

# 卧龙巴郎山流域大气降水与河水关系的研究

徐庆<sup>1</sup>, 蒋有绪<sup>1</sup>, 刘世荣<sup>1\*</sup>, 安树青<sup>2</sup>, 段正峰<sup>3</sup>

(1 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091;

2 南京大学生命科学院森林生态与全球变化实验室, 江苏南京 210093 3 西南大学地理科学学院, 重庆 400715)

**摘要:** 根据四川卧龙自然保护区巴郎山流域皮条河河水的氢氧同位素组成分析, 并与同期降水中氢氧同位素进行比较, 研究了河水和降水氢氧同位素的变化规律。结果表明: (1) 卧龙地区皮条河河水 ( $\delta D \sim \delta^{18}O$  线性关系为: ( $D = 3.888\delta^{18}O - 45.614 (R^2 = 0.494, p < 0.05, n = 61)$ )。河水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  变化幅度远小于降水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值的变化幅度。河水氘过量参数 ( $d$ ) 与大气降水的氘过量参数 ( $d$ ) 的季节变化趋势基本一致, 冬春季氘过量参数 ( $d$ ) 值较高, 而夏秋季较低。(2) 不同的季节, 雪水和冰雪融水补给河水不同, 雪水和冰雪融水补给河水主要发生在 11 月至翌年 6 月。(3) 当降水量在 0~10 mm 时, 降水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  的升高 (或降低) 引起河水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  升高 (或降低), 这种影响在降水后第 3 天滞后发生。当降水量在 10~20 mm 时, 降水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  的升高或降低引起河水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  升高或降低, 这种影响在降水后第 2 天滞后发生。降水量在 20~30 mm 时, 这种影响在降水后第 1~2 天发生。这表明河水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  的响应时间与降水强度紧密相关, 显示出发育良好的亚高山暗针叶林植被结构有利于土壤对降水的吸收、渗透和运移, 从而调节和补充河川径流。

**关键词:** 氢氧稳定同位素; 降水; 河水; 径流; 雪融; 森林流域; 卧龙

中图分类号: S715

文献标识码: A

## Study on the Relationship between Precipitation and River Water at Balang Mountain Watershed in Wolong Nature Reserve of Sichuan Province

XU Qing<sup>1</sup>, JIANG You-xu<sup>1</sup>, LIU Shi-rong<sup>1</sup>, AN Shu-qing<sup>2</sup>, DUAN Zheng-feng<sup>3</sup>

(1 Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, CAF, Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration, Beijing 100091, China; 2 Laboratory of Forest Ecology and Global Changes, School of Life Science, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China; 3 College of Geographic Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract** The authors investigated hydrogen and oxygen stable isotope ( $\delta D$  and  $\delta^{18}O$ ) of water in Pitiao River and compared them with the  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  of precipitation at Wolong Nature Reserve of Sichuan Province to explore the relationship between river water  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$ . It was found that the water  $\delta D$  was positively correlated with water  $\delta^{18}O$ , namely  $D = 3.888\delta^{18}O - 45.614 (R^2 = 0.494, p < 0.05, n = 61)$ . The variations of  $\delta^{18}O$  and  $\delta D$  in the river water were much smaller than those in the precipitation. The excess deuterium ( $d$ ) in the river water and in the precipitation showed a very similar patterns of the seasonal variation, with the higher values in winter than in summer. Snow and snow-ice melting water discharging into the river varied with seasons and this process occurred mainly from November to next June. The response times of  $\delta^{18}O$  and  $\delta D$  in the river water to precipitation depended on the intensity of precipitation. Given the intensities of precipitation at 0~10 mm, 10~20 mm and 20~30 mm, the response times of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  in the river

收稿日期: 2006-12-15

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2002CB111504)、国家林业局 948 项目 (2006-4-04)、国家自然科学基金杰出青年基金项目 (No. 30125036) 和国家科技攻关项目 (No. 2001BA510B06)

作者简介: 徐庆 (1964-), 女, 安徽青阳县人, 副研究员, 博士。

\* 通讯作者, Lius@caf.ac.cn

water were 3 d, 2 d and 1~2 d respectively after the occurrence of precipitation. This suggested that well structured sub-alpine dark brown coniferous forests could improve rain water permeability into soil and facilitate water movement into the adjacent rivers, by which the forest regulated the run-off process and water discharge into the river.

