

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.04.003

长江干流径流同位素同步监测

陆宝宏¹ 孙婷婷¹ 许宝华² 马全涛¹ 王 维¹ 汪集^{1 3}

(1.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室 江苏 南京 210098 ;
2.长江口水文水资源勘测局 上海 200136 ; 3.中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

摘要 : 基于 2003 年 1 月长江干流径流同位素同步监测资料 , 分析了径流同位素与大气降水同位素¹⁸O 和 D 相对丰度之间的关系 , 探讨了¹⁸O 相对丰度和氡盈余(E_d)的空间变化规律 . 分析结果表明 : 长江干流径流同位素时程变化主要受降水同位素季节变化的影响 , 区域降水同位素场是长江干流径流同位素¹⁸O 和 D 相对丰度空间变化的主要影响因素 ; 长江流域湖泊或水库蒸发效应是导致长江干流径流重同位素沿程富集的主要因素之一 ; 监测期间长江流域上中游蒸发较为强烈 , 中游区蒸发最强烈 , 下游区蒸发变化剧烈 .

关键词 : 径流同位素 ; 同步监测 ; 蒸发效应 ; 氡盈余 ; 长江流域

中图分类号 : P343 文献标识码 : A 文章编号 : 1000-1980(2009)04-0378-04

随着科学技术的进步和同位素测试水平的提高 , 同位素技术在地球科学领域的应用越来越广泛^[1-2] . 目前 , 同位素技术已广泛应用于地下水流动路径识别^[3] , 地下水补给源及其汇入河流的历史过程示踪监测^[3] , 水在流域中的平均停留时间或水的年龄确定^[4] , 地表水和地下水相互交换更新速度确定^[5] , 蒸散发和流域水文过程线划分^[6-8] , 无资料地区河川径流估计^[9] , 全球气候变化以及土地利用变化条件下的流域水文循环和水量平衡监测和研究^[10-12] 等方面 , 但大部分应用集中在地下水和小尺度的流域水循环方面 , 而在地表水中的应用尚不多见 .

国际原子能机构(IAEA)和世界气象组织(WMO)于 2002 年启动了“ 全球大江大河同位素监测网络设计准则 ”研究项目 . 为了研究长江干流河川径流同位素长期监测的站点设置问题 , 笔者于 2003 年 1 月下旬进行了长江干流径流同步取样并分析测试了水样中的同位素 . 本文基于该同步监测资料 , 分析了径流同位素与大气降水同位素相对丰度之间的关系以及¹⁸O 相对丰度和氡盈余(E_d)的空间变化规律 .

1 水样采集和测试

取样断面布置 , 除武汉、南京和上海 3 个城市各布置 2 个断面外 , 其他城市各布置 1 个断面 , 如图 1 所示 .

