

【水文·泥沙】

同位素技术在内陆河水循环研究中的应用前景

陶 辉¹, 毛炜峰², 宋郁东³, 韩 俊⁴

(1. 中国科学院 南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 2. 新疆气候中心, 新疆 乌鲁木齐 830002;

3. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 4. 新疆水利水电科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830049)

摘 要:介绍了同位素技术的原理,初步探讨并提出了同位素技术应用在气候变化对内陆河流域水循环影响研究中的思路 and 重点,主要包括水汽来源分析、区域降水线与蒸发线特征分析、氡盈余的分布特征及古气候信息的提取等方面。通过创新气候变化背景下的内陆河流域水循环变化的研究模式,可为盆地内水循环理论与大气水文学的建立提供依据。

关 键 词: 同位素; 气候变化; 水循环; 内陆河流域

中图分类号: P332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1379(2007)12-0031-02

中国西部的内陆河流域是对全球气候变化极为敏感的生态环境脆弱区,尤其是在全球气候变暖这一背景下,其水循环变化受到学术界和社会的普遍关注^[1-4]。探讨干旱、半干旱地区内陆河流域气候变化对水循环的影响,对合理开发和利用水资源具有重要意义。环境同位素技术能够获取水循环内部过程的更多信息,应用其研究气候变化对内陆河流域水循环的影响,有望形成原创性气候变化背景下的区域水循环理论,推动水科学前沿领域的发展。

1 水环境中的同位素成分

水的同位素成分被视为水的“指纹”或“DNA”^[5]。应用于水文学研究的同位素可分为稳定同位素和非稳定同位素两大类。非稳定同位素能自发地放出粒子并衰变为另一种同位素;稳定同位素是指不可测定放射性的同位素。目前在水循环研究中,广泛利用的同位素有 D(²H)、T(³H)、¹⁸O、¹⁴C。D、¹⁸O 为稳定同位素,T、¹⁴C 为放射性同位素。T、¹⁴C 的半衰期分别为 12.43 年和 5 730 年。

2 同位素技术原理

水中的同位素成分伴随着水循环而变化。T、¹⁴C 来源于大气层,而 D、¹⁸O 源于海洋。除海洋表面蒸发外,来源于地面蒸发作用的水汽对降水中稳定同位素的成分变化影响较大。因此,在研究降水中稳定同位素组成时,必须考虑局地水汽对降水的贡献。

同位素 D、T、¹⁸O 分别以 HDO、HTO、H₂¹⁸O 等水分子的形式在自然界中循环,其不与周围物质发生化学反应,因此 D、T、¹⁸O 是研究水循环的理想示踪剂^[6]。

通过分析同位素比值 R(同一元素的重同位素与轻同位素之比)的变化来研究水循环。但是通常 R 值变化微小,现有质谱仪极难测准。实际工作中,采用相对测量法,即待测样品的同位素比值 R₁ 与一标准物质的同位素比值 R₂ 作比较,比较结果称

为样品的 δ 值,即 $\delta = (R_1/R_2) \times 1000\%$ 。为了准确比较不同样品间同位素比值的变化,国际上采用了统一的标准^[7]。

3 应用于大气降水线研究

应用稳定同位素 D 和 ¹⁸O 可以研究大气降水线。大气降水线是 D 与 ¹⁸O 的关系曲线,对于水中的氢氧同位素,一般用相对于 SMOW 标准(标准平均)海水的千分差表示。此外,还有一种标准水——维也纳 - SMOW(V - SMOW),其 ¹⁸O 含量与 SMOW 相同,δ(D) 比 SMOW 低 0.2‰。因此,从使用角度来看,D 和 ¹⁸O 的测量精度通常分别为 1‰ 和 0.1‰,可认为 V - SMOW 和 SMOW 是完全相同的^[8]。当 δ¹⁸O 和 δ(D) 为正值时表示样品较 SMOW 标准富集了更多的 ¹⁸O 和 D;为负值时,表示样品中的同位素比 SMOW 标准亏缺。