**Key words** hydrogen and oxygen stable isotope; precipitation; river water; run-off; snow melting; forest watershed; Wulong

河水作为区域水循环过程中的一个重要环节,通过蒸发和补排途径与大气降水和地下水不断地发生转化。江河、湖泊水的来源及组成是水文学研究中的重要问题,测定它们的氢氧同位素组成就可以确定其补给的来源、补给的数量和各种来源水的混合比。对河流水的同位素分析可以得到各种水源的成因和贡献给河流流量的信息,并进一步去研究河流水的定量模式<sup>[1]</sup>。关于河水的氢氧同位素示踪研究国外报道较多<sup>[2-5]</sup>。在我国,程汝楠<sup>[6]</sup>研究了禹城地区的水分循环,发现降水、河水、地下水中的 $\delta D$ 值差异明显。尹观等<sup>[7]</sup>根据氢氧稳定同位素研究了九寨沟风景区的水分循环,发现尽管大气降水是九寨沟的主要水分来源,但是由于大气降水补给到各种水体内的时间、补给源区的高度、补给方式不同,各种水体中 $\delta^{18}O$ 和 $\delta D$ 存在较大的差异。田立德等<sup>[8]</sup>对青藏高原那曲河流域降水及河流水体中氧稳定同位素研究发现河水中 $\delta^{18}O$ 与流域降水中 $\delta^{18}O$ 的差异可能反映了该流域强烈的地表和湖面蒸发作用。近几十年来,稳定同位素技术因具有很高的灵敏度和准确性,在生态学研究领域得到了广泛的应用,为区域水循环研究提供了新的手段<sup>[9-11]</sup>。但国内关于森林流域河流水的氢氧稳定同位素变化特征研究方面还相对比较薄弱。

卧龙自然保护区是保护森林生态系统和大熊猫的国家级自然保护区。皮条河是贯穿整个卧龙自然保护区的一条主要河流,它发源于卧龙巴郎山东麓,位于长江上游重要支流岷江的源头地区<sup>[12]</sup>,对于保持水土、涵养水源、维持生态平衡起着重要作用。本文在卧龙地区大气降水氢氧同位素特征及降水分配过程中穿透水、土壤水氢氧同位素的变化研究基础上<sup>[11-14]</sup>,进一步开展了卧龙地区巴朗山流域河水的氢氧稳定同位素示踪研究,旨在探讨皮条河河水的补给来源、河水与大气降水的转化关系及不同的降水强度对皮条河河水的影响,对揭示川西亚高山暗针叶林降水分配过程中各水体的转化规律,建立亚高山暗针叶林集水区的水循环模式以及查明区域水资源时空分布规律并制定水资源的可持续管理模式皆具有十分重要的理论意义。

## 1 研究地区概况

本研究在四川省卧龙自然保护区巴郎山流域河流水源头区进行,选择四川省林业科学研究院邓生亚高山暗针叶林定位站(102°58'21" E, 30°51'41" N;海拔2745 m)附近的岷江冷杉(*Abies faxoniana* Rehd. et Wils.)暗针叶林山脚下唯一的一条河流——皮条河为采样点。研究地区植被概况见文献[11,12]。根据卧龙生态定位站2003年7月—2005年6月2个水文年的气象资料分析,本区年降水量1001.25 mm,年相对湿度80%,1月平均降水量11.05 mm,7月平均降水量165.4 mm,降水量集中在5—10月,占全年降水量的85.86%。降水量月变化大致呈单峰型分布,呈较典型的内陆降水分布特征。气温的季节变化则呈单峰型分布,从3月开始升温,至7月达到最高峰,而后逐渐回落。该区平均气温8.71℃,2月平均气温-2.5℃,7月平均气温19℃。

