

西双版纳热带季节雨林林冠截留 雾水和土壤水的关系

刘文杰¹, 李鹏菊^{1, 2}, 李红梅¹, 张一平¹, 段文平¹

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南 勐仑 666303; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:利用2002年1月~2003年12月在西双版纳热带季节雨林观测样地收集的林冠截留滴落雾水、雨水、浅层土壤水和地下水水样,对其氢、氧稳定性同位素比率 δD 和 $\delta^{18}O$ 的测定结果进行了分析,研究了林冠截留雾水对土壤水和地下水的影响。干季(11~翌年4月份),热带雨林林冠截留雾水的稳定性同位素比率、过量氘(d -excess)值明显高于雨水的相应值,表明雾水水汽中包含了区域森林植被蒸发、蒸腾的再循环水汽。林下地表浅层土壤水的稳定性同位素比率介于雾水和雨水的同位素比率之间,表明浅层土壤水来源于雾水和雨水的补给,但是干季浅层土壤水包含更多的雾水。在降雨稀少的干季,浅层土壤水主要来自雾水的补给,表明了林冠滴落的雾水是林下幼树和耐阴树种生长和生存的重要环境因子。干季和雨季(5~10月份)地下水的稳定性同位素比率与雨水的均没有显著差别,表明雾水对地下水的补给没有贡献,其水分补给仅仅来自雨水。

关键词:辐射雾;雾水截留;地下水;土壤水;稳定性同位素;热带季节雨林

文章编号:1000-0933(2006)01-0009-07 **中图分类号:**P463.22, Q143, Q945 **文献标识码:**A

Fog interception and its relation to soil water in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, Southwest China

LIU Wen-Jie¹, LI Peng-Ju^{1, 2}, LI Hong-Mei¹, ZHANG Yi-Ping¹, DUAN Wen-Ping¹ (1. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, CAS, Menghun, Yunnan 666303, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, CAS, Beijing 100039, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 9~15.

Abstract: Intercepted fog water (fog drip) by forest canopy, rainwater, shallow soil water and groundwater were collected during January 2002 and December 2003 for stable isotopic analysis at a tropical seasonal rain forest site in Xishuangbanna, Southwest China. The object of the study is to determine whether the fog interception has influence on soil water and groundwater. Bottle-funnel collectors were used to determine daily amount of intercepted fog water during fog-only events in the rain forest, and fog drip samples were collected monthly interval. Rainwater samples were collected monthly interval on an event basis, by using a collector consisting of a stainless steel funnel mounted on the top of a 72 m high meteorological tower. Rainwater sample was also collected at each rain event when rainfall exceeded 10 mm at the weather station. Shallow soil samples were obtained randomly within the forest site from cores collected to a depth of 20 cm beneath the canopy on each sampling day. Groundwater was collected monthly from the hand-dug wells located in the forest. The stable hydrogen (δD) and oxygen isotope composition ($\delta^{18}O$) of fog drip, rainwater, shallow soil water and groundwater was determined from an isotope ratio mass spectrometer. The results indicated that the fog drip water was thought to contain water that has been evaporated and recycled terrestrial meteoric water (evaporation of

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30570308, 30100019);国家重点基础发展计划资助项目(2003CB415100)

收稿日期:2005-02-07; **修订日期:**2005-11-02

作者简介:刘文杰(1969~),男,河南省人,博士,副研究员,主要从事热带森林水文和气候研究. E-mail: lwj@xtbg.org.cn

致谢:本研究得到了 MENG Fan-Rui 教授(加拿大 New Brunswick 大学)的帮助,刘梦楠先生、李少安先生参加了野外观测工作,谨此致谢

Foundation item: the National Natural Science Foundation of China (No. 30570308, 30100019) and the National Key Project of Basic Research (No. 2003CB415100)

Received date: 2005-02-07; **Accepted date:** 2005-11-02

Biography: LIU Wen-Jie, Ph.D., Associate professor, mainly engaged in forestry hydrology and climatology. E-mail: lwj@xtbg.org.cn

