (DEM) of the study area watershed information extraction and the world soil database and the national land-use data sets for watershed soil and land cover types of data. The analysis show that the measured and simulated runoff hydrograph in 2009 and 2010 fit the high QR passing rate of 87% and 90.85%. In addition, the combination of snow water equivalent changes in the value of MODIS data is verified to demonstrate the reliability of the model. The model is very useful and will provide a good example for snowmelt flood warning.

Key words: double-layer distributed; snowmelt model; energy balance; water balance; WRF