## 2 研究方法

### 2.1 样品的采集

2003年7月24日—2005年6月24日在四川卧龙邓生生态定位站进行了为期2个水文年的降水的观测和采样工作。其中,2003年7月24日—9月8日为连续(集中)采样期(每天1次),2003年10月—2005年6月为季节采样期(1月3次)。共采集降水水样74个,其中,雪水水样31个。

在卧龙岷江冷杉暗针叶林山脚下皮条河采集河水水样。2003年7月24日—9月8日为集中采样期,即分3个采样期:采样I期:7月28日—8月6日(降水为0~10 mm级);采样II期:8月10日—20日(降水为10~20 mm级);采样III期:8月30日—9月8日(降水为20~30 mm级)。7月24日、8月24日采集对照样品。采集河水水样33个。

2004年9月—2005年6月,采集河水水样频率为1月3次。采集河水样品28个。2年共采集河水样品61个。

收集降水和河水水样时间为早晨8:00,所采集的降水、河水样品立即装入塑料瓶密封,并存放在低温室(0~5℃)保存。

## 2 2 样品的测试

所有河水、降水水样  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  的测定在中国科学院北京植物所生态中心稳定同位素实验室 Delta plus XP 和 TC/EA 2 气体质谱仪上进行。样品中  $\delta D$  的测试精度  $\pm 5\text{‰}$ ， $\delta^{18}O$  的测试精度  $0.5\text{‰}$ 。

由于稳定同位素在自然界中含量极低，用绝对量表示同位素的差异比较困难，因此，国际上规定使用相对量即待测样品的同位素比值 ( $R_{\text{sample}}$ ) 与一标准物质的同位素比值 ( $R_{\text{standard}}$ ) 作比较，比较结果称为样品的  $\delta$  值，其定义为

$$\delta = (R_{\text{sample}} / R_{\text{standard}}) \times 1000\text{‰}$$

式中， $R_{\text{sample}}$  是样品中元素的重轻同位素丰度之比，如： $(D/H)_{\text{sample}}$  与  $(^{18}O/^{16}O)_{\text{sample}}$ ； $R_{\text{standard}}$  是国际通用标准物的重轻同位素丰度之比，如： $(D/H)_{\text{standard}}$  与  $(^{18}O/^{16}O)_{\text{standard}}$ 。

通过分析  $\delta$  值变化来分析区域大气降水与河水的关系等实际问题。

## 2 3 气象数据的获取

气象数据由卧龙邓生生态定位站无林地和林内两个气候观测站提供。林内气象站自计雨量计 (DSJ2 型, 天津气象仪器厂) 测量天然降水量 ( $P$ )，并与约 300 m 外的邓生定位站的 SM<sub>1</sub> 型标准雨量计作比较。

## 2 4 数据分析

本研究运用 SPSS 软件进行统计分析、线性回归分析和  $F$  检验。

## 3 结果与分析

### 3 1 卧龙地区皮条河河水氢氧同位素特征

根据卧龙地区 2003 年 7 月—2005 年 6 月 2 个水文年皮条河河水 61 个  $\delta D$  ( $\delta^{18}O$ ) 的实测值分析，卧龙亚高山暗针叶林皮条河河水中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值变化幅度较小， $\delta D$  介于  $-76.336\text{‰}$  ~  $-107.064\text{‰}$  之间， $\delta^{18}O$  介于  $-10.855\text{‰}$  ~  $-15.360\text{‰}$  之间。变化幅度分别为  $30.728\text{‰}$  和  $4.505\text{‰}$ 。

根据卧龙地区 2003 年 7 月—2005 年 6 月 2 个水文年 74 个大气降水的  $\delta D$  ( $\delta^{18}O$ ) 的实测值分析，大气降水  $\delta D$  介于  $-38.567\text{‰}$  ~  $-156.168\text{‰}$  之间，变化幅度为  $99.677\text{‰}$ ； $\delta^{18}O$  介于  $-6.903\text{‰}$  ~  $-17.731\text{‰}$  之间，变化幅度为  $8.892\text{‰}$ <sup>[13]</sup>。