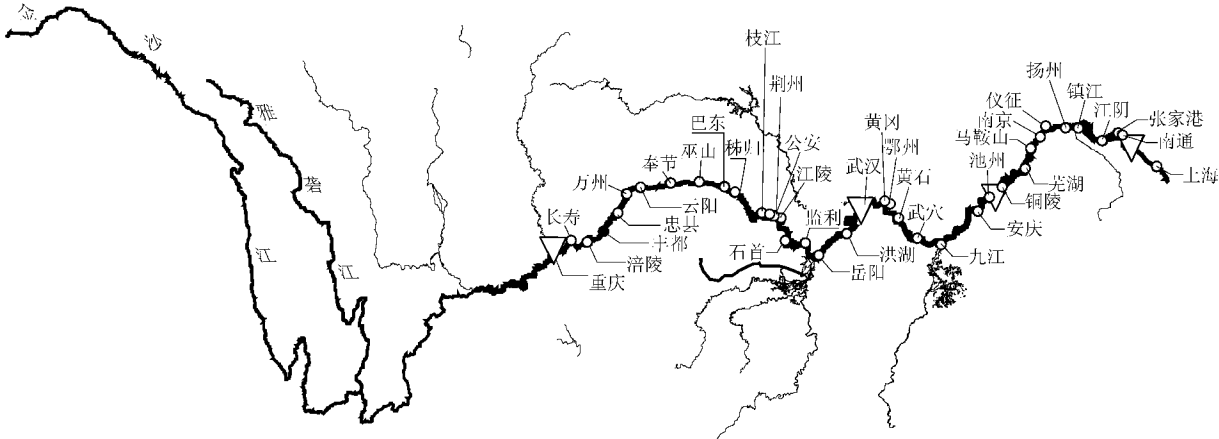


图 1 长江干流径流同步取样断面布置

Fig. 1 Sample sites of synchronous monitoring of main stem of Yangtze River

取样点布置在距左岸或右岸相对河宽 0.3 和相对水深 0.1 处. 取样要求 :用原水冲洗样品瓶 3 次后 ,迅速装满水样并密封 ,同时标明取样点位置、水温、气温、河宽、流速、流向、水位 (水深)及流量. 三峡库区内各断面的同步取样于 2003 年 1 月 13 日完成 ,库区以下各断面的同步取样于 2003 年 1 月 23 日完成.

同位素同步监测共采集 74 个水样. 其中 :三峡库区 11 个断面(重庆到秭归段)共采集 44 个水样 ;大坝以下 30 个断面(枝江到上海)共采集 30 个水样.

水样测试在加拿大滑铁卢大学的同位素实验室完成. 测试仪器型号为 MAT252, 测试以维也纳标准平均海洋水(VSMOW)作为标准品, 仪器测试精度 $\delta(^{18}\text{O})$ 为 $\pm 0.01\%$, $\delta(\text{D})$ 为 $\pm 0.08\%$. 其中 $\delta(^{18}\text{O})$ 和 $\delta(\text{D})$ 分别为 ^{18}O 和 D 的相对丰度.

2 同位素实验室测试结果检验

根据质量守恒原理, 2 种水体混合后的水同位素值一定介于 2 种水体的最大值与最小值之间. 例如, 螺山的流量等于同一时刻监利和洞庭湖流量之和, 即

$$Q_L = Q_J + Q_T$$

(1)

式中 Q_L, Q_J, Q_T 分别为螺山、监利和洞庭湖汇入干流的流量. 相应的质量平衡方程可近似地表示为

$$\delta_L Q_L = \delta_J Q_J + \delta_T Q_T$$

(2)

式中 $\delta_L, \delta_J, \delta_T$ 分别为螺山、监利和洞庭湖 3 个断面的同位素相对丰度. 将式(1)代入式(2)得

$$\delta_L = (\delta_J Q_J + \delta_T Q_T) / Q_L$$

(3)

如果不考虑螺山与武汉断面之间的支流汇入, 螺山的流量和同位素相对丰度可近似地用武汉断面的值来代替. 则由式(3)可计算出螺山同位素的相对丰度. 将计算得到的同位素相对丰度与实验室测试的同位素相对丰度进行对比, 就可以检验实验室测试结果的正确性. 已知同步取样时的 $Q_J = 4\,810\text{ m}^3/\text{s}$, $Q_L = 10\,400\text{ m}^3/\text{s}$, $Q_T = Q_L - Q_J = 5\,590\text{ m}^3/\text{s}$, $\delta_T = \delta_Y$ (δ_Y 为岳阳断面的同位素相对丰度) = -0.555% , $\delta_J = -1.014\%$,由式(3)得 $\delta_L = -0.767\%$,考虑仪器测试误差及洞庭湖口至武汉的沿程蒸发引起的河川径流重同位素富集, 计算值 δ_L 与武汉断面的水样实验室测试结果 -0.753% 非常接近, 说明实验室同位素测试结果可靠.

3 同位素监测结果分析

河川径流由融雪、地表径流和地下径流组成. 同一个地点, 上述 3 种径流的同位素组成不同, 且不同季节 3 种径流在河川径流中的比重是不同的, 因而河川径流同位素会有时程变化. 支流汇入干流后, 干流径流同位素会发生变化. 这种变化反映了降水同位素场对干流径流同位素的影响, 而大型湖泊水体汇入干流后会导致干流径流同位素相对丰度发生变化. 这种变化反映了同位素的蒸发效应. 从测试结果来看, 长江干流的同位素组成主要依赖于降水同位素场, 同时蒸发效应也是径流同位素相对丰度变化的主要因素之一.

