

天目山森林生态系统大气水汽稳定同位素组成的影响因素

牛晓栋¹, 江 洪^{1,2}, 王 帆²

(1. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 临安 311300; 2. 南京大学
国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093)

摘要: 稳定同位素技术是进一步揭示生态系统碳/水交换对环境条件变化响应的重要手段。学者将此技术用于农田生态系统的较多, 关于对森林生态系统的研究几乎没有。利用大气水汽稳定同位素观测系统和常规气象观测系统对浙江省天目山常绿落叶阔叶混交林生态系统进行观测。以 2013 年 8 月 1 日到 2013 年 10 月 1 日观测的数据为依据, 对天目山森林生态系统大气水汽稳定同位素组成(δ_v)的影响因素及其相互关系进行了研究。结果显示: 在森林生态系统中, 大气降水、环境温度、土壤 5 cm 温度与大气水汽稳定同位素组成的相关性显著($P < 0.05$)。土壤 5 cm 温度、环境湿度、平均风速、净辐射与大气水汽稳定同位素组成的相关性不显著。和农田生态系统相比, 森林生态系统中对大气水汽稳定同位素组成产生影响的环境因素有一定差别。图 13 参 17

关键词: 森林生态学; 大气水汽稳定同位素组成; 森林生态系统; 影响因素; 相关性; 天目山

中图分类号: S718.51 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2015)03-0327-08

Stable isotope composition for atmospheric water vapor in the forest ecosystem of Mount Tianmu

NIU Xiaodong¹, JIANG Hong^{1,2}, WANG Fan²

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China)

Abstract: Stable isotope techniques, one of the most effective techniques for understanding carbon and water relationships in terrestrial ecosystems, are commonly used domestically in agricultural but not in forest ecosystems. To establish long-term continuous observations with flux towers in forest ecosystems and to reveal stable isotopic composition of atmospheric water vapor for regional characteristics in ecosystem water balance research, a subtropical evergreen and deciduous broadleaf mixed forest observation tower was established for Mount Tianmu in Zhejiang Province. The tower detected hydrogen and oxygen isotopes and had an in situ measurement system based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS). Also multi-layer gradients for temperature and humidity, wind speed, and radiation using conventional meteorological instruments were operational from December 2012 onward. Based on data observed from August to September 2013, the stable isotope composition of atmospheric water vapor influencing factors and their relationships were analyzed. Results showed that atmospheric rainfall, air temperature, soil temperature at 5 cm soil depth were important environmental factors in the forest ecosystem in Mount Tianmu; the air temperature and water vapor stable isotope

收稿日期: 2014-03-22; 修回日期: 2014-12-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61190114 和 41171324); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110091110028); 科技部国家科技基础条件平台项目(2005DKA32300); 浙江省重点科技创新团队资助项目(2010R50030)

作者简介: 牛晓栋, 从事森林生态系统碳通量及大气水汽稳定同位素观测研究。E-mail: 764854761@qq.com。

通信作者: 江洪, 教授, 博士, 博士生导师, 从事全球变化生态、生态系统碳-氮-水循环研究。E-mail: jianghong_china@hotmail.com

composition were fitted in a linear relationship, while the soil temperature at 5 cm soil depth were fitted in a polynomial relationship with water vapor stable isotope composition, and also the statistics showed that the correlation was admirable. Thus, compared to agricultural ecosystems, water vapor stable isotope composition factors in this forest ecosystem had little influence. [Ch, 13 fig. 17 ref.]

Key words: forest ecology; stable isotopic composition of atmospheric water vapor; forest ecosystem; influencing factors; relativity; Mount Tianmu

水和水的循环对于生态系统具有特别重要的意义。水的主要循环路线是从地球表面通过蒸发进入大气圈，同时又不断从大气圈通过降水而回到地球表面。水在蒸发和凝结时，组成水分子的氢和氧同位素含量将产生微小的变化，这种现象被称为同位素分馏作用^[1]。生态系统水分向大气的输出包括蒸腾和蒸发2个过程，统一称为地表蒸散^[2]。利用微气象法，人们已经能够测定生态系统水汽通量，但是不能精确量化蒸散通量中的蒸腾和蒸发对水汽通量变化的相对贡献。稳定性同位素贯穿于生态系统复杂的生物、物理、化学过程中，能够在时间和空间尺度上整合反映生物生理生态过程对环境变化的响应，并逐渐成为人们深入了解生态系统对环境变化响应的重要工具。20世纪90年代以来，已有学者将稳定同位素技术运用在生态系统的碳水循环研究方面^[3-6]。随着激光痕量气体分析仪技术的发展，实现了大气水汽稳定同位素组成(δ)的原位连续观测^[7]。结合Keeling Plot技术可以更深入地了解生态系统水循环的过程^[8]。近年来，一些学者也运用此技术成功区分了地表蒸散量，但大多集中在暖温带农田生态系统^[9-10]。对森林生态系统的大气水汽稳定同位素组成的测定及地表蒸散分割的研究较少^[11]。森林生态系统的环境相较于农田有很大不同，因此，研究森林生态系统中气象因素对于大气水汽稳定同位素组成的影响对于区分森林生态系统蒸散组分有重要的意义。

