

三江平原露水水汽来源的氢氧稳定同位素辨析

徐莹莹^{1,2}, 阎百兴^{1*}, 王莉霞¹

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室, 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:为探讨湿地、水田露水氢氧同位素变化规律并辨析露水水汽来源,于 2009 年作物/植物生长季对三江平原雨水、地表积水及露水进行样品采集.通过测定样品 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD ,研究了露水、地表水体、雨水间的水力联系,确定了不同生态系统露水的水汽来源.结果表明,受不同降雨水汽来源影响,6 月末~8 月末露水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值总体变化趋势呈 V 型曲线,7 月中旬达到最低值(湿地与水田露水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值分别为 -12.1‰ 、 -87.4‰ 、 -12.0‰ 和 -88.0‰),9 月初 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值有下降趋势.根据同位素质量守恒规律,计算得到雨季水田露水中约 30% 的水分来自于水稻蒸腾和作物吐水,约 70% 来源于空气中水汽和田面水、雨水蒸发的水汽的再次凝结;湿地露水主要由地表积水及雨水蒸发水汽冷凝而成.露水与雨水中氢氧同位素变化规律的一致性,说明露水可反映降雨水汽来源变化信息.同时土地利用变化引起的下垫面水体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 变化导致湿地露水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 总体高于水田露水.本研究将稳定同位素方法应用于区分露水水汽来源,对进一步认识露水的凝结过程和影响因素有重要意义.

关键词:稳定同位素;湿地;水田;露水;水汽来源

中图分类号:X142; X143 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2011)06-1550-07

Discrimination of Vapour Sources of Dew in Sanjiang Plain by Stable Isotopic Technique

XU Ying-ying^{1,2}, YAN Bai-xing¹, WANG Li-xia¹

(1. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment Science, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract:This study aims to discuss the change of $\delta^{18}\text{O}$ and δD values and discriminate different vapour sources of dew in paddy and wetland. Rain, surface water of paddy and wetland as well as dew sample were collected in Sanjiang Plain during the growing season in 2009. By analysing the isotope composition of different kinds of water, the transformation among dew, surface water and rain was studied. The contribution of different vapour sources of dew in each ecosystem was identified. The results demonstrated the $\delta^{18}\text{O}$ and δD values of dew which effected by the different vapour sources of rain showed a V-shape curve from the late June to late August. The $\delta^{18}\text{O}$ and δD values reached the bottom in mid-July. The $\delta^{18}\text{O}$ and δD values of dew in wetland and paddy were -12.1‰ , -87.4‰ , -12.0‰ and -88.0‰ , respectively. The values had a downward tendency in the beginning of the September again. Based on isotopic mass conservation to partition quantitatively the contribution of different vapour sources of dew, the guttation and transpiration from the plant accounted about 30% and the evaporation of surface water mixed with vapour in air accounted the other partition of paddy dew in rainy season. As to wetland dew, the evaporation of surface water took the most partition. The $\delta^{18}\text{O}$ and δD values of dew exhibited the similar trend to the stable isotope in rain. Therefore, the stable isotope of dew is useful as a vapour resource of rain. The difference of $\delta^{18}\text{O}$ and δD values in surface layer water of wetland and paddy because of land use-cover change (LUCC) led to the $\delta^{18}\text{O}$ and δD values in wetland dew were higher than that in paddy dew. The research used stable isotope in discriminating the different vapour sources of dew. It was significant to identify the process of dew condensation and analyse dew formation conditions.

Key words:stable isotope; wetland; paddy; dew; vapour source

无论是干旱的沙漠生态系统^[1,2]还是湿润的森林生态系统^[3,4],露水都是植物、昆虫、小型动物生存的重要水分来源.对露水的研究已备受关注,露水的形成量^[5-7]及露水质^[8,9]的计算和分析已取得很大进展.但大部分关于植物表面凝结露水的研究均没有很好的定量区分露水来源^[10].露水的来源较为复杂,一般认为露水有 2 种形式:一是植物从空气中获得的水汽,包括地表积水、雨水蒸发后的水汽等再次凝结部分;二是植物从其本身的蒸腾或蒸发中获

