

# 喀斯特表层岩溶带原生森林的水文效应研究

## ——以贵州省茂兰国家自然保护区为例

康志强<sup>1,2,3</sup>

(1. 广西地质勘查总院, 广西 南宁 530023; 2. 国土资源部岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004; 3. 联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 贵州省茂兰国家级自然保护区现存有全球同纬度面积最大的喀斯特原生森林。研究证实, 其森林水文效应较为明显。通过对该区岩溶水实时动态监测及氡氧同位素化学分析, 认为该区喀斯特森林水文效应主要的表现方式是雨季的激发降水及早季生态需水消耗。2010 年位于原生森林区板寨站实测降水量高达 1 710.0 mm, 而位于森林外圈区的尧排站实测降水量仅为 1 066.5 mm。森林激发降水主要来自其对表层带岩溶水的蒸发蒸腾而产生的水汽。森林水文效应使该区表层带岩溶水的循环周期季节变化非常明显, 丰水季节超过了 3 个月, 而枯水季节则约为 2 个月, 说明该区表层带岩溶水受森林生长周期的影响较为明显。

**关键词:** 森林水文效应; 监测; 稳定同位素

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)06-0047-04

中图分类号: S715

## Hydrological Effect of Karst Primal Forest on Epi-karst Zone — A Case Study from Maolan National Nature Reserve of Guizhou Province

KANG Zhi-qiang<sup>1,2,3</sup>

(1. Guangxi General Institute of Geological Exploration, Nanning, Guangxi 530023, China; 2. Key Laboratory of Karst Dynamics, MLR, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. International Research Centre on Karst, UNESCO, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract:** The forest at Maolan National Nature Reserve of Guizhou Province(MNNRG) is the largest karst primal forest area along similar latitude in the world and of great hydrological significance to the region. Its major hydrological effect, according to the tracer technology of hydrogen and oxygen stable isotope, is to increase precipitation in summer and to supply ecological water need in winter. In 2010, the precipitation was 1 710.0 mm within the reserve area and 1 066.5 mm outside. The increased rainfall in the forest mainly came from evapotranspiration of epi-karst water. The epi-karst water cycle demonstrated distinct seasonal variations including a three-month wet season and two-month dry season, suggesting the epi-karst hydrodynamics might be affected significantly by forest growth cycle.

**Keywords:** forest hydrological effect; monitoring; stable isotope

森林植被对水文过程的影响较为显著<sup>[1]</sup>。然而, 有关森林对流域水循环影响的研究在不同地域不同时段得出大相径庭结论<sup>[2]</sup>, 甚至相悖<sup>[3-6]</sup>。2010 年初春, 我国西南地区发生特大旱灾。特别是岩溶区, 水资源严重匮乏, 给当地居民的生活造成了极大的困难。但是, 在贵州荔波县和广西环江县毗邻地带崇山峻岭之间的原生喀斯特森林区域, 大旱之年并无旱象。特别是位于荔波县茂兰国家级自然保护区内, 虽然部分村寨附近的泉流量虽有所减少, 但人畜生活用

水并未受到威胁。在板寨地下河上游部位的拉叭、洞长、碧巴等岩溶洼地, 碧绿的水田更不会让人相信时处特旱时节。以往研究表明<sup>[7]</sup>, 该区原始喀斯特森林植被在一定区域内形成了森林小气候环境, 具有较强的涵水能力, 为生态环境健康提供充足的水源。然而, 对于原生森林是如何影响当地气候的问题上, 以往的研究大部分处于定性的推理上, 并未能提出具体的科学依据。而植被自身水分转移等方面的微观过程研究在探讨宏观水文效应时也遇到尺度转换困难,

收稿日期: 2011-08-13

修回日期: 2012-01-10

资助项目: 中国地质调查局工作项目“中国岩溶碳汇动态评价”(1212011087122)

作者简介: 康志强(1982—), 男(汉族), 甘肃省武山县人, 博士, 工程师, 主要研究方向岩溶水文地质与环境地质。E-mail: zqkang000@126.com。

