

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.06.007

利用同位素质量守恒原理估算太湖河网受水量

陆宝宏^{1 2}, 孙营营^{1 2}, 马乐军¹, 许宝华³, 王 维¹, 汪集 2⁴

(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. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 长江口水文水资源勘测局, 上海 200136; 4. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要 : 为配合太湖流域管理局开展的“太浦河调水改善下游及黄浦江水质试验”研究, 利用水量平衡与同位素质量守恒原理构建了河网地区水量分配模型, 以解决太湖通过太浦河泄水时河网区(两省一市) 的受水量或受水比例问题. 模型计算结果表明, 利用落潮时的同位素丰度计算的两省一市的受水比例与实际监测成果较为接近. 在优化站点、取样频次和取样时间后, 该模型具有快捷、简便和经济的特点, 可以用来近似估算河网区不同地点的受水量, 但其精度有待进一步检验.

关键词 : 稳定同位素 ; 同位素质量守恒 ; 河网受水量 ; 太浦河

中图分类号 : P641.3 ; TV214 文献标识码 : A 文章编号 : 1000-1980(2009)06-0645-05

同位素水文学是 20 世纪 50 年代发展起来的一门学科. 同位素水文学利用水体中已存在的天然环境同位素²H(D), ³H(T), ¹⁸O, ¹³C, ¹⁴C, ³⁴S, ³⁶Cl 以及人工示踪同位素¹²⁹I 等来研究水循环或水流运动的基本规律^[1-2]. 水文学中普遍应用的环境同位素有¹⁸O 和²H 及放射性同位素³H 和¹⁴C 等. 目前, 环境同位素示踪是水循环研究中被广泛应用的一种先进技术, 它主要利用同位素水文技术解决普通水文学难以解决的一些问题.

氢(H)和氧(O)是水分子的组成部分, 不同类型或不同区域的天然水体, 其化学成分变化很大, 但其环境同位素²H 和¹⁸O 组成却相对稳定^[3]. 因此, ¹⁸O 和²H 是研究水循环理想的示踪剂之一. 环境同位素¹⁸O 和²H 已被广泛应用于研究全球或流域气候及下垫面变化对水循环的影响, 研究流域降水与河川(湖泊) 径流的变化规律及地表与地下水的相互转换关系, 确定流域水的补给来源、特性、年龄及其组成, 识别不同地貌单元径流对河川径流的贡献, 还应用于研究降雨/雪、融冰、溃坝、湖泊、喀斯特、高程、干旱、蒸发、融雪以及支流等对流域水文过程的综合影响等^[4-8]. 随着多种环境同位素综合研究技术水平的提高及应用同位素水文技术实践经验的积累, 应用同位素水文技术研究流域水问题已从定性逐步走向定量, 解决了一些常规水文学方法不能解决的问题, 并逐步得到水文学界的认同.

河川径流由大气降水/雪、地表径流(含融雪径流) 及地下水组成. 不同地区的降水, 其同位素丰度会存在差异. 大气降水在流域滞留的时间愈长, 由于同位素的平衡和动力分馏作用, 轻同位素组成的水分子首先离开水体而进入大气, 致使水体中的重同位素¹⁸O 和²H 相对愈富集. 由于不同地区、时间的河流或湖泊水体中的¹⁸O 和²H 的成分不一样, 因此可根据同位素质量守恒及水量平衡原理推求河川径流量. 为此, 本文尝试利用同位素质量守恒原理估算太湖通过太浦河泄水时两省(江、浙) 一市(上海) 的受水量.

1 研究区概况

太湖流域是河网密布、水系复杂、外受潮水影响和洪涝频发的典型平原河网地区. 由于流域人口密度高, 人类活动强度大, 加之坡度小, 水体流动速度慢, 致使流域水污染等问题日益突出, 生态环境遭受破坏, 直接影响流域水资源的开发利用前景及区域经济社会的可持续发展. 为解决日益严重的水污染问题, 改善太湖水环境, 缩短太湖换水周期, 2001 年 12 月启动了“引江济太”工程, 通过望虞河将长江水引入太湖, 以实现“静态河网、动态水体、科学调度、合理配置”的战略目标. 2002 年以来“引江济太”的调水实践证明: “引江济太”对太湖、流域河网及黄浦江水体水质改善效果明显^[9-11]. 通过太浦河增加黄浦江上游供水量, 以改善太浦河

收稿日期 : 2008-10-10
基金项目 : 国家自然科学基金(50379008, 50979023); 国际原子能机构全球合作项目 CPR(12593)
作者简介 : 陆宝宏(1962 —) 男, 安徽天长人, 副教授, 硕士, 主要从事水文水资源研究.

