

https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.204



海南岛河水稳定同位素空间分布特征及其对水汽输送的指示

林杰¹, 王照翻², 张云锺²

1. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广东广州 511458
2. 中国地质调查局海口海洋地质调查中心, 海南海口 571127

摘要: 热带低纬度地区水循环是全球气候系统演变的重要驱动力, 海南省是我国唯一的热带岛屿省份, 是热带水汽循环研究的理想地区. 水体的氢、氧稳定同位素是水文循环研究的重要手段, 通过海南岛主要河流的稳定同位素组成及其空间分布特征, 对海南岛水汽输送路径和来源进行研究. 海南岛河水同位素呈纬向上从西向东逐渐正偏, 经向上对称分布的特征, 海南岛东部河水同位素呈现“高度效应”, 而西部昌化江河水同位素呈现“反高度效应”. 海南岛河水同位素空间分布规律表明, 地形是控制河水同位素空间分布的最主要因素, 海南岛东南部为水汽输送的迎风坡, 而西南部处于“雨影区”, 水汽从东向西输送.
关键词: 海南岛; 河水; 稳定同位素; 地形; 水汽输送; 环境地质.

中图分类号: P66

文章编号: 1000-2383(2024)12-4622-13

收稿日期: 2023-08-15

Spatial Distribution Characteristics of Stable Isotopes in River Water in Hainan Island: Implication for Water Vapor Delivery Path

Lin Jie¹, Wang Zhaofan², Zhang Yunzhong²

1. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 511458, China
2. Haikou Marine Geological Survey Center, China Geological Survey, Haikou 571127, China

Abstract: The water cycle in the tropical regions is the important driving force for the evolution of the global climate system, and Hainan Province is the only tropical island province in China, which is an ideal area for the study of tropical water vapor cycle. Hydrogen and oxygen stable isotopes in water are important method for water cycle research. In this study, the transport path and source of water vapor in Hainan Island are studied through the spatial distribution of stable isotopes of major rivers in Hainan Island. The isotopes of the river water of Hainan Island are gradually positive from west to east in the latitude direction, and are symmetrically distributed in the longitude direction. The isotopes of the southeastern river of Hainan Island show the “altitude effect”, while the isotopes of the Changhua River in southwestern Hainan Island show the “anti-altitude effect”. The spatial distribution of river water isotopes in Hainan Island shows that topography is the most important factor controlling the spatial distribution of river water isotopes, and the eastern part of Hainan Island is the windward slope of water vapor transport, while the

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(No.42102140).

作者简介: 林杰(1992-), 男, 工程师, 博士, 主要从事生物地球化学、古环境、古气候等研究. ORCID: 0000-0003-1703-3100. E-mail: ljietibet@163.com

引用格式: 林杰, 王照翻, 张云锺, 2024. 海南岛河水稳定同位素空间分布特征及其对水汽输送的指示. 地球科学, 49(12): 4622-4634.

Citation: Lin Jie, Wang Zhaofan, Zhang Yunzhong, 2024. Spatial Distribution Characteristics of Stable Isotopes in River Water in Hainan Island: Implication for Water Vapor Delivery Path. *Earth Science*, 49(12): 4622-4634.

west is in the “rain shadow area”, and water vapor is transported from east to west.

Key words: Hainan Island; river water; stable isotope; topography; moisture transport; environmental geology.

0 引言

热带低纬度地区(赤道附近)的水循环对全球气候演化发挥着重要的作用,以西太平洋暖池区为代表的热带海区上升辐散的气流所形成的三大环流圈,通过季风和厄尔尼诺控制着地球气候,一旦暖池区海水上层结构和表层水温变化,就会影响全球的气候系统(翦知潜和金海燕,2008)。西太平洋地区具有极为复杂的气候特征,受到副热带东亚季风、热带印度季风、西北太平洋季风和澳大利亚季风四个季风系统的影响(Wang *et al.*, 2009),水汽过程较为复杂。此外,西太平洋地区还是全球人口密度最高的地区之一,其水汽循环和降水规律对于人类生产生活具有重要影响,因此一直是全球气候研究的热点(Peng *et al.*, 2010, 2011; Rangarajan *et al.*, 2017)。

从全球尺度来看,降水的氢、氧稳定同位素组成与降水量和温度密切相关(Dansgaard, 1964),因此成为研究热带区域气候动力和水汽来源,以及追踪现代和第四纪时间尺度上大气环流的重要工具。目前,利用降水稳定同位素追踪水汽来源和水汽输送多在大尺度上开展,如安第斯山脉(Esquivel-Hernández *et al.*, 2019),青藏高原和喜马拉雅(Tian *et al.*, 2005; Yao *et al.*, 2013; Acharya *et al.*, 2020),中亚(Yao *et al.*, 2021)等地区。例如,在中美洲和安第斯山脉的高海拔荒原,降水稳定同位素被用于追踪水汽来源和降水产生过程,发现该地区在厄尔尼诺年的水汽主要由北-东信风和低空急流输送而来(Esquivel-Hernández *et al.*, 2019)。在尼泊尔-喜马拉雅地区,通过气象观测站的降水同位素的季节性变化,能够观测到水汽来源从西风向南亚季风的转变(Acharya *et al.*, 2020)。然而,受限于气象观测站点分布密度的限制,利用降水稳定同位素对小尺度水汽输送过程的研究相对较少。在地形复杂的地区,由于海拔高度急剧变化和微气候的影响,降水同位素可能在很短的距离内发生较大改变。