nearby surface waters and canopy interception). The rain was isotopically more depleted. The fog drip was consistently more enriched than the rain during both the dry season and rainy season. The shallow soil water commonly had composition between the fog drip and rain, suggesting that the shallow soil water is a mixture of the two waters. However, the soil water collected in dry season appeared to contain more fog drip water than that collected in rainy season. The detection of fog drip water in the shallow soil indicates that fog drip may in dry season be an important factor in growth and survivability of understory species and seedlings. Therefore, neglect of the contribution from horizontal precipitation (fog drip) will make calculations of the water balance inaccurate in the forest. The groundwaters in both seasons were characterized by an isotopic composition similar to that of rain. The stable isotopic compositions of groundwater collected during both seasons also showed little seasonal variations, indicating that the groundwater has a constant and homogeneous source. These waters mainly located on the LMWL (Local Meteoric Water Line) and plotted in the rain isotopic field, suggesting that they were not affected by evaporation during infiltration in the recharge area and were recharged by rainwater. The groundwaters also displayed less fluctuation in isotopic compositions than the rain and fog drip, indicating a long residence time for these groundwaters. These variations in isotopic compositions of groundwater are probably the result of local recharge events since groundwater is believed to be recharged only by rainwater. Comparison of the $\delta^{18}\text{O}$ of groundwater with rainwater indicated that the seasonal response of groundwater lags behind the seasonal change in rainwater because the groundwater has a greater residence time than soil water. For example, the rainwater reached its greatest $\delta^{18}\text{O}$ value in April 2003 when the $\delta^{18}\text{O}$ value of groundwater was still near their minimum values for the year, and reached its lowest $\delta^{18}\text{O}$ value in the September when the groundwater was near their maximum. This isotopic pattern suggests fog drip water does not play a significant role as a source of recharge for the groundwater. This groundwater was thought to be recharged solely by rainwater. Our results also demonstrate the importance of understanding the impacts of climate factors, and have important implications for ecologists and hydrologists interested in fog-inundated ecosystems and the plants which inhabit them.

Further detailed studies which should cover the entire water cycle and water use by plants in this ecosystem are warranted to investigate the importance of the fog drip to the forest. The Xishuangbanna area is suitable for these studies since dense fog almost occurs every day and little rainfall falls during dry season (November to April).

Key words: radiation fog; fog interception; groundwater; soil water; stable isotopes; tropical seasonal rain forest

雾降水 (Fog interception, Horizontal precipitation) 一直被认为是一种极其重要的水文和化学输入项,其生态效应是多方面的^[1-3]。研究表明,当林冠截留雾水滴落到林冠下的地表时,土壤水分含量明显升高^[4-7],而当去除部分林冠或森林遭到砍伐后,进入森林的雾水和由森林流出的溪水都将明显减少^[4,8]。雾的形成不仅凝结水汽^[2]、沉降养分进入森林^[3],同时也释放了凝结潜热而减弱了降温强度^[9],及缩短了日照时数而消减蒸发散,这对缓解植物干旱、补充养分不足等方面具有重要作用^[10]。

由于靠近地表的雾形成于饱和空气凝结的早期阶段,因此与形成于后期的降雨相比,雾水中的氢、氧稳定性同位素比率(δD 和 $\delta^{18}\text{O}$)明显高于雨水的相应值^[11-14]。对部分森林生态系统而言,虽然雾水的来源可能主要来自森林的蒸腾水汽(其实质也是雨水补充后的土壤水),而植物吸收土壤水进行蒸腾作用并不改变土壤水的同位素比率^[6,13],但由于雾特殊的形成机制,雾水仍具有与土壤水显著不同的同位素比率值^[12,14]。因此,根据雨水、雾水、土壤水和地下水的同位素比率值可以判断土壤水和地下水的补充水源^[4,11]。Ingraham 等^[15]就此指出,稳定性同位素技术是现今可采用的示踪雾水对土壤水或地下水贡献的最好方法。他们的一项研究表明,在肯尼亚北部和加利福尼亚北部 Point Reyes 半岛的森林内,雾水都参与了土壤水和地下水的水分补给^[12]。Scholl 等^[7]采用此技术对夏威夷 Maui 岛上的森林集水区水源补给的研究指出,雾水是高海拔处森林溪流和土壤水的主要补给水源。

与世界其它热带森林分布区相比,西双版纳热带森林是在水分、热量均不足条件下分布的热带北缘森林群落,由于地处季风气候特点的热带北缘,热带森林受到了季节干旱和冬季低温的影响^[16]。本区年降雨量 1500~1600 mm,但干季(11~翌年 4 月份)雨量偏少,不足全年的 13%。但本区是有名的静风、多雾区,雾季