1 研究方法

1.1 试验地概况

研究区位于浙江天目山森林生态系统国家定位观测研究站($30^{\circ}18'30''\sim30^{\circ}24'55''N$, $119^{\circ}24'47''\sim119^{\circ}28'27''E$)，面积为4 284 hm²。主峰仙人顶，海拔为1 506 m。气候具有中亚热带向北亚热带过渡的特征，受海洋暖湿气流的影响较深，形成季风强盛，四季分明，气候温和，雨水充沛，光照适宜且复杂多变的森林生态气候^[12]。自山麓至山顶，年平均气温为14.8~8.8 °C，最冷月平均气温3.4~2.6 °C，极端最低气温-13.1~20.2 °C，最热月平均气温28.1~19.9 °C，极端最高气温38.2~29.1 °C，无霜期235.0~209.0 d，年雨日159.2~183.1 d，年雾日64.1~255.3 d，年降水量1 390.0~1 870.0 mm^[13]，年太阳辐射4 460~3 270 MJ·m⁻²^[14]，年相对湿度76%~81%。

常绿落叶阔叶混交林是天目山精华植被^[12]，分布于海拔850~1 140 m，常绿乔木主要有细叶青冈 *Cyclobalanopsis gracilis*，石栎 *Lithocarpus glaber* 和交让木 *Daphniphyllum macropodum* 等，落叶乔木有青钱柳 *Cyclocarya paliurus*，化香 *Platycarya strobilacea*，枫香 *Liquidambar formosana*，天目木姜子 *Litsea auriculata* 和短柄枹 *Quercus glandulifera* 等。灌木有柃木 *Eurya japonica*，箬竹 *Indocalamus tessellatus* 和马银花 *Rhododendron ovatum* 等，另外混有针叶林柳杉 *Cryptomeria fortunei* 林、金钱松 *Pseudolarix amabilis* 林及黄山松 *Pinus taiwanensis* 林等，组成多种较复杂的森林类型。土壤为山地黄壤，土层深度约为100 cm，pH 5.0~6.0，枯枝落叶层厚为10~20 cm。试验地在研究区的1块常绿落叶阔叶混交林样地($30^{\circ}20'59''N$, $119^{\circ}26'13.2''E$)内，海拔为1 139 m，样地面积为20 m×20 m，主要乔木有小叶青冈 *Cyclobalanopsis myrsinifolia*，交让木，小叶白辛树 *Pterostyrax corymbosus*，短柄枹，青钱柳 *Cyclocarya paliurus*，天目槭 *Acer sinopurpurascens*，秀丽槭 *Acer elegantulum* 和糙叶树 *Aphananthe aspera* 等，林龄为140 a，郁闭度0.7，林分密度3 125株·hm⁻²。林分为复层结构，分3层，15.0 m以上的乔木约占3.2%，第2层8.0~14.0 m的乔木约占43.2%，其余的乔木均在8.0 m以下。优势树种为小叶青冈、交让木和小叶白辛树等。据2012年调查，小叶青冈活立木平均高度为9.2 m，胸径24.1 cm；交让木活立木平均高度为5.1 m，胸径7.8 cm；小叶白辛树活立木平均高度为11.2 m，胸径20.2 cm。小乔木或灌木主要有红脉钓樟 *Lindera rubronervia*，微毛柃 *Eurya hebeclados*，莢蒾 *Viburnum dilatatum*，大青 *Clerodendrum cyrtophyllum*，

浙江大青 *Clerodendrum kaichianum*, 野鸦椿 *Euscaphis japonica*, 山胡椒 *Lindera glauca*, 鸡毛竹 *Shibataea chinensis*, 紫竹 *Phyllostachys nigra*, 牛鼻栓 *Fortunearia sinensis* 和四照花 *Dendrobenthamia japonica* var. *chinensis* 等。