河水同位素作为降水同位素的重要补充,或许可以为小尺度水汽输送过程研究提供帮助。河水主要来自降水和地下水,能够有效指示多年平均降水

的同位素组成,且具有取样便捷,不受气象观测站点分布限制等优势,尤其适合在水系较发育的地区开展高精度的水文环境研究。在黄河、长江、乌鲁木齐河、恒河等流域,河水氢氧同位素已成功用于揭示大气降水水汽来源,以及判断地下水、地表水径流途径及补给来源(Ramesh and Sarin, 1992; Miljević *et al.*, 2008; 陈新明等, 2011; Cockerton *et al.*, 2013; 冯芳等, 2013; 王贺等, 2016; 李宗省等, 2023; 毛龙富等, 2023)。

本文以我国典型的热带海洋岛屿——海南岛为研究区,检验河水同位素对地形复杂地区微气候变化的敏感性和对小尺度水汽输送特征的指示意义。海南岛具有规律的放射状分布水系,较小的年平均温差($\sim 2^\circ\text{C}$),以及较大的年均降水量变化范围(1 250~2 300 mm),是研究热带季风区水、碳、氮循环的理想地区(Zhang *et al.*, 2016; Shi *et al.*, 2019; 彭精诚等, 2022; Zhou *et al.*, 2022)。海南岛现有的绝大多数气象观测站点尚不具备测定降水稳定同位素组成的能力,但海南岛的降水、河水和地下水的稳定氢、氧同位素组成保持高度的空间分布一致性(陈静生和王忠, 1993)。本文通过海南岛主要水系的河水稳定氢氧同位素信息采集,分析其空间分布特征,进而探讨以海南岛为代表的热带复杂地貌区表层水稳定同位素组成与降水量、地形阻隔、蒸发作用等环境地质因素的关系,进一步确定海南岛的水汽来源和输送路径,为小尺度水汽输送路径研究提供新的思路。

1 研究区背景

海南岛地处北回归线以南,东亚大陆东南端。气候类型属于典型的热带季风气候,雨量充沛,年平均降水量在 1 600 mm 以上,降雨主要集中在 5 月~10 月份,占全年降水量的 75%~86%。海南岛的夏季风既有来自太平洋的东南季风,也有来自印度洋的西南季风(周淑贞, 1981)。

海南岛陆地面积 $3.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,地势以五指山和鹦哥岭为隆起中心,中部高,四周低,山体海拔高度多在 500~800 m,总体上属于低山丘陵类型。受到地形特征的影响,海南岛不同地区具有较大的降

水量差异(1 250~2 300 mm),位于山脉迎风面的中部山区气温较低,为多雨中心,年降雨量为 2 000~2 400 mm,以琼中、万宁和琼海为最多,位于背风面的西南和西部温度较高,为少雨区,年降雨量为 1 000~1 200 mm(徐淑英等, 1954; 周淑贞, 1981; 许格希等, 2013).海南岛热量丰富,气温较高,年平均气温在 23.5~25.6 °C,年太阳辐射量为 110~140 kCal/cm²,年日照时数为 1 750~2 650 h(李高聪等, 2016).

海南岛中间高,四周低的环形地貌以及充沛的降水,造成海南岛放射状的水系发育特征.海南岛的主要河流均为入海河流,起源于中部五指山等山区,其中南渡江、昌化江和万泉河流域是海南岛地区最大的 3 个流域,占全岛总面积的 46.80%(李高聪等, 2016).

2 研究方法

2.1 海南岛现代河水样品采集和同位素测定

本文在充分考虑区域自然条件、海拔及交通条件的基础上,于 2022 年 3 月系统采集海南岛不同气候区的主要河流样品,包括南渡江、文澜江、昌化江、陵水河和万泉河.在 34 个主河道采样点使用离心管采集枯水期河水样品 54 件(图 1a).全部样品装满不留气泡,并使用 Parafilm 封口膜封口.整个户外采样过程中避光放置,回到室内后至冷藏保存.

水体的稳定氢同位素($\delta^2\text{H}$)和氧同位素($\delta^{18}\text{O}$)测定在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室完成,采用美国 Los Gatos Research (LGR)公司的 IWA-35-EP 液态水稳定同位素分析仪进行测定,对汽化水分子吸收光谱强度和波长进行实时测量,可直接获得水样的 D/H 和 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比率. δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的分析精度分别为 0.5‰ 和 0.1‰,所有同位素测量结果都是相对于国际标准(V-SMOW)的千分差表示(‰).若同一采样点采集了多件样品,则将各样品的同位素值进行平均,代表采样点的河水稳定同位素组成.

2.2 海南岛年平均降水数据获取和处理

降水量数据采用美国太空署(national aeronautics and space administration, NASA)与日本宇宙航空研究开发机构(Japan aerospace exploration agency, JAXA)共同开展的全球降水观测任务(global precipitation measurement mission, GPM)提供的多传感器多卫星多算法结合卫星网络和雨量计反演

得到的更高精度的降水数据.数据的时间分辨率为 0.5 h,空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$.GPM 系统将使用 IMERG (integrated multi-satellite retrievals for GPM, GPM 综合多卫星检索)算法系统运行多次,按时间顺序依次生成早期多卫星产品(early)并用于起初的降水估计,发布时间为观测后 4 h;后期多卫星产品(later),发布时间为观测后 12 h;终期多卫星产品(final),发布时间为观测后约 2.5 个月.

本文采用 GPM 的 Final 逐月降水数据进行分析,将 2010 年 9 月 30 日—2021 年 9 月 30 日最新的观测数据通过 Arcgis 与 MATLAB 软件将数据重新处理为年平均降水数据,以便与河水同位素进行相关性分析(刘小婵等, 2015).海南岛年均降水量呈东部和中部较高,北部和西部较低分布特征(图 1b).