得水汽形成露水,即蒸馏或植物吐水^[11].前者对于植物来说是一种水分纯输入,而蒸馏仅是土壤-植物-大气系统水分的再分配.同时露水来源中的植物吐水由于含有一些营养物质可被某些真菌或害虫所

收稿日期:2010-06-08;修订日期:2010-07-08

基金项目:国家自然科学基金项目(40771035);中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-Q06-03)

作者简介:徐莹莹(1984~),女,博士研究生,主要研究方向为湿地水文学,E-mail:xuyingying.1019@yahoo.com.cn

* 通讯联系人,E-mail:yanbx@neigae.ac.cn

利用,给植物生长带来不利影响^[6,12]。有报道分析了我国西双版纳地区露雾水的水汽来源主要是来自池塘、河流、土壤的蒸发水汽和植物的呼吸作用产生的水汽^[13,14]。但这些研究仅处于定性分析阶段,而对露水来源的定量分析还鲜见报道。

近年来,通过测定稳定同位素获取水循环内部过程信息的方法已经日趋成熟,应用比较广泛的是氢氧稳定同位素^[15]。¹⁸O 和 D 广泛存在于自然界的各类水体中,可随水循环在降水、地表水、地下水、土壤水和植物水之间进行转化。自然界水在蒸发和冷凝的过程中,由于构成水分子的氢氧同位素的物理化学性质不同,引起不同水体具有不同的氢氧同位素含量,利用不同水体同位素含量之间的差异,可研究它们之间的相互转化方式及转化量^[16,17]。利用同位素质量守恒规律(质量平衡方程),计算混合水样不同补给来源的贡献率已被广泛应用。王杰等^[18]、Lee 等^[19]通过该规律计算出当地地下水各补给水源的比例;补充植物体内水分的不同来源水所占比例也可计算得出^[20-22]。

三江平原沼泽湿地曾广泛分布,20 世纪 50 年代初有 534.5 万 hm^2 。近 50 年来,大量湿地被垦殖,农田(2000 年面积为 524 万 hm^2)已成为主要的景观类型^[23]。90 年代中后期以来,水田面积迅速增加,目前已占农田面积的 33%。下垫面特征的改变可能与露水水汽来源的组成密切相关。对湿地和水田露水稳定同位素的分析,可探明下垫面的剧烈变化对露水凝结水分来源是否产生明显影响。本研究通过对三江平原雨水、地表积水及湿地和水田露水稳定同位素的分析,探明露水与雨水、地表积水间的水力联系,确定土地利用变化对露水同位素组成的影响。定量计算露水中各水汽来源的贡献率,对比湿地和水田露水水汽来源的差异,以期明确露水的生态效应及露水的形成过程提供依据。

1 材料与方法

1.1 采样地点、方法及样品分析

采样地点设在中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站和农田生态试验站(简称三江站)的试验场内,站区(133°31'E, 47°35'N)位于黑龙江省同江市,海拔约 56 m(图 1)。年平均气温 1.9℃,年降雨量 550~600 mm 左右,夏秋季雨水充沛,6~9 月降水总量可占全年 65% 以上^[24]。试验选择湿地代表植物毛茛草(*Carex lasiocarpa*)和主要作物水稻为研究对象。

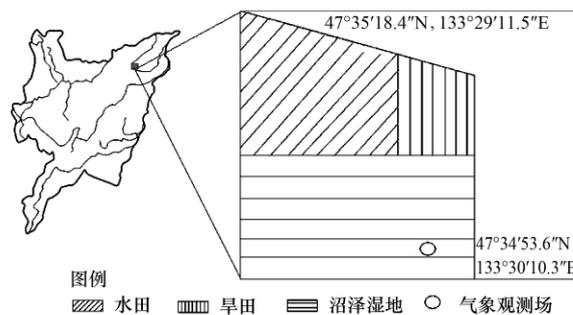


图 1 试验田位置示意

Fig. 1 Location of the experimental plot

2009 年 6~9 月在三江站气象观测场内对降水进行收集,同期对试验站内的毛茛草露水、水田露水、湿地积水及水田积水进行收集。将每次收集的雨样及地表水样集满密封在 100 mL 塑料瓶中,降水样为每 20 d 内各次降水的混合样,混合后将雨水样装入 100 mL 塑料瓶内集满密封。露水样品直接收集于露水浓重日凌晨时的植物/作物叶片上,装入 50 mL 的塑料瓶密封保存。