3.1 径流同位素与大气降水同位素的关系

从国际原子能机构全球大气降水同位素数据库(GNIP)可知, 在 $90^{\circ}33' \sim 122^{\circ}25' \text{ E}$ 和 $24^{\circ}30' \sim 35^{\circ}45' \text{ N}$ 范围内有 11 个监测站, 其中有 9 个监测站位于长江流域. 为了探讨长江流域径流和降水同位素组成之间的关系, 利用这 9 个监测站 589 对 ($\delta(^{18}\text{O})$ 和 $\delta(\text{D})$) 数据求出了长江流域大气降水的 $\delta(\text{D})$ 和 $\delta(^{18}\text{O})$ 关系线(LMWL). 依据实测径流 $\delta(\text{D})$ 和 $\delta(^{18}\text{O})$ (图 2 中 test 点据) 求出了长江干流径流的 $\delta(\text{D})$ 和 $\delta(^{18}\text{O})$ 关系线(LEL). 全球大气降水的 $\delta(\text{D})$ 和 $\delta(^{18}\text{O})$ 关系线(GMWL)和 LEL 如图 2 所示.

从图 2 可知, GMWL, LMWL 和 LEL 非常接近. 经计算, LMWL 的斜率和截距分别为 7.62 和 0.839% ,LEL 的斜率和截距分别为 7.64 和 0.693% ,非常接近于 GMWL 的斜率(8.0)和截距(1.0%). 2 条大气降水线斜率和截距十分接近的主要原因是 :长江流域面积大, 流经长, 跨越中国的三级阶梯和不同的气候带, 形成降水的水汽既有来自印度洋的, 又有来自太平洋的. 径流组成中既有融雪又有地表径流和地下径流. LEL 的斜率接近于 GMWL

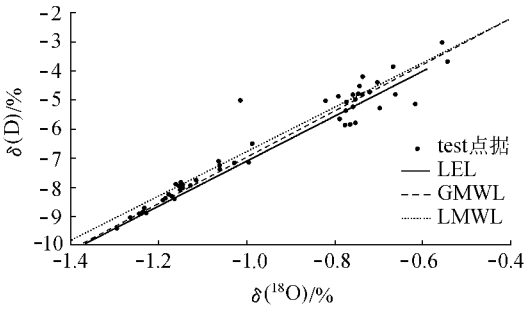


图 2 $\delta(^{18}\text{O})$ 与 $\delta(\text{D})$ 的关系

Fig. 2 Relationship between $\delta(^{18}\text{O})$ and $\delta(\text{D})$

和 LMWL 的斜率,表明长江流域径流同位素组成变化主要受降水同位素场的影响,LEL 与 LMWL 的差别主要体现在截距——氘盈余 (E_d) 上,是由于蒸发所致。

3.2 $\delta(^{18}\text{O})$ 的空间变化

为了进一步探讨径流同位素的空间变化规律,绘制了长江干流径流 $\delta(^{18}\text{O})$ 与河源距离 d 之间的关系曲线,如图 3 所示。从图 3 可以看出,长江干流径流 $\delta(^{18}\text{O})$ 从河源到河口呈逐渐增大趋势,这主要由降水同位素的大陆效应和高程效应所致。此外,枯季大气降水减少,重同位素相对富集的地下水沿程补给河川径流,且在河川径流中的比重逐渐增加,也是导致长江干流径流 $\delta(^{18}\text{O})$ 沿程逐渐增大的原因之一。图 3 中 $\delta(^{18}\text{O})$ 出现 3 个峰值,对应的取样断面不是在湖泊或水库,就是在取样断面的上游大型湖泊或水库水体汇入之处。第 1 个峰值处的水样取自洞庭湖,第 2 个峰值是由于鄱阳湖水体和长江干流水体混合导致的,第 3 个峰值位于镇江断面,其水样取自长江干流和淮河流域的洪泽湖水体的混合区。由此可见,受蒸发影响,湖泊或水库水体重同位素相对富集,经调节汇入干流后致使干流水体的重同位素相对丰度增大,没有经过湖泊或水库调节的水体,其同位素相对丰度虽然会随距离而变,但变化不大。这种湖泊或水库蒸发效应导致重同位素富集的情形在干流其他地方也会出现。例如,枝江断面的同位素相对丰度比秭归断面大得多,就是由于枝江上游的葛洲坝水库蒸发引起了径流中的重同位素富集。

