科学通报 2009 年 第 54 卷 第 15 期: 2148 ~ 2152
专题: 青藏高原水体中稳定同位素研究 论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

祁连山中段黑河上游山区地表径流水资源主要形成区域的同位素示踪研究

王宁练, 张世彪, 贺建桥, 蒲健辰, 武小波, 蒋熹

冰冻圈科学国家重点实验室, 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000
E-mail: nlwang@lzb.ac.cn

2008-04-10 收稿, 2009-07-07 接受
中国科学院创新团队国际合作伙伴计划项目(编号: CXTD-Z2005-2)、国家杰出青年科学基金项目(批准号: 40525001)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2005CB422003)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号: KZCX2-YW-310)资助

摘要 通过对黑河干流上游祁连山区降水中$\delta^{18}O$ 随海拔高度变化的研究, 揭示出其变化具有显著的高程效应, 高度梯度约为–0.18‰/100 m. 利用同位素示踪技术, 并结合出山口河水中$\delta^{18}O$, 认为出山径流主要形成于高海拔山区. 应用“二分量模型”, 阐明了海拔 3600 m 以上的高山冰雪冻土带是黑河山区流域的主要产流区, 产流量占出山径流量的 80.2%.

关键词
稳定同位素示踪
黑河
径流
祁连山

我国西北干旱区内高山环列, 形成了高山与盆地相间的地貌格局. 正是由于这些高大山系的存在, 促使了冰川的发育, 并截获了大气中较多的水汽使山区的降水量明显高于山前荒漠地带, 使其成为我国西北干旱区中的“湿岛”. 高山冰雪融水与降水是内陆河的重要水源, 它们不仅维系着中下游人工绿洲的发展和自然绿洲的存在, 而且也是下游沙漠地区众多终闾湖泊与环境演化的主要影响因素. 深入开展我国西北内陆河流域水资源的形成与转化以及水的循环过程与机理研究, 将是该地区水资源合理利用与生态环境建设的重要科学基础. 同位素方法在示踪水资源形成、循环与转化过程方面已经得到了广泛的应用[1~9]. 目前, 在黑河流域也开展了这一方面的相关研究工作[10~14], 并对该流域山前绿洲地区及下游地区的地表水与地下水转化取得了一些定量认识[10,14]. 然而, 对黑河上游祁连山区地表径流水资源在不同高度带的形成状况还缺乏系统的观测与研究, 本文试图从同位素示踪角度开展这一方面的研究.

1 研究区自然地理概况

黑河流域跨越青海、甘肃和内蒙古三省/自治区, 地理位置大致介于 96°42′~102°04′E, 37°45′~42°40′N之间, 流域面积 13×10^4 km^2, 是我国西北干旱区第二大内陆河流域. 黑河流域地貌特征区域差异显著, 南部为祁连山山地, 中部为走廊平原, 北部为低山山地和阿拉善高原, 并与巴丹吉林沙漠接壤. 上游祁连山区景观垂直地带性也十分明显, 从山前到高山区依次为荒漠草原带、干性灌丛草原带、山地森林草原带、亚高山灌丛草甸带、高山寒漠草甸带[15]和高山冰雪带.

通过对气象站观测资料的分析表明[16], 黑河上游祁连山区降水量从东向西呈减少趋势, 并随海拔升高而增加, 年降水量在低山区为 200 mm左右, 而在高山区可达 600 mm左右, 降水主要集中在夏季. 根据冰川编目资料[17], 黑河流域(包括北大河流域)共有冰川 1078 条, 面积为 420.55 km^2, 冰储量为 13.67 km^3(约合计 123.03×10^8 m^3 水当量). 黑河干流出山口莺落峡水文站控制流域总面积为 10009 km^2, 高程范围在海拔 1674 ~ 5103 m之间(平均海拔高度为 3737.7 m), 流域内有冰川 219 条, 面积为 59 km^2, 冰储量为 1.38 km^3(约合计 12.43×10^8 m^3 水当量). 八一冰川是黑河干流流域最大的冰川, 长度为 2.2 km, 面积为 2.81 km^2. 黑河流域有大小