由此可见，河水  $\delta D$  ( $\delta^{18}O$ ) 值的变化幅度远远小于降水  $\delta D$  ( $\delta^{18}O$ ) 值的变化幅度。将河水  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  进行线性相关性分析，结果表明：河水  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  相关性显著，关系式为： $\delta D = 3.888 \delta^{18}O - 45.614$  ( $R^2 = 0.4946$ ,  $n = 61$ ,  $p < 0.05$ ,  $F = 57.705$ ) (如图 1)。

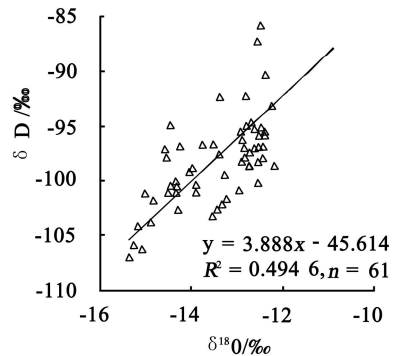


图 1 卧龙地区皮条河河水  $\delta D \sim \delta^{18}O$  关系图

### 3 2 河水与降水氢氧同位素的关系

根据卧龙地区 2003 年 7 月—2005 年 6 月 2 个水文年 74 个大气降水的  $\delta D$  ( $\delta^{18}O$ ) 的实测值，将卧龙地区大气降水的  $\delta D$  对  $\delta^{18}O$  进行一元线性回归分析，结果表明：大气降水  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  线性相关性显著 ( $R^2 = 0.8891$ ,  $p < 0.01$ )，关系式为： $\delta D = 9.4427 \delta^{18}O + 28.658$  ( $n = 74$ ) (如图 2)。

将河水取样点标于降水  $\delta D \sim \delta^{18}O$  关系图上。从图 2a 可以看出，河水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  样均位于地区降水线 ( $y = 9.4427x + 28.658$ ) 和全球雨水线 ( $y = 8x + 10$ ) 附近，表明河水与大气降水有着密切的联系，降水是河水的主要补给来源。

将丰水期 (5—10 月) 与枯水期 (11 月至翌年 4 月) 河水取样点分别标于卧龙地区大气降水  $\delta D \sim \delta^{18}O$  关系图上。

从图 2b、2c 可以看出，丰水期和枯水期的河水样氢氧同位素值均位于地区雨水线两侧附近，在  $\delta D \sim \delta^{18}O$  关系图上，丰水期河水样点多位于雨水线右下方，而枯水期则多位于雨水线左下方，这与丰水期降水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  较低，而枯水期降水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  较高相一致，但河水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值变化幅度远远小于降水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值的变化幅度，说明河水主要由降水补给之外，与其它水体之间也存在着一定的联系。

### 3 3 河水与雪水氢氧同位素的关系

将 7—9 月河水和 11 月至翌年 6 月的河水取样点分别标于雪水  $\delta D \sim \delta^{18}O$  关系图上。从图 3a 可以看出，7—9 月河水偏离地区雪水线 ( $y = 9.3761x + 33.245$ ,  $R^2 = 0.9189$ ,  $n = 31$ )；7—9 月河水多位于雨水线右下方，而 11 月至翌年 6 月的河水取样点则大多位于雪水线上 (图 3b)。这一结果表明，雪水和冰雪融水补给河水主要发生在 11 月至翌年 6 月，7—9 月冰雪融水补给河水较少。

