

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第2期

Vol.37 No.2

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

编者按 (403)

我国化学品的风险评价及风险管理 王铁宇,周云桥,李奇锋,吕永龙 (404)

土地利用回归模型在大气污染时空分异研究中的应用 吴健生,谢舞丹,李嘉诚 (413)

中国2000~2010年生态足迹变化特征及影响因素 黄宝荣,崔书红,李颖明 (420)

关中地区冬季PM_{2.5}中碳气溶胶的污染特征及来源解析 田鹏山,曹军骥,韩永明,张宁宁,张蓉,刘随心 (427)

利用SPAMS研究南宁市冬季单颗粒气溶胶化学成分 刘慧琳,宋红军,陈志明,黄炯丽,杨俊超,毛敬英,李宏姣,梁桂云,莫招育 (434)

南京夏季市区VOCs特征及O₃生成潜势的相关性分析 杨笑笑,汤莉莉,张运江,母应峰,王鸣,陈文泰,周宏仓,花艳,江蓉馨 (443)

北京城区气传花粉季节特征及与气象条件关系 孟龄,王效科,欧阳志云,任玉芬,王巧环 (452)

重庆市垃圾焚烧厂汞的分布特征与大气汞排放因子研究 段振亚,苏海涛,王凤阳,张磊,王书肖,余斌 (459)

三峡库区腹地大气微量金属干湿沉降特征 张六一,刘源,乔保清,付川,王欢博,黄怡民,杨复沫 (466)

长沙近地面水汽中稳定同位素的监测与分析 谢宇龙,章新平,姚天次,黄煌 (475)

青藏高原内陆典型冰川区“冰川-径流”汞传输过程 孙学军,王康,郭军明,康世昌,张国帅,黄杰,丛志远,张强弓 (482)

西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估 郭泌汐,刘勇勤,张凡,侯居峙,张宏波 (490)

坦噶尼喀湖东北部入湖河流沉积物重金属分布特征与生态风险评价 余成,陈爽,张路 (499)

近百年来新疆博斯腾湖多环芳烃的组成及变化特征 沈贝贝,吴敬禄,赵中华,曾海鳌,金苗 (507)

舟山青浜岛不同环境介质中PAHs的分布特征 郑煌,邢新丽,顾延生,桂福坤,祁士华,黄煊芳 (513)

模拟排水沟渠非点源溶质氮迁移实验研究 李强坤,宋常吉,胡亚伟,彭聪,马强,姜正曦,琚艺萌 (520)

中田河流域景观异质性对水体总氮浓度影响研究 王晶萍,李兆富,刘红玉,王刚,辛强 (527)

江西香溪流域干湿季交替下底泥氮释放机制及其对流域氮输出的贡献 韩宁,郝卓,徐亚娟,高扬,于贵瑞 (534)

巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征 奚姗姗,周春财,刘桂建,吴蕾,王培华 (542)

合肥城郊典型农田溪流系统沉积物磷形态及释放风险分析 裴婷婷,李如忠,高苏蒂,罗月颖 (548)

桑沟湾表层沉积物性质及对磷的吸附特征 朱佳美,曹晓燕,刘素美,王丽莎,杨桂朋,葛成凤,路敏 (558)

苏州市古城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态 李淮,吴玮,田永静,黄天寅 (565)

洪泽湖有毒和无毒微囊藻丰度及其与环境因子之间的相关分析 李大命,张彤晴,唐晟凯,段翠兰,杨俊虎,穆欢,刘小维 (573)

三峡库区消落带水体CDOM中电荷转移配合物对其紫外-可见吸收光谱的影响 江韬,梁俭,张慕雪,王定勇,魏世强,卢松 (580)

pH对高锰酸钾氧化降解苯胺类化合物动力学的影响 王辉,孙波,关小红 (588)

EDTA对Pd/Fe体系还原脱氯2,4-D的影响 周红艺,聂亚中,陈勇,雷双健 (595)

镍铝层状氧化物薄膜电极的制备及其除盐性能 王婷,朱春山,胡承志 (602)

微生物对砷的氧化还原竞争 杨婷婷,柏耀辉,梁金松,霍咏,王明星,袁林江 (609)

处理水产养殖污水潜流湿地中的厌氧氨氧化菌群特征 曾宪磊,刘兴国,吴宗凡,时旭,陆诗敏 (615)

污水回用中主要病原菌解析及其紫外消毒效应 景明,王磊 (622)

异养硝化-好氧反硝化菌 *Burkholderia* sp. YX02 强化连续流反应器中微生物群落结构解析 邵基伦,曹刚,李紫惠,黄郑郑,罗恺,莫渊辉 (630)

基于新一代测序技术的A²O与BIOLAK活性污泥宏基因组比较分析 田美,刘汉湖,申欣 (638)

1株海洋异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性 孙庆花,于德爽,张培玉,林学政,李津 (647)

纳米Ni/Fe用于去除染料生产废水二级生物处理出水中AOX和色度的研究 舒小铭,徐灿灿,刘锐,赵远,陈吕军 (655)

3BER-S工艺用于再生水深度脱氮同步去除PAEs的可行性 徐鹏程,郝瑞霞,张娅,王冬月,钟丽燕,徐浩丹 (662)

合成时间对钛酸盐纳米材料的影响及其吸附水中铅的性能研究 范功端,陈丽茹,林茹晶,林茜,苏昭越,林修咏 (668)

芦苇秸秆生物炭对水中菲和1,1-二氯乙烯的吸附特性 吴晴雯,孟梁,张志豪,罗启仕,杨洁 (680)

芦苇基和污泥基生物炭对水体中诺氟沙星的吸附性能 张涵瑜,王兆炜,高俊红,朱俊民,谢超然,谢晓芸 (689)

季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响 林俊杰,张帅,刘丹,周斌,肖晓君,马慧燕,于志国 (697)

增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响 陈书涛,桑琳,张旭,胡正华 (703)

基于GIS的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征 王幼奇,白一茹,王建宇 (710)

不同产地硅藻土原位控制土壤镉污染差异效应与机制 朱健,王平,林艳,雷明婧,陈仰 (717)

紫色土对邻苯二甲酸二甲酯的淋溶吸持特征及影响因素 王强,宋娇艳,曾微,王法 (726)

几种修复措施对Cd淋失及土壤剖面运移影响 刘孝利,曾昭霞,铁柏清,陈求稳,魏祥东 (734)

河北邯郸钢铁冶炼区周边麦田土和小麦籽粒的多环芳烃含量及其组分谱特征 吴迪,汪宜龙,刘伟健,陈源琛,付晓芳,陶澍,刘文新 (740)