引用格式: 王宁练, 张世彪, 贺建桥, 等. 祁连山中段黑河上游山区地表径流水资源主要形成区域的同位素示踪研究. 科学通报, 2009, 54: 2148~2152
Wang N L, Zhang S B, He J Q, et al. Tracing the major source area of the mountainous runoff generation of the Heihe River in northwest China using stable isotope technique. Chinese Sci Bull, 2009, 54: 2751—2757, doi: 10.1007/s11434-009-0505-8

河流 41 条, 多年平均年出山径流总量约为 36.8×10^8 m^3, 其中黑河干流的年出山径流量最大, 约为 16.0×10^8 m^3[18].

2 资料与方法

2006 年 4 月至 2007 年 5 月, 我们在黑河干流出山口莺落峡水文站、上游东支八宝河祁连水文站、上游西支扎麻什河扎麻什水文站进行了河水样品的逐日定时(每日 20:00 时)采集. 每次河水样品采集时, 先装入 100 mL 塑料瓶内, 然后再用蜡密封其瓶盖封口. 另外, 在临泽(海拔 1367 m)、莺落峡(海拔 1674 m)、祁连(海拔 2787 m)、扎麻什(海拔 2835 m)和野牛沟(海拔 3320 m)等站点采集了降水样品. 每次降水样品采集时, 同时记录了该次降水的降水量以及降水开始和结束时的气温. 降水样品也是在装入 100 mL 塑料瓶后, 再用蜡密封其瓶盖封口. 2006 年野外考察期间, 我们还在黑河干流源区八一冰川海拔 4650~4800 m 冰面上采集了冰雪样品, 以获得高海拔处降水中的稳定同位素比率值. 本文涉及的采样地点位置见图 1. 采集到的所有样品均在冰冻圈科学国家重点实验室分析完成, 分析所用的仪器是气体稳定同位素比质谱仪(MAT-252), 其样品中$\delta^{18}O$ 的分析精度为±0.05‰.

图 2 是黑河出山口莺落峡水文站河水中$\delta^{18}O$月平均值变化情况, 其值变化于–7.48‰～–8.11‰之间, 年平均值为–7.78‰. 图 3 是研究区域各站点降水中$\delta^{18}O$的降水量加权平均值变化情况, 从图中可以看出它们的季节变化特征极为显著(夏季高冬季低), 并且低海拔站点降水中$\delta^{18}O$比高海拔站点的高(即高程效应). 对比图 2 和 3, 可以看出黑河出山口河水中$\delta^{18}O$季节变化不仅幅度较小, 而且滞后于其上游祁连山山区降水中$\delta^{18}O$的季节变化, 这主要反映了降水下渗导致的壤中流及地下水汇流过程较缓慢以及出山口上游方向水库夏季蓄水调节的影响. 对莺落峡水文站、祁连水文站、扎麻什水文站河水样品中$\delta^{18}O$分析结果的研究表明[19], 在黑河上游中低山地区干流河水中$\delta^{18}O$沿程变化不大. 这说明黑河上游山区河段河水沿程蒸发很少, 对河水中$\delta^{18}O$的影响较小. 观测表明, 2006 年黑河干流流域的冰川融水径流为 0.66×10^8 m^3, 仅占该年出山径流(18.1×10^8 m^3)的 3.6%[20]. 这说明黑河干流径流的形成主要受降水的影响. 其他地区的大量研究表明, 在许多大河的源区