露水组成中由作物自身来源水汽收集较为困难,且地表积水在不同温度和湿度条件下蒸发所引起的同位素分馏程度不同,故试验采取原位采集法。选取露水浓重的雨季(7 月)进行露水不同来源的样品采集。在日落后 30 min 用自封袋将植物罩住,下端系紧,防止袋内植物蒸腾水汽的泄露和外界水汽的进入。用洁净塑料布将作物与外界相隔,在日出前 30 min 收集塑料布外侧的凝结水即为露水的外界来源部分,即空气水汽(包括地表积水蒸发水汽、雨水蒸发水汽等)冷凝部分。在收集自封袋内水汽前摇晃作物根部,目的是使叶片上水滴落下,此时自封袋内水滴为露水的自身来源部分(夜间作物排出水汽与叶尖吐水蒸发的水汽凝结混合物)。所有露水来源样品均移入 50 mL 的塑料瓶内,集满后密封。

所采集水样均在冷冻室低温保存,样品中氢氧稳定同位素在中国科学院地质与地球物理研究所由 Finnigan MAT253 同位素质谱仪完成测定,测量精度对于 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分别为 $\pm 1\text{‰}$ 和 $\pm 0.3\text{‰}$ 。测得的水样中氢氧同位素含量为与 Vienna“标准平均大洋水”(VSMOW)的千分差。风向由三江站气象监测站提供。

1.2 计算方法

式(1)为同位素混合比例公式:

$$\delta_{\text{sample}} = X\delta\text{A} + (1 - X)\delta\text{B} \quad (1)$$

式中, X 为 A 型水与 B 型水的混合比例; δ_{sample} 为混

合样品中同位素 δD 或 $\delta^{18}O$ 值; δA 为 A 型水的同位素 δD 或 $\delta^{18}O$ 值; δB 为 B 型水的同位素 δD 或 $\delta^{18}O$ 值。

利用质量守恒计算混合水样不同来源的贡献率其根本在于采集混合样品和各来源样品,故只要将露水及各水汽来源分别采集并测定 $\delta^{18}O$ 和 δD ,便可确定各来源的补给比例。根据瑞利同位素分馏原理/公式,分馏还与当时的环境温度、湿度有关^[25],水中的稳定同位素每次蒸发、冷凝均会发生同位素分馏,为保证露水各组成成分在相同环境和条件下得以区分,必须同时获取同一地点各部分数据,采集对应的一组样品进行分析。根据公式(1),需要采集露水(混合样品),作物部分提供的作物蒸腾和叶尖吐水凝结水(A型水)即作物/植物自身来源,外界部分提供的地表水蒸发水汽和雨水蒸发水汽等再次凝结的凝结水(B型水)即外界来源。

2 结果与分析

2.1 各水体 $\delta^{18}O$ 和 δD 变化

各水体 $\delta^{18}O$ 和 δD 变化如图 2、3 所示。6 月末~8 月末露水中 $\delta^{18}O$ 和 δD 值总体变化趋势呈 V 型曲线,7 月中旬达到最低值,9 月初 $\delta^{18}O$ 和 δD 值有下降趋势。由图 3 可知,在湿地积水、水田积水及雨水中 $\delta^{18}O$ 和 δD 也有相同的变化趋势。这是由于降水是三江平原湿地重要的补给水源,降水中 $\delta^{18}O$ 和 δD 的变化可影响湿地积水及水田积水中氢氧同位素的波动^[26]。露水与地表水体、雨水中的 $\delta^{18}O$ 和 δD 变化趋势的相似性表明露水很大程度上取决于地表水体及雨水蒸发后组成的空气水汽。间接证明露水与地表水体及雨水间水力联系密切,地表水体和雨水的蒸发水汽再次凝结部分是露水的重要部分。

