

大气水汽同位素观测与研究新进展

赵晓丽^{1,2}, 袁瑞强^{1*}

¹山西大学环境与资源学院, 山西 太原

²北京师范大学地理科学学部, 北京

收稿日期: 2022年1月12日; 录用日期: 2022年4月1日; 发布日期: 2022年4月8日

摘要

由于同位素的分馏效应, 大气水汽氢氧稳定同位素包含了重要的水循环信息, 成为研究陆-气、海-气、植被-大气界面水分运动的重要工具。二十一世纪以来, 稳定同位素红外光谱技术快速发展, 傅里叶变换红外线光谱仪(FTIR)和光腔增强近红外激光吸收光谱仪(CES)被广泛应用, 促进了大气水汽观测逐渐成熟, 观测精度不断提高, 监测数据不断丰富。目前, 基于红外光谱技术建立起了NDACC、TCCON、SWVID等地基监测网络, 开展大气水汽同位素监测。TES、SCIAMACHY、IASI、MIPAS、ACE等观测项目将FTIR搭载在卫星上对对流层或平流层的水汽同位素进行监测, 形成了覆盖全球的大气水汽同位素卫星天基观测网络。此外, 还产生了结合天基和地基观测的MUSICA项目。上述工作使得获得大尺度、高分辨率的大气水汽稳定同位素观测数据成为可能, 相关研究得到快速发展。本文在前人综述的基础上, 对天基观测、地基观测和多平台融合观测项目及其数据信息进行对比介绍, 并综述了近五年来基于大气水汽同位素观测在水汽同位素组成和变化、大气环流, 水汽来源, 生态系统和湖泊蒸散发, 以及冰雪动态等方面的主要研究进展。可预见覆盖全球的高时间分辨率大气水汽稳定同位素数据将成为探究地球表层系统的有力工具。

关键词

大气水汽同位素, 遥感, 数据库, 观测

Advances in Atmospheric Vapor Isotope Observation and Research

Xiaoli Zhao^{1,2}, Ruiqiang Yuan^{1*}

¹School of Environment and Resource, Shanxi University, Taiyuan Shanxi

²Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing

Received: Jan. 12th, 2022; accepted: Apr. 1st, 2022; published: Apr. 8th, 2022

*通讯作者。

文章引用: 赵晓丽, 袁瑞强. 大气水汽同位素观测与研究新进展[J]. 测绘科学技术, 2022, 10(2): 23-35.
DOI: 10.12677/gst.2022.102003

Abstract

Due to the fractionation effect of isotopes, the stable hydrogen and oxygen isotopes of atmospheric vapor contain important information of water cycle, and become an important tool for studying water movement at land-air, sea-air, and vegetation-atmosphere interfaces. Since the 21st century, infrared spectroscopy technology for water isotope observation has developed rapidly, and Fourier Transform infrared spectrometer (FTIR) and cavity enhanced near-infrared laser absorption spectrometer (CES) have been widely used, which has promoted the gradual maturity of the observation technology, improved observation accuracy and enriched monitoring data. At present, based on infrared spectroscopy technology, ground-based monitoring stations have been established to monitor water isotopes in atmospheric vapor, and monitoring networks such as NDACC, TCCON and SWVID have been formed. TES, SCIAMACHY, IASI, MIPAS, ACE and other observation projects carry FTIR on satellites to monitor water isotopes in the vapor of troposphere or stratosphere, and provide the satellite observation data covering the whole world. In addition, there is the MUSICA project, which combines space-based and ground-based observations. The above work makes it possible to obtain large scale and high resolution water isotope data in atmospheric vapor, and the related research has developed rapidly. In this paper, on the basis of previous reviews, the space-based and ground-based observations and datasets are introduced and compared. Studies in the isotopic composition and variation of water vapor, the atmospheric circulation, the water vapor sources, evapotranspiration of ecological systems and lakes, and cryosphere dynamics based on the water isotope observation in atmospheric vapor in the past five years are reviewed. The global stable isotopic data of atmospheric water vapor with high temporal resolution will be a powerful tool for exploring the earth surface system.

Keywords

Water Isotopes in Atmospheric Vapor, Remote Sensing, Database, Observation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

由于同位素分馏效应的存在,水同位素组成可为水循环提供大量有价值的信息。通过分析大气水汽同位素组成变化可以确定大气水汽来源,获取大气水汽运动过程信息,加深对水循环过程中陆-气、海-气、植被-大气界面水分运动的认识。然而,水汽同位素的观测相对于降水同位素观测存在明显的困难,使得大气水汽同位素观测和研究的发展大大落后于降水同位素的观测和研究。传统的大气水汽同位素观测方法,如液氮冷阱冷凝法、Peltier 制冷法、干燥剂脱水法和 Flask 真空采样法,均存在明显的缺点且需要收集大气样品再进行同位素测量,耗费人力物力,不适合大范围长时间的观测。直到近年来应用红外光谱技术的仪器出现,大气水汽同位素的观测问题才逐渐得到解决,产生了大量的监测数据,促进了相关研究的快速发展[1]。在此背景下,柳景峰等[2]综述了光谱仪测定水汽同位素的原理,总结了大气水汽同位素观测研究在同位素基础理论、地表过程等方面的主要进展,汇总分析了大气水汽同位素环流模型的发展和应用。Galewsky 等[3]综述了水汽同位素理论在蒸发、大尺度混合、对流和动力分馏等方面的研究进展,着重介绍了光腔增强近红外激光吸收光谱技术(Cavity enhanced Spectroscopy, CES)进行大气水汽同

位素原位测量的原理和应用以及基于傅里叶变换热红外光谱技术(Fourier Transform infrared spectroscopy, FTIR)的遥感观测和应用,总结了全球水汽同位素分布研究和大气过程研究方面的进展,以及大气水汽同位素组成的模型模拟技术。

随着大气水汽观测技术的不断发展和应用,目前相关观测体系和数据库已趋于完善,相关研究在多个方向上取得新的成果。本文在前人综述的基础上,将已有的大气水汽同位素观测项目分为天基观测、地基观测和多平台融合观测,对主要观测项目进行详细的汇总和对比分析,并综述了近五年来大气水汽同位素研究的主要研究进展。

2. 天基观测

历史上,大气水汽同位素的组成主要在地表观测,或者从降水样本中推断出来的,其采样过程较为复杂和困难。20世纪70年代有学者利用飞机搭载冷阱捕集器进行采样,这种大气水汽同位素的测量方法,时间和空间分辨率都很低。随着激光光谱法的出现,大气水汽同位素的机载/星载原位测量成为可能,对平流层水汽和对流层顶的水汽同位素研究随之不断丰富。值得注意的是卫星探测随着时间出现衰减和变化会导致数据产品的不确定性,卫星数据产品在实际应用前需要基于相同原理的地面观测对比验证,保证卫星观测的准确性。以下本文介绍了五个天基观测项目及其数据情况。