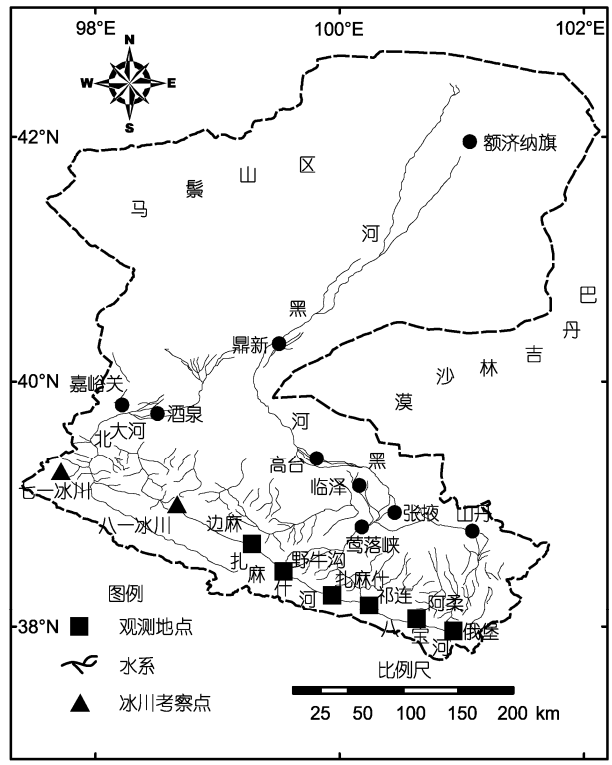

图 1 黑河流域河水与降水样品采集地点及考察地点位置

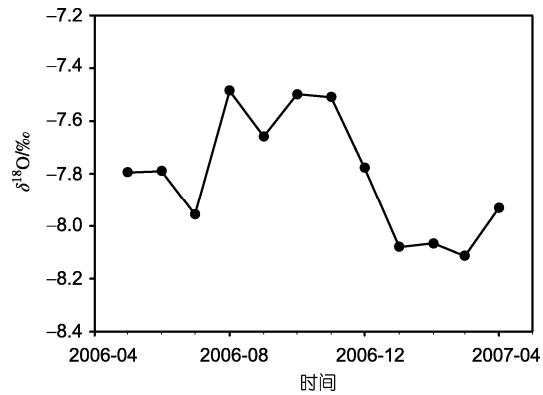

图 2 2006 年 5 月至 2007 年 4 月黑河莺落峡水文站河水中$\delta^{18}O$ 月平均值变化

其河水中稳定同位素比率非常接近其地方降水中稳定性同位素比率[21~23], 而且在许多小流域的地表与地下水体中稳定同位素比率接近地方降水中稳定同位素比率的年平均值[24]. 鉴于此, 我们可以利用降水中$\delta^{18}O$(以降水量加权的年平均值为基础, 以消除降水下渗导致的壤中流及地下水汇流过程的影响)的高程效应, 并结合黑河干流出山口河水中$\delta^{18}O$的年平均值, 根据物质守恒定律来判断出山径流形成的主要高程区域.

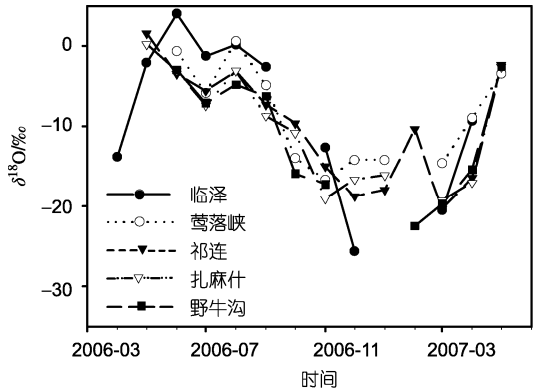

图 3 2006 年 4 月至 2007 年 5 月黑河流域不同地点降水中δ^{18}O 降水量加权平均值逐月变化

黑河流域气象站位置均位于海拔 3500 m以下, 即低于其上游山区的平均高程. 由于山区降水量的空间变化差异较大, 为了估算不同高程带的降水量状况, 必须对高海拔处的降水状况进行观测. 自2006年夏季以来我们在黑河流域上游山区的俄堡、阿柔、祁连、扎麻什、野牛沟和边麻等 6 个地点以及七一冰川流域开展了不同海拔高度降水量的观测(地点位置见图 1), 并获得了较系统的降水量资料[25].