湿生环境中丛枝菌根(AM)对香蒲耐Cd胁迫的影响 罗鹏程,李航,王曙光 (750)

溴酸盐对水生生物的急性毒性效应 王执伟,刘冬梅,张文娟,崔福义 (756)

自组装哑铃状Fe₃O₄微/纳米材料对十溴联苯的热催化降解 黄鑫辰,宗刚,刘焯焯,芦会杰,李倩倩,李宾克,赵彦辉,苏贵金 (765)

盐度对准好氧矿化垃圾生物反应器渗滤液处理及N₂O产生的影响 李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (775)

污泥直接干化尾气中恶臭污染物重要性评价:以指标权重评分法为例 丁文杰,陈文和,邓明佳,罗辉,李琳,刘俊新 (782)

《环境科学》征订启事(557) 《环境科学》征稿简则(594) 信息(419,442,781)

长沙近地面水汽中稳定同位素的监测与分析

谢宇龙^{1,2,3}, 章新平^{1*}, 姚天次¹, 黄煌¹

(1. 湖南师范大学资源与环境科学学院, 长沙 410081; 2. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 根据长沙地区于 2014 年 11 月 12 日~2015 年 4 月 13 日监测的大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 及观测的气象要素, 分析了长沙近地面水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 变化特征以及与温度、绝对湿度、降水量的关系. 结果表明: ①长沙大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 季节变化显著, 在冬季表现为高值. 冬季大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 与绝对湿度存在正相关关系. $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 在监测期间存在较大波动, 尤其是有降水事件发生时. 降水事件对长沙大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的变化影响显著, 水汽稳定同位素的低值与降水事件有关. ②不同天气条件下长沙大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的日变化实质上与绝对湿度有关, 而绝对湿度的大小又主要受控于局地的蒸散发和大气湍流的强度. 单次降水过程中大气水汽 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 存在显著的类似于降水中稳定同位素的“降雨量效应”. ③长沙大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 总是低于降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$, 逐日变化基本一致, 它们之间的平均差值分别为 8.6‰和 66.82‰. ④长沙冬半年大气水汽线方程为 $\delta^2\text{H} = 7.18 \delta^{18}\text{O} + 10.58$, 水汽线的斜率和截距总是小于同时段大气水汽线的斜率和截距, 春季水汽线的斜率和截距明显高于冬季水汽线的斜率和截距.

关键词: 大气水汽; 降水; 氢同位素; 氧同位素; 长沙地区

中图分类号: X142; X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)02-0475-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2016.02.010

Monitoring and Analysis of Stable Isotopes of the Near Surface Water Vapor in Changsha

XIE Yu-long^{1,2,3}, ZHANG Xin-ping^{1*}, YAO Tian-ci¹, HUANG Huang¹

(1. College of Resource and Environment Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China; 2. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the monitored atmospheric water vapor stable isotopes and observed meteorological elements at Changsha during the period from November 12, 2014 to April 13, 2015, the variations of water vapor stable isotopes and the relationships between isotope ratios and temperature, absolute humidity, precipitation amount were analyzed in this paper. The results indicated that: ①Seasonal variations of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in atmospheric water vapor at Changsha were remarkable, with high values in winter. $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in atmospheric water vapor were positively correlated with absolute humidity in winter. There were some fluctuations of the $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in atmospheric water vapor, especially when the precipitation events occurred. Precipitation events had a significant effect on the variations of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in atmospheric water vapor, and low values were often accompanied with precipitation events; ②Diurnal Variations of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in atmospheric water vapor had a close correlation with the atmospheric water vapor content, whereas the absolute humidity was mainly controlled by the strength of the local evapotranspiration and atmospheric turbulence. The “precipitation amount effect” was observed during the process of a single precipitation event; ③Values of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in atmospheric water vapor were always lower than those of precipitation in Changsha, but the variation trends were completely consistent, the average difference values were 8.6‰ and 66.82‰, respectively; ④The meteoric vapor line (MVL) in cold months was $\delta^2\text{H} = 7.18 \delta^{18}\text{O} + 10.58$, the slope and intercept of MVL were always lower than those of MWL, and the slope and intercept of MVL in spring were significantly higher than those of winter.

Key words: atmospheric water vapor; precipitation; hydrogen isotope; oxygen isotope; Changsha

水稳定同位素在水循环、大气环流和古气候古环境变化研究中得到了广泛应用^[1]. 大气水汽是降水的物质基础, 水汽中的稳定同位素组成对于降水中稳定同位素组成具有直接影响^[2]. 研究大气水汽中稳定同位素变化对于揭示水汽来源以及水汽输送过程有着重要的指示意义. 由于水汽在大气中的输送具有空间上和时间上的连续性, 因此, 利用水汽同位素可以全面地分析水汽的来源、路径、水循环中

各分量的再分配和补给形式, 更深入地了解水循环中各种空间和时间尺度下水汽的连续变化特征和历史^[3]. 大气水汽稳定同位素的研究在生物地球化学

收稿日期: 2015-07-26; 修订日期: 2015-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171035, 41571021); 湖南省重点学科建设项目(2011001); 湖南重特大干旱机理研究项目(2015001)

作者简介: 谢宇龙(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为气候变化, E-mail: 550368627@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: zxp@hunnu.edu.cn

循环研究中也具有重要的潜在价值. 高时空分辨率的大气水汽 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 可促进对全球和局地生态系统和生态水文过程的理解,也是模型验证和同位素卫星反演偏差估算的重要工具^[4].

在过去数十年里,有关降水中稳定同位素的研究已取得了丰硕成果. 但是降水只是大量蒸发、冷凝以及混合过程的最终产品^[5]. 研究表明大气水汽稳定同位素有助于深入认识水循环过程及反馈机制^[6]. 但由于大气水汽物理过程的复杂性以及大气水汽同位素监测手段限制了对水汽同位素高时空分辨率实测数据的获取,以至于到目前为止,大气水汽中稳定同位素的研究还较少涉及.