3 结果与讨论

3.1 海南岛河水同位素空间分布特征

海南岛河水稳定氢同位素值范围为 $-49.61\text{‰} \sim -34.49\text{‰}$ (VSMOW),稳定氧同位素值主要集中在 $-7.46\text{‰} \sim -5.11\text{‰}$ (VSMOW)之间(表 1).在文澜江北部入海口采集的河水样品具有明显偏正的氢氧同位素组成(δD : 约 -14‰ ; $\delta^{18}\text{O}$: -2‰),与文澜江上游河水以及海南岛其他河流水体的同位素组成存在明显的差异.由于该样品的采集位置距离入海口较近,可能受到海水混合的影响,导致水体同位素偏正,因此该采样点的同位素值不纳入后续讨论.

海南岛不同位置的河流稳定同位素组成具有明显的差异.位于海南岛东北部的南渡江河水最富集重同位素, δD 范围为 $-36.41\text{‰} \sim -34.49\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 范围为 $-5.42\text{‰} \sim -5.11\text{‰}$.位于海南岛北部的文澜江河水 δD 组成范围为 $-45.51\text{‰} \sim -38.25\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 范围为 $-6.91\text{‰} \sim -5.52\text{‰}$.位于东南部的陵水河 δD 范围为 $-42.06\text{‰} \sim -38.18\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 范围为 $-6.35\text{‰} \sim -5.82\text{‰}$.中西部昌化江河水组成最负,其中 δD 组成范围为 $-49.61\text{‰} \sim -44.61\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 范围为 $-7.46\text{‰} \sim -6.64\text{‰}$,昌化江上游到下游的水体同位素变化不明显.文澜江、南渡江、陵水河的水体同位素表现为从上游向下游逐渐富集重同位素的规律变化(图 2a 和图 2b).

整体而言,海南岛河水同位素的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 具有相似的空间变化特征(图 2a 和图 2b),每条河流的河水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 均具有较强的相关性(图 2c),与全球

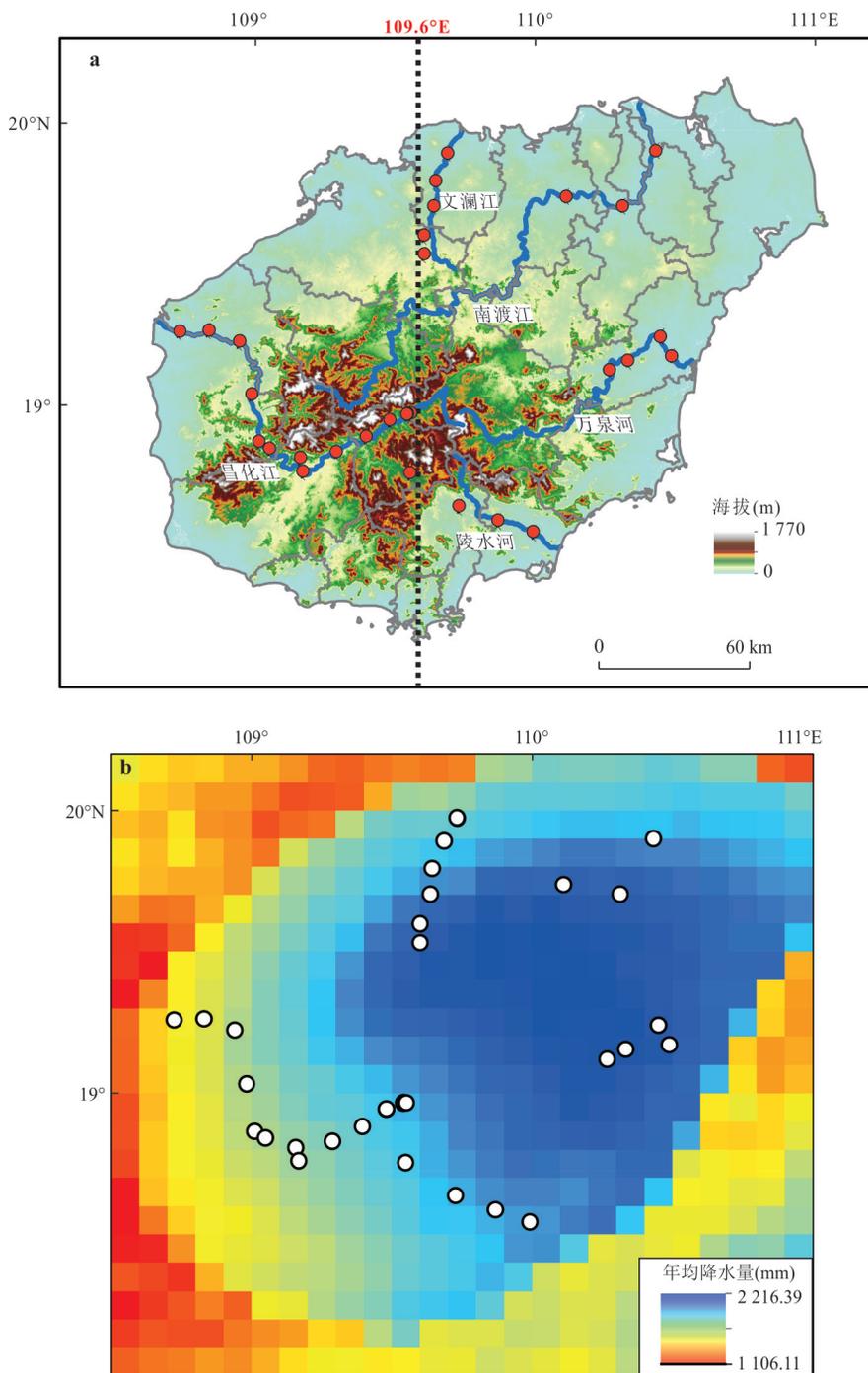


图1 海南岛河水采样位置分布图(红色圆点代表河水采样点)(a)和海南岛年均降水量分布(b)

Fig.1 Distribution map of river water sampling location in Hainan Island (red dots represent river water sampling locations) (a) and mean annual precipitation distribution in Hainan Island (b)

图b根据 GPM 2011—2021 年降水数据,白色圆点代表河水采样位置

平均大气降水线 $\delta D = 8 \times \delta^{18}O + 10$ (Craig, 1961) 相差较大,表明海南岛河水同位素可能受到蒸发作用的影响.前人通过大气降水的采样和同位素分析,计算得到海南岛的大气降水线为 $\delta D = 3.86 \times \delta^{18}O - 19.65$ ($n=13, r=0.871$) 与全球平均大气降水线具有较大差别,认为是由于热带云团降水往往是不平

衡过程,不遵循瑞利分馏的平衡分馏特征(陈静生和王忠, 1993).