3 结果与讨论

图 4 是 2006 年 5 月至 2007 年 5 月黑河流域降水中δ^{18}O 降水量加权平均值随海拔高度的变化情况. 从该图可以看出, 在黑河中上游地区降水中δ^{18}O 随海拔高度(H)的升高而降低(即高程效应), 其线性关系为

$$\delta^{18}\mathrm{O} = -0.001769H - 1.02,\ (R^2 = 0.886,\ n = 6). \quad (1)$$

式(1)表明, 黑河流域降水中δ^{18}O的高度梯度约为 −0.18‰/100 m. 该梯度值位于全球不同地区降水中δ^{18}O的高度梯度值的变化范围(大致变化于−0.10 ~ −0.50‰/100 m[2])之内. 由于黑河干流出山径流主要来自降水的影响, 那么根据这里黑河上游降水中δ^{18}O随海拔高度的变化规律以及黑河干流出山口莺落峡水文站河水中δ^{18}O年平均值(−7.78‰, 这一数值是2006 年 5 月至 2007 年 5 月莺落峡水文站逐日河流样品中δ^{18}O的算术平均值. 我们曾采用流量加权平均值法和简单算术平均值法对祁连水文站河水中δ^{18}O年平均值进行了计算, 两种算法所得结果的差异仅为0.09‰[19]. 由于缺乏莺落峡水文站逐日流量资料, 加之河水中δ^{18}O季节变化幅度很小, 所以本文采用的莺落峡水文站河水中δ^{18}O年算术平均值所做的相关计算将不会引起大的误差), 初步估计黑河干流径流主要形成在海拔 3820 m左右的高度带地区. 该高度带附近的山地面积占流域面积的比例也相对较大(见图 5, 高度-面积分布资料取自文献[26]).

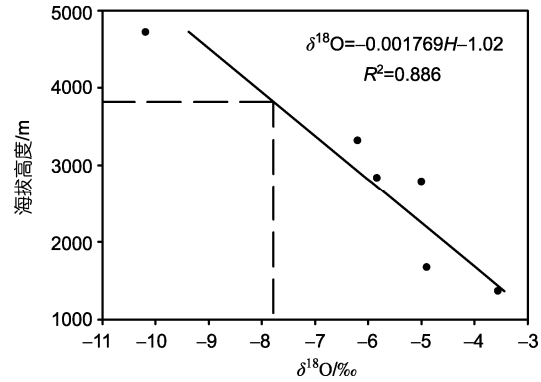

图 4 2006 年 5 月至 2007 年 5 月黑河流域降水中δ^{18}O 降水量加权平均值随海拔高度的变化

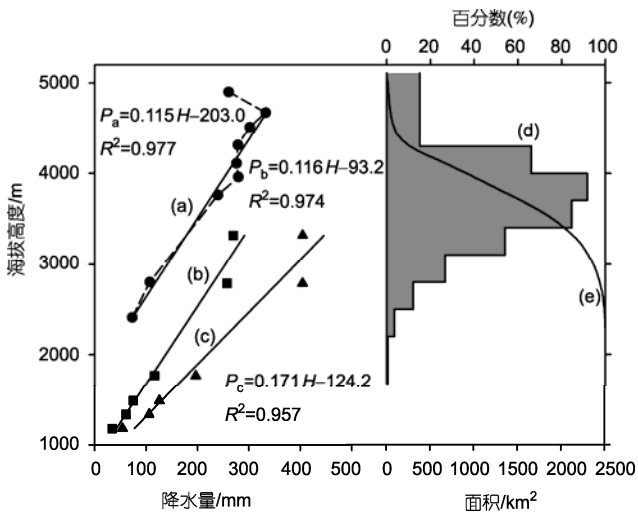

图 5 黑河流域降水量以及不同高度带面积随海拔升高的变化情况

(a) 七一冰川流域 2008 年 5 月 22 日至 9 月 12 日降水量(P_a); (b) 黑河流域气象站多年平均夏季降水量(P_b, 1960~2004 年); (c) 黑河流域气象站多年平均年降水量(P_c, 1960~2004 年); (d) 不同高度带面积; (e) 不同高度带面积百分率累积值

揭示降水量随海拔的变化情况, 是认识山区不同海拔高度带降水径流量的重要基础. 根据鼎新、高台、张掖、山丹、祁连和野牛沟气象站的长期观测资料, 发现黑河流域在海拔 3500 m 以下的中低山区不论是年降水量(P_c)还是夏季降水量(P_b)均随海拔高度(H)的升高而增大(图 5(b), (c)), 并且年降水量随海拔