综合近年来的研究成果发现,在不同地区,影响大气水汽中稳定同位素的主要因素不尽相同. Jacob等^[7]在德国海德堡 8 a 的观测发现,在年际尺度上,大气水汽中同位素组成与降水中同位素组成具有显著的正相关关系,且水汽中同位素与温度的关系比降水中同位素与温度的关系显著. Gat等^[8]对地中海大气水汽的研究表明,大气水汽中稳定同位素受到强烈的海气相互作用影响,高过量氘与强烈的蒸发及过低的湿度有关. Uemura等^[9]利用船载设备收集了南大洋 33°~69°S 近海表大气水汽中的氢氧同位素,发现过量氘与相对湿度呈反相关而与海表温度呈正相关. Noone等^[10]通过对冒纳罗亚岛观测的大气水汽混合比率和水汽 $\delta^2\text{H}$ 的综合分析,揭示了该地区秋季海表边界层与对流层自由大气的日循环机制,证实了水汽同位素在识别水汽运动中的独特优势. Steen-Larsen等^[11]发现在格陵兰大气中水汽同位素与近地表相对湿度具有明显相关性;后续研究实地对比观测了地表不同高度大气水汽同位素含量,发现大气水汽同位素日变化与相对湿度具有很强的相关性,其季节变化与局地天气条件相关^[12]. 大气水汽中同位素成分还与天气过程有关. 例如,强烈的暴风雨引发的降水能使大气水汽中重的同位素成分快速脱离出来,从而导致剩余水汽中稳定同位素的贫化加速^[13].

在国内,余武生等^[14]和尹常亮等^[15]分别对青藏高原上的那曲、德令哈两地近地面的大气水汽同位素进行了研究,发现降水事件对水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响非常大. Wen等^[16,17]对北京近地面大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的观测表明同位素丰度的逐日变化及昼夜变化在夏季风期间明显小于其它时段、非季风期间同位素的丰度与水汽含量显著正相关. Huang等^[4]对张掖人工绿洲玉米生态系统大气水汽 $\delta^{18}\text{O}$ 和

$\delta^2\text{H}$ 比值与通量进行了原位连续观测,发现在季节尺度上,大气水汽 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的月均值表现出先上升后降低的趋势. 在日时间尺度上,大气水汽 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 具有明显的日循环特征. 大气水汽稳定同位素的变化对极端天气事件十分敏感,崔江鹏等^[18]在青藏高原中部那曲捕捉到印度洋台风“费林”极低的大气水汽 $\delta^{18}\text{O}$ 信号,表明即使在季风结束期,印度洋水汽仍可以通过极端天气事件影响到青藏高原,而且这种影响有可能被保存在冰芯等介质的稳定同位素记录中.

尽管国内已有学者对青藏高原等地区大气水汽中稳定同位素进行了初步研究,但缺乏对受东南季风和西南季风共同影响的南方地区水汽稳定同位素的基本认识,限制了人们对该地区大气水汽输送过程中稳定同位素变化的认识. 长沙位于湖南东北部,受西南季风和东南季风共同影响,在这里开展水汽稳定同位素研究,不仅可以与青藏高原的水汽稳定同位素作对比,揭示大气水汽稳定同位素的区域变化特征,同时也可受复杂季风系统影响下的季风区水汽来源及水汽再循环等过程提供来自稳定同位素的证据. 考虑到长沙地区降水季节变化明显:春季 41%、夏季 30%、秋季 14.8%、冬季 14.2%,其中冬春季节降水量差异最大,选择冬春季节作为研究时段,有利于深入地认识降水量等因子对水汽同位素的影响. 基于此,研究根据 2014 年 11 月~2015 年 4 月长沙地区近地面水汽同位素的实测资料,分析了大气水汽中稳定同位素的变化特征以及与近地面温度、绝对湿度、降水量之间的关系.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长沙(27°51'~28°41'N,111°53'~114°15'E,海拔 37 m)位于中国中南部、湖南省东部偏北、湘江下游和长浏盆地西缘,属典型的中亚热带季风气候:气候温和湿润,四季分明,降水充沛,雨热同期,年平均气温 17.2℃,年平均降水量达 1 361 mm,降水主要集中于春夏季,占全年降水的 71%,而秋冬季降水较少,仅占全年降水的 29%.

1.2 水汽监测和数据校正

2014 年 11 月 12 日~2015 年 4 月 13 日,在位于岳麓山脚下的湖南师范大学气象气候实验中心,利用美国 LGR 公司生产的液气两用型稳定同位素分析仪(IWA-35EP)对近地面 10 m 高的水汽进行连续取样分析. IWA-35EP 水汽同位素分析仪由两

部分组成,即同位素分析仪和水汽同位素校正源.同位素分析仪采用高分辨率的直接吸收激光光谱测量原理,直接给出水汽中氢氧稳定同位素比率($^2\text{H}/\text{H}$ 、 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$).测试时,为了保证测量的精度,需要对测量结果进行校验,该步骤通过水汽同位素校正源测量已知稳定同位素成分的标准水完成.比较测得的标准水汽稳定同位素值与已知标准水汽真实值,对大气水汽稳定同位素测量结果进行标准值校正和漂移校正.标准水测完后,开始测量外界环境大气水汽的氢氧稳定同位素值.本研究中 ^{18}O 和 ^2H 的比率采用相对于维也纳标准海洋水(V-SMOW)的千分差表示:

$$\delta^{18}\text{O} \text{ (或 } \delta^2\text{H)} = \left(\frac{R_s}{R_{\text{V-SMOW}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (1)$$

式中, R_s 和 $R_{\text{V-SMOW}}$ 分别为水汽样和维也纳标准平均海洋水中的氧(或氢)稳定同位素比率($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 或 $^2\text{H}/\text{H}$),测量的 $\delta^{18}\text{O}$ 精度为 $\pm 0.4\text{‰}$, $\delta^2\text{H}$ 精度为 $\pm 1.2\text{‰}$.气象数据通过湖南师范大学气象园自动气象站获取.

2 结果与讨论

2.1 水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的逐日变化特征

图1给出了长沙近地面2014年11月12日~

2015年4月13日大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 与气温、绝对湿度和降水量的逐日变化曲线.可以看出,大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 存在显著的季节变化.11月12日~12月22日波动较大,但总体呈上升趋势,期间出现3次回落,分别为11月24日前后、11月27日~12月3日以及12月21日前后.12月21日 $\delta^{18}\text{O}$ 跌入低谷,达 -16.59‰ , $\delta^2\text{H}$ 也降到监测期间的次低值,达 -115.26‰ .12月22日以后,大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 急剧上升,此后维持高值水平.此种状态一直持续到3月中旬.3月中旬至4月中旬大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 均存在较大波动.整个监测期间大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -8.66‰ ,最高值为 -2.19‰ ,最低值为 -17.23‰ ; $\delta^2\text{H}$ 的平均值为 -51.58‰ ,最高值为 -7.98‰ ,最低值为 -124.99‰ .