尽管不同河流水体的同位素存在一定的差异,但整体而言,海南岛河水同位素呈现出显著的空间分布规律性.在东西方向上,以 $109.6^\circ E$ 为界,东西两侧的河水同位素表现为不同的分布特征(图 3).

表 1 海南岛各河流采样点位置及水体 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值Table 1 The location of sampling points and $\delta^{18}\text{O}$ and δD values of various rivers in Hainan Island

采样点	经度 (°E)	纬度 (°N)	海拔 (m)	年平均降雨量 (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰, VSMOW)	δD (‰, VSMOW)	d-excess (‰)
南渡江							
N-1	110.433	19.900	1	1 940.82	-5.11	-34.49	6.42
N-2	110.313	19.703	10	2 111.31	-5.12	-34.75	6.24
N-3	110.111	19.736	17	2 117.27	-5.42	-36.41	6.97
文澜江							
W-1	109.686	19.891	30	1 841.29	-5.52	-38.25	5.88
W-2	109.643	19.793	50	1 919.35	-6.05	-40.61	7.80
W-3	109.637	19.703	61	2 000.96	-6.40	-42.27	8.96
W-4	109.601	19.598	92	2 210.78	-6.83	-45.11	9.50
W-5	109.600	19.530	144	2 148.06	-6.91	-45.51	9.80
昌化江							
C-1	108.940	19.221	20	1 688.65	-7.09	-48.02	8.74
C-2	108.830	19.261	9	1 575.68	-7.11	-47.55	9.31
C-3	108.724	19.257	4	1 502.42	-6.98	-47.76	8.10
C-4	108.983	19.032	72	1 685.89	-7.46	-49.61	10.04
C-5	109.010	18.863	143	1 697.23	-7.13	-48.12	8.90
C-6	109.049	18.841	136	1 697.23	-6.95	-46.46	9.13
C-7	109.157	18.807	140	1 750.92	-6.99	-46.04	9.86
C-8	109.169	18.760	138	1 724.88	-6.64	-45.17	7.92
C-9	109.288	18.829	160	1 792.61	-6.72	-45.86	7.93
C-10	109.395	18.880	181	1 829.70	-7.29	-47.65	10.66
C-11	109.480	18.942	197	1 917.77	-7.39	-48.23	10.88
C-12	109.480	18.942	203	1 917.77	-7.25	-47.76	10.21
C-13	109.541	18.963	220	1 959.06	-6.88	-45.23	9.80
C-14	109.543	18.965	220	1 959.06	-6.94	-45.25	10.27
C-15	109.552	18.965	231	1 959.06	-7.06	-47.26	9.25
C-16	109.550	18.753	315	1 907.52	-6.83	-44.61	10.04
陵水河							
L-1	109.727	18.636	33	1 968.74	-6.18	-41.00	8.44
L-2	109.868	18.586	23	1 966.31	-6.35	-42.06	8.78
L-3	109.993	18.543	13	1 989.38	-5.82	-38.18	8.41
万泉河							
WA-1	110.267	19.120	15	2 189.33	-6.35	-38.95	11.85
WA-2	110.333	19.154	13	2 184.88	-6.36	-39.16	11.69
WA-3	110.450	19.239	8	2 162.89	-5.99	-38.04	9.84
WA-4	110.450	19.238	11	2 162.89	-6.07	-38.21	10.33
WA-5	110.488	19.170	6	2 163.20	-5.91	-37.29	9.99

在 109.6°E 以东,文澜江、南渡江、万泉河和陵水河 4 条河流的河水稳定同位素表现出随着经度的增加而逐渐富集重同位素(^{18}O 和 ^2H)的特征(图 3)。而在 109.6°E 以西,昌化江河水的氢氧稳定同位素保持相对较负的值(δD : $-45\text{‰} \sim -50\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O}$: $-6.5\text{‰} \sim -7.5\text{‰}$),从上游到下游的河水同位素变化不

大。109.6°E 大致位于中部分水岭的位置(图 1a),可能由于海南岛中部高地形的分隔,东西两侧的水文环境具有较大差异。东侧海拔与降水量的变化趋势相反,西侧海拔与降水量的变化趋势相同。在 109.6°E 以东,除文澜江外,其余 3 条河流的河水同位素与降水量同步增加,与同位素的“降水量效应”相反,