升高的递增率为 17.1 mm/100 m, 夏季降水量随海拔升高的递增率为 11.6 mm/100 m. 2008 年夏季, 我们在七一冰川流域进行的降水量观测(图 5(a)), 弥补了研究区域高山带降水量随海拔变化的资料. 结果表明, 在海拔 4670 m 左右存在一个最大降水高度带, 该高度以下降水量随海拔升高而增加, 在该高度带以上(山地面积很少, 见图 5(e))降水量随海拔升高而减小. 如果我们对最大降水高度以下降水量随海拔高度的变化(图 5(a))用一个线性来拟合, 那么 2008 年 5 月 22 日至 2008 年 9 月 12 日时段降水量(P_a, 夏季降水量)随海拔升高的递增率为 11.5 mm/100 m. 这与黑河干流海拔 3500 m 以下中低山区夏季降水量随海拔升高的递增率(11.6 mm/100 m)极为一致, 说明我们可以利用黑河干流中低山地区年降水量及其随高度变化的梯度值, 来进行高山地区年降水量的推算. 值得注意的是, 在同高度上七一冰川流域夏季降水量比黑河干流流域的偏小(图 5(a), (b)), 这是祁连山区降水量从东向西减少的表现. 如果利用观测到的黑河流域中山带以下夏季降水量随海拔的递增率, 将 2006 年夏季我们在黑河上游山区 6 个观测点(俄堡、阿柔、祁连、扎麻什、野牛沟和边麻, 见图 1)的降水量订正到海拔 3000 m 的同一个高度上(图 6), 可以估计出 2006 年夏季黑河上游山区降水量从东向西的递减率约为 80 mm/100 km 左右. 从图 1 可以看到, 张掖-祁连-扎麻什一线大致垂直于黑河干流上游山区东西方向的中部, 而且祁连-扎麻什一带订正到海拔 3000 m 高度的夏季降水量为 280.0 mm 左右, 接近该高度带东西方向夏季降水量的平均值 277.3 mm. 因此, 可以选择这一线的年降水量随高度变化状况来代表黑河干流流域的平均状况. 为了计算时间的统一性, 本文具体计算时应用 2006 年张掖-祁连一线降水量(P)与海拔高度(H)之间的关系式:

$$P = 0.1833H - 148.4,\ (R^2 = 0.950,\ n = 6). \quad (2)$$

最近对黑河上游山区植被的空间分布特征研究表明, 植被指数随海拔高度的增加逐渐增大, 在海拔 3400 m处达到峰值, 植被发育最好, 而后随着海拔高度的增加逐渐减小[27]. 考虑到不同植被带的产流情况不同, 以及黑河上游山区多年冻土下界在海拔 3600 m左右[28]和黑河干流径流主要形成在海拔 3820 m 左右的高度带, 我们将黑河干流山区流域以海拔 3600 m为界分为上下两部分, 上部为高山冰雪冻土带, 下部为中低山植被带(康尔泗等人[26]曾经也这样

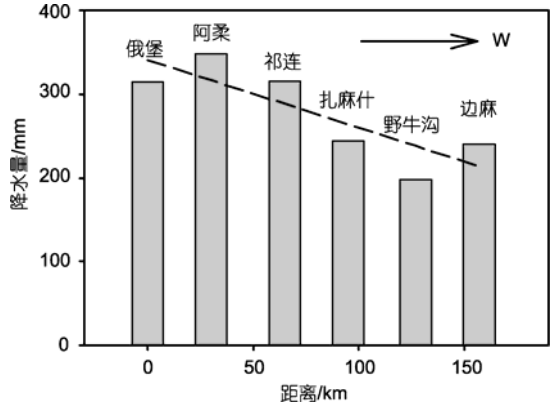

图 6　2006 年夏季黑河上游山区海拔 3000 m 高度处降水量(订正值)从东到西变化

划分黑河上游流域). 根据公式(1)和图 5 中不同高度带面积分布状况, 可求出高山冰雪冻土带降水中δ^{18}O的降水量-面积加权平均值($\delta^{18}O_{上}$)为−8.05‰, 中低山植被带降水中δ^{18}O 的降水量－面积加权平均值($\delta^{18}O_{下}$)为−6.69‰. 设高山冰雪冻土带产流量为 $Q_{上}$, 中低山植被带产流量为 $Q_{下}$, 根据物质守恒有