可以看到,大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的变化与温度、绝对湿度的变化在某些时段并不一致.例如11月12日至12月初、3月中旬至4月13日温度、绝对湿度相对较高,而大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 却相对较低.因此,这可能与降水事件的影响有关.监测期间的11~12月共出现了4次水汽稳定同位素低值事件,强度和持续时间各有不同.前3次低值事件分别出现在11月中旬、11月24日前后以及11月

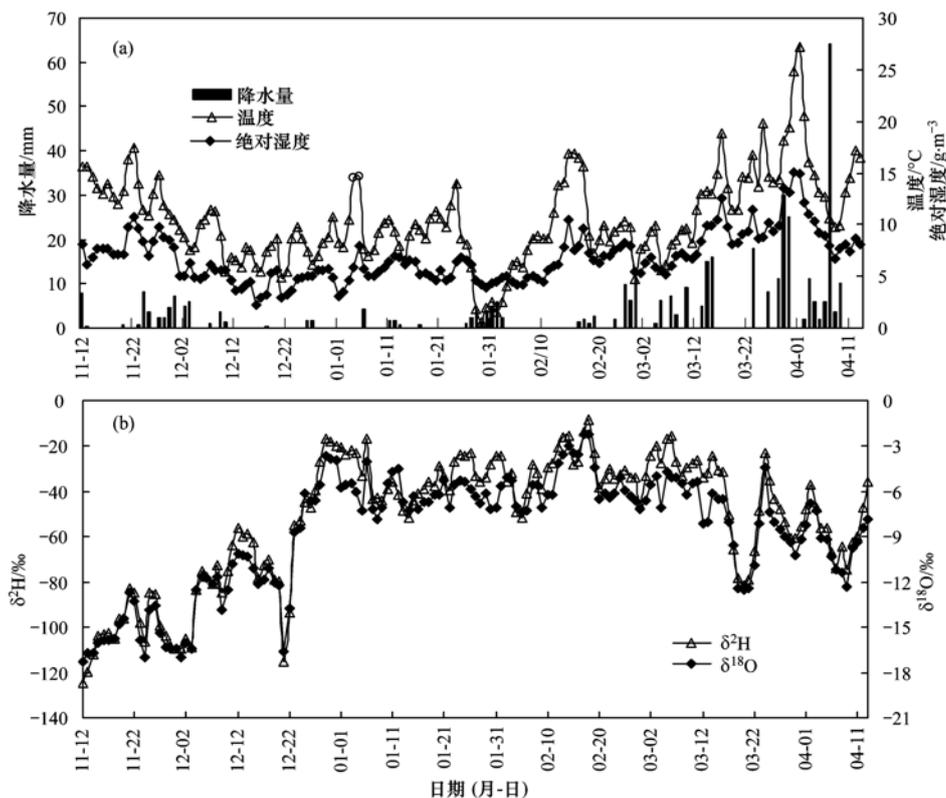


图1 长沙大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 及各气象要素的逐日变化

Fig. 1 Daily variations of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in atmospheric water vapor and some meteorological factors in Changsha

27日~12月3日. 虽然在12月21日前后也出现一次大气水汽稳定同位素低值事件,但与前3次低值事件的原因不同. 前3次低值事件的出现均伴有降水过程,大气湿度较高,而12月21日前后无降水过程,白天强烈升温导致的大气湍流混合加强则成为该次低值事件的主要原因,12月23日~3月16日,长沙受大陆性气团影响. 由于气团内降水相对较少,大气湿度低,水汽中稳定同位素一直维持高值. 3月中旬至4月13日大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 表现出波动变化,这与长沙春季频繁的降雨降温过程有关. 由于降水主要来源自高层水汽的凝结,则由降落水滴蒸发贡献给近地层的水汽具有相对较低的稳定同位素比率. 这也就是为何降水事件发生时水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 值均较低的原因.

通过分析长沙降水较多时段和降水较少时段大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 与相关气象要素的关系发现,在降水较少的12月4日~2月16日,大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 与绝对湿度存在显著的正相关关系(相关系数分别为0.47和0.39,都达到0.01的信度). 相对

而言,该时段大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 与温度关系较为微弱(相关系数仅为0.27和0.21,但都达到0.01的信度). 而在降水较多的2月17日~4月13日,11月12日~12月4日水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 与降水量存在明显的反向波动趋势. 在有降水事件发生时, $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 都处在曲线的波谷处. 可以看出,降水事件对长沙大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的变化影响显著.

2.2 不同天气条件下水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的日变化

2.2.1 晴天水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的变化

在不同天气条件下,大气水汽中稳定同位素的日变化特点不尽相同. 例如,在2015年12月21日,长沙为晴天,气温变化于 $-1\sim 10.3^\circ\text{C}$,绝对湿度变化于 $2.2\sim 3.79\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$. 从图2(b)可以看出,该日大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 具有显著的日变化. $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的最低值出现在温度最高、绝对湿度最低的15:00,分别为 -28.71‰ 和 -234.4‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的最高值则出现在02:00,分别为 -4.47‰ 和 -37.73‰ . 很明显,晴天大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 与温度存在明显的反比关系.

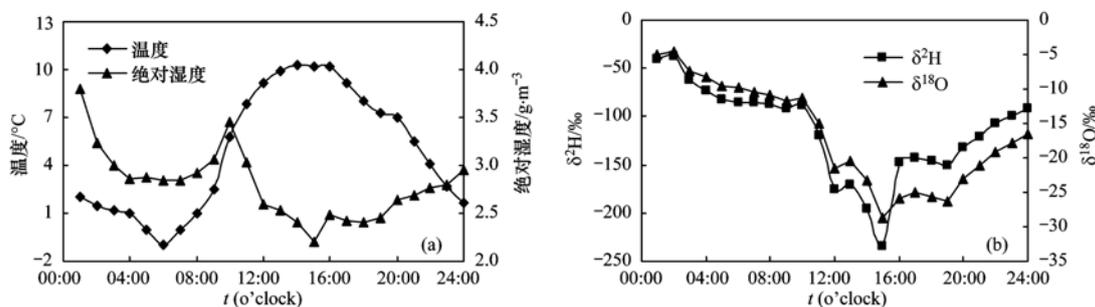


图2 晴天长沙大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 及温度、绝对湿度的变化

Fig. 2 Diurnal variations of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in atmospheric water vapor and temperature, absolute humidity in sunny day in Changsha

水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的这种日变化特征与局部的蒸散发和大气湍流有关. 通常,蒸散过程不产生稳定同位素分馏. 因此,由下垫面蒸散贡献给近地层的水汽具有相对较高的稳定同位素比率. 另外,大气湍流的强弱对于水汽同位素高低层之间的混合具有重要影响. 湍流强时,上下层之间的空气交换作用强,近地层水汽中稳定同位素减少;湍流弱时,近地层水汽中稳定同位素变化较小. 在晴天日出后,地面温度上升,低层趋于不稳定,湍流混合加强,蒸发加快;10:00后,由于湍流混合的作用大于地面蒸发的作用,水汽含量反而减小,近地层水汽中的稳定同位素不断降低,15:00之后,温度降低,湍流减弱,而蒸发作用超过湍流作用,近地层水汽同位素比率也随之增加.