因而难以与宏观的气象要素进行耦合。

喀斯特森林植被在地理上具有一定的连续性,与林区外围相比,森林对林区水文循环的影响在宏观的岩溶水动态以及水化学成分上具有一定的反映。不同源的地下水中同位素组分差异较大,因而通常被用来示踪地下水的补给来源<sup>[8-12]</sup>。本研究利用氢氧稳定同位素水文地质手段,结合林区内降水及林区岩溶水动态实时监测资料,在不考虑森林系统内水分转换(如植被自身水分耗散等)因素的情况下,从宏观的岩溶水循环的视角来探讨喀斯特原生森林植被对岩溶水循环的影响,为西南岩溶区水资源开发保护和水土保持工作提供参考。

## 1 研究区概况及数据获取

### 1.1 研究区概况

贵州省茂兰国家级自然保护区(下称“保护区”)隶属于贵州省荔波县,面积约 130 km<sup>2</sup>,森林覆盖面积达 91.59%,是全球同纬度面积最大的喀斯特原生森林覆盖区。地貌单元上属于贵州高原南部向广西丘陵平原过渡的斜坡地带,海拔介于 500~1 100 m。

### 1.2 保护区及外围降水量特征

前期研究表明,保护区内外的降水量差别极为明显,如区外的荔波县城年均降水量为 1 272.7 mm<sup>[13]</sup>,而保护区年均降水则高达 1 752.5 mm<sup>[14]</sup>,其差异性极为明显。在本项研究中,于 2009 年 10 月在板寨(处于保护区内部)和尧排(保护区外围)分别修筑了两个自动化监测站。均安装有澳大利亚 Greenspan CDTP300 多参数水化学自动监测仪,具备实时在线监测功能,其降水量监测精度为 0.5

mm。尧排站距荔波县城仅 7 km,与板寨站直线距离约 30 km。根据 2010 年全年的自动监测数据统计得逐月降水量数据(表 1)。

表 1 2010 年板寨、尧排逐月降水量监测结果 mm

| 地区 | 1月    | 2月    | 3月    | 4月    | 5月    | 6月    |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 板寨 | 73.0  | 5.5   | 15.0  | 116.0 | 225.5 | 391.5 |
| 尧排 | 37.0  | 5.5   | 9.0   | 78.0  | 127.0 | 350.5 |
| 地区 | 7月    | 8月    | 9月    | 10月   | 11月   | 12月   |
| 板寨 | 353.0 | 148.5 | 221.0 | 40.0  | 40.0  | 81.0  |
| 尧排 | 207.0 | 73.0  | 68.5  | 2.0   | 42.5  | 66.5  |

据表 1 监测数据显示,2010 年板寨站降水量高达 1 710.0 mm;而尧排站为 1 066.5 mm,仅为板寨的 62%。与以往数据相比,受 2010 年初春大旱的影响,该区降水量小于多年平均值。但是,在喀斯特原生森林覆盖较好的保护区内部,年降水量仍然很大,说明其森林在激发降水方面的水文效应较为明显。然而,另一个问题接踵而至,即喀斯特原生森林激发降水源自哪里,本研究将以氘氧同位素为分析手段对该问题加以探讨。

### 1.3 岩溶水氘氧同位素特征

自 2010 年 5—12 月,分别在研究区 8 个不同岩溶水点采集了稳定同位素样品,其中板王井为表层带岩溶泉水;板寨为地下河明流段监测站处地表水;其余均为地下河干流处饱水带岩溶泉水。水样采集后送中国地质科学院岩溶地质研究所分析测试中心,采用 MAT 253 气体稳定同位素质谱仪测试。标准样品为 V-SMOW;测定精度分别为  $\delta^{18}\text{O} \leq 0.2\text{‰}$  和  $\delta\text{D} \leq 1\text{‰}$ 。分析结果详见表 2。