2.1. SCIAMACHY

大气扫描成像吸收光谱仪(The Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography, SCIAMACHY)搭载在欧洲空间局(ESA)太阳同步轨道卫星 ENVISAT 上(轨道高度 800 km),是一种工作在 240~2380 nm 波段的被动遥感光谱仪。ENVISAT 卫星在 2002 年 3 月至 2012 年 4 月运行,提供了 10 年全球测量的综合数据序列。SCIAMACHY 有 8 个光谱通道,观测地球大气和表面的后向散射、反射、透射或发射的辐射,设计光谱分辨率为 0.2~0.5 nm。SCIAMACHY 有两种数据采集模式,一种采集模式是 NADIR 和 LIMB 的交替扫描,另一种是日/月(满月)掩星。在太阳同步轨道中,掩星测量仅限于两个半球 60°到 80°之间的纬度区域。SCIAMACHY 的主要科学目标是从太阳辐照度和地球辐照度光谱中获得全球对流层和平流层中的各种微量气体含量(SO₂、NO₂、CO、CO₂、O₃、CH₄、HCHO、OCIO 和 H₂O/HDO 等),该仪器所覆盖的大波长范围也非常适合于云和气溶胶的观测。SCIAMACHY 在 LIMB 和日/月掩星观测模式下的垂直分辨率小于 3 km, NADIR 扫描水平分辨率通常为 32 × 75 km。

SCIAMACHY 仪器对 H₂O 和 HDO 的卫星观测数据集时间跨度为 2003 年至 2007 年。荷兰空间研究所(SRON)提供了经过验证的 HDO 与 H₂O 比率数据产品,时间跨度为 2003~2007 年。不莱梅大学提供的垂直水汽柱数据产品时间跨度为 2002~2012,有经过验证的 v0.9.1 和 v1.1 版本以及有效的 v1.0 版本。目前无法提供提取特定时间段或地区数据的特殊服务。很多学者对相关数据进行了验证,如 Mieruch 等[4]用大气质量校正差分光学吸收光谱法(AMC-DOAS)进行水汽检索,对 SCIAMACHY 的 Level 1 数据进行了验证,改善关于水蒸气数据产品的质量;Piesanie 等[5]利用无线电探空测得的综合水汽数据对两个独立的 SCIAMACHY 水汽柱产品进行对比,对数据产品进行验证,结果表明两者的水汽柱值基本一致;Scheepmaker 等[6]使用 TCCON 和 NDACC-MUSICA 地基网络对 SCIAMACHY 的 HDO/H₂O 数据进行了校正。

2.2. MIPAS

大气无源探测迈克尔逊干涉仪(The Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding, MIPAS)搭载在 ESA 发射的 ENVISAT 卫星上,是一种高分辨率的傅里叶变换光谱仪(Fourier transform spectro-

meter, FTS), 用于测量全球范围内大气成分的浓度分布。MIPAS 用 LIMB 模式观测大气近中红外发射光谱, 光谱范围 4.15~14.6 μm , 光谱分辨率 0.05 cm^{-1} , 有 5 个光谱波段, 能够日夜观测超过 20 种气体的垂直示踪气体剖面, 3 天内获得全球覆盖。MIPAS 扫描地球边缘大气的高度范围从 5 至 150 km, 垂直分辨率约为 3 km, MIPAS 从 2002 年 3 月 1 日运行到 2012 年 4 月 8 日, 提供的信息加强了对中层大气(平流层和中间层)和对流层上部的组成、动力学和辐射平衡的研究。

MIPAS 作为 ENVISAT 上的大气仪器之一, 其获得的数据完全覆盖全球, 包括极地地区, 且不受光照条件影响, 可测量痕量种类的日变化, 补充了 SCIAMACHY 上所获得的信息。MIPAS 提供的标准数据产品包括, L1 数据产品涵盖了地理位置, 光谱, 和 685~2410 cm^{-1} 波段范围的辐射校准 LIMB 发射光谱; L2 产品涵盖平流层 H_2O 、 O_3 、 HNO_3 、 CH_4 、 N_2O 和 NO_2 的气体剖面。数据集在切点处的分辨率范围为 3 km (垂向) \times 30 km (水平方向); 时间范围为 2002 年 7 月 1 日~2012 年 4 月 8 日。这些产品由 ESA 通过位于德国遥感数据中心(DFD)的德国处理和存档中心(D-PAC)提供。

2.3. ACE

大气化学实验(Atmospheric Chemistry Experiment, ACE)探测器搭载在加拿大太空署 SCISAT 卫星上, 是一种红外傅里叶变换光谱仪, 可同时测量痕量气体(O_3 、 N_2O 、 CH_4 、 HNO_3 、 H_2O 、 CO 等)、薄云、气溶胶和温度。ACE 任务的主要科学目标是测量和了解控制地球大气中臭氧分布的化学过程, 特别是在高海拔地区。2003 年 8 月 13 日发射的 SCISAT 卫星在一个高倾角(74°)的圆形低地球轨道(650 km)上运行, 提供热带、中纬度和极地的覆盖范围。SCISAT 卫星主要以太阳掩星模式工作, 提供 10~100 km 高度剖面信息, 包括温度、压力和数十个大气分子的体积混合比(VMR_s)测量日出和日落期间的大气吸收光谱序列, 以及北纬 85°到南纬 85°上的大气消光剖面。

ACE 在质量、功率和体积方面较小, 但测量精度很高。ACE 数据的垂直分辨率为 1~2 km, 主要测量臭氧、二氧化氮和气溶胶/云, 每 2 秒测量并记录一次。ACE 的 Level 1 数据包括 H_2O 、HDO 光谱, Level 2 提供了许多大气相关分子的温度、压力和体积混合比剖面随高度的函数。2.2、3.0、3.5 和 3.6 版本的数据产品包括了 HDO 数据, 时间覆盖 2004 到 2012 年间, 但 2.2 版本的 HDO 数据存在问题, 应使用更新版本的数据。ACE-FTS 的数据丰富了相关科学研究, 帮助我们提高对地球大气过程的理解。

2.4. TES

对流层发射光谱仪(Tropospheric Emission Spectrometer, TES)搭载在美国国家航空航天局(NASA)的 AURA 卫星上, 是一种高分辨率红外成像傅里叶变换光谱仪, 光谱覆盖范围为 3.2~15.4 μm , 光谱分辨率为 0.025 cm^{-1} 。TES 可进行 LIMB 和 NADIR 模式观测。在 LIMB 模式下 TES 的垂向分辨率为 2.3 km, 覆盖范围从 0~34 km, 在 NADIR 模式下, TES 的空间分辨率为 0.53 \times 5.3 km。TES 拥有全球全天候观测能力。TES 的观测可提供对流层中微量气体(SO_2 、 NO_y 、 CO 、 O_3 和 $\text{H}_2\text{O}/\text{HDO}$ 等)的数量、全球分布和混合的长期变化, 及其与平流层之间的交换。2004 年 7 月 15 日, NASA 对地观测系统(EOS)第三星 AURA 搭载 TES 进入太阳同步轨道。2018 年 1 月 31 日 TES 结束了近 14 年的探测。

相较于其他光谱仪, TES 光谱仪分辨率较高, 运行时间长, 且数据详尽。TES 的数据产品有 Level 1B、Level 2、Level 3, 包括数据/模型和数据/数据比较。TES 每个数据产品都具有充分的表征, 可用于科学分析。TES 是迄今为止最先进、最成功的大气水汽 HDO 观测[7]。