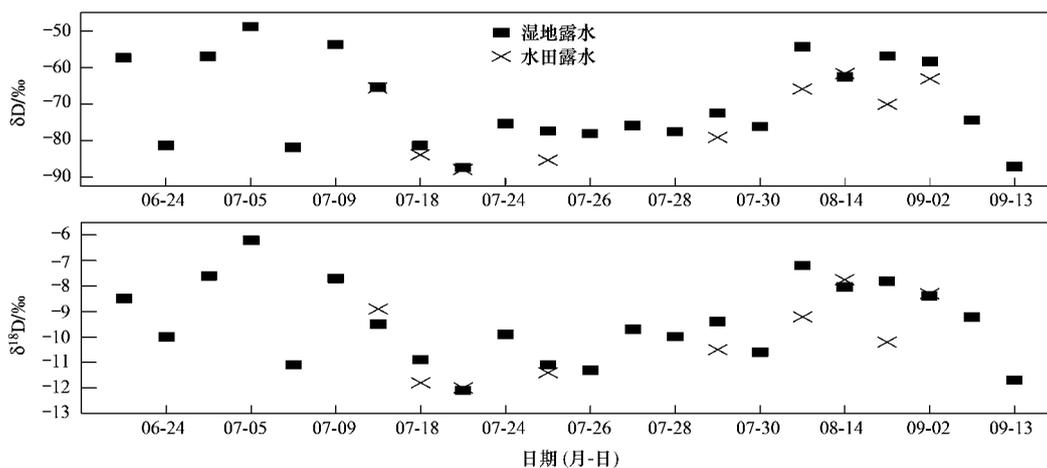


图 2 2009 年三江平原各群落露水 $\delta^{18}O$ 变化

Fig. 2 Seasonal variability of $\delta^{18}O$ in dew of different communities in Sanjiang Plain in 2009

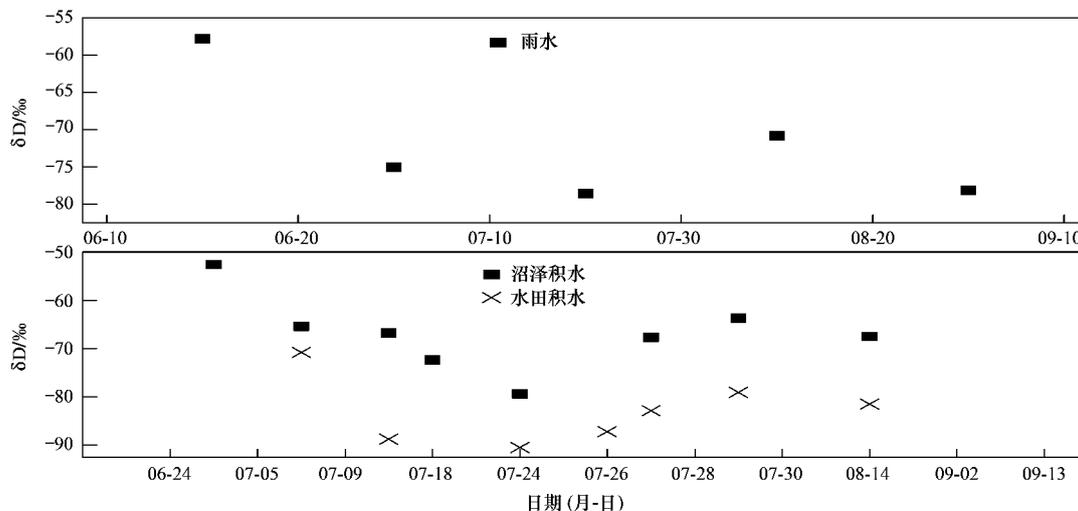


图 3 2009 年三江平原各水体 δD 变化

Fig. 3 Seasonal variability of δD in different waters by type in Sanjiang Plain in 2009

2.2 各水体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 对比

由三江平原各水体氢氧同位素特征值(表1)和图2可知,湿地积水和露水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 总体高于水田积水和露水,湿地露水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 略低于湿地积水,而水田露水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 高于水田积水. 2个采样地点距离接近(图1),空气水汽中雨水蒸发水汽稳定同位素含量应接近一致,因此造成湿地和水田露水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的微小差别的原因,则是湿

地积水和在水田积水中稳定同位素的差别引起的. 由表2可知,雨季水田露水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 介于作物自身来源凝结水和外界来源凝结水之间,由此判断水田露数为作物蒸腾水汽和外界蒸发水汽混合后冷凝而成. 湿地植物吐水以及植物蒸腾作用产生的水汽未收集到,由表1可知,湿地露水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 略低于湿地积水,故推测湿地露水主要由空气水汽即地表积水、雨水蒸发水汽再次冷凝而成.