1.2 观测方法

1.2.1 大气水汽稳定同位素组成 δ_v 的原位连续观测 试验地建有 40 m 高的微气象观测塔, 观测塔搭载有由三维超声风速仪(CAST3, Campbell Inc, 美国)和开路 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪(Li-7500, LiCor Inc., 美国), 7 层 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 廓线观测系统, 大气水汽稳定同位素分析系统, 以及常规气象观测系统。利用 LGR 水汽同位素分析仪(WVIA)对大气水汽稳定同位素组成进行原位连续观测。该系统采用离轴积分腔输出光谱技术, 可以实现对环境中水汽浓度, $\delta^{18}\text{O}$, δ_D 的原位连续观测^[15], 借助于外扩构件可以测量 5 个不同高度的大气水汽浓度及大气水汽稳定同位素组成。本试验地的系统的 5 个高度分别设在 2, 4, 8, 16 和 32 m, 取 16 m 高度的通道值代表森林生态系统的地表蒸散总量的大气水汽稳定同位素组成。数据采集频率为 6 min⁻¹·通道⁻¹, 采样频率为 0.1 Hz, 输出结果以相对于国际原子能机构推荐的 $\delta_{\text{v-SMOW}}$ 值表示, $\delta^{18}\text{O}$ 的测量精度为 $(\delta^{18}\text{O}) < \pm 0.2\text{‰}$, 所采数据最后经校准并标准化后统一使用。本研究中的稳定同位素组成值均为 $\delta^{18}\text{O}$ 。

1.2.2 气象数据的观测 常规气象观测系统由锦州阳光气象科技有限公司安装, 包括 7 层风速, 7 层大气温度和湿度。安装高度分别为 2, 7, 11, 17, 23, 30 和 38 m。温湿度采用 17 m 的数据为准。土壤温度和湿度观测深度为 5, 50 和 100 cm。土壤热通量测量深度为 3 和 5 cm。降雨量和净辐射值由距离试验地 500 m 的自动气象站提供。常规气象观测系统数据通过数据采集器隔 30 min 自动记录平均风速、环境温度、环境湿度、土壤温度、土壤湿度等常规气象信息。自动气象站数据通过数据采集器隔 10 min 自动记录降雨量、净辐射等信息。

2 结果与分析

2.1 降水对大气水汽稳定同位素组成的影响

试验采用 2013 年 8 月 1 日到 2013 年 10 月 1 日的数据。大气水汽稳定同位素组成采取了 2 m 和 16 m 等 2 个高度, 排除了高度对于同位素值的影响, 1 h 计算 1 个平均值, 1 d 共有 24 个同位素值。由于试验地郁闭度较高, 降水量值存在偏低现象, 但不影响试验结果。结果如图 1 所示。

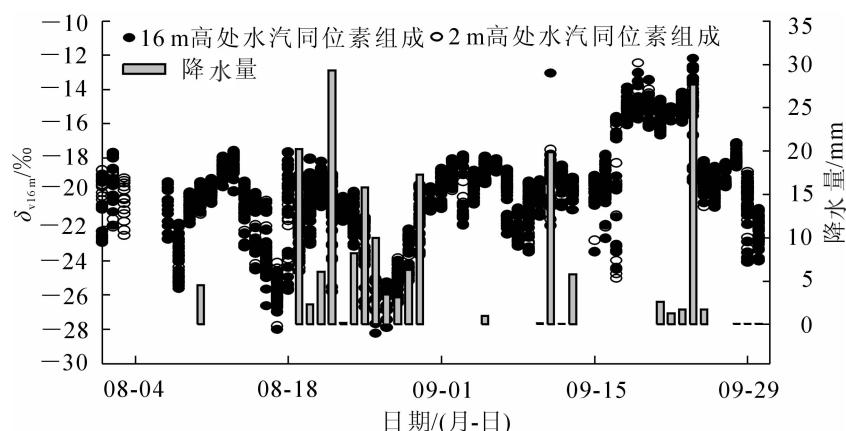


图 1 不同高度大气水汽的稳定同位素值(小时平均)以及降水的变化

Figure 1 Time series of atmospheric water vapor δ_v (hourly) at two different heights and precipitation

对图 1 进行分析: 整体来看, 试验地大气水汽稳定同位素组成的变化趋势与降水量有明显关系。每次降水过后, 高低 2 层大气水汽稳定同位素组成都明显降低。比如 8 月 22 日, 9 月 11 日, 9 月 24 日 3 次比较大的降水过后, 大气水汽稳定同位素组成都明显降低。这可能是因为降水过程中, 水汽的冷凝消耗了森林生态系统中的大量水蒸气中的 $\delta^{18}\text{O}$, 使得大气水汽中的同位素组成也随之降低。