下游及黄浦江水体水质,应对水体污染突发事件,保障流域下游江苏、浙江和上海部分地区的供水安全,是行之有效的方法和途径之一。

由于流域河网密布,水文站网稀疏,加上受潮水影响及基本资料和技术条件等限制,传统的水文学或水力学方法有难以克服的缺陷,很难确切掌握“引江济太”时的受水(影响)区域以及各河网的受水流量,很难正确计算太湖流域的换水频率以及“引江济太”以后的换水周期。由于不能定量评估“引江济太”的效果,直接影响到“引江济太”工程的进一步实施。随着“引江济太”由调水试验走向常年调水,正确计算“引江济太”的受水区域、换水周期及各河网受水量将是科学评估“引江济太”效益的关键。

2 同位素取样及实验室测试

为配合太湖流域管理局2006年3月22日至4月7日组织开展的“太浦河调水改善下游及黄浦江水质试验”研究,定量计算调水试验期间两省一市的受水量,根据控制进出太浦河水量的原则,在太浦河干流及其河网地区共布置了23个取样断面。其中:太浦河干流4个断面,分别为庙港大桥、平望大桥、汾湖大桥和练塘大桥;京杭大运河出、入太浦河干流各布置1个断面,在其他主要支流及河网也布置了相应的监测断面(图1)。

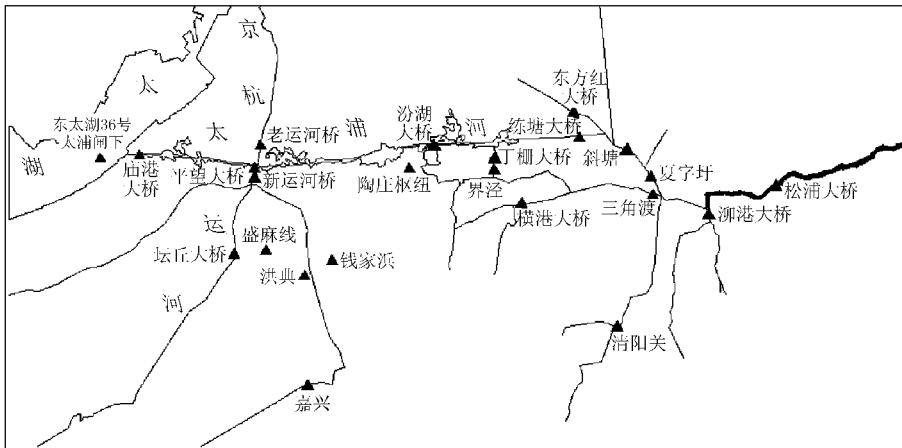


图1 同位素采样点(三角)布置

Fig. 1 Layout of isotopic water sampling sites(triangle)

为保证所取水样能够代表断面水样,采用船舶在水面下相对水深0.1、相对河宽0.3处取样,装样前用原水冲洗样品瓶3次,迅速将样品瓶装满不留任何空气,密封,注明取样地点、时间、河宽、水深、水温、空气温度及取样人姓名,主要断面取样频次及时间见表1。