2.2.2 阴天水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的变化

监测期间的1月10日为阴天,气温变化于 $8.1\sim 13.7^\circ\text{C}$,绝对湿度变化于 $5.4\sim 6.57\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$. 如图3(b)所示,00:00~06:00,水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 值一直维持在低值水平,06:00之后上升较快,至上午10:00出现最高值,此后出现急剧下降,17:00后一直维持较低值. 其中,大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 最高值为 -3.65‰ ,最低值为 -7.1‰ ; $\delta^2\text{H}$ 最高值为 -30.4‰ ,最低值为 -43.75‰ ,可见长沙阴天大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 变化幅度较小. 水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的这种变化与温度的变化缺少关联,但与绝对湿度的变化较为一致. 由于阴天的大气湍流作用通常较弱,水汽含量的日变化主要受制于下垫面的蒸散发. 蒸散发越强,近地面绝对湿度越大,水汽同位素值越高;反之,蒸散

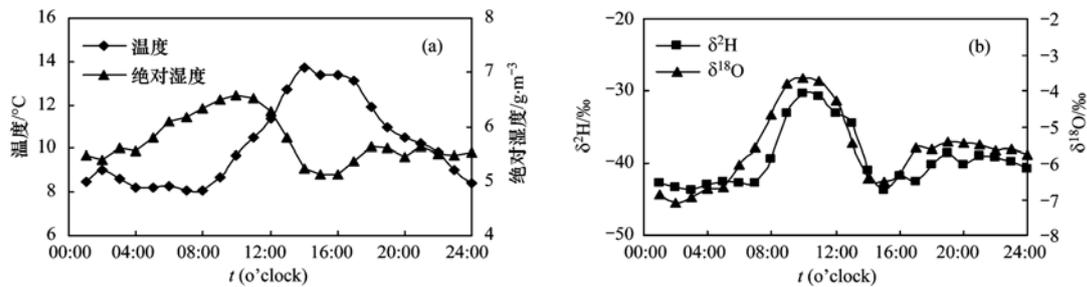


图3 阴天长沙大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 及温度、绝对湿度的变化

Fig. 3 Diurnal variations of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in atmospheric water vapor and temperature, absolute humidity in cloudy day in Changsha

越弱,近地面绝对湿度越小,则水汽同位素值越低。

2.2.3 降雨日水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的变化

监测期间的2015年4月7日是雨日,降水量达64 mm,气温变化于9.8~12.1 $^{\circ}\text{C}$,绝对湿度变化于6.89~9.15 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。根据图4(b),00:00~12:00,大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 维持低值状态,午后上升。 $\delta^{18}\text{O}$ 波动范围为-12.14‰~-9.9‰, $\delta^2\text{H}$ 的波动范围-82.28‰~-60.13‰。很显然, $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 与绝对湿度呈显著反比关系, $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 与温度的变化则缺少关联。降雨日水汽中的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$

的变化与云下雨滴的蒸发和下垫面蒸发有关,而这两类蒸发又主要受降水影响。该日的降水过程主要发生在00:00~08:00,云下雨滴的蒸发使近地面水汽同位素降低,又由于此时大气湿度大,夜间温度低,下垫面蒸发弱,蒸发补给的水汽少,大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 较低,08:00~12:00雨量逐渐减小,午后降雨基本停止,下垫面蒸发则加强,蒸发补给的水汽增多,水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 增大。综上所述,单次降水过程中大气水汽 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 存在显著的类似于降水中稳定同位素的“降雨量效应”。

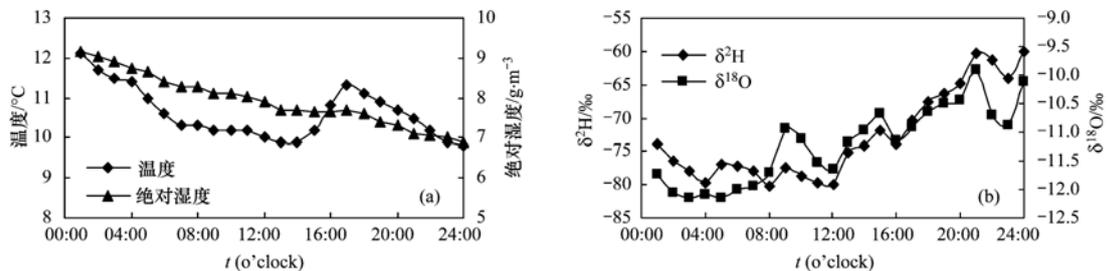


图4 降雨日长沙大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 及温度、绝对湿度的变化

Fig. 4 Diurnal variations of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in atmospheric water vapor and temperature, absolute humidity in rainy day in Changsha

2.3 水汽中稳定同位素与降水中稳定同位素的比较

降水和在水汽中稳定同位素存在相互转换的关系,这对了解水汽稳定同位素的补给具有重要意义。为研究这种关系,比较了降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 与相应日期大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 。由于降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的资料长度有限,本研究只比较2014年11月12日~2015年1月18日水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 与降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的关系。

根据图5,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 与水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的变化基本一致。在取样期间,大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 波动范围为-17.23‰~-4.01‰,平均值为-12.37‰;降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的波动范围为-9.33‰~-0.23‰,平均值为-3.79‰。大气水汽中 $\delta^2\text{H}$ 波动范围为-124.99‰~-16.32‰,平均值为-81.25‰;降水中 $\delta^2\text{H}$ 的波动范围为-54.02‰~3.82‰,平均值

为-14.53‰。大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 均低于降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$,水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 之间存在一个差值 $\Delta\delta^{18}\text{O}$,最大时为13.11‰,最小时为1.18‰,平均值为8.6‰;水汽中 $\delta^2\text{H}$ 与降水中 $\delta^2\text{H}$ 同样存在一个差值 $\Delta\delta^2\text{H}$,最大时为107.27‰,最小时12.43‰,平均值为66.82‰。这个差值的大小与水循环中的稳定同位素的分馏有关。首先,降落的雨滴在不饱和大气中会产生蒸发,使得雨滴在下落过程中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 富集,而蒸发补给大气的那部分水汽 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 则相对贫化;其次,由于轻重同位素水汽压的不同,当降落雨滴与周围大气水汽发生同位素交换时,轻同位素优先进入气相,重同位素则优先进入液相,因此大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 低于降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$;另一个原因则是在形成降水时的凝结作用过程中,重同位素首先凝结进入液相。从图5(c)可以看出,