2.2 环境温度对大气水汽稳定同位素组成的影响

从图 2 可以看出: 森林生态系统的环境温度的变化趋势与大气水汽稳定同位素组成的变化趋势不一

致。当环境温度下降时,大气水汽稳定同位素组成上升,当环境温度上升时,大气水汽稳定同位素组成呈下降趋势,9月开始尤其明显。对两者进行回归分析,从图3我们可以看到环境温度和大气水汽稳定同位素组成的拟合曲线: $y=-0.3477x-13.8790$, $R^2=0.2123$, $F=15.9070$, $P=0.0002$ 。说明森林生态系统中环境温度和大气水汽稳定同位素组成有极显著的相关性。分析原因可能为:环境温度对于叶片蒸腾和土壤水的蒸发都有很大影响,进而影响到同位素分馏作用,而大气水汽稳定同位素组成主要包括大气本底的水汽同位素组成和叶片蒸腾的水汽同位素组成以及土壤水蒸发的水汽同位素组成^[4],因而环境温度的变化会引起大气水汽稳定同位素组成的变化。

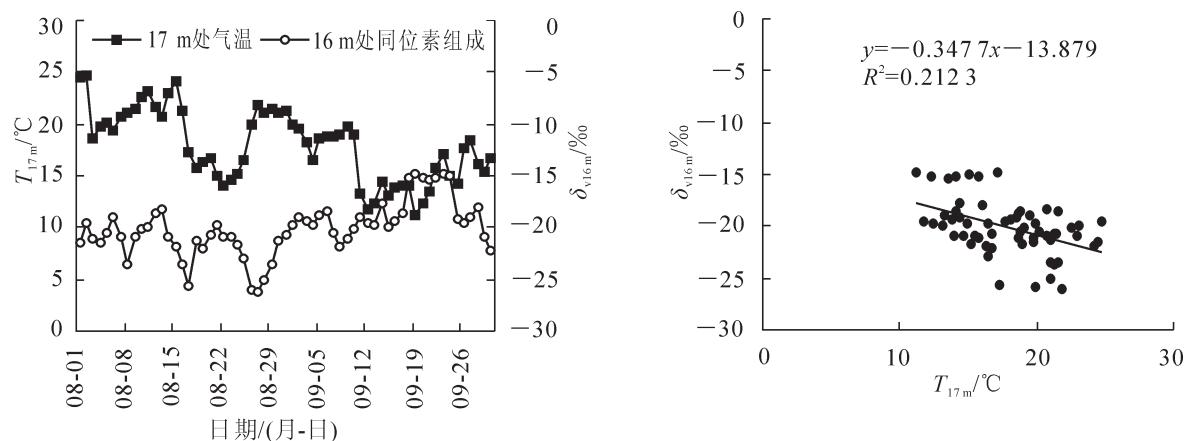


图2 气温和大气水汽同位素组成的变化

Figure 2 Variation of air temperature and atmospheric water vapor δ_v

图3 环境温度和大气水汽稳定同位素组成的关系

Figure 3 Relationship between air temperature and atmospheric water vapor δ_v

2.3 土壤5 cm温度和大气水汽稳定同位素组成的关系

土壤5 cm深度处为土壤蒸发面^[17],此处的温度可能会影响到土壤蒸发面液态水的蒸发,进而影响到土壤蒸发水汽的同位素组成,因此选取土壤5 cm深度的温度和大气水汽稳定同位素组成作相关性分析。对图4进行分析,土壤温度的变化趋势和图2中环境温度的变化趋势类似,土壤5 cm温度最大值为8月2日22.49 °C,大气水汽稳定同位素组成为-19.47‰,土壤5 cm温度最小值为9月20日13.38 °C,大气水汽同位素组成为-15.24‰。图5是土壤5 cm温度和大气水汽稳定同位素组成的拟合曲线及方程,拟合方程为: $y=0.1356x^2-5.3818x+31.917$, $R^2=0.3369$, $F=14.732$, $P<0.0001$,两者相关性极显著。