和干热季多有辐射雾出现。尤其是在热带雨林覆盖区,辐射雾更是频繁出现。因而,雾所塑造的温湿环境必然对热带森林的生存和发展起到一定的作用。对本区热带季节雨林林冠截留雾水的研究表明^[17, 18],全年雾水截留量达 89.4 mm。然而,有关热带季节雨林林冠截留的雾水对土壤水和地下水的影响并未涉及。本文利用 2002 年 1 月至 2003 年 12 月在热带季节雨林内采集的截留雾水、雨水、浅层土壤水和地下水的稳定性同位素比率(δD 和 $\delta^{18}O$)资料,研究西双版纳热带季节雨林林冠截留雾水对土壤水的影响,为热带森林的水分和养分循环规律的深入研究提供参考。

1 样地自然环境及群落特征

观测点设在中国生态系统研究网络西双版纳热带季节雨林定位观测样地(热带雨林面积约 3 km²)内(21°56'N, 101°15'E),海拔 750 m,观测点与雨林边缘平坝区相对高差约 150 m。本区属热带北缘西南季风气候,一年中有干季(包括雾季(11~翌年 2 月份)和干热季(3~4 月份))和雨季(5~10 月份)之分^[19]。年均气温 21.7℃,年均风速 0.7 m/s,年均相对湿度 86%,年降雨量 1600~1700 mm(10a 平均),其中雨季占 83%~87%,干季占 13%~17%。

观测样地所在的热带季节雨林,其群落高度 35.7 m,乔木层按高度可分为 3 层:上层优势种为番龙眼(*Pometia tomentosa*)、千果榄仁(*Terminalia myriocarpa*);中层常见种有云南玉蕊(*Barringtonia macrostachya*)、大叶白颜树(*Gironniera subaequalis*)、山蕉(*Mitrephora maingayi*)等;下层树种主要有染木(*Saprosma ternatum*)、狭叶巴戟(*Morinda angustifolia*)、玉叶金花(*Mussaenda* sp.)等,群落结构特征详见文献^[20]。

2 研究方法

在热带季节雨林林下距地表 0.7 m 高处水平随机架置 8 个口径 0.8 m 的圆形漏斗,各漏斗出水口处悬挂 1000 ml 的塑料瓶承接林冠滴落雾水。塑料瓶内 503 ml 承接水换算到单位面积上等于 1 mm 的林冠滴落雾水。在观测期间,每日上午 9:00~10:00(林冠雾水停止滴落时)测定林冠滴落雾水的水量。用于同位素分析的滴落雾水水样的收集时间是观测当天的早晨 8:00 左右雾最浓重时,此时视为收集的雾水中没有同位素蒸馏富集作用发生^[21],收集频度是每月 1 次(2002 年 1 月~2003 年 12 月),但 2002 年 8、9 月份和 2003 年 7、8、9 月份没有收集到雾水。

雨水水样收集是采用季节雨林内观测铁塔(72 m)顶部的雨量筒承接的雨水传输到林下塑料筒进行收集,每月采集 1 次观测当日的雨水水样。同时,在距季节雨林 5 km 处的气象观测站分别采集日降水量大于 10 mm 的所有雨水水样。采集时间是每次雨后或夜间降雨的次日清晨,以减少蒸发作用的影响^[21]。

土壤样品采用土钻法,距林下地表 20 cm 深土壤随机钻取 6 个土样混合,样品带回实验室处理,每月 1 次。地下水水样则直接从地下水位测井内采集,3 个地下水位测井的水样混合,每月采集 1 次。

林冠滴落雾水、雨水、地下水水样用 100 ml 塑料瓶带回实验室,在冰箱内冰冻保存。浅层土壤水采用真空蒸馏法^[22]从钻取的土壤样品中提取,并冰冻保存在冰箱内。在观测的两年内,分 3 批共采集了 23 个林冠滴落雾水水样、22 个林冠顶部雨水水样、92 个气象站雨水水样、24 个浅层土壤水和地下水水样。

所有水样的氢、氧稳定性同位素比率的测定是分前后 3 批寄送中国科学院兰州分院测试中心地球化学部采用稳定性同位素气体质谱仪(Finnigan MAT-252,德国)进行。氢、氧稳定性同位素的比率值是以相对于 VSMOW(Vienna Standard Mean Ocean Water)的千分率(‰)给出^[23],以 δD 和 $\delta^{18}O$ 分别表示,精度分别为 $\pm 2‰$ 和 $\pm 0.2‰$ 。