表1 2009年三江平原各水体同位素特征值

Table 1 Summary of stable isotopic variability of waters by type in Sanjiang Plain in 2009

类型	$\delta\text{D}/\text{‰}$			$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$			N
	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	
雨水	-72.1 ± 8.6	-78.6	-57.8	-9.3 ± 1.0	-10.3	-7.8	5
湿地露水	-70.1 ± 11.9	-87.4	-48.8	-9.5 ± 1.6	-12.1	-6.2	22
水田露水	-73.7 ± 10.5	-88.0	-61.7	-10.0 ± 1.6	-12.0	-7.8	9
湿地积水	-66.9 ± 7.6	-79.4	-52.7	-9.4 ± 1.6	-11.4	-6.5	8
水田积水	-83.0 ± 6.8	-90.5	-70.8	-11.9 ± 1.6	-13.4	-8.6	7

表2 水稻露水及各补给来源 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值和补给比例

Table 2 Stable isotopic composition of dew and its water sources in paddy

日期	露水		作物自身来源凝结水		外界来源凝结水	
	$\delta\text{D}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\delta\text{D}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\delta\text{D}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$
7月12日	-65.6	-8.9	-72.0	-10.5	-62.7	-7.8
7月18日	-83.9	-11.8	-69.3	-8.9	-88.8	-12.8
7月20日	-88.0	-12.0	-67.1	-8.6	-90.5	-13.4

3 讨论

3.1 露水与地表积水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD

在水体蒸发过程中,轻的水分子 H_2^{16}O 比包含有一个重同位素水分子(H_2^{18}O 或 HD^{18}O)更为活跃,率先从液相中逃逸,这样水蒸气富集 H 和 ^{16}O ,导致剩余水体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 升高^[27]. 故蒸发水汽中氢氧同位素应比地表水体中低,导致湿地露水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 略低于湿地积水,而水分在被植物根系吸收和从根向叶移动时不发生氢氧同位素分馏^[21],故露水中作物吐水部分由于未经过同位素分馏或只有微弱分馏,导致水田露水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 高于水田积水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD . 这进一步验证了水田露水由积水、雨水蒸发与作物吐水及蒸馏水汽混合而成,而湿地露水以积水、雨水蒸发水汽冷凝为主.

沼泽露水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 总体高于水田露水是由于湿地积水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 高于水田积水. 水田积水主要来源于地下水灌溉和雨水,湿地积水主要由融雪积水及雨水补给. 湿地积水由于常年暴露,相比每年抽采的地下水,湿地积水蒸发历时远长于水田积水. 同时有研究表明,湿地蒸发量在夏季高于农田^[26],导致湿地积水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 高于田面水. 故土地利

用变化引发的下垫面水体不同决定了露水中氢氧同位素的差异.

3.2 影响露水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 变化因素

由图1、2可知,雨水、地表积水及露水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 变化趋势基本相同. 这是由于雨水是地表水的重要补给来源,地表水虽不是露水的直接来源,而地表水蒸发水汽再次凝结成为露水的重要来源. 雨水氢氧同位素的变化引起地表积水同位素含量的变化后,地表积水在蒸发形成露水过程中会发生同位素的分馏,但这种分馏作用与地表积水长期蒸发、混入雨水等过程带来的同位素的变化趋势相比较为微弱,故地表积水同位素的改变趋势会直接体现为露水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的变化趋势(图2、3). 所测得雨水混合样的氘过剩值(d)分别为4.18、4.16、3.46和7.71. d 值反映了降水形成过程中的水汽团同位素组成以及形成暖湿气团区等重要信息, d 值的变化不一致反映了水汽团的多样性^[28-29]. 三江平原受季风影响,由图4可知,2009年6、7月主要风向为SE,8、9月主要风向为SW. 在降水中稳定同位素的组成是顺着水汽运移方向降低的^[30-31],6、7月降水水汽来源基本一致,使雨水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 不断降低,8月风向以SW为主,水汽来源的变化使 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD

升高,在相同风向带来的水汽来源影响下,9月 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 再次降低.综上所述,降雨水汽来源的迥异导致雨水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 变化,直接使地表积水中 $\delta^{18}\text{O}$

和 δD 发生波动,间接影响露水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD .由此可知,露水中的氢氧同位素反映了降水水汽来源不同的信息.