2.4 环境相对湿度对大气水汽稳定同位素组成的影响

对图6和图7进行分析:试验地的相对湿度值很高,最小值出现在9月28日,为54%,大气水汽

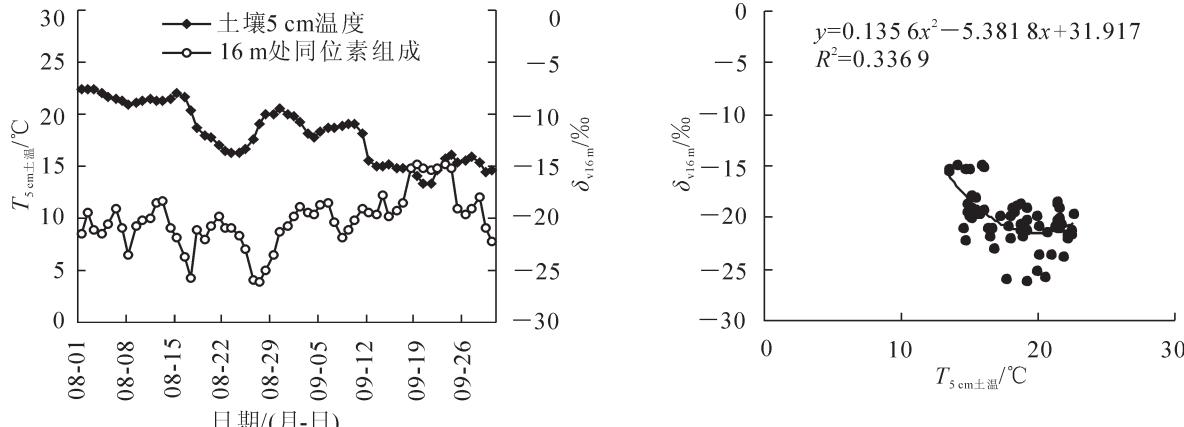


图4 土壤5 cm温度与大气水汽稳定同位素组成的变化

Figure 4 Variation of the soil temperature at 5 cm and atmospheric water vapor δ_v

图5 土壤5 cm温度与大气水汽稳定同位素组成的关系

Figure 5 Relationship between soil temperature at 5 cm and atmospheric water vapor δ_v

稳定同位素组成为 $-17.97\text{\textperthousand}$; 达到相对湿度最大值100%的天数有20 d, 期间大气水汽稳定同位素组成最大值出现在9月23日的 $-14.79\text{\textperthousand}$, 最小值为8月28日的 $-25.04\text{\textperthousand}$ 。对两者拟合, 得到 $y=-0.0326x-17.1510$, $R^2=0.0220$, $F=0.6605$, $P=0.5204$, 两者相关性不显著。

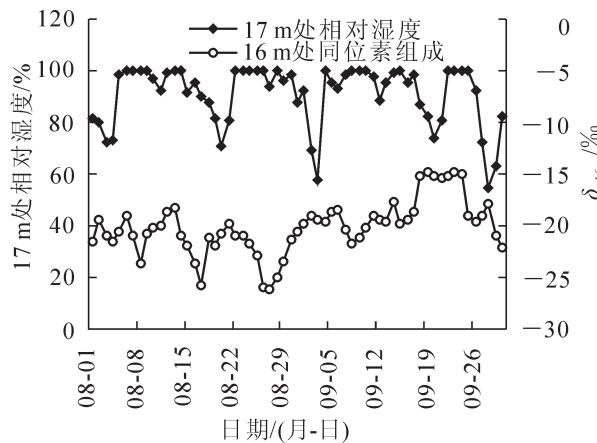


图6 环境相对湿度与大气水汽同位素组成的变化

Figure 6 Variation of the air relative humidity and atmospheric water vapor δ_v

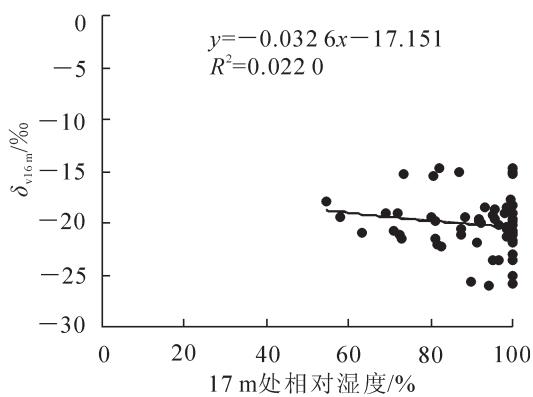


图7 环境相对湿度与大气水汽稳定同位素组成的关系

Figure 7 Relationship between air relative humidity and atmospheric water vapor δ_v

2.5 土壤5 cm湿度和大气水汽稳定同位素组成的关系

对图8和图9进行分析: 图8可以看到土壤5 cm相对湿度最大值为8月23日43.84%, 大气水汽稳定同位素组成 δ_v 为 $-20.97\text{\textperthousand}$; 土壤5 cm相对湿度最小值为25.91%, 大气水汽稳定同位素组成因自然原因缺失, 但这不影响我们探讨两者之间的关系。图9为两者拟合曲线及方程: $y=0.0381x^2-2.9413x+35.928$, $R^2=0.0753$, $F=2.3608$, $P=0.1034$, 两者相关性不显著。