3 结果

3.1 雨水的 $\delta^{18}O$ 和 δD 变化

在观测期间(2002 年 1 月~2003 年 12 月),雨水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 变化非常大,其中, $\delta^{18}O$ 介于 $-16.6‰$ 与 $+2.7‰$ 之间, δD 介于 $-120‰$ 与 $+23.7‰$ 之间(图 1)。根据这些雨水水样的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值建立的本地区大气水线(Local meteoric water line, LMWL)如图 1 中所示,其方程为: $\delta D = 7.96\delta^{18}O + 8.67$ ($R^2 = 0.97$; $n = 92$),与 IAEA/WMO^[24] 根据东南亚 60 个水样站测得的区域大气水线($\delta D = 7.92\delta^{18}O + 9.20$)比较接近。由于干季和雨

季降雨性质和水汽的来源不同,地区大气水线 LMWL 也相应不同。其中,雨季的地区大气水线 LMWL 为 $\delta D = 7.85\delta^{18}O + 7.21$ ($R^2 = 0.96$; $n = 83$),干季的地区大气水线 LMWL 为 $\delta D = 8.15\delta^{18}O + 13.79$ ($R^2 = 0.97$; $n = 9$)。可看出,雨季降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 的关系斜率略小于 8,截距小于 10;干季降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 的关系斜率略大于 8,截距远大于 10。通过对加权平均的雨水 $\delta^{18}O$ 与月降水量 (P_{mon}) 和月平均气温的相关分析发现, $\delta^{18}O$ 与月降水量(图 2)呈较显著的负相关关系($\delta^{18}O = -0.029 \times P_{\text{mon}} - 3.9$; $R^2 = 0.52$; $n = 23$), $\delta^{18}O$ 与月平均气温没有显著相关($R^2 = 0.19$; $n = 23$)。

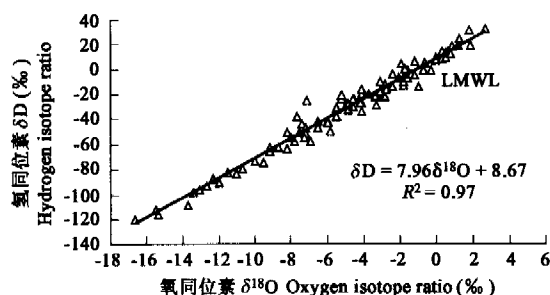


图 1 西双版纳热带季节雨林地区雨水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 的关系(2002 ~ 2003 年)

Fig.1 δD versus $\delta^{18}O$ relationship of rainwater samples collected at the tropical forest site in Xishuangbanna, SW China during 2002 ~ 2003

LMWL 为拟合的地区大气水线 The local meteoric water regression line (LMWL) drawn through these data is also shown

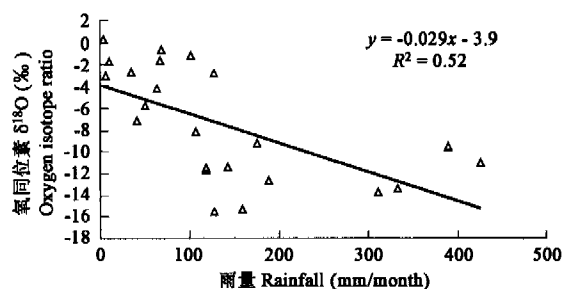


图 2 西双版纳热带季节雨林地区雨水的月加权平均 $\delta^{18}O$ 和月降水量的关系

Fig.2 Relationship between $\delta^{18}O$ of rainwater (monthly means) and monthly rainfall collected at the tropical forest site in Xishuangbanna, SW China during 2002 ~ 2003

3.2 林冠滴落雾水、土壤水和地下水的 $\delta^{18}O$ 和 δD 变化及其关系

图 3 是雨水的月加权平均 $\delta^{18}O$ 和 δD 关系散点图,以及热带季节雨林林冠滴落雾水、浅层土壤水、地下水的 $\delta^{18}O$ 和 δD 关系散点图。可看出,林冠滴落雾水的稳定性同位素值均明显的高于雨水的相应值。其中,雾水的 δD 变化为 $-30‰ \sim -27‰$, $\delta^{18}O$ 的变化为 $-6.2‰ \sim 1.9‰$,其拟合方程为 $\delta D = 7.64\delta^{18}O + 14.32$ ($R^2 = 0.82$; $n = 20$);雨水的 δD 变化为 $-94‰ \sim -45‰$, $\delta^{18}O$ 的变化为 $-13.2‰ \sim -6.8‰$ 。雾水的对应散点几乎全分布于地区大气水线 LMWL 以上,而雨水、浅层土壤水、地下水的对应散点则大部分分布于 LMWL 线上。同时可看出,浅层土壤水对应散点的分布区域介于雾水和雨水之间,其 δD 的变化为 $-70‰ \sim -9‰$, $\delta^{18}O$ 的变化为 $-10.3‰ \sim -2.6‰$;而地下水对应散点的分布区域几乎与雨水的相同,其 δD 变化为 $-89‰ \sim -49‰$, $\delta^{18}O$ 的变化为 $-12.2‰ \sim -7.6‰$ 。统计也发现,地下水的稳定性同位素值与雨水的稳定性同位素值没有显著的差别($p > 0.05$)。