Craig 经过测定发现,全球规模的大气降水中的 δ(D) 与 δ(¹⁸O) 关系式为

$$\delta(D) = 8\delta(^{18}O) + 10$$

对应的曲线是一条直线,称为大气降水线(简称 MWL)。自然界的蒸发过程常伴有动力学效应,由于各地蒸发过程存在差异,因此世界各地大气降水线的斜率及常数项将偏离 8 和 10,称为地区降水线,反映了蒸发作用的影响。其常数项主要受水蒸气生成时的蒸发速度(动力学同位素效应)控制。

全球大气降水 δ(D) 和 δ(¹⁸O) 相关关系见图 1。由图 1 可以得到以下规律^[8]:①温度低、远离蒸汽源的内陆、高海拔、高纬度地区大气降水的 δ(D)、δ(¹⁸O) 比值一般落在降水线左下方,反之则落在全球降水线的右下方;②偏离全球降水线,斜率较小的蒸发线(或地区降水线),则落在全球降水线的右下方,

收稿日期: 2007-02-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40601017)。

作者简介: 陶辉(1981—),男,新疆昌吉人,博士研究生,主要研究方向为气候变化对水资源的影响。

斜率愈小,偏离全球线愈远,反映的蒸发作用愈强烈;③蒸发线与降水线的焦点可近似反映出蒸发源的原始平均同位素组成。鉴于上述规律, D 、 ^{18}O 同位素被认为是具有“空间情报”的示踪剂。通过这些差异,可以判断地下水补给来源,分析形成大气降水的水蒸气来源。还可以利用该技术分割河流流量变化曲线,区分基流和洪峰及它们的比例,这是传统研究方法很难解决的问题。

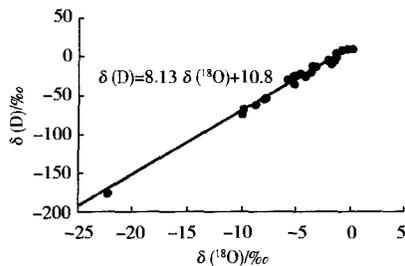


图1 全球大气降水 $\delta(D)$ — $\delta(^{18}O)$ 相关关系

4 在内陆河流域水循环研究中的应用前景

对水循环过程中稳定同位素的研究始于20世纪50年代初,大范围有组织的取样工作始于1961年。在国际原子能机构(IAEA)和世界气象组织(WMO)联合下,全球已建立了550多个降水取样点,对降水中稳定同位素进行了连续跟踪监测,为研究全球及局地水循环提供了依据。我国西北内陆河流域广袤,水文气象测站稀少,采用常规方法进行大规模实地观测将耗费大量的人力、物力。笔者认为,通过同位素水文学方法认识全球气候变化背景下内陆河流域水循环机理更为合适,其重点包括以下几方面。

(1) 水汽来源与出山径流分析。结合流域水热通量观测,如利用卫星遥感资料反演大气水汽密度,利用微波辐射计探测空中水汽含量等,揭示径流形成区的气候特征;采用氢氧同位素组成、水化学信息及同位素示踪技术,定量分析流域内外大气水分来源、比例及出山径流中冰雪融水比例变化趋势,解答造成这些变化的驱动力,掌握水资源时空分布规律,为提高西北内陆流域空中水资源利用效率及实施人工降雪、降雨提供依据,同时也为盆地内水循环理论与大气水文学的建立提供依据。

(2) 区域降水线、蒸发线特征分析。中国西北内陆河流域位于亚欧大陆内部,具有明显的垂直景观分布,大致可分为高山冰雪带、山区植被带、山前平原绿洲带和荒漠带。受青藏高原隆起及高大山系的影响,高山冰雪带和山区植被带降水较多,气温较低,高山带冰川发育,植被带对水源的涵养作用使山区成为内陆河流域径流的主要形成区,因此地区降水线研究的重点应为山区。地区降水线与全球大气降水线的交点代表区内天然水的初始同位素比值,相关系数 R 值较大,表明降水中的氢、氧同位素组成有较好的相关性;与全球大气降水线越相吻合,越能反映海洋性气候的氢、氧同位素特征。

湖泊水量、蒸发量等对气候变化具有敏感响应,是认识内陆河流域水循环变化响应于气候变化尺度和强度的重要参照^[9],因此根据瑞利分馏函数,通过对同位素富集程度的分析,可以建立同位素含量与湖泊水量的关系式,这对内陆地区的湖