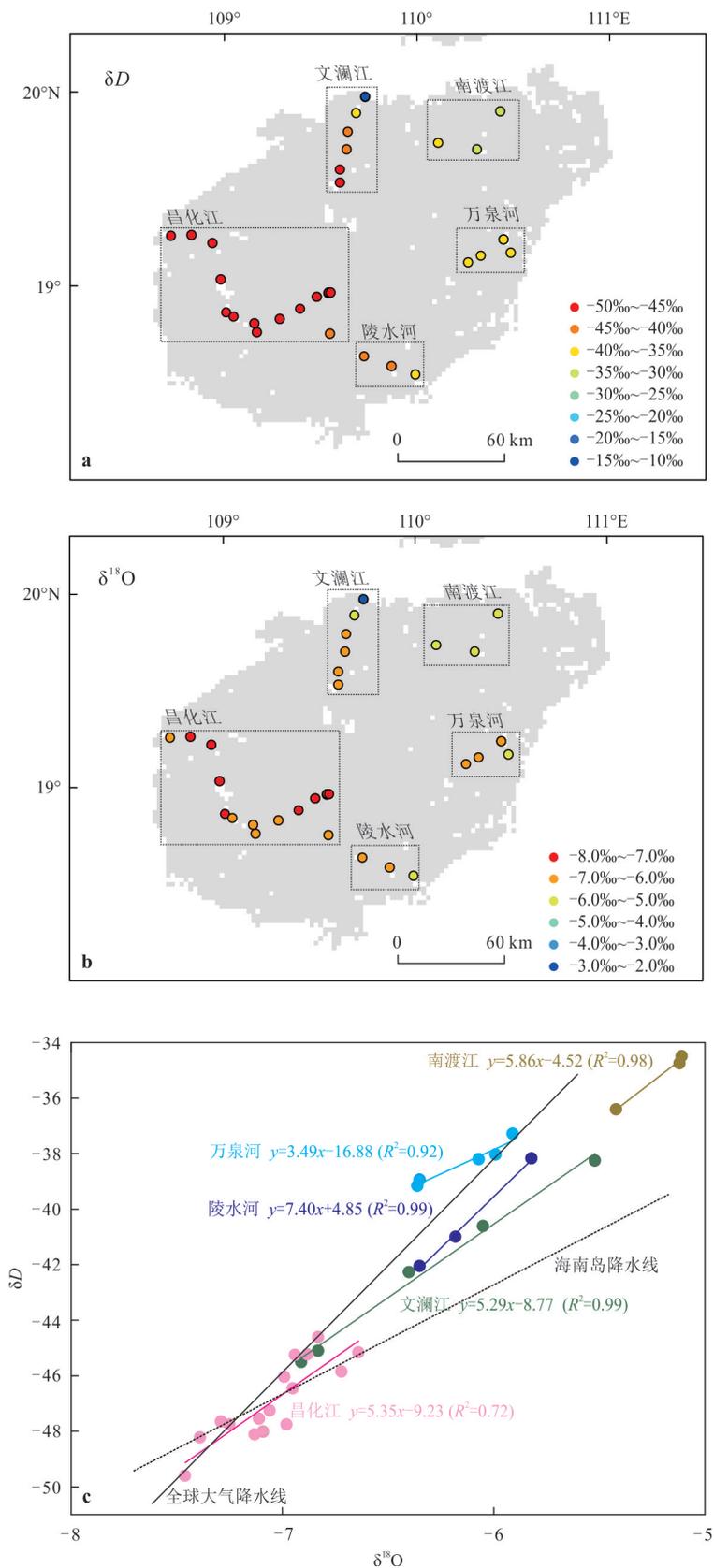


图2 海南岛不同水系氢、氧稳定同位素分布特(a,b)和不同河流氢、氧稳定同位素相关性图(c)

Fig.2 Stable isotope distribution characteristics of hydrogen and oxygen in different river systems (a, b) and correlation analysis between stable hydrogen and oxygen isotopes (c) in Hainan Island

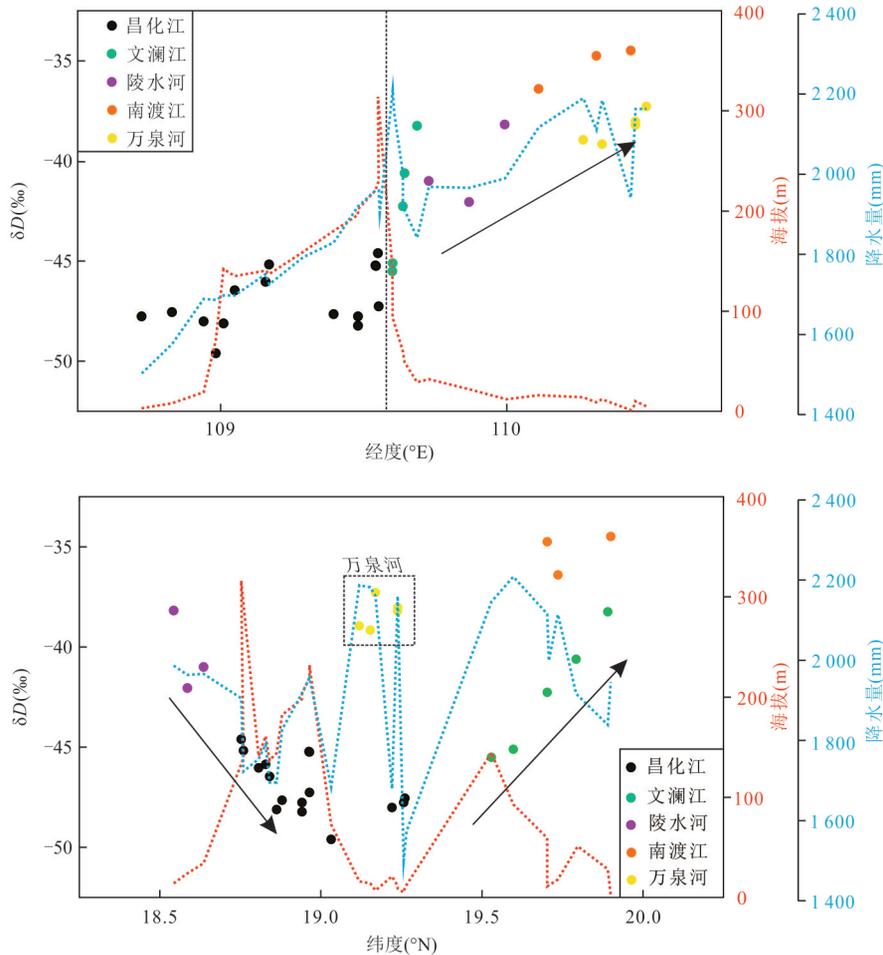


图3 海南岛河水同位素与经度、纬度相关性图

Fig.3 Correlation analysis between river water isotopes and latitude and longitude in Hainan Island