图 4 是干季(11 ~ 翌年 4 月份)和雨季(5 ~ 10 月份)雨水、林冠滴落雾水、浅层土壤水、地下水的 $\delta^{18}O$ 和 δD 关系散点图。可看出,浅层土壤水对应散点的分布区域在干季明显更靠近于雾水的分布区域(图 4a),而在雨季则更靠近于雨水的分布区域(图 4b)。雨季,雨水、林冠滴落雾水、浅层土壤水、地下水的稳定性同位素值均低于干季的相应值,其中,林冠滴落雾水和浅层土壤水表现最为明显。同时还可看出,与干季相比,雨季林冠滴落雾水的稳定性同位素值变化范围较小。对地下水的稳定性同位素而言,雨季和干季没有差别。

4 讨论

4.1 雨水和雾水的稳定性同位素

图 3 表明,雾水与雨水具有明显不同的稳定性同位素值 $\delta^{18}O$ 和 δD 。这种差别与产生降水(降雨和雾)的水汽来源及其所经历的过程有关,同时与发生凝结、出现降水的大气状况密不可分^[24, 25]。国外许多研究也发现相似的结果,即:雾水与雨水具有明显不同的 $\delta^{18}O$ 和 δD ^[6, 11, 12, 14, 15]。

由于横段山脉的哀牢山和无量山的阻挡作用,北方冷空气几乎无法达到西双版纳地区。因此,整个干季(11 ~ 翌年 4 月份),本地区空气干燥、天空晴朗、降雨稀少。然而,在干季这种静风、晴稳的大气状况下,由于

夜间地表的强烈辐射降温,辐射雾几乎天天出现,可从 23:00 ~ 24:00 持续到次日上午 11:00 ~ 12:00^[18]。这表明,形成雾水的水汽来源可能包含本区域植被层的再循环蒸发、蒸腾水汽。这些水汽与大气中原有的水汽混合后,在夜间辐射降温作用下,大气极易凝结和形成大雾。与降雨相比,由于雾滴的凝结是在较高温度下的地表层进行(降雨是在高空低温大气中产生),因此,根据降水的稳定性同位素蒸馏原理,雾水具有明显较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值^[12, 13]。根据雾水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 拟合的直线 ($\delta\text{D} = 7.64\delta^{18}\text{O} + 14.32$) 几乎与本地区大气水线 LMWL ($\delta\text{D} = 7.96\delta^{18}\text{O} + 8.67$) 平行,但其截距(也称 d -excess, 过量氘)14.32 明显高于后者。这说明,雾水中的水汽大部分来自区域蒸发散。根据计算的 2002 ~ 2003 年雾水和雨水的过量氘变化,发现干季雾水和雨水的过量氘均大于 10(全球大气水线 GMWL 的截距^[26]),在干季后期(3 ~ 4 月份)分别达到 18 和 16。这说明,干季地被层的直接蒸发散对大气的水汽输入非常明显。同时,干季雨水的高 $\delta^{18}\text{O}$ 值也表明,区域再循环的蒸发散水汽(地表蒸发和森林林冠截留降水的蒸发)也是降雨的主要水汽来源,尽管雨滴在到达雨量筒前的蒸发也是导致 $\delta^{18}\text{O}$ 值略为偏高的一个原因^[24]。

干季和雨季具有不同的大气水线 LMWL, 分别为 $\delta\text{D} = 8.15\delta^{18}\text{O} + 13.79$ 和 $\delta\text{D} = 7.85\delta^{18}\text{O} + 7.21$ 。雨季大气水线 LMWL 的斜率几乎与 IAEA/WMO 在东南亚测得的大气水线 LMWL 的斜率相同^[24], 这表明,雨季各月的降雨是决定一个地区大气水线 LMWL 的主要部分。对于干季而言,大气水线 LMWL 的斜率大于 8, 这一方面是由于不同来源水汽(区域再循环的蒸发水汽和大气中原有水汽)的混合所致^[24, 27], 另一方面,可能也与干季雨水水样个数较少而代表性较差有关。IAEA 的数据也同样表明^[28], 在一个地区大气水线 LMWL 的斜率大于 8 的情况下,雨水中也可达到较高的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值和较高的过量氘值。