表1 主要断面同位素监测采样频次及时间

Table 1 Frequencies and times of isotopic water sampling for main sections

断 面	采样频次/ (个·d ⁻¹)	采样时间	采样数量	断 面	采样频次/ (个·d ⁻¹)	采样时间	采样数量
庙港大桥	2	8 00 17 00	1 1	斜塘(五库以下交汇处)	3	涨憩 落憩	1 2
平望大桥	3	涨潮 2h 时 落潮 2h 时	1 2	乌 镇	2	涨潮 2h 时 落潮 2h 时	1 1
汾湖大桥	3	涨潮 2h 时 落潮 2h 时	1 2	嘉 兴	2	涨潮 2h 时 落潮 2h 时	1 1
练塘大桥	3	涨潮 2h 时 落潮 2h 时	1 2	坛丘大桥	2	涨潮 2h 时 落潮 2h 时	1 1
东方红大桥	3	涨潮 2h 时 落潮 2h 时	1 2	盛 麻 线	2	涨潮 2h 时 落潮 2h 时	1 1
三 角 渡	3	涨潮 2h 时 落潮 2h 时	1 2	钱 家 浜	2	涨潮 2h 时 落潮 2h 时	1 1
柳港(上游)	3	涨潮 2h 时 落潮 2h 时	1 2	界 泾	2	涨潮 2h 时 落潮 2h 时	1 1
松浦大桥	4	涨潮 2h 时 落潮 2h 时	2 2	其他断面	2	涨潮 2h 时 落潮 2h 时	1 1

由于研究的是太湖通过太浦河泄水时两省一市的受水量,因此选择 238 个落潮时河水样进行稳定同位素测试分析.水样分别在中国科学院地质与地球物理研究所稳定同位素实验室和河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室同位素实验室分析测试,质谱仪型号为 MAT253, $\delta(^2\text{H})$ 和 $\delta(^{18}\text{O})$ 的测试精度分别为 $\pm 0.08\%$ 和 $\pm 0.01\%$.

3 模型建立

由于沿调水试验路线(从太浦河上游太浦闸至黄浦江上游松浦大桥)口门众多,河网调蓄能力强,且受天文潮汛的影响,因此在计算两省一市的受水量或受水比例时按省进行概化(图 2),依据水量平衡和同位素质量守恒原理,采用分段计算的方法,具体计算过程如下:

通过太浦河输水期间的同位素连续取样,分别建立环境同位素 ^2H 、 ^{18}O 与时间的关系,根据各河段水量平衡以及同位素质量守恒原理建立模型,根据太浦闸泄水流量,可连续求解出太浦河干流的水量沿程分配,计算公式为

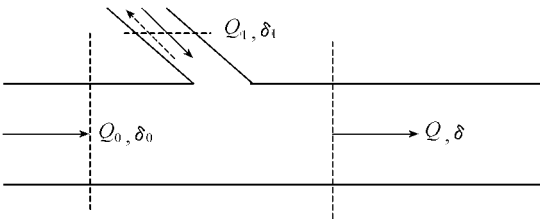


图 2 干流河段水量和同位素质量平衡关系模型
Fig. 2 Isotopic mass conservation and water balance model for each reach along main stem of Taihu River

$$\begin{cases} Q_0 + Q_1 = Q \\ \delta_0 Q_0 + \delta_1 Q_1 = \delta Q \end{cases}$$

(1)

(2)

式中: Q_0 、 δ_0 ——上断面入流流量和同位素 ^2H 或 ^{18}O 的丰度(取样测得); Q_1 、 δ_1 ——口门流入(+)或流出(-)研究断面的流量(河网受水量)和流入(+)或流出(-)水体的同位素 ^2H 或 ^{18}O 的丰度(取样测得); Q ——下断面出流流量; δ ——出流断面的 ^2H 或 ^{18}O 同位素丰度(取样测得).

4 计算结果讨论

在具体计算过程中,将太浦河干流分成太浦闸至平望大桥、平望大桥至汾湖、汾湖至练塘 3 个子河段,根据建立的模型,从太浦闸断面(庙港大桥)开始,计算下断面和概化出口断面的逐日平均流量,依据计算的逐日下断面流量,连续递推至松浦大桥,进而计算各个河段口门流入或流出的水量,表 2 列举了庙港大桥至平望大桥段计算结果.