指示万泉河、南渡江和陵水河的河水同位素受到降水量的影响较小。文澜江河水同位素与降水量呈相反的趋势,表明文澜江可能主要受到“降水量效应”的控制。而位于西部的昌化江河水同位素与降水量和海拔的关系均不明显,可能受到其他因素的影响。

在南北方向上,除万泉河外,海南岛其他河水稳定同位素整体表现为海南岛中部最负(19°N),南北两侧河水较富集重同位素的对称分布特征(图3)。尽管采样点的海拔和降水量的变化较为复杂,但除了中部的万泉河和部分昌化江采样点外,降水量与高程呈现相近的变化趋势。19.5°N以北,文澜江、南渡江河水同位素与纬度呈正相关,与海拔和降水量呈相反的变化趋势,说明海拔或者降水量都有可能造成河水同位素随纬度变化的原因。在19°N以南,昌化江和陵水河的河水同位素出现随纬度增加,逐渐负偏的特征。河水同位素还与海拔具有一定负相关,说明降水的高度分馏可能是导致同位素

组成逐渐负偏的重要因素。19.0°~19.5°N范围内,万泉河和部分昌化江下游的河流样品与纬度相关性较差。昌化江下游受到中部山脉的阻挡,降水量较少,同位素组成也较负。万泉河虽然降水量较大,但由于采样位置靠近水汽输送的上游,水汽团同位素分馏程度较低,造成降水的同位素组成偏正。

3.2 河水氢氧同位素空间分布影响因素分析——降水量、地形和蒸发作用?

通过上述分析可知,海南岛河水同位素空间分布可能与海拔、降水量相关。同时,河水的蒸发作用也是影响河水同位素的重要因素。为进一步探究控制海南岛河水同位素分布的主要因素,我们将各个河流的河水同位素分别与上述环境因素进行对比。

通过河水同位素与采样位置的年均降水量进行比较发现(图4):在所采集的5条河流中,位于海南岛北部的文澜江河水同位素与降水量存在明显的负相关关系($R^2=0.93$),表现出“降水量效应”,说

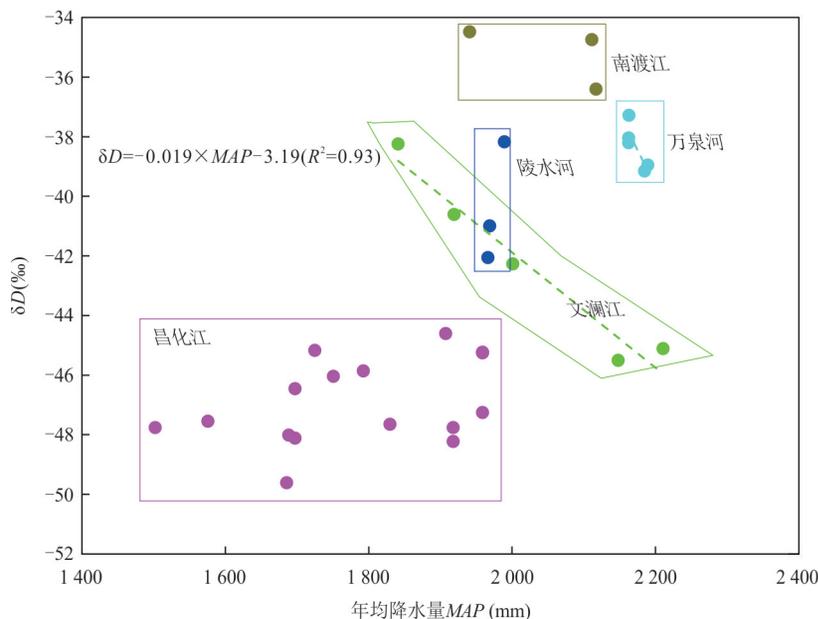


图 4 海南岛降水量与河水同位素相关性分析图

Fig.4 Correlation analysis between precipitation and river water stable isotopes in Hainan Island

明降水量可能是文澜江河水同位素的主控因素.位于海南岛西部的昌化江河水同位素与降水量不存在明显的相关性.万泉河各采样点之间的降水量变化不明显,同位素值也较集中,但同位素与降水量呈现一定的负相关性($R^2=0.65$).陵水河样品采样位置的年均降水量较为接近,但河水同位素相差较大,表明降水量可能不是影响其河水同位素的主要因素.南渡江由于采样点数量较少,未体现出明确的与降水量的关系.

通过河水同位素与地形的相关性研究发现(图 5),海南岛东部万泉河河水同位素随着海拔的增加明显降低,具有明显的地形控制特征($R^2=0.83$).文澜江的河水同位素同样与采样位置的海拔具有明显的负相关性($R^2=0.77$),但其河水同位素与降雨量的相关性更强,因此,有可能是由于海拔恰好与降水量的分布规律相似(图 3),造成其河水同位素与海拔具有相关性.与万泉河和文澜江不同,昌化江河水同位素与采样点海拔表现出一定的正相关关系,表现为“反高度效应”,但相关性较弱($R^2=0.24$).位于东北部的南渡江和南部的陵水河河水同位素均表现为随着海拔增加而逐渐减小的特征,也暗示了这两条河流的同位素组成与海拔之间的相关性.