$\Delta\delta^2\text{H}$ 和 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 的高值出现在降水较多的11月12日~12月10日,此后呈降低趋势.通常降雨量越大,云下雨滴的二次蒸发作用越弱,下垫面蒸发也越弱,近地面水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 偏低, $\Delta\delta^2\text{H}$ 和 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 值也就越大.当 $\Delta\delta^2\text{H}$ 和 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 趋近于0时(如1月12日),

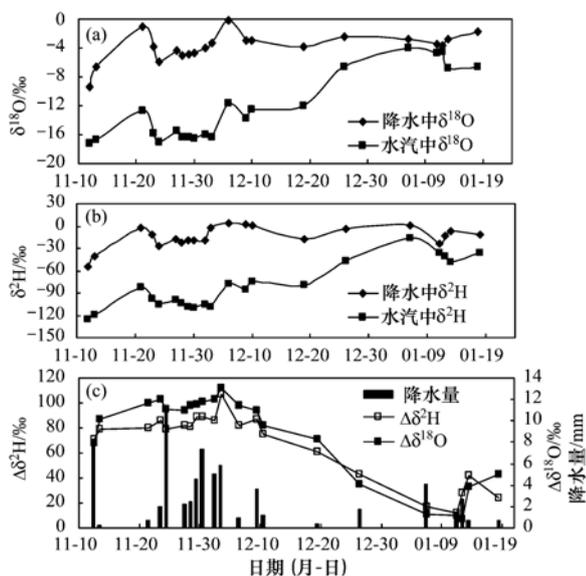


图5 长沙水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 与降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的比较

Fig. 5 Comparison between $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in atmospheric water vapor and those in precipitation in Changsha

表1 长沙大气水汽线与大气水线的比较

Table 1 Comparison between Meteoric Vapor Line and meteoric water line in Changsha

时间	大气水汽线	大气水线
冬半年	$\delta^2\text{H} = 7.18 \delta^{18}\text{O} + 10.58$, $r = 0.98$ (2014-11-12 ~ 2015-04-13 资料)	$\delta^2\text{H} = 8.18 \delta^{18}\text{O} + 18.96$, $r = 0.98$ (2010-01 ~ 2013-12 资料)
冬季	$\delta^2\text{H} = 6.97 \delta^{18}\text{O} + 8.05$, $r = 0.97$ (2014-12 ~ 2015-02 资料)	$\delta^2\text{H} = 8.35 \delta^{18}\text{O} + 21.53$, $r = 0.98$ (2010-01 ~ 2012-12 资料)
春季	$\delta^2\text{H} = 7.84 \delta^{18}\text{O} + 18.1$, $r = 0.96$ (2015-03-01 ~ 2015-04-13 资料)	$\delta^2\text{H} = 8.24 \delta^{18}\text{O} + 17.31$, $r = 0.97$ (2010-01 ~ 2012-12 资料)

3 结论

(1)长沙大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 季节变化显著,在冬季表现为高值. $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 在监测期间存在较大波动,尤其是有降水事件发生时.受降水事件的影响,长沙大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 逐日变化与温度、绝对湿度的变化不一致,但冬季大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 与绝对湿度具有显著的正比关系.降水事件对大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的变化影响显著,水汽稳定同位素的低值与降水事件有关.

(2)不同天气条件下长沙大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的日变化与绝对湿度有关,而绝对湿度的大小又主要受控于局地的蒸散发和大气湍流的强度.局地蒸

说明此时下垫面蒸发水汽的同位素补给占了绝对优势.

2.4 大气水汽线

根据大气水线(MWL)的定义,将水汽中 $\delta^2\text{H}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 间的线性关系定义为大气水汽线(meteoric vapor line, MVL).基于长沙监测期间大气水汽中稳定同位素和2010年1月1日~2012年12月31日长沙降水稳定同位素资料^[20],对冬半年、冬季和春季(暂且以3月1日~4月13日代表春季)的大气水汽线分别进行计算并相互对比(见表1).结果显示:大气水汽线斜率和截距总是小于大气水线的斜率和截距.这个结果不仅与降落雨滴在云底的二次蒸发产生的分馏效应有关^[1],也与下垫面水汽蒸发的补充有关^[29].通常,在从液相到气相的蒸发中,轻同位素(例如 ^2H)比重同位素(例如 ^{18}O)有更快的蒸发分馏速率,因此,大气水汽线的斜率通常小于8.

另外,水汽线斜率和截距在冬季又明显小于春季,这是由于冬季降雨量较小,空气较干燥,雨滴在云底二次蒸发过程较强,受到同位素动力分馏强烈而使得水汽线的斜率和截距偏小,而春季降雨量大,空气湿度大,在云底受到的同位素动力分馏作用偏弱,使得水汽线的斜率和截距偏大.

散发使近地表大气水汽 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 出现富集.单次降水过程中大气水汽 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 存在显著的类似于降水中稳定同位素的“降雨量效应”.

(3)长沙大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 总是低于降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$,但逐日变化基本一致,它们之间存在一个差值 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 和 $\Delta\delta^2\text{H}$,平均值分别为8.6‰和66.82‰.

(4)冬半年长沙大气水汽线方程为 $\delta^2\text{H} = 7.18 \delta^{18}\text{O} + 10.58$,水汽线的斜率和截距总是小于同时段大气水线的斜率和截距,春季水汽线的斜率和截距则明显高于冬季水汽线的斜率和截距.

参考文献:

- [1] Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record

- [J]. *Nature*, 1993, **364**(6434): 218-220.
- [2] Hubner H, Kowski P, Hermichen W D, *et al.* Regional and temporal variations of Deuterium in the precipitation and atmospheric moisture of central Europe [A]. In: *Isotope Hydrology 1978* [C]. Vienna/Austria: IAEA-publications, 1979. 289-307.
- [3] 章新平, 张新主, 关华德, 等. 由 TES 反演的大气水汽中 δD 的时空分布特征[J]. *气象学报*, 2012, **70**(6): 1367-1380.
- [4] Huang L J, Wen X F. Temporal variations of atmospheric water vapor δD and $\delta^{18}O$ above an arid artificial oasis cropland in the Heihe River Basin [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, **119**(19): 11456-11476.
- [5] Frankenberg C, Yoshimura K, Warneke T, *et al.* Dynamic processes governing lower-tropospheric HDO/H₂O ratios as observed from space and ground [J]. *Science*, 2009, **325**(5946): 1374-1377.
- [6] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, **16**(4): 436-468.
- [7] Jacob H, Sonntag C. An 8-year record of the seasonal variation of ²H and ¹⁸O in atmospheric water vapour and precipitation at Heidelberg, Germany[J]. *Tellus B*, 1991, **43**(3): 291-300.
- [8] Gat J R, Klein B, Kushnir Y, *et al.* Isotope composition of air moisture over the Mediterranean Sea: an index of the air-sea interaction pattern[J]. *Tellus B*, 2003, **55**(5): 953-965.
- [9] Uemura R, Matsui Y, Yoshimura K, *et al.* Evidence of deuterium excess in water vapor as an indicator of ocean surface conditions[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, **113**(D19): D19114.
- [10] Noone D, Galewsky J, Sharp Z D, *et al.* Properties of air mass mixing and humidity in the subtropics from measurements of the D/H isotope ratio of water vapor at the Mauna Loa Observatory [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, **116**(D22): D22113.
- [11] Steen-Larsen H C, Masson-Delmotte V, Sjolte J, *et al.* Understanding the climatic signal in the water stable isotope records from the NEEM shallow firn/ice cores in northwest Greenland[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 2011, **116**(D6): D06108.
- [12] Steen-Larsen H C, Johnsen S J, Masson-Delmotte V, *et al.* Continuous monitoring of summer surface water vapor isotopic composition above the Greenland Ice Sheet [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(9): 4815-4828.
- [13] Lawrence J R, Gedzelman S D, Zhang X P, *et al.* Stable isotope ratios of rain and vapor in 1995 hurricanes [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, **103**(D10): 11381-11400.
- [14] 余武生, 姚檀栋, 田立德, 等. 那曲河流域季风结束后前后大气水汽中 $\delta^{18}O$ 变化特征[J]. *科学通报*, 2006, **51**(2): 194-199.
- [15] 尹常亮, 姚檀栋, 田立德, 等. 德令哈水汽中 $\delta^{18}O$ 的时间变化特征——以2005年7月~2006年2月为例[J]. *中国科学D辑: 地球科学*, 2008, **38**(6): 723-731.
- [16] Wen X F, Zhang S C, Sun X M, *et al.* Water vapor and precipitation isotope ratios in Beijing, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, **115**(D1): D01103.
- [17] Wen X F, Sun X M, Zhang S C, *et al.* Continuous measurement of water vapor D/H and ¹⁸O/¹⁶O isotope ratios in the atmosphere [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, **349**(3-4): 489-500.
- [18] 崔江鹏, 田立德, 刘琴, 等. 青藏高原中部大气水汽稳定同位素捕捉到印度洋台风“费林”信号[J]. *科学通报*, 2014, **59**(35): 3526-3532.
- [19] White J W C, Gedzelman S D. The isotopic composition of atmospheric water vapor and the concurrent meteorological conditions [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 1984, **89**(D3): 4937-4939.
- [20] 黄一民, 章新平, 孙葭. 长沙大气水汽及与局地气象要素的关系[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, **23**(10): 1412-1417.
- [21] 黄一民, 章新平, 唐方雨, 等. 长沙大气降水稳定同位素变化及过量氘指示水汽来源[J]. *自然资源学报*, 2013, **28**(11): 1945-1954.
- [22] 黄一民, 孙葭, 黄一斌, 等. 基于 TES 反演数据的亚洲中低纬度地区大气水汽 δD 的时空分布[J]. *地理学报*, 2014, **69**(11): 1661-1672.
- [23] 黄一民, 章新平, 孙葭, 等. 长沙大气水汽、降水中稳定同位素季节变化及与水汽输送关系[J]. *地理科学*, 2015, **35**(4): 498-506.
- [24] 吴华武, 章新平, 关华德, 等. 不同水汽来源对湖南长沙地区降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的影响[J]. *自然资源学报*, 2012, **27**(8): 1404-1414.
- [25] 章新平, 姚檀栋. 我国降水中 $\delta^{18}O$ 的分布特点[J]. *地理学报*, 1998, **53**(4): 356-364.
- [26] 柳景峰, 丁明虎, 效存德. 大气水汽氢氧同位素观测研究进展——理论基础、观测方法和模拟[J]. *地理科学进展*, 2015, **34**(3): 340-353.
- [27] 吴华武, 章新平, 孙广禄, 等. 湖南长沙地区大气降水中稳定同位素特征变化[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, **21**(5): 540-546.
- [28] 朱建佳, 陈辉, 巩国丽. 柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源[J]. *环境科学*, 2015, **36**(8): 2784-2790.
- [29] 王恒纯. 同位素水文地质概论[M]. 北京: 地质出版社, 1991. 5-102.