4.2 土壤水、地下水与雾水的关系

图 3 和图 4a 表明,浅层土壤水的稳定性同位素的对应散点大部分分布于大气水线 LMWL 上,并且介于雾水和雨水之间。由于研究样地是林冠茂密的热带雨林,因此,浅层土壤的蒸发分馏作用不可能是导致浅层土壤水的稳定性同位素明显高于雨水的原因。另一方面,如果林下地表土壤有微弱的蒸发分馏作用,因蒸发导致明显的稳定性同位素富集也似乎是不可能的。干季,浅层土壤水的稳定性同位素明显高于雨水和靠近雾水的分布区域,说明浅层土壤水来自雾水和雨水,并以雾水的水分补给为主。这与已有的观测结果非常符合^[17, 18],干季几乎每日清晨,热带雨林林冠截留茫茫的浓雾,滴落的雾水如同小雨一般,嘀哒不断,浸湿了地表土壤和林下枝叶,因而浅层土壤水包含有大量的滴落雾水,并具有较高的稳定性同位素值。对浅根树种(林

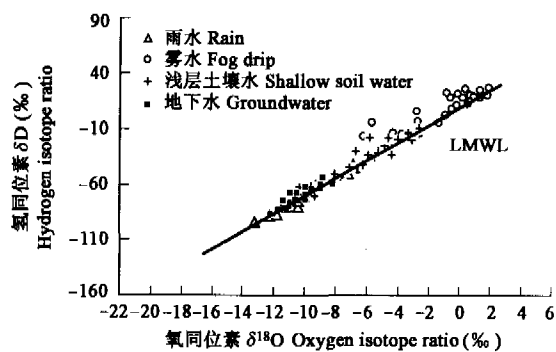


图 3 热带季节雨林地区雨水的月加权平均 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 及雾水、浅层土壤水和地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 关系散点图

Fig.3 Stable isotopic compositions of rain (monthly means), fog drip, shallow soil water and groundwater samples collected at the tropical forest site shown along with the LMWL

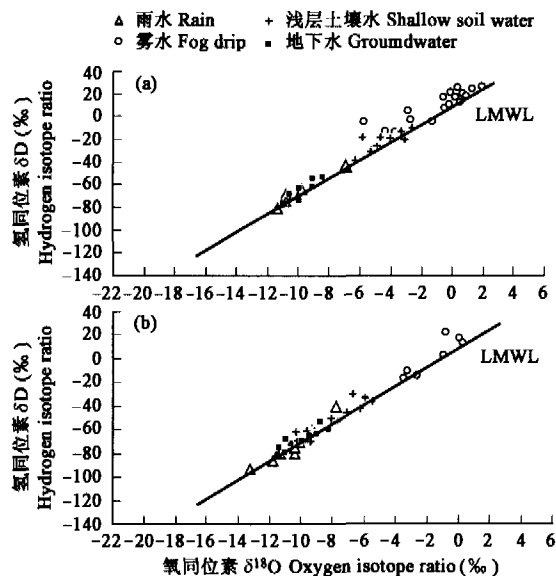


图 4 热带季节雨林地区干季(a)和雨季(b)雨水的月加权平均 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 及雾水、浅层土壤水和地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 关系散点图

Fig.4 Stable isotopic compositions of rain (monthly means), fog drip, shallow soil water and groundwater samples collected in (a) dry season and (b) rainy season, each shown along with the LMWL

下幼树和耐阴树种)而言,雾水是干季少雨季节主要的水分供应者,也为其生存和生长创造了有利、少变的阴湿环境。

雨季,浅层土壤水的稳定性同位素对应散点也同样介于雾水和雨水之间,但更靠近于雨水的分布区域(图 4b)。此时的浅层土壤水可能来自雨水的补给,其较高的稳定性同位素可能是由于雨水在渗透到深层土壤前的蒸发富集作用所致。但是,由于浅层土壤水的稳定性同位素对应散点分布于大气水线 LMWL 上,而不是沿蒸发线(Evaporation line)分布^[29],因而没有显示出任何蒸发富集作用。一个可能的解释是,浅层土壤水中包含雾水,但是与干季相比,其量较少。观测也发现^[18],大雾和较多的林冠截留雾水主要出现在干季,热带雨林林冠全年截留雾水 89.4 mm,其中干季占 86%,这说明,雾和雾水在干季对热带雨林更为重要。浅层土壤中包含雾水这一结果也同样被 Ingraham 等^[14]在加利福尼亚 Point Reyes 半岛的针叶林内发现,他们的结果还表明,植物通过其浅层根直接吸收了雾水。和 Ingraham 等的研究相似,Dawson 对此森林的研究表明^[21],与林冠大树相比,林下幼树和耐阴树种可利用更多的雾水,并与其浅根分布形式有关,因为林下幼树和耐阴树种大都是浅根生长,而林冠大树则是深根生长。