蒸发作用可以改变河水的同位素组成,海南岛

不同地区的气候条件不同,蒸发强弱也不同,对河水同位素分布造成一定的影响.为了探究蒸发作用对海南岛河水同位素的影响,我们采用 d-excess 值进行河水蒸发强度分析.水体的 d-excess ($d\text{-excess}=\delta D-8\times\delta^{18}\text{O}$)指标反映氘对于平衡状态的偏差,主要由水在蒸发过程中动力分馏引起.降水的 d-excess 值可以反映大气降水在蒸发、凝结过程中的不平衡程度,通常大气湿度高的地区, d-excess 值较低,大气湿度低的区域,蒸发作用强, d-excess 值较高(Dansgaard, 1964).对于河水而言,蒸发作用越强,河水的 d-excess 值越低;蒸发强度越弱,河水的 d-excess 值越高(Zhong *et al.*, 2021).

海南岛河水同位素的 d-excess 值范围为 $5.88\text{‰}\sim 11.85\text{‰}$,其中东部万泉河的 d-excess 值最大($9.84\text{‰}\sim 11.85\text{‰}$),说明蒸发强度较低,万泉河河水 d-excess 值与 δD 具有明显的负相关性(图 6; $R^2=0.73$).文澜江河水的 d-excess 值范围为 $5.88\text{‰}\sim 9.80\text{‰}$,从上游到下游的 d-excess 值逐渐增大,河水 δD 值逐渐减小, d-excess 与 δD 明显负相关(图 6; $R^2=0.90$).昌化江河水 d-excess 值变化范围为 $7.92\text{‰}\sim 10.88\text{‰}$,波动较大,但与 δD 值相关性较差(图 6),说明蒸发作用对昌化江的河水同位素控制作用最不明显.海南岛东北部南渡江的 d-excess 值最低,为 $6.24\text{‰}\sim 6.97\text{‰}$,陵水河的 d-excess 值范

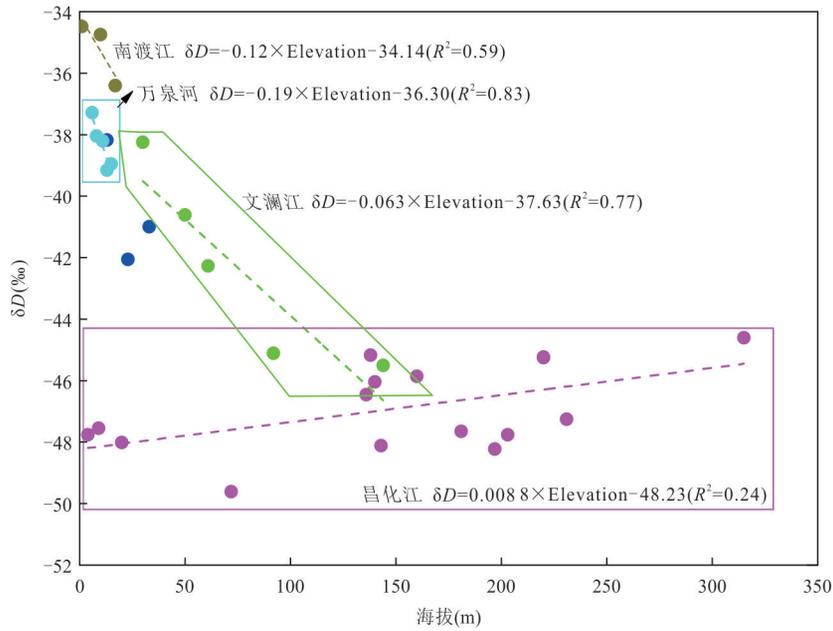


图 5 采样点海拔高度与河水同位素的相关性分析

Fig.5 Correlation analysis between the altitude of the sampling point and the isotopes of river water

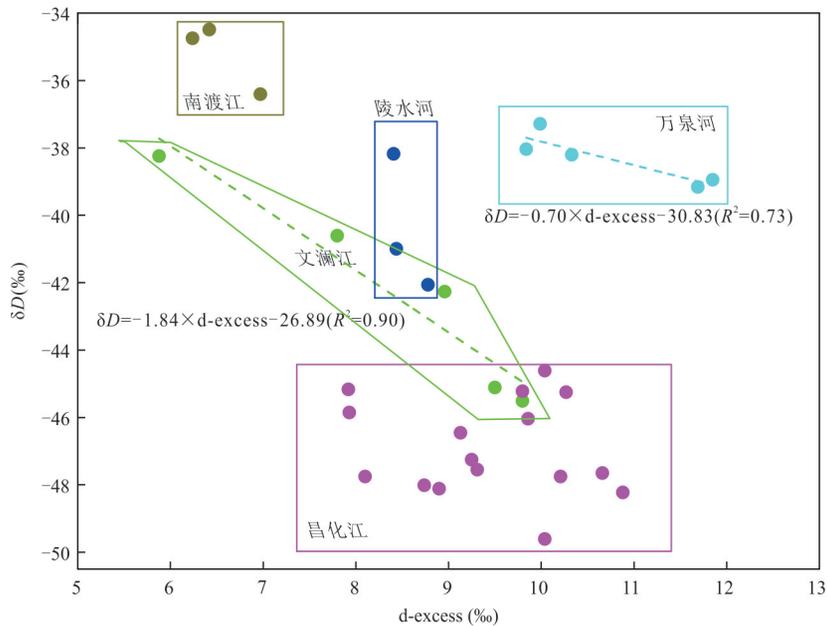


图 6 海南岛河水样品氘值(d-excess)与河水同位素相关性分析图

Fig.6 Correlation analysis between d-excess and river water isotope from Hainan Island

围为 8.41‰~8.78‰. 南渡江和陵水河的河水采样点较少, 但整体变化趋势依然是随着 d-excess 值的增大, δD 值越低, 采样点之间的蒸发强度差异不大, 但 δD 值发生了较大改变 (图 6), 可能也说明了两条河流的稳定同位素组成对蒸发强度的变化更加敏感.