CONTENTS

Editor's comment	(403)
Risk Assessment and Risk Management of Chemicals in China	WANG Tie-yu, ZHOU Yun-qiao, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (404)
Application of Land-use Regression Models in Spatial-temporal Differentiation of Air Pollution	WU Jian-sheng, XIE Wu-dan, LI Jia-cheng (413)
Ecological Footprint Evolution Characteristics and Its Influencing Factors in China from 2000 to 2010	HUANG Bao-rong, CUI Shu-hong, LI Ying-ming (420)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Aerosol in PM _{2.5} During Winter in Guanzhong Area	TIAN Peng-shan, CAO Jun-ji, HAN Yong-ming, <i>et al.</i> (427)
Chemical Composition of the Single Particle Aerosol in Winter in Nanning Using SPAMS	LIU Hui-lin, SONG Hong-jun, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (434)
Correlation Analysis Between Characteristics of VOCs and Ozone Formation Potential in Summer in Nanjing Urban District	YANG Xiao-xiao, TANG Li-li, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i> (443)
Seasonal Dynamics of Airborne Pollens and Its Relationship with Meteorological Factors in Beijing Urban Area	MENG Ling, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (452)
Mercury Distribution Characteristics and Atmospheric Mercury Emission Factors of Typical Waste Incineration Plants in Chongqing	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (459)
Characteristics of Atmospheric Dry and Wet Deposition of Trace Metals in the Hinterland of the Three Gorges Reservoir, China	ZHANG Liu-yi, LIU Yuan, QIAO Bao-qing, <i>et al.</i> (466)
Monitoring and Analysis of Stable Isotopes of the Near Surface Water Vapor in Changsha	XIE Yu-long, ZHANG Xin-ping, YAO Tian-ci, <i>et al.</i> (475)
Mercury Transport from Glacier to Runoff in Typical Inland Glacial Area in the Tibetan Plateau	SUN Xue-jun, WANG Kang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (482)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Core Sediments from Lakes of Tibet	GUO Bi-xi, LIU Yong-qin, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (490)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Inflow Rivers to Northeastern Lake Tanganyika	YU Cheng, CHEN Shuang, ZHANG Lu (499)
Over One Hundred Year Sediment Record of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Lake Bosten, Xinjiang	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (507)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media from Qingbang Island, Zhoushan, China	ZHENG Huang, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (513)
Transformation of Non-point Source Soluble Nitrogen in Simulated Drainage Ditch	LI Qiang-kun, SONG Chang-ji, HU Ya-wei, <i>et al.</i> (520)
Influence of Landscape Heterogeneity on Total Nitrogen Concentration in Zhongtian River Watershed	WANG Jing-ping, LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, <i>et al.</i> (527)
Nitrogen Release from Sediment Under Dry and Rainy Season Alternation and Its Contribution to N Export from Xiangxi Watershed in Jiangxi Province	HAN Ning, HAO Zhuo, XU Ya-juan, <i>et al.</i> (534)
Spatial and Temporal Distributions of Nitrogen and Phosphate in the Chaohu Lake	XI Shan-shan, ZHOU Chun-cai, LIU Gui-jian, <i>et al.</i> (542)
Phosphorus Fractions and Release Risk in Surface Sediments of an Agricultural Headwater Stream System in Hefei Suburban, China	PEI Ting-ting, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (548)
Surface Property and Sorption Characteristics of Phosphorus onto Surface Sediments in Sanggou Bay	ZHU Jia-mei, CAO Xiao-yan, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (558)
Particle Size Distribution and Pollutant Speciation Analyses of Stormwater Runoff in the Ancient Town of Suzhou	LI Huai, WU Wei, TIAN Yong-jing, <i>et al.</i> (565)
Abundance of Toxic and Non-toxic <i>Microcystis</i> sp. in Lake Hongze and Its Correlation with Environmental Factors	LI Da-ming, ZHANG Tong-qing, TANG Sheng-kai, <i>et al.</i> (573)
Effect of Charge-Transfer Complex on Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Property of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Waters of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	JIANG Tao, LIANG Jian, ZHANG Mu-xue, <i>et al.</i> (580)
Influence of pH on Kinetics of Anilines Oxidation by Permanganate	WANG Hui, SUN Bo, GUAN Xiao-hong (588)
Effects of EDTA on the Reductive Dechlorination of 2,4-D by Pd/Fe	ZHOU Hong-yi, NIE Ya-zhong, CHEN Yong, <i>et al.</i> (595)
Preparation of NiAl-MMO Films Electrode and Its Capacitive Deionization Property	WANG Ting, ZHU Chun-shan, HU Cheng-zhi (602)
Competitive Microbial Oxidation and Reduction of Arsenic	YANG Ting-ting, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (609)
Community Characteristics of ANAMMOX Bacteria in Subsurface Flow Constructed Wetland(SSFCW) for Processing of Aquaculture Waster Water	ZENG Xian-lei, LIU Xing-guo, WU Zong-fan, <i>et al.</i> (615)
Analysis of Pathogenic Bacteria in Reclaimed Water and Impact of UV Disinfection on the Removal of Pathogenic Bacteria	JING Ming, WANG Lei (622)
Analysis of the Microbial Community Structure in Continuous Flow Reactor Enhanced by Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterium <i>Burkholderia</i> sp. YX02	SHAO Ji-lun, CAO Gang, LI Zi-hui, <i>et al.</i> (630)
Comparative Metagenomics of BIOLAK and A ² O Activated Sludge Based on Next-generation Sequencing Technology	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin (638)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (647)
Removal of AOX and Chroma in Biologically Treated Effluent of Chemical Dyestuff Wastewater with Nanoscale Ni/Fe	SHU Xiao-ming, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (655)
Feasibility of 3BER-S Process for the Deep Denitrification in Synch with the Removal of PAEs from Reclaimed Water	XU Peng-cheng, HAO Rui-xia, ZHANG Ya, <i>et al.</i> (662)
Influence of Reaction Time on Titanate Nanomaterials and Its Adsorption Capability for Lead in Aqueous Solutions	FAN Gong-duan, CHEN Li-ru, LIN Ru-jing, <i>et al.</i> (668)
Sorption Characteristics of Phenanthrene and 1,1-Dichloroethene onto Reed Straw Biochar in Aquatic Solutions	WU Qing-wen, MENG Liang, ZHANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (680)
Adsorption Characteristics of Norfloxacin by Biochars Derived from Reed Straw and Municipal Sludge	ZHANG Han-yu, WANG Zhao-wei, GAO Jun-hong, <i>et al.</i> (689)
Effect of Seasonal Temperature Increasing on Nitrogen Mineralization in Soil of the Water Level Fluctuating Zone of Three Gorge Tributary During the Dry Period	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, LIU Dan, <i>et al.</i> (697)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Respiration and Enzyme Activity in a Winter Wheat Cropland	CHEN Shu-tao, SANG Lin, ZHANG Xu, <i>et al.</i> (703)
Distribution of Urban Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation in Different Functional Zones of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu (710)
Differential Effect and Mechanism of <i>in situ</i> Immobilization of Cadmium Contamination in Soil Using Diatomite Produced from Different Areas	ZHU Jian, WANG Ping, LIN Yan, <i>et al.</i> (717)
Characteristics of Adsorption Leaching and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate in Purple Soil	WANG Qiang, SONG Jiao-yan, ZENG Wei, <i>et al.</i> (726)
Cd Runoff Load and Soil Profile Movement After Implementation of Some Typical Contaminated Agricultural Soil Remediation Strategies	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (734)
Concentrations and Component Profiles PAHs in Surface Soils and Wheat Grains from the Cornfields Close to the Steel Smelting Industry in Handan, Hebei Province	WU Di, WANG Yi-long, LIU Wei-jian, <i>et al.</i> (740)
Effect of Arbuscular Mycorrhiza (AM) on Tolerance of Cattail to Cd Stress in Aquatic Environment	LUO Peng-cheng, LI Hang, WANG Shu-guang (750)
Acute Toxic Effects of Bromate on Aquatic Organisms	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (756)
Development of Self-assembled Dumbbell-like Fe ₃ O ₄ Micro/nanomaterial for Application in Thermocatalytic Degradation of Polybrominated Biphenyls	HUANG Xin-chen, ZONG Gang, LIU Ye-xuan, <i>et al.</i> (765)
Impact of Salinity on Leachate Treatment and N ₂ O Releases from Semi-aerobic Aged-refuse Bioreactor	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (775)
Evaluating the Significance of Odor Gas Released During the Directly Drying Process of Sludge: Based on the Multi-index Integrated Assessment Method	DING Wen-jie, CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, <i>et al.</i> (782)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年2月15日 第37卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 2 Feb. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行