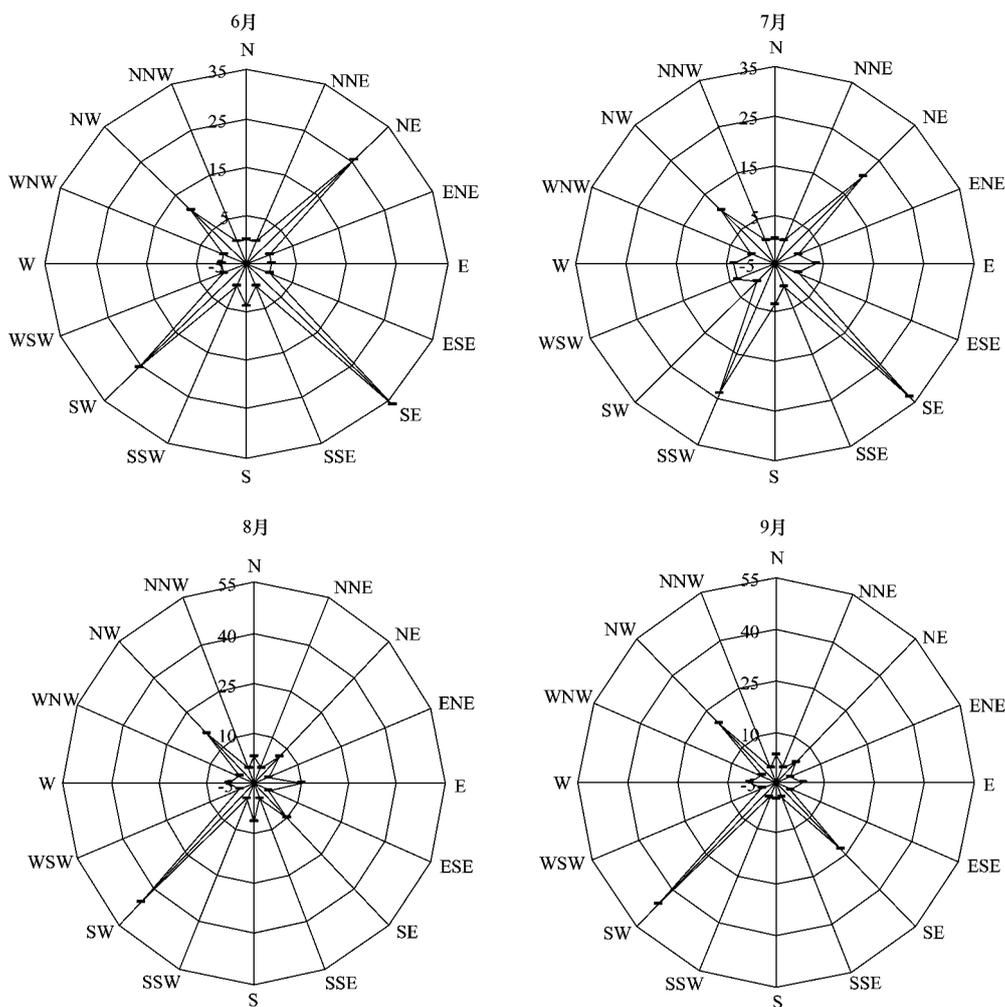


图4 三江平原2009年6~9月风向玫瑰图

Fig. 4 Breeze rose diagram from June to September in 2009 in the Sanjiang Plain

3.3 露水来源差异

表3为水稻露水、作物补给露水部分及大气地表积水蒸发补给部分测定的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$,通过线性混合模型计算的各来源的补给比例,范围端值分别为用各水体 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的计算结果.由表3可知,水田露水来源中由作物吐水作用提供的水汽成分约占30%,大气水汽及地表积水蒸发再次冷凝水约占70%.这与Luo等^[12,32]的研究结果略有差异,Luo于菲律宾研究水温对水稻上露水的凝结和叶子水分渗透作用影响的试验中,曾得出水稻作物吐水量与其他露水组成成分基本持平的结论.这可能是由于不同地区由于天气原因作物生长情况的差异引起的.