2.5. IASI

红外大气探测干涉仪(The Infrared Atmospheric Sounding Interferometer, IASI)搭载在 METOP-A、

METOP-B 和 METOP-C 卫星上, 可能是 METOP 卫星上携带的最先进的仪器。这些卫星分别由欧洲航天局(ESA)和欧洲气象卫星开发组织(European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellite, EUMETSAT)于 2006 年、2012 年和 2018 年发射, IASI 测量地球系统从低空太阳同步轨道发射的红外光谱, 可提供对流层和平流层低层的大气温度廓线, 对流层水汽廓线、臭氧总量及其垂直分布、云盖分数和云顶温度/气压等观测数据。IASI 被设计应用于高精度的气象探测(温度观测精度为 1K, 湿度观测精度为 10%), 可改善中尺度天气预报, 也可以应用于大气化学中痕量气体(如 O_3 、 CH_4 、 CO_2)的全球评估和监测。IASI 是一种傅里叶变换光谱仪, 其光谱范围为 3.63~15.5 μm , 共 8461 个通道, 光谱分辨率为 0.25 cm^{-1} 。卫星在 817 km 的高空轨道上以 NADIR 模式观测时, IASI 每一条扫描线有 30 个有效视场, 每一个有效视场由 2×2 个圆形等效直径 12 km 的瞬时视场组成, 沿轨道和扫描方向分别逐渐增大至 39 km 和 20 km [8] [9]。IASI 进行分步扫描, 扫面幅宽为 2200 km, 每天可提供两次全球数据(9:30 am/pm)。IASI 的观测可提供大气剖面(温度、 SO_2 、 CO 、 CO_2 、 O_3 、 CH_4 、 NH_3 、 H_2S 、 HNO_3 、VOCs 和 H_2O/HDO 等气体、气溶胶和云)和表面辐射特性的信息。这一观测任务将使用法国国家空间研究中心的新一代仪器 IASI-NG, 并搭载在 METOPS-SG 卫星上。

根据国际卫星对地观测委员会(CEOS)的标准, IASI 的数据产品划分为 5 级产品, 分别为 L0、L1A、L1B、L1C、L2A、L2B、L3、L4, 提供了 0-12Z、12-24Z, 两个时段的水蒸气混合比参数值, IASI 的 METOP-1 和 METOP-2 数据一直在更新, 数据可从欧洲卫星开发气象卫星组织(EUMETSAT)获取。

综上五个观测项目(见表 1), 在运行时间方面, 其时间范围接近。TES 项目的运行时间长且数据较新。在观测范围方面, 主要是对对流层和平流层低层的大气进行探测, 其中 MIPAS 还包括了中间层的探测。在分辨率方面, ACE 项目的垂直分辨率较好, IASI 的分辨率稍差。在数据丰富度上, TES 的数据最为详尽。SCIAMACHY 项目的验证产品也较完善, MIPASA 项目对 SCIAMACHY 项目进行了补充完善。ACE 数据的版本较多, 但也出现了数据偏差较大的问题。IASI 的数据还处于进一步更新之中。各项目的观测存在不同优缺点, 有研究将不同的观测项目数据结合运用。如潘晨等[10]利用了 TES、MIPAS、SCIAMACHY 观测项目的数据结合站点数据进行水分来源分析, 分析东亚的水汽来源, 在研究中要注意不同模型的精确度问题。

Table 1. Overview of observation items

表 1. 观测项目概况表

名称	项目单位	搭载卫星	光谱范围	运行时间	网址
SCIAMACHY	欧洲航天局	ENVISAT	240~2380 nm	2002~2012	http://www.sciamachy.org/
MIPAS	欧洲航天局	ENVISAT	4.15~14.6 μm	2002~2012	https://earth.esa.int/eogateway/instruments/mipas/description
ACE	加拿大太空署	SCISAT	285~1030 nm	2003~2013	http://www.ace.uwaterloo.ca/mission.php
TES	美国国家航空航天局	AURA	3.2~15.4 μm	2004~2018	https://eosweb.larc.nasa.gov/project/tes/TL2HCNN_8
IASI	欧洲航天局	METOP 系列	3.63~15.5 μm	2002~	https://www.ospo.noaa.gov/Products/atmosphere/soundings/iasi/

3. 地基观测与数据

卫星遥感观测具有全天候全天时观测, 观测范围广的特点, 但也存在时间分辨率不足的问题。卫星地面站点观测可以长时间序列的连续的观测, 同时地面站点观测数据的精度更高, 常常用来检验卫星遥

感反演产品的精度。但地面观测站点稀少, 并且单个站点观测受地形、地貌和生产发展水平影响, 所代表的水平尺度有限, 分布不均匀, 对于全球范围的大气水汽观测研究存在明显的局限性。已有研究将地面观测与卫星观测数据结合起来, 对全球尺度问题进行高精度的研究。但问题也随之显现, 卫星利用近红外波段探测, 反映的是整个大气柱的气体含量, 而地面的站点观测、高塔观测以及轮船观测得到的都是离地面某一高度点上的气体浓度, 这样的产品精度已经无法满足目前高精度卫星探测的验证的需求。因此, 建立一个长期连续观测的地面验证系统非常重要。基于这一目的, 超高分辨率的地基傅里叶光谱仪观测项目应运而生。本文总结了三个主要的地基观测项目及其数据状况, 以及结合天基和地基观测的项目及其数据状况。

3.1. NDACC

大气成分变化探测网络(Network for the Detection of Atmospheric Composition Change, NDACC)目前由全球分布的 72 个(低纬度带 15 个, 中纬度带 37 个, 高纬度带 20 个)活跃地面遥感研究站组成, 采用红外光谱谱仪、激光雷达、微波辐射计、探测仪、紫外光谱仪紫外/可见光谱仪等观测仪器, 于 1991 年 1 月开始网络作业, 对大气温度和微量气体、粒子的高质量、一致化、标准化的长期测量。NDACC 分析到达地球表面的光谱, 探测大气组成, 了解它们对同温层、对流层和中间层的影响, 建立气候变化与大气成分之间的联系, 测试和验证来自卫星的大气测量结果, 研究大气过程, 测试和改进大气理论模型。NDACC 是世界气象组织(WMO)全球大气监测(GAW)计划的主要贡献者, 也是全球大气化学综合观测(IGACO)计划的关键组成部分。NDACC 已经得到包括联合国环境规划署(UNEP)和国际气象与大气科学协会的国际臭氧委员会在内的多个国家和国际科学机构的认可。该项目生成一年以上的数据对公众免费开放, 项目网址: <http://www.ndaccdemo.org/>。

NDACC 项目早于天基观测项目和其他地基观测网络, 目前全球的观测站点最多。然而 NDACC 项目下的不同站点观测的气体类型不完全相同, 数据覆盖的时间范围、详尽程度、观测所用仪器也不完全一致。目前以站点和观测仪器为分类标准对数据进行归纳, 有的新站点数据较少, 有的站点十几年前已停止更新数据, 有的站点数据更新至今。