### 3.4 不同强度降水对河水氢氧同位素变化的影响

$\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  的影响不同。

不同降水强度对暗针叶林山脚下皮条河河水的

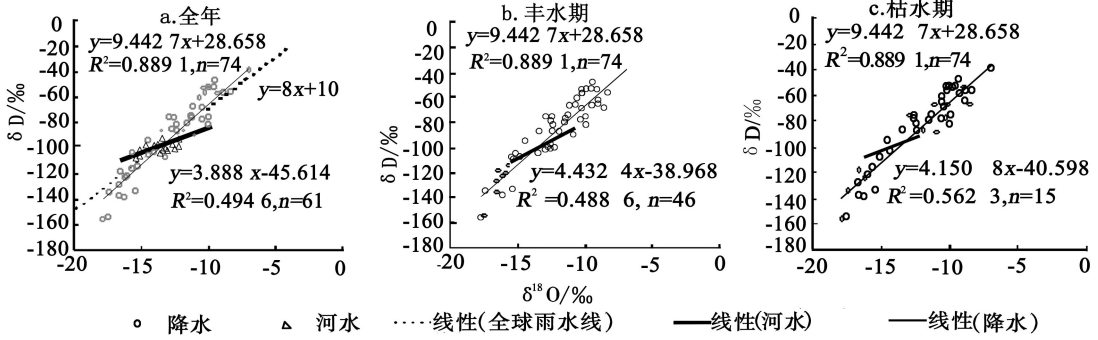


图 2 河水与降水氢氧同位素关系图

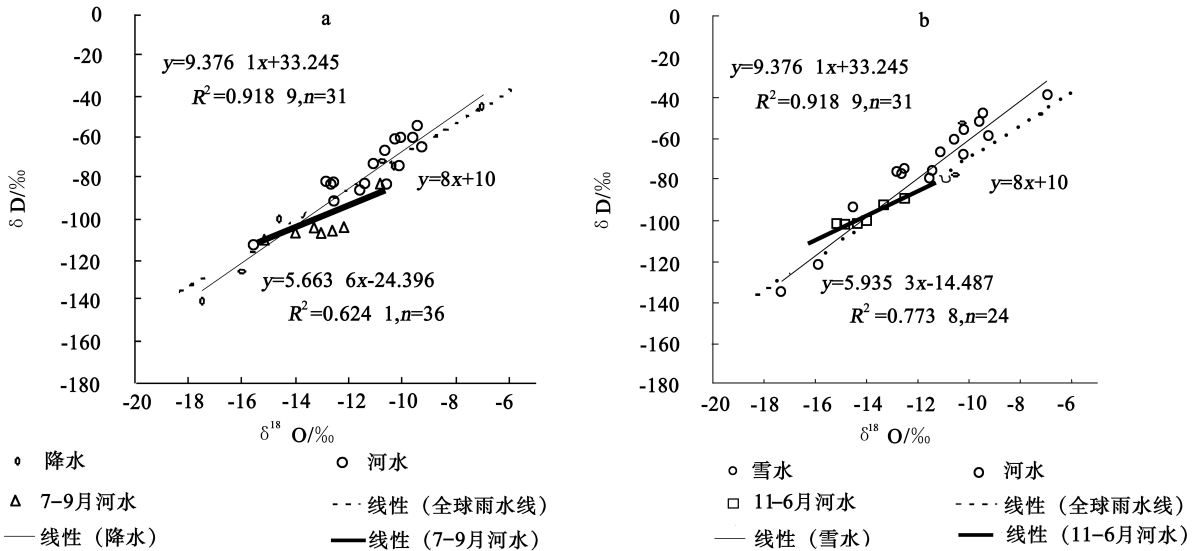


图 3 皮条河河水和雪水  $\delta D \sim \delta^{18}O$  关系图

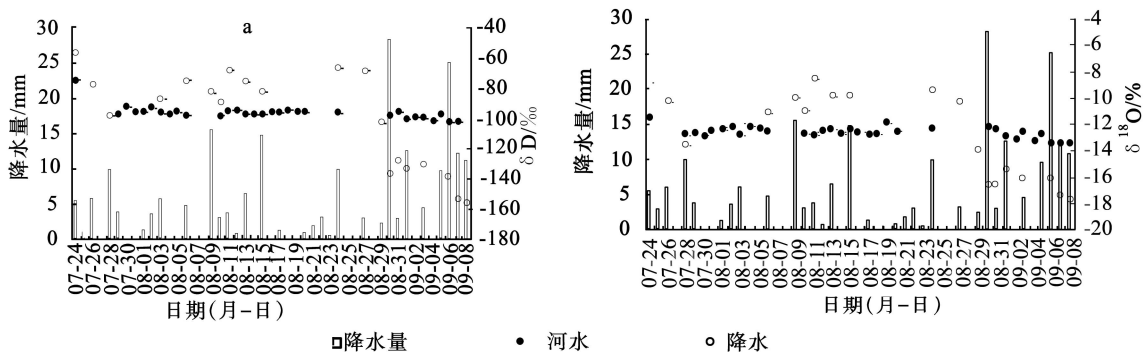


图 4 河水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  和降水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  随日期的变化

从图 4 可以看出, 当降水量在 0~10 mm 时, 即采样 I 期, 降水对河水的的影响甚微。河水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值接近降水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  的平均值。降水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  的升高或降低引起河水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  升高或降低, 这种影响在降水后第 3 天才滞后发生。当降水量在 10~20 mm 时, 即采样 II 期, 在降水量、日平均降水量较大和降水连续性

较高时, 降水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  的升高或降低引起河水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  升高或降低, 这种影响在降水后第 2 天滞后发生。降水量在 20~30 mm 时, 即采样 III 期, 前 3 天也是每天一场雨, 河水  $\delta D$  变化曲线随降水的  $\delta D$  曲线变化而变化, 这种影响在降雨当天发生 (图 4a); 河水  $\delta^{18}O$  变