表3 水稻露水来源补给比例

Table 3 Mixing ratio of vapour sources of paddy dew

日期	来源比例/%	
	作物	外界
7月12日	31.78~40.74	59.26~68.82
7月18日	25.13~25.64	74.36~74.87
7月20日	29.17~37.43	62.57~70.83

水稻体内的水分可以不断地通过水孔排出体外.当外界的温度高,气候比较干燥的时候,从水孔排出的水分就很快蒸发散失了.如果外界的温度很高,湿度又大,高温使根的吸收作用旺盛,湿度大抑制了水分从气孔中蒸散出去,此时水分直接从叶表水孔中流出来.不同地区由于气温、相对湿度、水稻品种的不

同,都可能影响根部的吸水作用,进而使植物吐水部分在露水中所占比例有差异。

湿地露水中植物吐水和植物蒸腾部分的样品并未收集到,不能判断湿地露水的来源组成比例。

当土壤水分充足,空气潮湿,无风且温度较低的天气,未受伤的植物可从叶尖、叶缘部位的水孔向外溢出液滴。有吐水现象的植物,主要有水稻、小麦、高粱、玉米等禾本科植物及柳树等乔木。它们为了保持自身水分的平衡,就启用排水量大的叶尖水孔,将富余的水分排出体外。水稻比毛苔草吐水现象明显,这是水汽来源差异的原因之一。

4 结论

(1)通过对三江平原雨水、湿地和水田积水、露水样品中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的测定表明不同水汽来源的雨水直接影响地表水氢氧同位素波动,间接决定了露水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的变化趋势。雨水和地表积水虽不是露水的直接组成部分,而其经过蒸发后的水汽冷凝后是露水的重要组成部分,故露水中的重要同位素变化暗含了雨水水汽来源差异性的信息。

(2)湿地开垦为水田后,下垫面水体同位素含量的变化导致露水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的不同,湿地露水水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 总体高于水田露水。土地利用方式改变后,露水的水汽来源也发生了转变:雨季湿地露水中绝大部分是由地表积水、雨水蒸发水汽再次冷凝而成,水田露水中由植物蒸腾及叶尖吐水的部分增加至约 30%,田面水、雨水蒸发水汽再次凝结部分占约 70%。可见大面积开荒是影响露水同位素变化的重要影响因素之一。

(3)无论是湿地还是水田,外界水汽均为露水的主要水汽来源,故露水是湿地和农田生态系统的重要水分输入项。稳定同位素示踪是研究露水来源简单有效的方法,通过该方法可定量确定露水来源,有助于进一步开展湿地及农田内部水循环过程等方面的研究。

参考文献:

- [1] Malek E, McCurdy G, Giles B. Dew contribution to the annual water balances in semi-arid desert valleys [J]. *Journal of Arid Environments*, 1999, **42**: 71-80.
- [2] Adrie F G J, Bert G H, Simon M B. A simple model for potential dewfall in an arid region [J]. *Atmospheric Research*, 2002, **64**: 285-295.
- [3] 刘文杰,张克映,张光明,等. 西双版纳热带雨林干季林冠雾露水资源效益研究 [J]. *资源科学*, 2001, **23**(2): 75-80.
- [4] Grubb P J, Whitmore T C. A comparison of montane and lowland

rainforest in Ecuador. The climate and its effects on the distribution and physiognomy of the forests [J]. *Journal of Ecology*, 1966, **54**: 303-333.