表 2 庙港大桥至平望大桥河段计算结果
Table 2 Calculated results of Miaogang-Pingwang reach

调度方式	时间	庙港大桥日平均流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$\delta(^{18}\text{O})/\%$			新运河桥计算流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
			庙港大桥	坛丘大桥	平望大桥	
闸供期	03-22	49	-0.394 7	-0.465 1	-0.358 8	17
	03-23	63	-0.462 4	-0.444 4	-0.347 0	74
	03-24	104	-0.432 5	-0.426 3	-0.396 3	125
	03-25	134	-0.402 6	-0.457 5	-0.352 2	64
	03-26	222	-0.407 8	-0.460 6	-0.350 9	115
	03-27	292	-0.412 9	-0.445 2	-0.360 9	180
	03-28	308	-0.402 1	-0.427 7	-0.369 8	172
泵供期	03-29	170	-0.396 6	-0.428 6	-0.348 2	103
	03-30	282	-0.416 2	-0.429 4	-0.344 6	205
	03-31	265	-0.402 6	-0.430 2	-0.344 1	165
	04-01	276	-0.389 0	-0.427 4	-0.342 7	151
	04-02	347	-0.395 5	-0.424 6	-0.355 4	201
	04-03	277	-0.402 0	-0.421 8	-0.368 1	175
	04-04	252	-0.400 6	-0.419 0	-0.355 7	178

在表 2 中,坛丘大桥断面为平望新运河的口门断面(Q_1 、 δ_1),庙港大桥为上断面(Q_0 、 δ_0),平望大桥为下断面(Q 、 δ),其中 Q_0 和 δ_1 、 δ 及 δ_0 已知, Q_1 和 Q 待求,求出 Q_1 和 Q 后,就可连续递推.对于个别断面同位素取样存在少量缺测问题,考虑到调水试验期间水文气象条件没有明显的变化,因此采用前后 2 日均值替代.例如:庙港大桥 3 月 24 日、26 日、31 日以及 4 月 2 日、4 日,平望大桥 4 月 2 日、4 日缺测,其同位素均以该站同日前后 2 日同位素丰度的均值代替.

同理,可以解出各河段的受水量,进而根据各概化河段的进出口门水量,计算出调水试验期间两省一市

受水情况,见表3。

计算结果与实测结果相比,总的受水量基本一致,但两省一市的受水量有一些差别。由表3可以发现,模型计算的两省一市受水比例最大误差在5%左右,受水量或受水比例的沿程变化趋势与实测结果的趋势一致,因此同位素方法可用来解决近似估计河网地区的水量分配问题。

可能的误差来源主要表现为2个方面:一是根据水量平衡和质量守恒原理建立模型时未考虑太浦河各河段的槽蓄量影响,对于所研究的各河段而言,槽蓄量是客观存在的事实,忽略槽蓄量必然产生误差;二是研究区属河网感潮区,受半日潮影响,潮水和太湖水混合程度决定所取水样的同位素丰度。鉴于研究的是太湖通过太浦河泄水时两省一市河网地区的受水问题,所取的必须是无潮水混合的水样,对取样时间的把握非常重要,而实际取样时限于条件的限制,很难完全满足这一苛刻要求,会产生一定的误差;三是在计算上海区的实际监测受水量时,以练塘大桥断面为控制断面,根据赶潮河网特性,将试验期间练塘大桥的下泄水量与同期多年平均下泄流量的增量作为上海区的受水量,而同位素水文方法与监测计算方法是2种截然不同的方法,所以2种计算结果存在一定的误差也是必然的。

5 结 语

总体来说,同位素水文方法在地下水研究中应用较为广泛,但在地表水中的应用,尤其是平原河网地区感潮河流的水文要素的定量分析研究方面还处于探索阶段。本文尝试应用同位素水文方法推求太湖运用不同的调度方式通过太浦河向下游泄水期间,两省一市的受水量或受水比例,发现基于同位素质量守恒原理计算的结果与实测结果基本相当。由于是第一次应用同位素技术解决河网地区的水量组成问题,只能说明同位素水文方法可以用作平原河网区水量分配的近似估计,但其适用性及精度还有待于进一步检验,对监测取样断面设计及采样过程中存在的问题,今后应优化取样站点、取样频次和取样时间。

参考文献:

[1] MOOK W G. Environmental isotopes in the hydrological cycle[M]. Paris :UNESCO ,2000.

[2] CLARK I D ,FRITZ P. Environmental isotopes in hydrogeology[M]. New York :Lewis Publishers ,1997.