化曲线随降水的  $\delta^{18}\text{O}$  曲线变化而变化, 这种影响在降水的第 2 天发生(图 4b)。

上述结果表明, 发育良好的原始亚高山暗针叶林林冠层、地被层和土壤结构有利于土壤对降水的吸收、渗透和运移, 从而调节和补充河川径流。

### 3.5 河水氘过量参数 ( $d$ ) 与大气降水的氘过量参数 ( $d$ ) 的季节变化

图 5 给出了 2 个水文年的月平均河水氘过量参数 ( $d$ ) 与月平均大气降水的氘过量参数 ( $d$ ) 的变化。

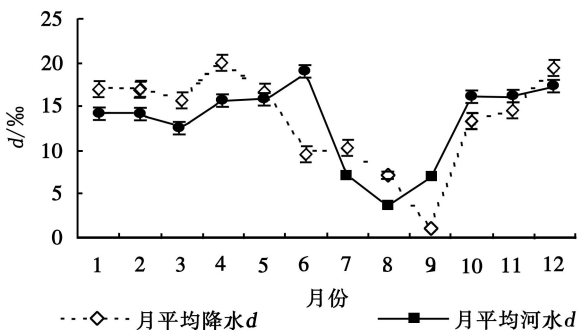


图 5 卧龙地区皮条河河水和降水月平均氘过量参数 ( $d$ ) 的变化

从图 5 可以看出, 一年四季, 大气降水的氘过量参数 ( $d$ ) 与河水氘过量参数 ( $d$ ) 的变化趋势基本一致。大气降水 (河水) 中的  $d$  值在冬、春季明显较高, 夏、秋季较低。降水的  $d$  值的变化幅度大于河水  $d$  值的变化幅度。从不同月份的测试结果来看, 4 月降水的  $d$  值最大达 19.961 ‰, 9 月最低 1.111 ‰, 相差 18.850 ‰, 6 月河水的  $d$  值最大达 18.720 ‰, 8 月最低 3.678 ‰, 相差 15.042 ‰。引起这种差异的主要原因是雨量效应, 且河水中除了由降水补给外, 还含有其它水体 (地下水等) 的成份。但月平均降水  $d$  值与月平均河水  $d$  值相差不大, 月平均降水  $d$  值为 13.409 ‰, 月平均河水  $d$  值为 13.157 ‰。

从中国气候区划上看, 卧龙自然保护区大气降水的氘过量参数 ( $d_j$ ) 与皮条河河水的氘过量参数 ( $d_h$ ) 作线性回归分析,  $d_j = 0.584 d_h + 5.331$  ( $R^2 = 0.466$ ,  $F = 8.771$ ,  $n = 12$ ,  $p < 0.05$ )。