表 2 研究区岩溶水氢氧稳定同位素测定结果

‰

| 测试指标                  | 取样时间     | 板王泉   | 板寨监测站 | 出口     | 洞亮    | 洞长     | 拉叭    | 坡报    | 拉桥     |
|-----------------------|----------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|
| $\delta\text{D}$      | 20100525 | —     | —     | -36.1  | —     | -39.4  | -44.3 | -37.0 | —      |
|                       | 20100629 | —     | —     | —      | -49.6 | —      | —     | —     | —      |
|                       | 20100727 | -51.3 | -59.0 | —      | -58.4 | -59.9  | -61.1 | -57.4 | —      |
|                       | 20100928 | -61.7 | -64.8 | -65.2  | —     | -67.0  | -65.8 | —     | -69.2  |
|                       | 20101023 | -57.5 | -62.4 | -65.5  | -59.9 | -67.0  | -68.1 | -62.0 | -67.0  |
|                       | 20101130 | —     | -60.7 | —      | —     | —      | —     | —     | —      |
|                       | 20101220 | —     | -59.9 | -60.0  | -58.6 | -65.3  | -67.4 | -60.5 | —      |
|                       | 20100525 | —     | —     | -5.86  | —     | -6.26  | -6.89 | -6.15 | —      |
| $\delta^{18}\text{O}$ | 20100629 | —     | —     | —      | -7.48 | —      | —     | —     | —      |
|                       | 20100727 | -7.63 | -8.58 | —      | -8.67 | -8.83  | -8.89 | -8.38 | —      |
|                       | 20100928 | -9.52 | -9.98 | -10.04 | —     | -10.23 | -9.90 | —     | -10.69 |
|                       | 20101023 | -8.91 | -9.27 | -9.70  | -9.24 | -10.10 | -9.89 | -9.48 | -10.12 |
|                       | 20101130 | —     | -8.63 | —      | —     | —      | —     | —     | —      |
|                       | 20101220 | —     | -8.62 | -8.92  | -8.72 | -9.59  | -9.88 | -8.94 | —      |

## 2 氕氧同位素特征

### 2.1 氕氧稳定同位素变化趋势

从表 2 可以看出,研究区岩溶水中氕氧同位素整体上经历了先变轻后变重的过程,且下降较快而回升较慢,其中最轻的月份出现在 9 月份。这主要是受到降水的影响,初期降水由于受到干旱的影响,同位素含量偏重。而随着降水高峰的到来,雨水同位素也明显变轻,含水层中较轻的同位素占支配地位。与之对应,当降水高峰过后,雨水同位素组分逐渐变重,因而使得含水层中地下水的同位素也日趋变重。但是,由于后期降水在含水层中要和前期的地下水进行混合,且在水量值上也有一定的差异,因而回升过程比较缓慢。另一方面,降水中同位素最负值和泉水中氕氧同位素最负值之间存在一个时间差,该差值也可以认为是含水层中岩溶水从降水补给再到泉水排泄的整个周期。

### 2.2 同位素分馏

根据国际原子能机构(IAEA)提供数据可以统计得到,该区雨水线和保护区岩溶水氕氧同位素资料数据图(图 1)。

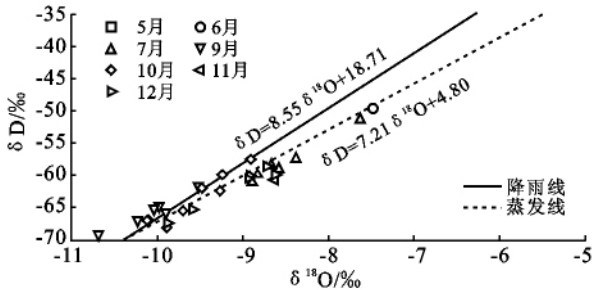


图 1 研究区氕氧稳定同位素关系

通过图 1 可以发现,研究区大部分岩溶水氕氧同位素值位于当地降雨线(LMWL)下方,说明地下水的补给来源为大气降水,在其运移过程中发生蒸发作用而使水中的同位素逐渐变重。但 9 月份的部分水样点却落在当地雨水线的上方,说明这些地下水点的补给来源中降水同位素严重偏轻,而且相对于当地雨水线发生负飘移现象。

有两种情况可以促使该现象现象的发生。其一是盐分较高的卤水中,离子水合作用使水中的重同位素减少<sup>[15]</sup>,如  $\text{CaCl}_2$  溶液中水合水比自由水 $^{18}\text{O}$ 富集 26%,D 富集 341%<sup>[16]</sup>,从而造成  $\delta\text{D}$  值较高的假象;其二是森林区强烈的蒸发蒸腾作用而形成的水汽发生再次降水,在蒸发过程中氧同位素分馏较明显,使其大气降水中同位素整体偏轻,因而补给地下水时,