3.2. TCCON

全碳柱观测网络(Total Carbon Column Observing Network, TCCON)隶属于大气成分变化(NDACC-IRWG)和(GAW)项目, 是一个由傅里叶变换红外光谱仪(BRUKER IFS 120HIR 或 125HR)组成的地基观测网络, 记录在近红外光谱区域的太阳光谱。从这些光谱中, 可以精确地检索和报道 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、 HF 、 CO 、 H_2O 和 HDO 的柱平均丰度, 提供长期的时间序列, 用于碳循环研究和卫星验证[11]。TCCON 的目的是提供一个严格维护的、长时间尺度的记录, 以确定天基传感器(例如, 用于大气制图的扫描成像吸收光谱仪(SCIAMACHY), 对流层发射光谱仪(TES), 大气红外探测器(AIRS), 轨道碳天文台 2 号(OCO-2))校准中的时间漂移和空间偏差。该项目的数据有 GGG2009、GGG2012、GGG2014 三个版本, 以 NETCDF 格式提供。项目网址: <https://tccodata.org/>。

TCCON 的测量精度非常高, 但 TCCON 站点空间覆盖度差。该项目建立于 2004 年, 到 2013 年该网络扩展到全球分布的 32 个运营站点(见图 1)。TCCON 的站点涵盖了从热带到极地、大陆和海洋的各种大气状态和观测条件。但在空间覆盖率方面存在明显不足, 特别是在南美、非洲和亚洲覆盖较少, 而主要集中在欧美地区。

3.3. SWVID

稳定水汽同位素数据库(the Stable Water Vapor Isotope Database, SWVID)由耶鲁大学建成并维护, 收

集和存档了全球研究者利用红外同位素光谱仪收集到的原位高频水汽同位素数据, 建立了一个高时间分辨率稳定水汽同位素比值的全球数据库。该项目的目的是作为一个类似全球降水同位素网络(GNIP)和全球河流同位素网络(GNIR)的平台, 允许研究人员在一个集中的存储库中共享他们的水汽同位素数据集, 从而促进大气水汽同位素研究。入库数据的信息包括所使用的设备、测量高度、水汽同位素 ^{18}O 、 ^2H 组成及标准偏差、气温、相对湿度、气压、净辐射能量、风速、风向、降水高度及开始和结束时间等信息。每个数据集的关键变量是大气水汽每小时的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的值, 为了支持同位素数据的解释, 还提供了现场同步观测的气象变量时间序列。数据以小时分辨率存储, 数据文件为 CSV 格式。

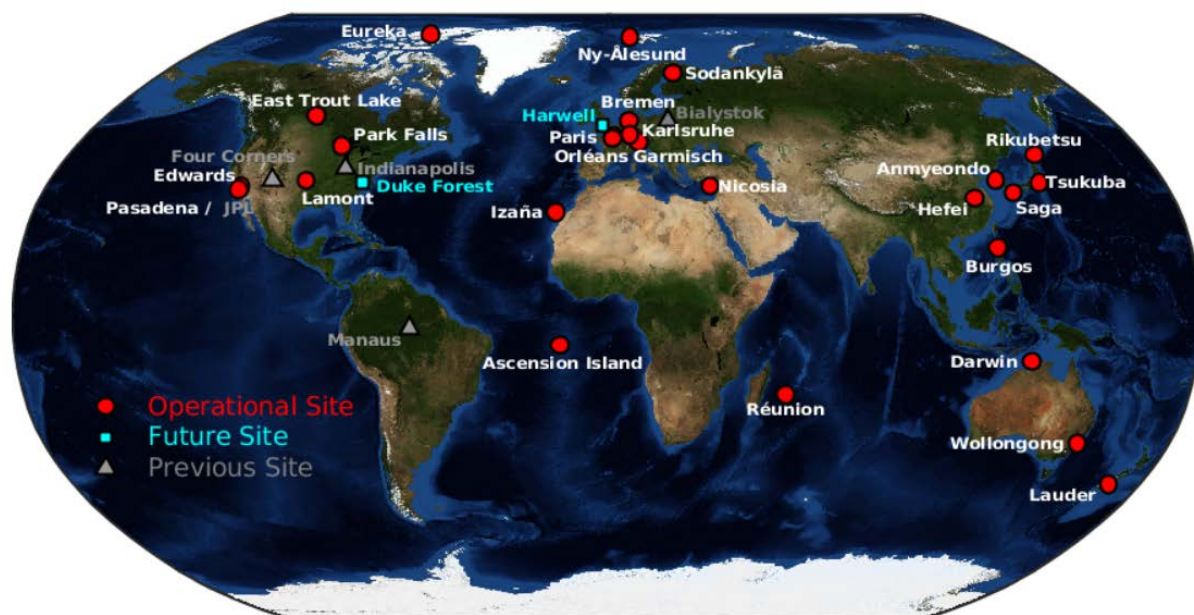


Figure 1. Distribution of TCCON observation sites (download from <https://tccodata.org/>)

图 1. TCCON 观测站点分布图(从 <https://tccodata.org/> 下载)

目前, 该数据库收录了 44 个研究项目的站点观测数据。大多数站点位于北半球且观测时长少于一年(见图 2), 观测时段集中在 7~9 月。特别地, SWVID 不仅收录地基观测数据, 还收录了多个飞机和船舶巡航数据集。观测数据覆盖了森林、海岸、城市、冰盖、湿地、农田、草原等不同的陆地生态系统, 包括了寒冷半干旱气候、地中海气候、潮湿的亚热带气候等。SWVID 收集的水汽同位素数据以及全球降水同位素网络(GNIP)和全球河流同位素网络(GNIR)提供的降水和河流的水同位素数据, 提供了较为全面的同位素组成模式, 有助于集成了水同位素分馏的大气模型的验证, 卫星水汽同位素观测的校准, 不同地表条件下的同位素分馏研究, 以及改善大气数据同化等方面研究[12]。项目网址:

<https://vapor-isotope.yale.edu/>。

4. 多平台同位素遥感(MUSICA)

大气水循环的多平台同位素遥感(Multi-platform Remote Sensing of Isotopologues for Investigating the Cycle of Atmospheric Water, MUSICA)是欧洲研究委员会(ERC)发起的项目。为了进一步的生成对流层 H_2O 和 HDO 高质量数据库, MUSICA 项目应运而生。MUSICA 将原位测量、地面遥感和空间遥感观测相结合。地基遥感部分由 12 个红外遥感站组成, 其中包括 10 个全球分布的 NDACC 地基 FTIR 观测站, 覆盖了地球北极、中纬度和南北半球的亚热带以及南极, 提供对流层 H_2O 和 HDO 的剖面, 其中最早的

观测数据采集于 1996 年。天基遥感部分使用安装在 METOP 气象卫星上的 IASI 传感器获取观测数据。该项目利用地基 FTIR 光谱和卫星传感器 IASI 测量的热低空光谱, 开发了对流层水汽同位素反演(H_2O 和 $H_2O-\delta D$ 对), 来研究对流层水输送路径, 并与模型结合, 可以帮助我们理解重要的气候反馈机制。