河水  $d$  接近大气降水  $d$ , 反应河水在很大程度上受当地季节性大气降水影响, 即河水中有相当比例的大气降水。皮条河河水为大气降水、地下水和冰雪融水的混合体。

## 4 结论

(1) 卧龙地区皮条河河水  $\delta\text{D} \sim \delta^{18}\text{O}$  线性关系为:  $\text{D} = 3.888 \delta^{18}\text{O} - 45.614$ , 河水氘过量参数 ( $d$ ) 与大气降水的氘过量参数 ( $d$ ) 的季节变化趋势基本

一致, 冬春季较高, 夏秋季较低。

(2) 雪水和高山冰雪融水补给河水是有季节性的。雪水和冰雪融水补给河水主要发生在 11 月至翌年 6 月。7—9 月, 冰雪融水补给河水较少。

(3) 不同的降水强度对皮条河河水的  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  的影响不同。当降水量在 0~10 mm 时, 降水  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  的升高 (或降低) 引起河水  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  升高 (或降低), 这种影响在降水后第 3 天才滞后发生, 当降水量在 10~20 mm 时, 这种影响在降水后第 2 天滞后发生。降水量在 20~30 mm 时, 这种影响在降水后第 1~2 天发生。这显示出亚高山暗针叶林植被结构对暗针叶林流域中的河流具有明显的调节作用。

## 参考文献:

- [1] 尹观. 同位素水文地球化学 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1988: 166~183
- [2] Craig H, Gordon L I, Horibe Y. Isotopic exchange effects in the evaporation of water [J]. J Geophys Res, 1963, 68, 5: 079~5: 087
- [3] Lamb S L. Interactions between groundwater and surface water at river banks and the confluence of river [J]. Journal of Hydrology, 2004, 288 (3~4): 312~326
- [4] Clay A, Bradley C, Gerard A J, et al. Using stable isotopes of water to infer wetland hydrological dynamics [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2004, 18 (6): 1164~1173
- [5] Aravena R, Suzuki O. Isotopic evolution of riverwater in the Northern Chile region [J]. Water Resour Res, 1990, 26 (12): 1887~1895
- [6] 程汝楠. 应用天然同位素示踪水量转换 [A]. 见: 刘昌明, 任鸿遵. 水量转换——实验与计算分析 [M]. 北京: 科学出版社, 1988: 33~50
- [7] 尹观, 范晓, 郭建强, 等. 四川九寨沟水循环系统的同位素示踪 [J]. 地理学报, 2000, 55 (4): 487~494
- [8] 田立德, 姚檀栋, 孙维贞. 青藏高原那曲河流域降水及河流水体中氧稳定同位素研究 [J]. 水科学进展, 2002, 13 (2): 206~210
- [9] 林光辉, 柯渊. 稳定同位素技术与全球变化研究 [A]. 见: 李博. 现代生态学讲座 [M]. 北京: 科学出版社, 1995: 161~188
- [10] 石辉, 刘世荣, 赵晓广. 稳定性氢氧同位素在水分循环中的应用 [J]. 水土保持学报, 2003, 17 (2): 163~166
- [11] 徐庆, 安树青, 刘世荣, 等. 四川卧龙亚高山暗针叶林降水分配过程的氢稳定同位素特征 [J]. 林业科学, 2005, 41 (4): 7~12
- [12] 徐庆, 刘世荣, 安树青, 等. 川西亚高山暗针叶林降水分配过程中氧稳定同位素特征 [J]. 植物生态学报, 2006, 30 (1): 83~89
- [13] 徐庆, 刘世荣, 安树青, 等. 卧龙地区大气降水氢氧同位素特征的研究 [J]. 林业科学研究, 2006, 19 (6): 679~686
- [14] 徐庆, 刘世荣, 安树青, 等. 四川卧龙亚高山暗针叶林土壤水的氢稳定同位素特征 [J]. 林业科学, 2007, 43 (1): 8~14