- [5] Zangvil A. Six years of dew observation in the Negev Desert, Israel [J]. *Journal of Arid Environments*, 1996, **32**: 361-372.
- [6] Clus O, Ortega P, Muselli M, et al. Study of dew water collection in humid tropical islands [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, **361**: 159-171.
- [7] Ye Y H, Zhou K, Song L Y, et al. Dew amounts and its correlations with meteorological factors in urban landscapes of Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Research*, 2007, **86**: 21-29.
- [8] Anwar J. Chemical composition of dew in Amman, Jordan [J]. *Atmospheric Research*, 2001, **57**: 261-268.
- [9] Singh S P, Khare P, Maharaj K K, et al. Chemical characterization of dew at a regional representative site of North-Central India [J]. *Atmospheric Research*, 2006, **80**: 239-249.
- [10] Monteith J L, Unsworth M H. Principles of environmental physics [M]. (Second edition), London, UK, Edward Arnold, 1990.
- [11] Jackson I J. Climate, water and agriculture in the tropics [M]. New York: Longman Inc., 1977.
- [12] Luo W H, Goudriaan J. Effects of altering water temperature on leaf wetness in paddy rice crops [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, **97**: 33-42.
- [13] Liu W J, Liu W Y, Li P J, et al. Using stable isotopes to determine sources of fog drip in a tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, SW China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, **143**: 80-91.
- [14] 刘文杰,李鹏菊,李红梅,等. 西双版纳热带季节雨林林下土壤蒸发的稳定性同位素分析 [J]. *生态学报*, 2006, **26**(5): 1303-1311.
- [15] Gat J R. Oxygen and hydrogen stable isotopes in the hydrological cycle [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1996, **24**: 225-262.
- [16] Gammons C H, Poulson S R, Pellicori D A, et al. The hydrogen and oxygen isotopic composition of precipitation, evaporated mine water, and river water in Montana, USA [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, **328**: 319-330.
- [17] Mayr C, Lücke A, Stichler W, et al. Precipitation origin and evaporation of lakes in semi-arid Patagonia (Argentina) inferred from stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, **334**: 53-63.
- [18] 王杰,王文科,田华,等. 环境同位素在三水转化研究中的应用 [J]. *工程勘察*, 2007, **3**: 31-39.
- [19] Lee K S, Wenner D B, Lee I. Using H- and O- isotopic data for estimating the relative contributions of rainy and dry season precipitation to groundwater: example from Cheju Island, Korea [J]. *Journal of Hydrology*, 1999, **222**: 65-74.
- [20] 曹燕丽,卢琦,林光辉. 氢稳定性同位素确定植物水源的应用与前景 [J]. *生态学报*, 2002, **22**(1): 111-117.
- [21] 段德玉,欧阳华. 稳定氢氧同位素在定量区分植物水分利用来源中的应用 [J]. *生态环境*, 2007, **16**(2): 655-660.

- [22] 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.
- [23] 刘兴士,马学慧. 三江平原自然环境变化与生态保育[M]. 北京:科学出版社,2002. 97.
- [24] Jia Z J, Song C C, Sun L. The study on latent and sensible heat flux over mire in the Sanjiang Plain [J]. Wetland Science, 2006,4(1): 13-20.
- [25] 胡海英,包为民,王涛. 水体蒸发中瑞利分馏公式的模拟及实验验证[J]. 水利学报,2007,10(增刊): 314-317.
- [26] 张芸,吕宪国,杨青. 三江平原湿地水平衡结构研究[J]. 地理与地理信息科学,2005,25(1): 79-82.
- [27] 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.
- [28] 赵家成,魏宝华,肖尚斌. 湖北宜昌地区大气降水中的稳定同位素特征[J]. 热带地理,2009,29(6): 526-531.
- [29] 卫克勤,林瑞芳. 论季风气候对我国雨水同位素组成的影响[J]. 地球化学,1994,23(1): 33-41.
- [30] 徐振,刘玉虹,王中生,等. 卧龙降水稳定同位素与季风活动的关系[J]. 环境科学,2008,29(4): 1007-1013.
- [31] 郑琰明,钟巍,彭晓莹,等. 粤西云浮市大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽来源的关系[J]. 环境科学,2009,30(3): 637-643.
- [32] Luo W H, Goudriaan J. Dew formation on rice under varying durations of nocturnal radiative loss[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2000,104: 303-313.
- [33] 舒理. 科学奥秘系列丛书:植物之谜[M]. 2009-05-30. <http://www.jyvec.com/Onlineaccess/book/ts066096.pdf>.