$$Q_{总}\cdot\delta^{18}O = Q_{上}\cdot\delta^{18}O_{上} + Q_{下}\cdot\delta^{18}O_{下}, \quad (3)$$

$$Q_{总} = Q_{上} + Q_{下}, \quad (4)$$

式中$Q_{总}$为出山径流量, $\delta^{18}O_{总}$为出山口河水中的年平均δ^{18}O(−7.78‰). 式(3), (4)就是同位素示踪研究中常用的“二分量模型”[3]. 将 2006 年的相关参数值代入上述两公式, 联立求解, 得到$Q_{上}$=14.52×10^8 m^3, $Q_{下}$=3.58×10^8 m^3. 这表明高山冰雪冻土带(即海拔 3600 m以上流域范围, 其面积占出山口以上流域面积的 58.9%)是黑河干流流域的主要产流区, 该区域产流量占出山径流量的 80.2%(如果考虑到蒸发过程对汇入河道的水中δ^{18}O的影响, 这里关于高山冰雪冻土带产流量的估计值是最小估计, 因为蒸发量随海拔升高而减小, 这使得低海拔处汇入河道的水中δ^{18}O更偏大一些), 而中低山植被带产流量仅占出山径流量的 19.8%. 康尔泗等人[29]最近根据降水量、蒸散发量随海拔升高的对比关系, 研究了黑河干流山区流域的产流情况, 也认为高山冰雪冻土带是主要产流区, 产流量为出山径流量的 83%. 由此可见, 不同方法的研究结果是比较一致的. 根据上述计算结果, 我们还可以计算出 2006 年黑河干流上游高山冰雪冻土带的径流深为 246.4 mm, 中低山植被带的径流深为 86.9 mm, 上游山区的平均径流深为 180.8 mm. 另外, 根据公式(2)和图 5 中不同高度带(小带)面积分布状况, 求得

2006 年黑河上游山区平均降水量为 521.6 mm, 高山冰雪冻土带平均降水量为 579.6 mm, 中低山植被带平均降水量为 438.6 mm. 依据这些资料, 可得到黑河干流上游山区的径流系数为 0.347, 高山冰雪冻土带的径流系数为 0.425, 中低山植被带的径流系数为 0.198. 通过以上分析, 我们认为高海拔处的高降水量、低蒸散发量和高径流系数, 使得这一高度带地区成为黑河地表径流的主要产流区.

4 结论

同位素水文学研究已成为水文学研究的一个重要前沿领域. 研究各种水体中稳定同位素的时空变化特征及其影响因素, 是利用稳定同位素技术开展水文过程、水文循环与水资源转化等研究的重要基础. 本文通过对黑河干流流域降水中δ^{18}O的研究, 揭示出其变化具有显著的高程效应. 根据这种特征以及出山口河水中δ^{18}O值与降水量高程分布, 利用"二分量模型", 揭示出海拔 3600 m以上的高山冰雪冻土带是黑河山区流域的主要产流区, 该区域的径流系数为 0.425, 这明显地高于我国西北干旱内流区的平均径流系数值(0.165[30]). 该结果表明, 干旱区高山地带的气候与气候变化对山区径流水资源的形成与演化具有重要影响, 这是值得进一步深入开展研究的课题.