地下水的稳定性同位素在雨季和干季没有差别(图 4),说明地下水有一致、稳定的水源供应。地下水的稳定性同位素对应散点主要分布于大气水线 LMWL 上和雨水的分布区域,表明雨水渗透到地下时没有受蒸发分馏作用的影响,且其水分补给来自雨水。同时,与雨水和雾水相比,地下水的稳定性同位素也显示出较小的波动性(图 4),说明地下水也具有较长的滞留时间,其波动主要来自大降水过程的补给影响^[30]。通过地下水与雨水的稳定性同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值对比发现,地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 季节变化明显滞后于雨水的季节变化。例如,雨水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 2003 年 4 月达到最大,而地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值此时仍是处于较低值;雨水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 9 月份达到最小,但地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值此时接近最大值。由于雨季和干季地下水的稳定性同位素对应散点在雨水的分布区域(图 3、图 4),说明雾水对地下水没有贡献。在智利北部的热带森林内,Aravena 等^[11]也发现地下水与雨水具有相似的稳定性同位素值,而 Ingraham 等^[14]在加利福尼亚北部森林内的研究表明,地下水的补给主要来自雨水,但也有林冠滴落雾水的贡献。

5 结论

通过分析西双版纳热带季节雨林内 2a(2002~2003)的雨水、林冠滴落的雾水、浅层土壤水和地下水的稳定性同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 表明,干季(11~翌年 4 月份)和雨季(5~10 月份)雾水的稳定性同位素值明显高于雨水,认为雾水中包含区域再循环的蒸发水汽;浅层土壤水的稳定性同位素值介于雾水和雨水之间,其来源是雾水和雨水,但是干季浅层土壤水包含更多的雾水;干季浅层土壤水主要来自雾水表明,林冠滴落的雾水是林下幼树和耐阴树种生长和生存的重要环境因子;干季和雨季地下水的稳定性同位素值与雨水的没有显著差别,表明雾水对地下水的补给没有贡献,其水分补给仅仅来自雨水。

仅研究了雾水对土壤水和地下水的影响,进一步的深入研究应该包括整个生态系统中的水分循环、植物对不同水源(雾水、雨水、不同深度土壤水、地下水)的利用状况,从而揭示雾水对热带季节雨林生态系统的生存和发展所起到的重要作用。

References:

- [1] Dallard G J, Unsworth M H, Harve M J. Pollutant transfer in upland regions by occult precipitation. *Nature*, 1983, 302: 241~243.
- [2] Bruijnzeel L A, Waterloo M J, Proctor J, *et al.* Hydrological observations in montane rain forests on Gunung Silam, Sabah, Malaysia, with special reference to the 'Mussenerhebung' effect. *Journal of Ecology*, 1993, 81: 145~167.
- [3] Bruijnzeel L A. Hydrology of tropical montane cloud forest: a reassessment. *Land Use and Water Resources Research*, 2001, 1: 1~18.
- [4] Ingwersen J B. Fog drip, water yield, and timber harvesting in the Bull Run municipal watershed, Oregon. *Water Resources Bulletin*, 1985, 21: 269~273.
- [5] Schemenauer R S, Fuenzalida H, Cereceda P. A neglected water resource: the Camanchaca of South America. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1988, 69: 138~147.
- [6] Dawson T E, Ehleringer J R. Streamside trees that do not use stream water. *Nature*, 1991, 350: 335~337.