[3] 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.(WANG Ji-yang. Isotope hydrology and water resources plus hydro-environment[J]. Earth Science :Journal of China University of Geosciences ,2002,27(5):532-533.(in Chinese))

[4] 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.(BAO Wei-min , HU Hai-ying ,QU Si-min et al. Application of stable isotope method to the water balance of lakes[J]. Yellow River ,2007(8):29-30.(in Chinese))

[5] 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.(PANG Zhong-he. Development assistance and scientific cooperation in isotope hydrology[J]. Hydrogeology and Engineering Geology ,2004(2):114-116. (in Chinese))

[6] 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.

[7] 陆宝宏,孙婷婷,许宝华,等. 长江干流径流同位素同步监测[J]. 河海大学学报 :自然科学版,2009,37(4):378-381.(LU Bao-hong ,SUN Ting-ting ,XU Bao-hua et al. Isotopic synchronous monitoring of runoff in main stem of Yangtze River[J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences ,2009,37(4):378-381.(in Chinese))

[8] 孙营营,陆宝宏,杨洪林,等. 同位素方法在太浦河调水试验中的应用[J]. 水利学报,2007(增刊1):470-474.(SUN Ying-ying ,LU Bao-hong ,YANG Hong-lin et al. On isotope hydrology method during the experiment of diverting water from Taipu River[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,2007(S1):470-474.(in Chinese))

[9] 高怡,毛新伟,徐卫东.“引江济太”工程对太湖及周边地区的影响分析[J]. 水文,2006,26(1):92-94.(GAO Yi ,MAO Xin-wei ,

表3 太浦河调水试验期间两省一市的受水量
Table 3 Amount of received water of Jiangsu Province , Zhejiang Province and Shanghai Municipality during water diversion tests on Taipu River

省(市)	受水量/ 10^4 m^3		占总受水量的比例/%	
	计算	实测	计算	实测
江苏	15015	16683	57.14	62.11
浙江	3371	2905	12.83	10.81
上海	7891	7274	30.03	27.08
总受水量	26277	26862	100.00	100.00

注:表中数据不含正常调度期(2006年4月5~6日)水量。

XU Wei-dong. Analysis of influence on the Taihu Lake and the area around :diversion from the Yangtze River to the Taihu Lake[J]. Journal of China Hydrology 2006 26(1) 92-94.(in Chinese))

[10] 胡和平 ,田富强 .对引江济太调水试验的认识[J]. 中国水利 ,2004(10) :12-13.(HU He-ping ,TIAN Fu-qiang. Considerations on water diversion experiment of“ direrting water from the Yangtze to Taihu [J]. China Water Resources 2004(10) :12-13.(in Chinese))

[11] 陈静 林荷娟 .引江济太水量水质联合调度存在问题及对策[J]. 水利科技与经济 ,2005 ,11(4) :213-215.(CHEN Jing ,LIN He-juan. The questions and measures of water amount and quality combined regulation[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy 2005 ,11(4) :213-215.(in Chinese))

Estimation of water amount in river network of Taihu Lake based on isotopic mass conservation

LU Bao-hong^{1 2} , SUN Ying-ying^{1 2} , MA Le-jun¹ , XU Bao-hua³ , WANG Wei¹ , WANG Ji-yang^{2 4}

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

2. College of Hydrology and Water Resources , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;

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

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

Abstract : In order to cooperate with the Taihu Basin Authority in tests on improving water quality in the downstream reaches of the Huangpu River by diverting water from the Taipu River , a water allocation model of the river network region based on the water balance principle and the isotopic mass conservation was established to solve for the amont of water received(or ratio of received water of two provinces and one municipality) by Taihu Lake from the Taipu River. The calculated results indicate that the ratio of the received water yielded by the proposed method using the stable isotope compositions of the ebb-tide water samples is close to the observed results. The proposed model is convenient , simple and economic after the optimization of isotopic sampling sites , frequencies and time , and it can be used to approximately estimate the received water amount at different sites in the river network region. However , the accuracy should be further validated.

Key words : stable isotope ; isotopic mass conservation ; received water of river network ; Taipu River