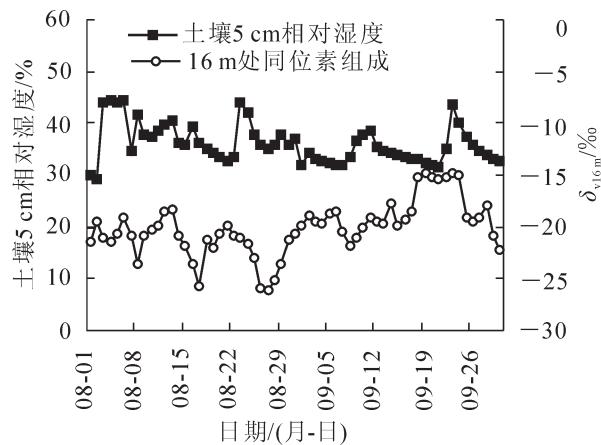


图8 土壤5 cm湿度和大气水汽同位素组成的变化

Figure 8 Variation of the soil relative humidity at 5 cm and atmospheric water vapor δ_v

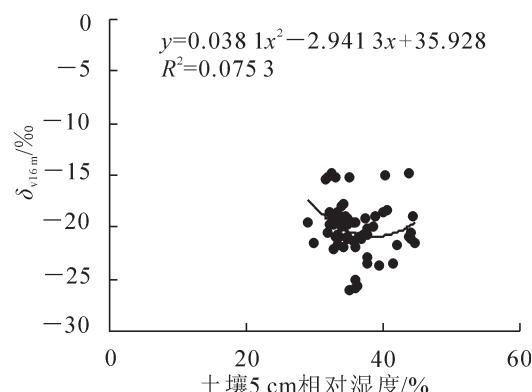


图9 土壤5 cm相对湿度和大气水汽稳定同位素组成的关系

Figure 9 Relationship between soil relative humidity at 5 cm and atmospheric water vapor δ_v

2.6 平均风速对大气水汽稳定同位素组成的影响

对图10进行分析: 平均风速最大值为9月18日 $2.56\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 相应大气水汽稳定同位素组成为 $-15.18\text{\textperthousand}$; 平均风速最小值为8月24日和8月25日 $0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 相应大气水汽稳定同位素组成为 $-21.69\text{\textperthousand}$ 和 $-22.97\text{\textperthousand}$ 。图11为两者拟合后的结果: $y=0.5942x-20.5090$, $R^2=0.0179$, $F=1.0729$, $P=0.3045$, 表明两者相关性不显著。

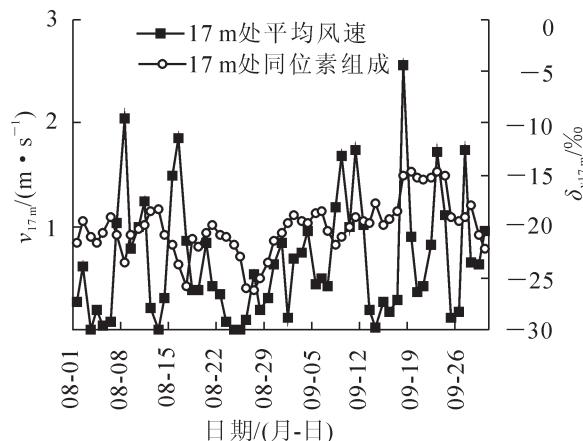


图 10 17 m 风速和大气水汽同位素组成的变化

Figure 10 Variation of the wind speed at 17 m and atmospheric water vapor δ_v .

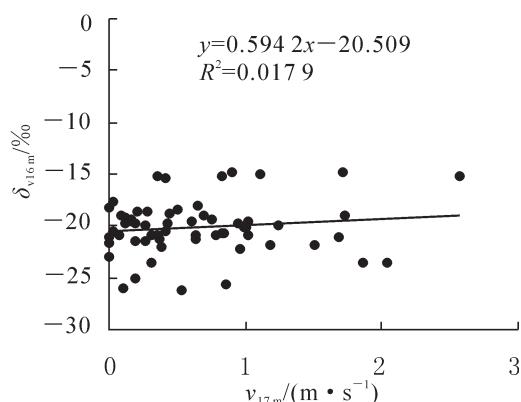


图 11 风速和大气水汽同位素组成的关系

Figure 11 Relationship between the average wind speed and atmospheric water vapor δ_v .

2.7 净辐射对大气水汽稳定同位素组成的影响

对图 12 进行分析: 是每日平均瞬时净辐射值同大气水汽稳定同位素组成的变化趋势, 图 13 是两者的拟合曲线: $y = -0.8261 \ln x - 16.3640$, $R^2 = 0.0460$, $F = 1.6618$, $P = 0.1987$, 两者相关性不显著。

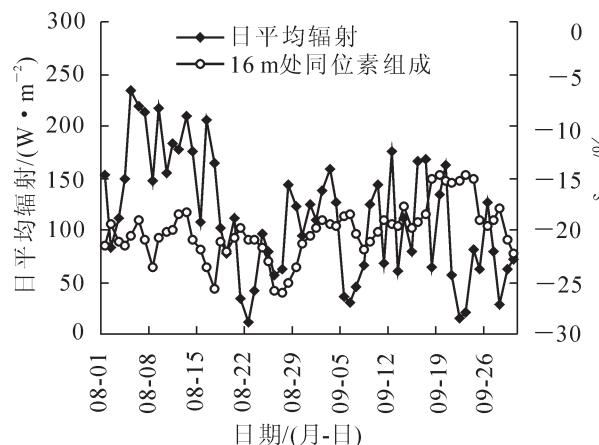


图 12 日平均净辐射和日平均水汽同位素组成的变化

Figure 12 Variation of the average daily net radiation and the average daily water vapor δ_v .