- [7] Scholl M A, Gingerich S B, Tribble G W. The influence of microclimates and fog on stable isotope signatures used in interpretation of regional hydrology: East Maui, Hawaii. *Journal of Hydrology*, 2002, 264: 170 ~ 184.
- [8] Harr R D. Fog drip in the Bull Run municipal watershed, Oregon. *Water Resources Bulletin*, 1982, 18: 785 ~ 789.
- [9] Liu W J, Zhang K Y, Zhang G M, *et al.* The microclimate of dew and fog formation on canopy layer in the dry season in Xishuangbanna tropical rain forest. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(3): 165 ~ 170.
- [10] Weathers K C, Likens G E. Clouds in Southern Chile: an important source of nitrogen to nitrogen-limited ecosystems. *Environmental Science and Technology*, 1997, 31: 210 ~ 213.
- [11] Aravena R, Suzuki O, Pollastri A. Coastal fog and its relation to groundwater in the IV region of northern Chile. *Chemical Geology*, 1989, 79: 83 ~ 91.
- [12] Ingraham N L, Matthews R A. A stable isotopic study of fog: the Point Reyes Peninsula, California, U.S.A. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, 1990, 80: 281 ~ 290.
- [13] Gonfiantini R, Longinelli A. Oxygen isotopic compositions of fog and rains from North Atlantic. *Experientia*, 1961, 18: 222 ~ 223.
- [14] Ingraham N L, Matthews R A. The importance of fog-drip water to vegetation: Point Reyes Peninsula, California. *Journal of Hydrology*, 1995, 164: 269 ~ 285.
- [15] Ingraham N L, Matthews R A. Fog drip as a source of groundwater recharge in northern Kenya. *Water Resources Research*, 1988, 24: 1406 ~ 1410.
- [16] Zhu H. Research of community ecology on *Shorea chinensis* forest in Xishuangbanna. *Acta Botanica Yunnanica*, 1992, 15(1): 34 ~ 46.
- [17] Liu W J, Zhang Y P, Liu Y H, *et al.* Comparison of fog interception at a tropical seasonal rain forest and a rubber plantation in Xishuangbanna, Southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2379 ~ 2386.
- [18] Liu W J, Meng F R, Zhang Y P, *et al.* Water input from fog drip in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, Southwest China. *Journal of Tropical Ecology*, 2004, 20: 517 ~ 524.
- [19] Zhang K Y. An analysis on the characteristics and forming factors of climates in the south part of Yunnan. *Acta Meteorologica Sinica*, 1963, 33(2): 210 ~ 230.
- [20] Cao M, Zhang J H, Feng Z L, *et al.* Tree species composition of a seasonal rain forest in Xishuangbanna, Southwest China. *Tropical Ecology*, 1996, 37: 183 ~ 192.
- [21] Dawson T E. Fog in the California redwood forest: ecosystem inputs and use by plants. *Oecologia*, 1998, 117: 478 ~ 485.
- [22] Ingraham N L, Shadel C. A comparison of the toluence distillation and vacuum/heat methods for extracting soil water for stable isotopic analysis. *Journal of Hydrology*, 1992, 140: 371 ~ 387.
- [23] Coplen T B. Reporting of stable hydrogen, carbon and oxygen isotopic abundances. *Pure and Applied Chemistry*, 1994, 46: 273 ~ 276.
- [24] Araguás-Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103: 28721 ~ 28742.
- [25] Araguás-Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture. *Hydrological Processes*, 2000, 14: 1341 ~ 1355.
- [26] Craig H. Isotope variations in meteoric waters. *Science*, 1961, 133: 1702 ~ 1703.
- [27] Wei K Q, Lin R F. The influence of the monsoon climate on the isotopic composition of precipitation in China. *Geochimica*, 1994, 23: 33 ~ 41.
- [28] IAEA. Statistical treatment of environmental isotope data in precipitation. Technical Report Series No. 331. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1992. 784.
- [29] Martinelli L A, Victoria R L, Sternberg L S L, *et al.* Using stable isotopes to determine sources of evaporated water to the atmosphere in the Amazon basin. *Journal of Hydrology*, 1996, 183: 191 ~ 204.
- [30] Burns D A, McDonnell J J. Effects of a beaver pond on runoff processes: comparison of two headwater catchments. *Journal of Hydrology*, 1998, 205: 248 ~ 264.

参考文献:

- [9] 刘文杰,张克映,张光明,等. 西双版纳热带雨林干季林冠层雾露形成的小气候特征研究. *生态学报*, 2001, 21(3): 165 ~ 170.
- [16] 朱华. 西双版纳望天树林群落生态研究. *云南植物研究*, 1992, 15(1): 34 ~ 46.
- [17] 刘文杰,张一平,刘玉洪,等. 热带季节雨林和人工橡胶林林冠截留雾水的比较研究. *生态学报*, 2003, 23(11): 2379 ~ 2386.
- [19] 张克映. 滇南气候特征及其形成因子的初步分析. *气象学报*, 1963, 33(2): 210 ~ 230.