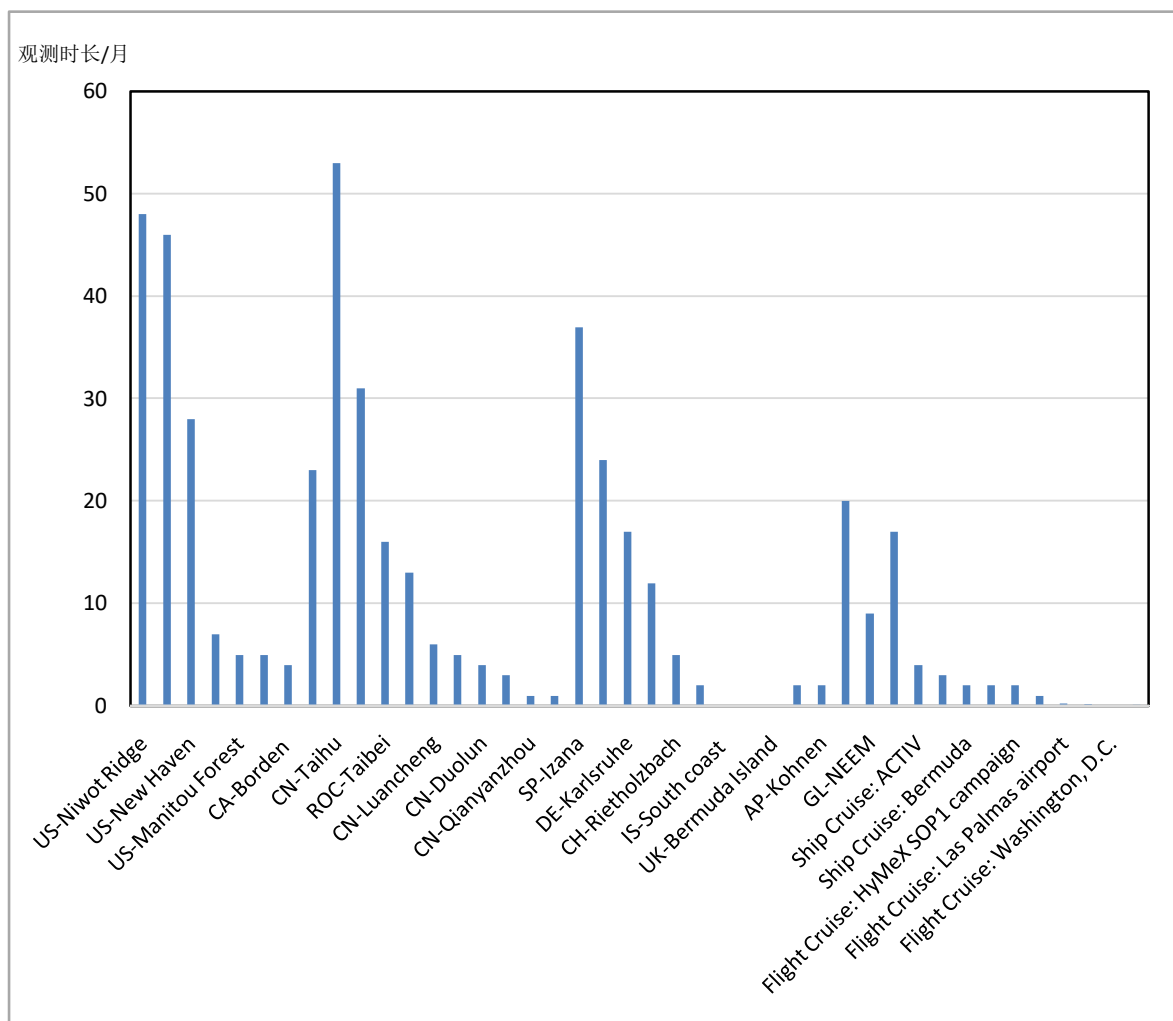


Figure 2. Observation duration of SWVID at each site (the horizontal axis of the figure is each site, and the vertical axis is the accumulated observation duration of the data at the site, unit: month)

图 2. SWVID 各站点观测时长(该图横轴为各站点, 纵轴为该站点观测数据的累计时长, 单位: 月。)

Schneider 等[13]证明了 MUSICA 地基和天基观测的一致性。MUSICA 还使用两台 Picarro L2120-i 水同位素分析仪进行连续原位测量[14]。其中一台位于 Karlsruhe (110 m a.s.l, 代表边界层), 另一台在 Izaña (2370 m a. s. l, 代表对流层), 这两台仪器自 2012 年初以来一直在运行。同时, 还使用机载 ISOWAT 仪器航空测量 Izaña 对流层水同位素剖面[15]。这些原位测量将允许对遥感数据集进行验证。在一些站点(例如 Wollongong 或 Karlsruhe), 当天气状况良好时会进行全天观测。对于极地地点, 由于出现极夜没有冬季的观测[13]。数据集可以从 NDACC 数据库获得, 项目网址: <ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/ndacc/MUSICA/>。

5. 研究进展与展望

大气水汽同位素的组成变化包含水循环过程的一些关键信息。与降水同位素的观测相比, 大气水汽

同位素的观测不受季节和天气(是否降雨)的限制,可以获得连续的高时间分辨率的观测数据,但是与降水稳定同位素相比,大气水汽同位素研究相对很少,受传统的水汽收集和分析技术的限制。因此大多数的已有研究是短期的、覆盖范围小的,有些长期的观测数据也存在分辨率低的缺点。随着上文提到的大气水汽同位素观测技术和相关数据库的逐渐成熟,大气水汽同位素研究快速发展起来。近年来对大气水汽同位素的研究在水汽同位素组成变化、水汽来源、大气环流、生态系统蒸散发、湖泊蒸发和积雪动态等方面取得了丰富的进展。

第一,大气水汽同位素受气雨同位素交换,陆-气-水交换模式和大规模的水汽运动的控制而发生变化[12][16][17][18]。因此大气水汽同位素的变化可以反映湿度、蒸散发状况、季节变化等信息。过去大气水汽同位素组成主要用于古气候背景下,从自然记录中推断过去的温度变化和湿度来源,以及研究平流层水分收支[19]。目前大气水汽同位素的研究扩展到天气和次日尺度以及大多数水汽存在的对流层。陆地蒸散发可以明显地改变地表水汽同位素组成。对流层中上层大气下沉气团和受蒸发影响的边界层空气之间的混合可导致水汽稳定水同位素呈现明显的垂直梯度[20]。来自不同海洋源区的混合平流水汽影响区域地表水同位素的时间变化[21]。大气水汽同位素组成是研究蒸散发和降水的有力工具,研究表明威尼斯泻湖地表水具有大的同位素梯度的特点,其同位素梯度组成清晰的标志着同位素平衡条件下的水汽同位素组成,即当低层大气接近水汽饱和时,在离取样点约6~26 km范围内,地面水汽的同位素组成与沿海泻湖地表水可处于同位素平衡[22]。大气水汽同位素组成的影响机理十分复杂,存在鲜明的地域性规律,对其认识尚有明显欠缺。目前,模型对大陆站点水汽同位素模拟的效果不佳;在蒸发较强的月份沿海和海洋站点大气水汽同位素组成的模拟结果也不理想[12]。在湿润且沿海的上海地区,大气水汽氢氧同位素与绝对湿度的相关性最好[23]。然而,在相对干旱的或受高蒸发率影响的地区大气水汽和降水同位素可能因为较低的相对湿度而不平衡,导致对水汽同位素组成的估计出现较大偏差[24]。在北极东部的针叶林,雪同位素剖面中保存了水汽同位素组成的季节变化,那里风驱动的再分配明显少于阿拉斯加冻原[25]。未来,更多关于大气水汽同位素组成的广泛数据集将在天气和气候预测模型中为大气水循环提供约束。受益于对蒸发区近地表水蒸气的补充采样,我们将进一步深入了解边界层和自由对流层之间的混合。