泊水循环研究具有重要的参考价值。

(3) 氘盈余的分布特征与古水文、古气候、古地理信息的提取。研究地下水补给来源和各种来源比例的一个重要证据就是 D 的盈余值 d , $d = \delta(D) - 8\delta(^{18}O)$ 。 d 值越大,则反映蒸发速率越大^[10]。研究降水中的 d 变化,可以揭示不同空间、不同时间降水的水汽来源及水循环方式的变化、水汽蒸发源地的气候变化特征。内陆地区、平原或盆地地下水往往在蒸发量相对较小的山区接受大气降水补给,因此地下水的同位素组成与大气降水中同位素成分有良好的关系。随着温度的变化(古气候效应),降水同位素含量的变化必然反映到地下水的同位素变化上。如德国科学家发现在撒哈拉古地下水中^[11],稳定重同位素含量从西向东明显降低,这与欧洲冬季降水的“大陆效应”十分相似,从而得出北非过去必定经受西风气团影响的结论。因此,通过研究地下水的这些变化,结合放射性同位素测年技术,可以了解古水文、古地理特征及古气候变迁信息,并有望重建古气候变量的时间序列。

(4) 全球气候变化背景下的水循环过程模式研究。目前有关稳定性氢、氧同位素应用的研究,主要是分别针对水循环中的大气降水、地表水、地下水、土壤水和植物水某一方面进行的,若将水循环过程作为一个统一的整体,应用稳定性氢、氧同位素技术进行研究,可解决气候变化背景下水循环中的一些重大关键问题和生产实践问题。如通过研究降水、土壤水、地下水、洪峰径流、基流和植物体内水分的氢、氧同位素的组成,可进一步认识植被主要利用的是降水、土壤水、地下水还是径流,河川基流的主要来源是次降水还是地下水,认识土壤盐分运移状况及上述水分之间的转化关系。这些问题的解决,可深化对内陆流域典型山地—绿洲—荒漠系统水循环的认识;科学评估内陆流域气候和生态环境对全球变化的响应,设计内陆流域土地利用和生态系统优化的空间格局;解决内陆流域植被恢复中的生态需水、地下水开发、土壤盐渍化等关键性科学问题,为气候变化背景下内陆流域的生态环境恢复提供科学依据。另外,延长大气降水中同位素分析取样的时间序列,利用同位素示踪分析验证大气循环模式,可以与大气循环模型相结合。

参考文献:

- [1] 施雅风,沈永平,胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土,2002,24(3).
- [2] 高前兆,仵彦卿. 河西内陆河流域的水循环分析[J]. 水科学进展,2004,15(3).
- [3] 王守荣,郑水红,程磊. 气候变化对西北水循环和水资源影响的研究[J]. 气候与环境研究,2003,8(1).
- [4] 何清,袁玉江,魏文寿. 新疆地表水资源对气候变化的响应初探[J]. 中国沙漠,2003,23(5).
- [5] 汪集旸. 同位素水文学与水资源、水环境[J]. 地球科学,2002,27(5).
- [6] 宋献方,夏军,于静洁. 应用环境同位素技术研究华北典型流域水循环机理的展望[J]. 地理科学进展,2002,21(6).

(下转第35页)