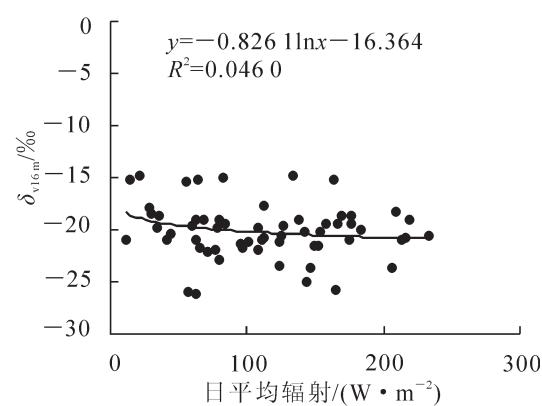


图 13 净辐射和大气水汽稳定同位素组成的关系

Figure 13 Relationship between net radiation and water vapor δ_v .

3 讨论

本研究结果表明: 森林生态系统中降水量、环境温度、土壤 5 cm 温度对大气水汽稳定同位素组成 δ_v 的影响较大。降水过后, 大气水汽稳定同位素组成会明显降低。这与石俊杰等^[10]在玉米田生态系统, 袁国富等^[9]在小麦生态系统得到的结论一致。环境温度和大气水汽稳定同位素组成相关性极显著。但在本实验中呈现的是负相关, 而石俊杰等^[10]在玉米田生态系统得到的结论是两者呈线性正相关。原因可能比较复杂, 位于亚热带的天目山森林生态系统和北方的玉米田生态系统相比大气环境都有很大的不同, 植被因素也不容忽略, 导致环境温度对于土壤水分的蒸发和植被叶片蒸腾的影响作用不同, 对于生态系统的大气水汽稳定同位素组成的影响也有很大不同。在计算土壤蒸发水汽的 Craig-Gordon 模型中, 土壤 5 cm 处可以作为土壤液态水蒸发面^[17], 理论上此处的温度和湿度对土壤蒸发水汽同位素组成有影响。结果土壤 5 cm 温度和大气水汽稳定同位素组成相关性极显著, 符合预期。对于环境相对湿度而言, 在森林生态系统中它和大气水汽稳定同位素组成的拟合的结果相关性不高。原因可能为天目山森林生态系统常年湿度在 75% 以上, 在试验选取的时间 8 月和 9 月有 20 d 的相对湿度达到了 100%, 作为单因子对

于大气水汽同位素组成 δ_v 的影响不显著。平均风速和大气水汽稳定同位素组成的线性关系方程的相关系数值为 0.017, 表明两者之间相关性不显著。净辐射作为生态系统能量流通、转化的基础量度, 本研究也探讨了它与大气水汽稳定同位素组成的关系, 结果显示两者相关性不高, 这与石俊杰等^[10]在玉米田生态系统得到的结论也不一致。通过分析森林生态系统中各气象要素对大气水汽稳定同位素组成的影响, 和以前的一些论文做对比, 我们发现: 试验结果有一些不一致, 在森林生态系统中就单气象因素对大气水汽稳定同位素组成做相关性分析, 结果显示一些因素是不显著的, 这可能是因为和农田生态系统相比, 森林生态系统的环境更加复杂, 各因子相互作用影响也更为复杂。当然本研究为以后探讨各因素之间如何相互作用共同影响森林生态系统大气水汽稳定同位素组成作了一定的基础, 也为今后在天目山森林生态系统中利用大气水汽稳定性同位素观测技术和 Keeling 曲线区分地表蒸散提供了一定的补充。