3.3 氘盈余

河流中的同位素信息可以分成 2 类 (a) 同位素比率 R 或 $\delta(\text{D})$, $\delta(^{18}\text{O})$ (b) 氘盈余 $E_d^{[10]}$,

$$E_d = \delta(\text{D}) - 8\delta(^{18}\text{O}) \tag{4}$$

它综合了 $\delta(^{18}\text{O})$ 和 $\delta(\text{D})$ 二者的信息。

$\delta(^{18}\text{O})$, $\delta(\text{D})$ 和 E_d 是研究水文循环的一套非常有效的参数。 E_d 可以很好地说明水汽团的行进路径及蒸发环境的复杂性,目前它已经被直接用来研究区域蒸发。鉴于三峡库区断面有 4 个取样点,本文采用 $\delta(\text{D})$, $\delta(^{18}\text{O})$ 的断面平均值计算了 E_d , 其沿程变化如图 4 所示。

从图 4 可以看出,从重庆到河口, E_d 在 1.0% 上下波动,长江干流上中游的 E_d 大于或非常接近于全球大气降水线的 E_d (1.0%)。从 E_d 的沿程变化情况来看,长江干流上中游区同期蒸发较为强烈,中游区是长江干流同期蒸发最强烈的地区。主要原因:一是中游区湖泊和水库多,水面蒸发大;二是该地区农业种植以水稻为主,经蒸发的稻田水以地下水的形式补给长江干流的枯季径流。同时可以发现,长江干流下游区 E_d 变化较为剧烈,最大值 (1.364%) 出现在池州,最小值 (小于 0) 出现在镇江右,从芜湖到镇江的 E_d 几乎随河源距离呈直线下降。从地理学角度来看,池州及其上游的安庆都属于同一气候区域,在地形上没有明显区别,两者应有相近的 E_d ,但前者的 E_d 为 1.364%,后者却为 0.658%,主要原因是该区域受到东中国海半日潮的影响。此外,镇江断面的 $E_d < 0$,水样取自洪泽湖与干流水体的混合处,是否存在 D 漂移问题,目前尚不能确切解释。当然, E_d 还受取样时的温度、湿度及水流条件等因素的影响,仅靠一次干流径流同步监测的同位素数据不足以解释上述差别,尚需进一步求证其原因。

4 结 论

河川径流中包含了大量的有关水文循环的信息,长江干流首次 (2003 年 1 月) 同位素监测为以后径流同位素的季节和年际变化的长期连续监测打下了基础,也为应用同位素技术分析研究流域水文气候问题提供

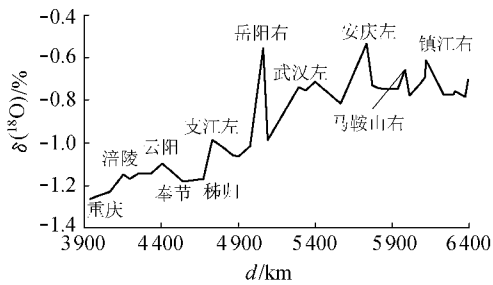


图 3 长江干流径流 $\delta(^{18}\text{O})$ 与河源距离 d 的关系曲线
Fig. 3 Relationship between $\delta(^{18}\text{O})$ of runoff of main stem of Yangtze River and distance to river source d

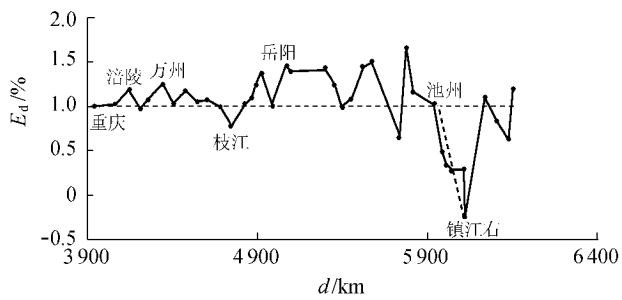


图 4 长江干流 E_d 沿程变化曲线
Fig. 4 Variation of E_d along main stem of Yangtze River

了资料,分析长江干流首次同位素监测资料,可以得出如下结论:

a. 长江干流径流同位素($\alpha^{18}\text{O}$)或(αD)的变化主要受区域降水同位素场的影响;长江干流径流同位素时程变化主要受区域降水同位素季节变化的影响.蒸发效应导致湖泊或水库径流重同位素富集,经湖泊或水库调节汇入干流后引起干流径流重同位素相对丰度沿程增大,重同位素突变点常发生在大型水库或湖泊汇入干流的下游处.枯季(2003年1月)长江流域上中游蒸发较为强烈,中游区最强烈,下游区蒸发变化剧烈.

b. 河流中的同位素信息有助于解释大流域内与气候变化和人类相关的水文过程和水文循环,径流同位素相对丰度还可以为无资料地区提供径流第1次近似估计.

参考文献:

- [1] 谭忠成,陆宝宏,汪集,等.同位素水文学研究综述[J].河海大学学报:自然科学版,2009,37(1):16-22.
- [2] 汪集.同位素水文学与水资源、水环境[J].地球科学:中国地质大学学报,2002,27(5):532-533.
- [3] 包为民,胡海英,瞿思敏,等.稳定同位素方法在湖泊水量平衡研究中的应用[J].人民黄河,2007(8):29-30.
- [4] 庞忠和.同位素水文领域的国际科研合作与发展援助[J].水文地质工程地质,2004(2):114-116.
- [5] WELKER J M. Isotopic ($\delta^{18}\text{O}$) characteristics of weekly precipitation collected across the USA: an initial analysis with application to water source studies[J]. Hydrological Processes, 2000, 14: 1449-1464.
- [6] GIBSON J J, EDWARD T W D. Regional water balance trends and evaporation-transpiration partitioning from a stable isotope survey of lakes in northern Canada[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2002, 16(2): 1001-1014.
- [7] 高正夏,徐军海,王建平,等.同位素技术测试地下水流速流向的原理及应用[J].河海大学学报:自然科学版,2003,31(6):655-658.
- [8] 童海滨,陈建生.湖泊水体年龄与水体中放射性同位素浓度关系浅析[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(6):647-650.
- [9] SKLASH M G. A conceptual model of watershed response to rainfall, developed through the use of oxygen-18 as a natural tracer[J]. Journal of Earth Science, 1976, 13: 271-283.
- [10] GIBSON J J. Forest-tundra water balance singles traced by isotopic enrichment in lake[J]. Journal of Hydrology, 2001, 251: 1-13.
- [11] LU Bao-hong. Temporal and spatial variations of $\delta^{18}\text{O}$ along the main stem of Yangtze River, China[M]//YANG Da-wen, TIAN Fu-qiang, TANG Liu-hua et al. Hydrological research in China: process studies modelling approaches and applications. Oxford: IAHS, 2008: 199-204.
- [12] CRAIG H. Isotope variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133: 1702-1703.

Isotopic synchronous monitoring of runoff of main stem of Yangtze River

LU Bao-hong¹, SUN Ting-ting¹, XU Bao-hua², MA Quan-tao¹, WANG Wei¹, WANG Ji-yang^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Hydrology and Water Resources Investigation Bureau of Yangtze Estuary, Shanghai 200136, China;

3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Based on isotopic synchronous monitoring data of runoff of the main stem of Yangtze River in January of 2003, the relationship between the ^{18}O of runoff and atmospheric precipitation isotope and D was analyzed. The spatial variation of ^{18}O and excess deuterium (E_d) are discussed. The analytic results show the following: the temporal and spatial variation of the runoff isotopes of the main stem of the Yangtze River are mainly affected by seasonal precipitation isotopes; the main factors in the spatial variation of ^{18}O and D are the isotopic fields of regional precipitation; the evaporation effect of lakes and reservoirs in the Yangtze River basin is one of the main factors in its isotopic influx; and, during the monitoring period, the evaporation in the upper and middle reaches of the Yangtze River was high, especially in the middle reaches, and the variation of the evaporation in the lower reaches was large.

Key words: runoff isotope; synchronous monitoring; evaporation effect; deuterium excess; Yangtze River basin