第二,大气水汽同位素的变化反映了大气环流的信息,可用于辅助区域水汽来源研究。在水循环过程中,水汽既作为载体,又作为相变的主体,其中同位素的含量必然会发生变化,因此,我们可以将水体中的环境同位素作为水汽来源及运动路径的示踪剂。Griffis等[26]评估了瑞利蒸馏过程、蒸发和行星边界层夹带过程对水汽同位素组成的重要性。在研究水汽循环时,氡盈余可作为区域蒸发的示踪剂通过氡盈余的时空变化分析蒸散发通量,例如Naoyuki等[27]利用大气水汽同位素特征将到达南极日本昭和站(Syowa)的气团分为海洋(海洋气流)和冰川(冰川气流)来源,确定夏季的温暖事件与冰原内部下降到Syowa的冰川气流有关。此外,从澳大利亚到Syowa的水汽同位素数据揭示了向Syowa运动的海洋气流的水分来源以及海洋空气侵入南极洲的频率和强度,北风与气旋的南移将海洋空气推入南极内陆从而引起了同位素值的变化[28]。在水汽循环较弱的长干燥期,氡盈余可以作为海洋来源水汽的示踪剂[29]。将大气水汽同位素作为示踪剂,对于不同源区的水汽来源研究不断拓展,González等[30]在北大西洋亚热带的山区测量了水汽含量和水同位素组成,识别了北大西洋副热带对流层的四种水汽输送路径。基于水汽和日降雨中氢和氧同位素组成的观测,Munksgaard等[31]识别了澳大利亚东北地区主要水汽来源是西南太平洋。Meng等[32]利用黑河流域昼夜水汽同位素数据辅助识别了夏季昼夜水汽的潜在蒸发源地。特别地,大气水汽同位素观测促进了南极的水文循环研究。受观测数据的限制,现有的水汽来源研究更多的是局限于站点等局部地区,随着类似于全球降雨同位素网络(GNIP)的全球的水汽稳定同位素观测网络的建立,观测数据的相互补充将大大促进全球尺度上的水汽轨迹研究。

第三, 水稳定同位素作为示踪剂用于生态系统蒸散发机理研究, 加深了对植物在大气和水圈中发挥的重要作用的认识。地表蒸散是生态系统水分循环的一个重要过程, 它与陆地植被的总生态系统生产力高度相关, 并且植物蒸腾和土壤蒸发同位素组成往往具有显著差异[33]。准确估算生态系统地表蒸散通量在水循环研究中是非常重要的。在生态系统尺度上将大气水汽同位素组成与质量守恒, 通量梯度法, 总初级产量函数关系等结合研究蒸散发分割也被证明是一种十分有效的方法[34] [35] [36]。利用水同位素示踪方法进行蒸散发分割的结果与土壤蒸渗仪测定的结果可达到较高的一致性[35]。水同位素示踪方法还可以实现田间蒸散发准确、持续地分割为蒸发和蒸腾通量, 提高对 SPAC 系统中水分循环的认识[37]。植物能强烈地影响土壤水分的同位素组成, 加剧小尺度异质性, 这对利用同位素示踪研究土壤水文、蒸发和蒸腾通量, 提高对土壤-植物-大气连续体(SPAC)中水通量的理解具有重要意义[38] [39]。除研究蒸散发分割之外, Wang 等[40]利用 Iso-SPAC 模型分别模拟了植物蒸腾和土壤蒸发同位素组成的动态变化, 讨论了上述动态变化与蒸散发通量中的同位素组成变化的关系。同时, 研究发现植物叶片形态/生理性状影响蒸腾水汽同位素组成, 这与植物蒸腾速率和气孔导度之间, 气孔密度和叶片含水量之间显著相关有关[41]。蒸散发通量的水同位素证据表明生物通过蒸腾活动控制着水/能通量分配的日变化[42]。水稳定同位素已成为定量研究生态系统水通量和植物-气候相互作用的有效工具。此外注意植物蒸腾的稳态与非稳态假设是有必要的, 并且对蒸散发进行分割后计算蒸发与蒸腾的绝对量需要将稳定同位素数据与遥感模型结合起来, 不断地改进蒸散发估算精度。

第四, 水汽同位素观测促进了蒸发和冰雪升华过程中关键问题的研究。研究表明, 开放水域的蒸发动力学分馏更适合用弱动力学因子来描述, 用该因子在太湖的模拟结果与实际的蒸发测量结果具有更好的一致性[43]。弱动力学因子模拟结果与开放水域上空观测到的氘盈余-湿度的关系一致, 并且弱动力学因子的同位素示踪法计算得到的结果与大气环流模型的结果有较好一致性[44]。对较低的大气水汽和地表雪的同位素进行高时间分辨率的测量, 有利于对地表积雪同位素组成进行量化, 对于准确地解释冰芯水同位素数据至关重要。Ritter 等[45]研究了空气与雪之间的水分子交换, 讨论了冰雪升华过程中发生的水同位素分馏, 雪表面与水汽的水同位素交换对冰芯中记录的水同位素组成可能具有重要意义, 汽雪交换对于极地地区近地表的水同位素组成是重要的。Christner 等[46]识别了积雪的非分馏升华和融水的分馏蒸发机理。Madsen 等[47]进一步发现降水事件之间近地表雪的水同位素组成有显著的日变化, 这与大气水汽的同位素交换和升华诱导的分馏有关。此外, 为了更好地了解水平平流的重要性 and 评估冬季期间的过程, 延展监测的时间是一个前提条件, 并且进一步研究雪-空气相互作用的同位素监测在水相变化分馏过程研究中的潜力, 以及提高分析精度是今后面临的挑战。

第五, 水汽同位素组成的测量和模拟发展迅速。在过去的 20 年里, 观测技术和仪器、观测数据共享和定量分析方面的取得的进展促进了同位素水文学的发展[48]。对控制现代水汽同位素组成的过程的研究为解释水文循环的古气候记录指标发展了一个改进的框架[3]。水汽同位素组成测量技术的改进和水汽同位素模拟模型结合为深入研究大气水循环打开了大门。Salamalikis 等[49]利用同位素蒸发模型研究了雨滴下落过程中稳定同位素的垂直分布, 及其与温度和湿度的依赖关系, 证明随着温度的升高和相对湿度的降低重同位素逐渐富集。Wong 等[50]对比了场地尺度和全球尺度上 CLM4 模型的水同位素模拟结果和已有的观测数据集, 指出通过改进对同位素分馏的动力学效应参数可进一步改善模拟精度。平衡假设对低纬度地区的蒸发水的水同位素比率提供了相对准确的估计, 但在纬度增加的地区估计效果却越来越差。Fiorella 等[51]提出今后对蒸发水汽同位素组成的研究应使用大气同位素比率的测量值或 GCM 模型的模拟结果来限制潜在偏差。此外, 模型模拟还应用于大尺度问题的研究。集成水同位素组成模拟模块的全球气候模型(IsoGCMs)的发展对全球水循环的同位素示踪研究具有重要意义[52]。Lamb 等[53]用 IsoCloud 模型模拟卷云中冰晶 HDO/H₂O 同位素分馏过程中的动力学同位素效应, 定量验证了冰-水汽系统中水