会使地下水中同位素发生负飘移现象<sup>[17-19]</sup>。很显然,保护区岩溶水均为地矿化度淡水,不存在第一种现象。而喀斯特原生森林强烈的蒸腾蒸发作用产生的水汽,成为形成二次降水的重要来源。

## 3 结果讨论

### 3.1 喀斯特原生森林区水循环特征

分析可知,虽然受 2010 年初春大旱的影响,研究区 2—3 月份降水量极小,致使年降水量相比多年平均降水量有所下降,但相对于无森林地区,保护区的年降水量仍然较大。以板寨和尧排两个监测站的实测数据分别代表森林区及外围大气降水量,则可以简单地勾勒出 2010 年度板寨河流域水循环过程(图 2)。

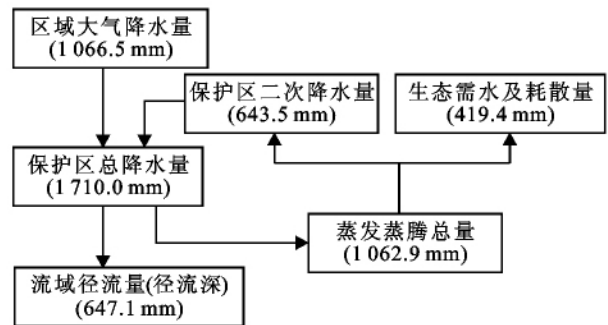


图 2 保护区 2010 年水循环路径

### 3.2 表层带岩溶水循环

毋庸置疑,表层岩溶带是纯碳酸盐岩区最为特殊的含水单元。蕴涵于其中的表层带岩溶水与管流带水资源量的暴起暴落不同。虽然表层岩溶带含水能力有限,但具有一定的调蓄功能,使水资源在表层岩溶带中缓慢渗流。排泄去路也无非 3 种渠道,或补给饱水带岩溶水,或以泉水出露,或用来维持地表生物的健康生长。从板寨监测站获取的降水数据发现,1 月 22 日单次降水量为 42.5 mm。此后受大旱的影响,2—3 月份均未发生有效降水。板寨河于 3 月 24 日发生过短期断流,后因 4 月初强降水天气的来临而使旱情有所缓解。从旱情发生前最后一次强降水到河水流量衰减完全,经历了大约 2 月的时间。

地下水在表层岩溶带的径流过程中,随着蒸发蒸腾以及生物作用,水体氕氧同位素组分逐渐变重。基于这个原理,氕氧同位素常常被作为含水层中岩溶水运移的示踪指标。含水层岩溶水运移周期可以由补给源和排泄处氕氧同位素的最负值间的时间相位差计算。受季风气候的影响,我国西南地区大气降水的同位素组成夏季偏轻而冬季偏重,同位素最负值也通常出现在暴雨高峰季节。根据上述规律,将 2010 年保护区降水高峰和岩溶水同位素最低值相比较,发现

两者在时间上的相位差约为 3 个月。如果再加上整个流量衰减的时间,整个过程将远超过 3 个月,其远大于枯水季节水循环周期。

研究结果表明,保护区表层带岩溶水的循环周期在雨季较长而旱季较短。该区以常绿混合植被为主,虽然其对地下水的蒸发蒸腾作用也有季节性的变化,但其常年均能保持在一定的强度。而岩溶区特有的双重含水结构却使表层带岩溶水补给量有较大的差别。在枯水季节,蒸发蒸腾占据了表层带岩溶水排泄去路的相当一部分,使表层带岩溶水的循环周期变短;丰水季节由于水量较为充沛,径流是表层带岩溶水的主要排泄途径,其周期反应了岩溶水从源到汇的真实运移时间,因而较枯水季节长。

## 4 结 论

(1) 同位素水文地球化学方法结合自动化实施观测技术在水文地质研究中具有明显的优势。特别是在水文地质条件较为复杂、水资源空间分布极为不均的岩溶区中小流域水循环研究工作中,其具有精度高、工作量小等优点,值得进一步推广。