4 参考文献

- [1] 胡海英, 包为民, 瞿思敏, 等. 稳定性氢氧同位素在水体蒸发中的研究进展[J]. 水文, 2007, 27(3): 1–5.
HU Haiying, BAO Weimin, QU Simin, et al. Fractionation mechanism of stable hydrogen and oxygen isotope in water body evaporating [J]. *J China Hydrol*, 2007, 27(3): 1–5.
- [2] 郑秋红, 王兵. 稳定性同位素技术在森林生态系统碳水通量组分区分中的应用[J]. 林业科学研究, 2009, 22(1): 109–114.
ZHENG QiuHong, WANG Bing. Applications of stable isotope techniques to determine components of CO_2 and H_2O fluxes in forest ecosystems [J]. *For Res*, 2009, 22(1): 109–114.
- [3] BRUNEL J P, SIMPSON H J, HERCZEG A L, et al. Stable isotope composition of water vapor as an indicator of transpiration fluxes from rice crops [J]. *Water Resour Res*, 1992, 28(5): 1407–1416.
- [4] GAT J R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle [J]. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 1996, 24(1): 225–262.
- [5] MOREIRA M, STERNBERG L, MARTINELLI L, et al. Contribution of transpiration to forest ambient vapour based on isotopic measurements [J]. *Global Change Biol*, 1997, 3(5): 439–450.
- [6] WANG Xuefeng, YAKIR D. Using stable isotopes of water in evapotranspiration studies [J]. *Hydrol Proc*, 2000, 14(8): 1407–1421.
- [7] LEE X, SARGENT S, SMITH R, et al. In situ measurement of the water vapor $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ isotope ratio for atmospheric and ecological applications [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2005, 22(5): 555–565.
- [8] YEPEZ E A, SCOTT R L, CABLE W L, et al. Intraseasonal variation in water and carbon dioxide flux components in a semiarid riparian woodland [J]. *Ecosystem*, 2007, 10(10): 1100–1115.
- [9] 袁国富, 张娜, 孙晓敏, 等. 利用原位连续测定水汽 δ_v^{18} 值和 Keeling Plot 方法区分麦田蒸散组分[J]. 植物生态学报, 2010, 34(2): 170–178.
YUAN Guofu, ZHANG Na, SUN Xiaomin, et al. Partitioning wheat field evapotranspiration using Keeling Plot method and continuous atmospheric vapor δ_v^{18} data [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2010, 34(2): 170–178.
- [10] 石俊杰, 龚道枝, 梅旭荣, 等. 稳定同位素法和涡度-微型蒸渗仪区分玉米田蒸散组分的比较[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 114–120.
SHI Junjie, GONG Daozhi, MEI Xurong, et al. Comparison of partitioning evapotranspiration composition in maize field using stable isotope and eddy covariance-microlysimeter methods [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2012, 28(20): 114–120.
- [11] 郑秋红, 王兵. 稳定性同位素技术在森林生态系统碳水通量组分区分中的应用[J]. 林业科学研究, 2009, 22(1): 109–114.
ZHENG QiuHong, WANG Bing. Applications of stable isotope techniques to determine components of CO_2 and H_2O fluxes in forest ecosystems [J]. *For Res*, 2009, 22(1): 109–114.
- [12] 汤孟平, 陈永刚, 施拥军, 等. 基于 Voronoi 图的群落优势树种种内种间竞争[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4707–4716.
TANG Mengping, CHEN Yonggang, SHI Yongjun, et al. Intraspecific and interspecific competition analysis of community dominant plant populations based on Voronoi diagram [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, 27(11): 4707–4716.

- [13] 方国景, 汤孟平, 章雪莲. 天目山常绿阔叶林的混交度研究[J]. 浙江林学院学报, 2008, **25**(2): 216 – 220.
FANG Guojing, TANG Mengping, ZHANG Xuelian. The mingling index with evergreen broadleaf forests on Mount Tianmu [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2008, **25**(2): 216 – 220.
- [14] 郝云庆, 江洪, 向成华, 等. 天目山毛竹种群生物量结构[J]. 四川林业科技, 2010, **31**(4): 29 – 33.
HAO Yunqing, JIANG Hong, XIANG Chenghua, et al. Biomass structure of *Phyllostachys pubescens* population in the Tianmu Mountain [J]. *J Sichuan For Sci Technol*, 2010, **31**(4): 29 – 33.
- [15] ZHANG Shichun, SUN Xiaomin, WANG Jianlin, et al. Short-term variations of vapor isotope ratios reveal the influence of atmospheric processes [J]. *J Geogr Sci*, 2011, **21**(3): 401 – 416.
- [16] 石俊杰, 马孝义, 胡笑涛, 等. 大气水汽稳定同位素组成 δ_v 影响因素分析[J]. 灌溉排水学报, 2012, **31**(5): 56 – 59.
SHI Junjie, MA Xiaoyi, HU Xiaotao, et al. Atmospheric water vapor stable isotope composition δ_v influence factors analysis [J]. *J Irrig Drain*, 2012, **31**(5): 56 – 59.
- [17] GAT J R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle [J]. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 1996, **24**(1): 225 – 262.