表 2 各模型含沙量比尺对比

单位	模型名称	主要完成人	几何比尺		模型沙容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	含沙量比尺	
			λ_L	λ_h		公式	模型
黄科院	黄河下游野外大模型	李保如	1 000	80	2.65	2.28	2.5
黄科院	小浪底枢纽悬沙模型	屈孟浩	100	100	2.17	0.84	1.0
黄科院	黄河东坝头至高村河段模型	屈孟浩	1 000	80	2.17	1.91	3.0
黄科院	黄河大义屯至朱圈河段模型	屈孟浩	500	50	2.17	2.07	3.0
黄科院	小浪底至苏泗庄河段模型	张红武	600	60	2.10	2.00	2.0
黄科院	黄河花园口至东坝头河段模型	张红武	800	60	2.10	1.80	2.0
黄科院	黄河温孟滩河段整治模型	赵业安	600	60	2.10	2.00	2.0
黄科院	南水北调中线穿黄概化模型	张红武	1 000	80	2.10	1.85	2.0
黄科院	南水北调中线穿黄河段模型	张红武	600	60	2.10	2.00	2.0
黄科院	小浪底库区模型	张俊华	300	45	2.10	2.26	1.7
黄科院	黄河西霞院水利枢纽模型	姚文艺	800	80	2.10	2.00	2.0
黄科院	陕西泾河东庄水库模型	张红武	280	95	2.10	1.53	1.6
黄科院	黄河窄河段挖河固堤模型	姚文艺	500	55	2.10	2.07	3.5
黄科院	西霞院配套工程泥沙模型	刘海凌	600	60	2.10	1.99	1.8
中国水科院	渭河下游河道动床模型	胡春宏	500	60	2.12	2.14	2.8
中国水科院	官厅水库奶水河口疏浚整治模型	胡春宏	250	50	2.12	2.44	1.5
中国水科院	黄河花园口至黑岗口河段河道整治模型	彭瑞善	1 200	50	2.65	1.73	2~4
长科院	南水北调中线穿黄模型	殷瑞兰	800	60	2.10	1.80	2.0
清华大学	南水北调中线工程浑沌河河工模型	张红武	400	80	1.70	1.82	1.7
清华大学	宁夏黄河青铜峡至石嘴山河段模型	张红武	680	80	1.90	1.87	2.0
清华大学	塔里木河流域克尔水库模型	钟德钰	400	85	1.69	1.82	1.6
清华大学	辽河德日苏宝冷水库模型	张红武	310	62	1.69	1.80	2.0
清华大学	泾河流域亭口水库模型	张红武	270	62	1.69	1.84	2.0
清华大学	无定河王圪堵水库模型	张红武	300	60	1.89	2.13	2.0

参考文献:

[1] 窦国仁,王国兵. 黄河小浪底枢纽泥沙研究(报告汇编)[G]. 南京:南京水利科学研究院,1993.

[2] 李昌华. 论悬沙水流模型试验的相似律[G]//泥沙模型报告汇编. 武汉:长江水利水电科学研究院,1979.

[3] 杨志达. 输沙与河工[C]//第一次河流泥沙国际学术讨论会论文集. 北京:光华出版社,1980.

[4] 李保如,屈孟浩. 黄河河道演变的物理模型试验[G]//黄河水利科学研究所科学研究论文集. 郑州:河南科学技术出版社,1989.

[5] 张红武,张俊华,江恩惠,等. 工程泥沙研究与实践[M]. 郑州:黄河水利出版社,1999.

[6] 李保如. 我国河流泥沙物理模型的设计方法[J]. 水动力学研究与进展:A辑,1991(增刊).

[7] 彭瑞善,陈建国. 黄河下游花园口至黑岗口河段河道整治模型试验报告[R]. 北京:中国水利水电科学研究院,1997.

[8] 胡春宏,陈建国,高建恩. 渭河下游河道概况及动床模型试验报告[R]. 北京:中国水利水电科学研究院,2002.

[9] 张红武,赵新建,刘建生. 黄河柳园口至曹岗河道模型的设计与验证[C]//黄河水利科学研究所首届青年科技学术讨论会文集. 郑州:黄河水利出版社,1988.

[10] 张红武,江恩惠,白咏梅,等. 黄河高含沙洪水模型的相似律[M]. 郑州:河南科学技术出版社,1994.

[11] 屈孟浩. 黄河动床模型试验理论和方法[M]. 郑州:黄河水利出版社,2005.

[12] 张羽,洪建,李远发,等. 黄河水流挟沙力公式的验证[J]. 人民黄河,2006(11).

【责任编辑 翟成亮】

(上接第 32 页)

[7] Ian D Clark, Peter Fritz. 水文地质学中的环境同位素[M]. 郑州:黄河水利出版社,2006.

[8] 张人权. 同位素方法在水文地质中的应用[M]. 北京:地质出版社,1983.

[9] J J Gibson, T W D Edwards. Development and validation of an isotopic method for estimating lake evaporation [J]. Hydrological progresses, 1996(10).

[10] 田立德,姚檀栋,孙维贞,等. 青藏高原南北降水中 $\delta(D)$ 和 $\delta(^{18}O)$ 关系及水汽循环[J]. 中国科学:D辑, 2001,31(3).

[11] IAEA. Isotope techniques in water resource investigations in arid and semi - arid regions [Z]. International Atomic Energy Agency, 2001.

【责任编辑 张华岩】