(2) 根据对该区岩溶水气氧同位素的分析发现,该区森林水文效应主要的表现方式是夏季的激发降水及冬季生态需水消耗。森林激发降水主要来自其对表层带岩溶水的蒸发蒸腾而产生的水汽。

(3) 研究区森林水文效应使得表层带岩溶水周期在丰水季节和枯水季节差别较为明显。在丰水季节超过了 3 个月,而枯水季节仅约 2 个月。这主要是因为丰水期以径流排泄为主,而枯水期以供给生态需水为主。

**致谢:**感谢国土资源部岩溶动力学重点实验室何师意研究员在本研究过程中所提的宝贵意见;感谢茂兰国家级自然保护区管理处冉景丞局长、熊志斌高级工程师在样品采集及监测站维护中的帮助;感谢岩溶地质研究所测试中心王华、杨会老师在样品测试过程中给予的帮助。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] McCulloch J S G, Robinson M. History of forest hydrology[J]. *Journal of Hydrology*, 1993,150(2/4):189-216.
- [2] 石培礼,李文华. 森林植被变化对水文过程和径流的影响效应[J]. *自然资源学报*,2001,16(5):481-487.
- [3] 陈军锋,李秀彬. 森林植被变化对流域水文影响的争论[J]. *自然资源学报*,2001,16(5):474-480.
- [4] 程根伟,钟祥浩,何毓成. 森林水文研究中的悖论及最新认识[J]. *大自然探索*,1996,15(2):81-85.
- [5] 李伟民,黄文辉. 森林对河川径流影响关系的研究进展[J]. *广东林业科技*,2007,23(2):81-85.
- [6] 魏晓华,李文华,周国逸,等. 森林与径流关系:一致性和复杂性[J]. *自然资源学报*,2005,20(5):761-770.
- [7] 周政贤. 茂兰喀斯特森林科学考察集[M]. 贵州 贵阳:贵州人民出版社,1987.
- [8] Lee E S, Krothe N C. A four-component mixing model for water in a karst terrain in south-central Indiana, USA. Using solute concentration and stable isotopes as tracers[J]. *Chemical Geology*, 2001,179(1/4):129-143.
- [9] Goldscheider N, Drew D. Methods in Karst Hydrogeology[M]. New York: Taylor & Francis, 2007.
- [10] Adinolfi Falcone R, Falgiani A, Parisse B, et al. Chemical and isotopic ( $\delta^{18}\text{O}\%$ ,  $\delta^2\text{H}\%$ ,  $\delta^{13}\text{C}\%$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ) multi-tracing for groundwater conceptual model of carbonate aquifer (Gran Sasso INFN underground laboratory-central Italy) [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 357(3/4):368-388.
- [11] Fernández-Chacón F, Benavente J, Rubio-Campos J C, et al. Isotopic composition( $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$ ) of precipitation and groundwater in a semi-arid, mountainous area (Guadiana Menor basin, Southeast Spain)[J]. *Hydrological Processes*, 2010,24(10):1343-1356.
- [12] 瞿思敏,包为民,石朋,等. 同位素流量过程线分割研究进展与展望[J]. *水电能源科学*,2006,24(1):80-83.
- [13] 覃晓朗,胡毅,毕波. 荔波县喀斯特地区气候分析[J]. *云南地理环境研究*,2008,20(S1):50-53.
- [14] 郑永飞,陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [15] Clark I D, Fritz P. Environmental Isotopes in Hydrogeology[M]. New York: Taylor & Francis LLC, 1997.
- [16] Sofer Z, Gat J R. The isotope composition of evaporating brines: Effect of the isotopic activity ratio in saline solutions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1975,26(2):179-186.
- [17] Ingraham N L, Matthews R A. Fog drip as a source of groundwater recharge in northern Kenya [J]. *Water Resour. Res.*, 1988,24(8):1406-1410.
- [18] Lauriol B, Clark I D. An approach to determine the origin and age of massive ice blockages in two arctic caves [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1993,4(1):77-85.
- [19] Liu Wenjie, Zhang Yiping, Li Hongmei, et al. Fog drip and its relation to groundwater in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, Southwest China: A preliminary study[J]. *Water Research*, 2005,39(5):787-794.