同位素在过饱和条件下可能发生的动力学变化。对于模型涉及水循环过程的改进、参数优化以及应用尺度还需进一步探索。

综上所述, 受益于稳定同位素红外光谱技术发展和应用, 全球大气水汽同位素数据库快速建立, 促进了相关研究的发展。然而, 大气水汽同位素的观测与研究仍处在探索和逐渐完善的过程中, 面临很多问题。首先, 传统的原位大气水汽分析技术对于遥感数据校准和大气水汽同位素组成观测仍具有不可替代的意义。需进一步改进传统观测方法, 提高观测精度和不同区域的适用性。其次, 与国外已有研究相比, 国内关于大气水汽同位素的研究较少。一方面可以利用国外已有数据库在水同位素分馏过程和机理、水循环过程、大气环流模型等方面开展研究; 另一方面需要加强国内高时空分辨率大气水汽同位素的观测, 提升校正水平, 以促进相关研究进一步发展。最后, 水汽同位素组成可提供与降雨同位素记录相同的气象事件信息, 与降雨提供的同位素记录相比, 水汽同位素可提供连续的, 更详细的大气水汽循环信息[31]。因此, 对大气水汽稳定同位素数据观测的时间分辨率和全球覆盖分辨率的改进, 将会极大地改进气候因素驱动全球水文循环变化的研究, 成为探究地球表层系统的有力工具。

参考文献

- [1] Herman, R., *et al.* (2014) Aircraft Validation of Aura Tropospheric Emission Spectrometer Retrievals of HDO/H₂O. *Atmospheric Measurement Techniques*, **7**, 3127-3138. <https://doi.org/10.5194/amt-7-3127-2014>
- [2] 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.
- [3] Galewsky, J., *et al.* (2016) Stable Isotopes in Atmospheric Water Vapor and Applications to the Hydrologic Cycle. *Reviews of Geophysics*, **54**, 809-865. <https://doi.org/10.1002/2015RG000512>
- [4] Mieruch, S., *et al.* (2006) Verification of Sciamachy Level 1 Data by AMC-DOAS Water Vapour Retrieval.
- [5] Piesanie, A., *et al.* (2013) Validation of Two Independent Retrievals of SCIAMACHY Water Vapour Columns Using Radiosonde Data. *Atmospheric Measurement Techniques*, **6**, 665-702. <https://doi.org/10.5194/amt-6-2925-2013>
- [6] Scheepmaker, R., *et al.* (2015) Validation of SCIAMACHY HDO/H₂O Measurements Using the TCCON and NDACC-MUSICA Networks. *Atmospheric Measurement Techniques*, **8**, 1799-1818. <https://doi.org/10.5194/amt-8-1799-2015>
- [7] Worden, J., *et al.* (2006) Tropospheric Emission Spectrometer Observations of the Tropospheric HDO/H₂O Ratio: Estimation Approach and Characterization. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **111**, D16309. <https://doi.org/10.1029/2005JD006606>
- [8] August, T., *et al.* (2012) IASI on METOP-A: Operational Level 2 Retrievals after Five Years in Orbit. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **113**, 1340-1371. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2012.02.028>
- [9] Zhang, Y.P., *et al.* (2014) Cloud Top Heights Measured by METOP-A IASI Instrument Compared with Ground-Based Cloud Radar. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, **38**, 874-884.
- [10] 潘晨, 朱彬. 基于全球化学气候模式在线源追踪方法研发及其在东亚地区大气水成物的源解析中的应用[R]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- [11] Wunch, D., *et al.* (2011) The Total Carbon Column Observing Network. *Philosophical Transactions of the Royal Society: A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, **369**, 2087-2112. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0240>
- [12] Wei, Z.W., *et al.* (2019) The Utility of Near-Surface Water Vapor Deuterium Excess as an Indicator of Atmospheric Moisture Source. *Journal of Hydrology*, **577**, Article ID: 123923. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123923>
- [13] Schneider, M., *et al.* (2012) Ground-Based Remote Sensing of Tropospheric Water Vapor Isotopologues within the Project MUSICA. *Atmospheric Measurement Techniques*. Discuss, **5**, 3007-3027. <https://doi.org/10.5194/amt-5-3007-2012>
- [14] Aemisegger, F., *et al.* (2012) Measuring Variations of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in at Two Commercial Laser-Based Spectrometers: An Instrument Characterisation Study. *Atmospheric Measurement Techniques*, **5**, 1491-1511. <https://doi.org/10.5194/amt-5-1491-2012>
- [15] Dyroff, C., *et al.* (2009) Compact Diode-Laser Spectrometer ISOWAT for Highly Sensitive Airborne Measurements of Water-Isotope Ratios. *Applied Physics B*, **98**, 537-548. <https://doi.org/10.1007/s00340-009-3775-6>
- [16] Wei, Z.W., *et al.* (2016) Understanding the Variability of Water Isotopologues in Near-Surface Atmospheric Moisture