参考文献

1 Agency International Atomic Energy. Tritium and Other Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1967. 1—83
2 Clark I D, Fritz P. Environmental Isotopes in Hydrogeology. New York: Lewis Publishers, 1997. 35—78
3 Kendall C, Mcdonnell J J. Isotope Tracers in Catchment Hydrology. Amsterdam: Elsevier, 1998. 723—760
4 Taniguchi M, Nakayama T, Tase N, et al. Stable isotope studies of precipitation and river water in the Lake Biwa Basin, Japan. Hydrol Proc, 2000, 14: 539—556[doi]
5 Gibson J J, Edwards T W D, Birks S J, et al. Progress in isotope tracer hydrology in Canada. Hydrol Proc, 2005, 19: 303—327[doi]
6 Lambs L, Balakrishna K, Brunet F, et al. Oxygen and hydrogen isotopic composition of major Indian rivers: A first global assessment. Hydrol Proc, 2005, 19: 3345—3355[doi]
7 Kattan Z. Estimation of evaporation and irrigation return flow in arid zones using stable isotope ratios and chloride mass-balance analysis: Case of the Euphrates River, Syria. J Arid Environ, 2008, 72: 730—747[doi]
8 刘丹, 刘世青, 徐则民. 应用环境同位素方法研究塔里木河下游浅层地下水. 成都理工学院学报, 1997, 24: 89—95
9 宋献方, 刘相超, 夏军, 等. 基于环境同位素技术的怀沙河流域地表水和地下水转化关系研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37: 102—110
10 张应华, 仵彦卿, 丁建强, 等. 运用氧稳定同位素研究黑河中游盆地地下水与河水转化. 冰川冻土, 2005, 27: 106—110
11 聂振龙, 陈宗宇, 申建梅, 等. 应用环境同位素方法研究黑河源区水文循环特征. 地理与地理信息科学, 2005, 21: 104—108
12 张光辉, 聂振龙, 谢悦波, 等. 甘肃西部平原区地下水同位素特征及更新性. 地质通报, 2005, 24: 149—155
13 张光辉, 聂振龙, 王金哲, 等. 黑河流域水循环过程中地下水同位素特征及补给效应. 地球科学进展, 2005, 20: 511—519
14 陈宗宇, 万力, 聂振龙, 等. 利用稳定同位素识别黑河流域地下水的补给来源. 水文地质工程地质, 2006, 6: 9—14
15 王金叶, 常学向, 葛双兰, 等. 祁连山(北坡)水热状况与植被垂直分布. 西北林学院学报, 2001, 16(增刊): 1—3
16 丁永建, 叶佰生, 周文娟. 黑河流域过去 40 a 来降水时空分布特征. 冰川冻土, 1999, 21: 42—48
17 王宗太, 刘潮海, 尤根祥, 等. 中国冰川目录(I)祁连山区. 兰州: 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1981
18 肖洪浪. 中国水情. 北京: 开明出版社, 2000. 179—180
19 王宁练, 张世彪, 蒲建辰, 等. 黑河上游河水中δ^{18}O 的季节变化特征及其影响因素研究. 冰川冻土, 2008, 30: 914—920
20 贺建桥, 宋高举, 蒋熹, 等. 2006 年黑河水系典型流域冰川融水径流与出山径流的关系. 中国沙漠, 2008, 28: 1186—1189
21 Frederickson G C, Criss R E. Isotope hydrology and time constants of the unimpounded Meramec river basin, Missouri. Chem Geol, 1999, 157: 303—317[doi]
22 Kendall C, Coplen T B. Distribution of oxygen-18 and deuterium in river waters across the United States. Hydrol Proc, 2001, 15: 1363—1393[doi]
23 Winston W E, Criss R E. Oxygen isotope and geochemical variations in the Missouri River. Environ Geol, 2003, 43: 546—556
24 Frits P. River waters. In: Stable Isotope Hydrology, Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle. Tech Rep Ser No. 210, IAEA. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1981
25 王宁练, 贺建桥, 蒋熹, 等. 祁连山中段北坡最大降水高度带观测与研究. 冰川冻土, 2009, 31: 395—403
26 康尔泗, 程国栋, 董增川. 中国西北干旱区冰雪水资源与出山径流. 北京: 科学出版社, 2002. 248—304
27 金晓媚, 万力, 胡光成. 黑河上游山区植被的空间分布特征及其影响因素. 干旱区资源与环境, 2008, 22: 140—144
28 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土. 北京: 科学出版社, 2000. 309—326
29 康尔泗, 陈仁升, 张智慧, 等. 内陆河流域山区水文与生态研究. 地球科学进展, 2008, 23: 675—681
30 中国科学院《中国自然地理》编辑委员会. 中国自然地理(地表水). 北京: 科学出版社, 1981. 12—15