- over a Humid Subtropical Rice Paddy in Tsukuba, Japan. *Journal of Hydrology*, **533**, 91-102. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.044>
- [17] Fiorella, R., *et al.* (2018) Seasonal Patterns of Water Cycling in a Deep, Continental Mountain Valley Inferred from Stable Water Vapor Isotopes. *Atmospheres*, **123**, 7271-7291. <https://doi.org/10.1029/2017JD028093>
- [18] Lai, X., *et al.* (2018) Contributions of Atmospheric Transport and Rain-Vapor Exchange to Near-Surface Water Vapor in the Zhanjiang Mangrove Reserve, Southern China: An Isotopic Perspective. *Atmosphere*, **9**, 365. <https://doi.org/10.3390/atmos9090365>
- [19] 王帆, 江洪, 牛晓栋. 大气水汽稳定同位素组成在生态系统水循环中的应用[J]. 浙江农业大学学报, 2016, 33(1): 156-165.
- [20] Harald, S., *et al.* (2017) The Stable Isotope Composition of Water Vapor above Corsica during the HyMeX SOP1: Insight into Vertical Mixing Processes from Lower-Tropospheric Survey Flights. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **17**, 6125-6151. <https://doi.org/10.5194/acp-17-6125-2017>
- [21] Rangarajan, R., *et al.* (2017) An Insight into the Western Pacific Wintertime Moisture Sources Using Dual Water Vapor Isotopes. *Journal of Hydrology*, **547**, 111-123. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.047>
- [22] Zannoni, D., *et al.* (2019) The Atmospheric Water Cycle of a Coastal Lagoon: An Isotope Study of the Interactions between Water Vapor, Precipitation and Surface Waters. *Journal of Hydrology*, **572**, 630-644. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.033>
- [23] 杨言. 上海地区大气水汽及降水氢氧同位素特征及其环境意义[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2020: 1-76.
- [24] Mercer, J.J., *et al.* (2020) Atmospheric Vapor and Precipitation Are Not in Isotopic Equilibrium in a Continental Mountain Environment. *Hydrological Processes*, **34**, 3078-3101. <https://doi.org/10.1002/hyp.13775>
- [25] Pertti, A., *et al.* (2021) Arctic Snow Isotope Hydrology: A Comparative Snow-Water Vapor Study. *Atmosphere*, **12**, 150. <https://doi.org/10.3390/atmos12020150>
- [26] Griffis, T., *et al.* (2016) Investigating the Source, Transport, and Isotope Composition of Water Vapor in the Planetary Boundary Layer. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **16**, 1-36. <https://doi.org/10.5194/acp-16-5139-2016>
- [27] Naoyuki, K., *et al.* (2016) Identification of Air Masses Responsible for Warm Events on the East Antarctic Coast. *SOLA*, **12**, 307-313. <https://doi.org/10.2151/sola.2016-060>
- [28] Naoyuki, K., *et al.* (2016) Influence of Large-Scale Atmospheric Circulation on Marine Air Intrusion toward the East Antarctic Coast. *Geophysical Research Letters*, **43**, 9298-9305. <https://doi.org/10.1002/2016GL070246>
- [29] Parkes, S., *et al.* (2017) Response of Water Vapour D-Excess to Land-Atmosphere Interactions in a Semi-Arid Environment. *Hydrology and Earth System Sciences*, **522**, 533-548. <https://doi.org/10.5194/hess-21-533-2017>
- [30] González, Y., *et al.* (2016) Detecting Moisture Transport Pathways to the Subtropical North Atlantic Free Troposphere Using Paired H₂O- δ Density Measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **15**, 219-251.
- [31] Munksgaard, N.C., *et al.* (2020) Coupled Rainfall and Water Vapour Stable Isotope Time Series Reveal Tropical Atmospheric Processes on Multiple Timescales. *Hydrological Processes*, **34**, 111-124. <https://doi.org/10.1002/hyp.13576>
- [32] Meng, H.F., *et al.* (2020) Isotopic Characteristics of Water Vapor and Its Sources during Day and Night along the Heihe River in Summer. *Arid Land Geography*, **43**, 360-370.
- [33] Quade, M., *et al.* (2019) *In-Situ* Monitoring of Soil Water Isotopic Composition for Partitioning of Evapotranspiration during One Growing Season of Sugar Beet (*Beta vulgaris*). *Agricultural and Forest Meteorology*, **266**, 53-64. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.12.002>
- [34] Berkelhammer, M., *et al.* (2016) Converge Approaches to Determine an Ecosystem's Transpiration Fraction. *Global Biogeochemical Cycles*, **30**, 933-951. <https://doi.org/10.1002/2016GB005392>
- [35] Wen, X.F., *et al.* (2016) Evapotranspiration Partitioning through *In-Situ* Oxygen Isotope Measurements in an Oasis Cropland. *Agricultural and Forest Meteorology*, **230**, 89-96. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.12.003>
- [36] Wei, W., *et al.* (2018) Evapotranspiration Partitioning at the Ecosystem Scale Using the Stable Isotope Method—A Review. *Agricultural and Forest Meteorology*, **263**, 346-361. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.09.005>
- [37] Wu, Y.J., *et al.* (2017) Multiple Methods to Partition Evapotranspiration in a Maize Field. *Journal of Hydrometeorology*, **18**, 139-149. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0138.1>
- [38] Maren, D., *et al.* (2019) Water Fluxes Mediated by Vegetation: Emerging Isotopic Insights at the Soil and Atmosphere Interfaces. *New Phytologist Foundation*, **221**, 1754-1763. <https://doi.org/10.1111/nph.15547>
- [39] Oerter, E.J., *et al.* (2019) Spatio-Temporal Heterogeneity in Soil Water Stable Isotopic Composition and Its Ecohydrologic Implications in Semiarid Ecosystems. *Hydrological Process*, **33**, 1724-1738. <https://doi.org/10.1002/hyp.13434>
- [40] Wang, P., *et al.* (2016) Numerical Modeling the Isotopic Composition of Evapotranspiration in an Arid Artificial Oasis

- Cropland Ecosystem with High-Frequency Water Vapor Isotope Measurement. *Agricultural and Forest Meteorology*, **230**, 79-88. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.12.063>
- [41] Dubbert, M., *et al.* (2017) Impact of Leaf Traits on Temporal Dynamics of Transpired Oxygen Isotope Signatures and Its Impact on Atmospheric Vapor. *Frontiers in Plant Science*, **8**, Article No. 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00005>
- [42] Wang, P., *et al.* (2021) Seasonal Variations in Water Flux Compositions Controlled by Leaf Development: Isotopic Insights at the Canopy-Atmosphere Interface. *International Journal of Biometeorology*, **65**, 1719-1732. <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02126-9>
- [43] Wei, X., *et al.* (2017) An Experimental Investigation of Kinetic Fractionation of Open-Water Evaporation over a Large Lake. *Atmospheres*, **122**, 651-663. <https://doi.org/10.1002/2017JD026774>
- [44] Wei, X., *et al.* (2018) Hydrologic Implications of the Isotopic Kinetic Fractionation of Open-Water Evaporation. *Science China Earth Sciences*, **61**, 1523-1532. <https://doi.org/10.1007/s11430-018-9246-9>
- [45] Ritter, F., *et al.* (2016) Isotopic Exchange on the Diurnal Scale between Near-Surface Snow and Lower Atmospheric Water Vapor at Kohnen Station, East Antarctica. *The Cryosphere*, **10**, 1647-1663. <https://doi.org/10.5194/tc-10-1647-2016>
- [46] Christner, E., *et al.* (2017) The Influence of Snow Sublimation and Meltwater Evaporation on δD of Water Vapor in the Atmospheric Boundary Layer of Central Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **17**, 1207-1225. <https://doi.org/10.5194/acp-17-1207-2017>
- [47] Madsen, M.V., *et al.* (2019) Evidence of Isotopic Fractionation during Vapor Exchange between the Atmosphere and the Snow Surface in Greenland. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **124**, 2932-2945. <https://doi.org/10.1029/2018JD029619>
- [48] Bowen, G.J., *et al.* (2019) Isotopes in the Water Cycle: Regional- to Global-Scale Patterns and Applications. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **47**, 453-479. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-053018-060220>
- [49] Salamalikis, V., *et al.* (2016) Isotopic Modeling of the Sub-Cloud Evaporation Effect in Precipitation. *Science of the Total Environment*, **544**, 1059-1072. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.072>
- [50] Wong, T.E., *et al.* (2017) Evaluation of Modeled Land-Atmosphere Exchanges with a Comprehensive Water Isotope Fractionation Scheme in Version 4 of the Community Land Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **9**, 978-1001. <https://doi.org/10.1002/2016MS000842>
- [51] Fiorella, R., *et al.* (2019) Biased Estimates of the Isotope Ratios of Steady-State Evaporation from the Assumption of Equilibrium between Vapour and Precipitation. *Hydrological Processes*, **33**, 2576-2590. <https://doi.org/10.1002/hyp.13531>
- [52] Nusbaumer, J., *et al.* (2017) Evaluating Hydrological Processes in the Community Atmosphere Model Version 5 (CAM5) Using Stable Isotope Ratios of Water. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **9**, 949-977. <https://doi.org/10.1002/2016MS000839>
- [53] Lamb, K.D., *et al.* (2017) Laboratory Measurements of HDO/H₂O Isotopic Fractionation during Ice Deposition in Simulated Cirrus Clouds. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **114**, 5612-5617. <https://doi.org/10.1073/pnas.1618374114>