上述相关性分析可知, 地形、降水量以及蒸发作用等环境地理因素对海南岛河水同位素均具有

一定的控制作用. 为确定哪种因素为主要控制因素, 本文对河水同位素、降水量、海拔高度、d-excess 值 4 个因子进行主成分分析 (图 7), 结果发现, 与降水量和 d-excess 相比, 海拔高度与河水的同位素的相关性最强 (图 7), 表明海南岛的地形对河水同位素的分布起到了最关键的控

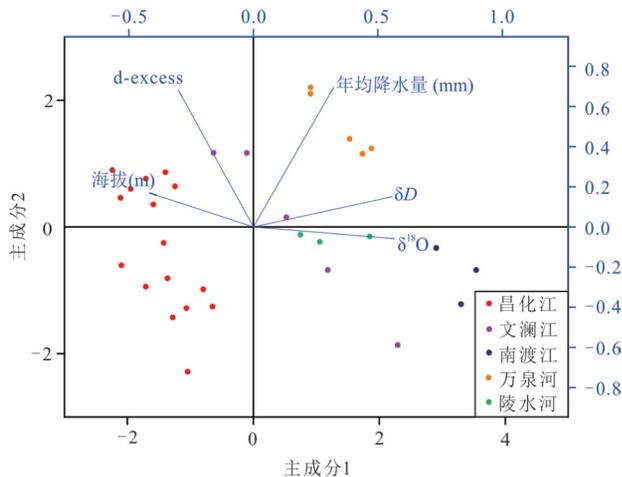


图7 海南岛河水同位素、海拔、年均降水量和河水 d-excess 值主成分分析

Fig.7 Analysis of principal component of river water isotope, altitude, mean annual precipitation and river water d-excess value in Hainan Island

明年均降水量较大(越湿润)的地区,蒸发作用较弱,符合一般认识.当然,不同河流的河水同位素的主控因素可能有所不同.例如文澜江,降水量、蒸发强度和海拔均与其河水同位素呈负相关,而降水量与河水同位素的相关性最强,表明降水量是控制河水同位素的重要因素.但就整个海南岛而言,海拔和地形特征是影响降水、蒸发和河水同位素组成的主要因素.

在全球尺度上,热带低纬度地区的降水同位素分布表现出明显的“降水量效应”,即降水量越大的地区,降水的同位素组成越偏负(Dansgaard, 1964).然而,区域性气候研究发现,由于受到地形等因素的影响,低纬度地区的降水同位素并不总是与降水量呈现负相关.如前人通过统计我国亚热带气象站点数据发现,我国亚热带许多地区存在同位素的“反降水量效应”,出现该现象的原因是该地区包含诸多内陆高原,当水汽团在高原内部运输时,会发生多次降水过程,氢氧稳定同位素分馏作用会导致剩余水汽团中的重同位素持续减少,最终造成氢氧同位素值和降水量的同步减少,呈现出“反降水量效应”(张蓓蓓等, 2022).海南岛东部降雨量远高于西部,但其西部河流(昌化江)的河水同位素比东部河流偏负,也体现出一定的“反降水量效应”,进而说明了海南岛的地形分布对降水过程和氢氧同位素分馏的影响.

3.3 河水同位素对水汽来源的指示意义

早期的文献对海南岛的水汽来源的研究主要基于地面盛行风向统计,统计发现:1月全岛盛行东北风,3月—4月逐步转为东、东南、南风,6月—7月东部仍为东南、南风,南部、西部则转为南、西南风,9月—10月全岛又转为东北风,认为海南岛的水汽既有通过东亚季风输送的水汽,也有通过西南季风输送的水汽(郭恩华等, 1982).近些年来,关于海南岛水汽来源的研究多关注台风等极端气候事件的水汽来源特征,发现海南岛台风的水汽来源区主要为西太平洋、孟加拉湾、南海和印度洋,在台风降水偏多年,水汽来源主要为西太平洋和孟加拉湾;在台风降水偏少年,水汽主要来自西北太平洋(刘金庆等, 2018; 罗婷等, 2020).

海南岛雨季各地降水量充足,东、西部差异小,而旱季不仅降水量普遍减少,分布也极不均匀,东部多,西部少,年均降水量的巨大差异主要是由旱季降水量分布不均匀所致(郭恩华等, 1982).本文样品采集时间为海南岛的旱季,受到台风等极端气候的影响较小,且采样过程中未出现降雨过程,河水主要由地下水补给,能够更好的代表海南岛多年年均降水的平均同位素组成.

通过河水同位素的空间分布研究可知,海南岛河水空间分布主要受到地形的控制.河水同位素的分布呈现从西向东逐渐正偏,而南北方向对称的分布格局,可能指示了海南岛的主导水汽输送路径主要为东西方向.而海南岛东部河流水系表现出类似“高度效应”的特征,西部昌化江河水同位素的类似“反高度效应”,说明前者可能处于迎风坡,而后者所在位置应该为背风坡,从而进一步印证了海南岛的水汽应主要来自东部.结合前人关于主导风向和水汽来源的研究,本文认为海南岛旱季的水汽团应主要来自南海和西太平洋地区.

尽管海南岛中部山地的最高海拔 $<2\ 000\text{ m}$,但也有81座海拔超过1 000 m的山峰,分布在东北—西南走向的五指山、雅加大岭和鹦哥岭三大山脉之中(许格希等, 2013).从东向西输送的水汽遇到地形的阻挡,在海南岛西部形成了明显的“雨影”效应.处于“雨影”区的昌化江流域,尽管降水量较少,但由于水汽输送过程中经历了地形降雨分馏,重的同位素优先进入降水被带出,造成到达海南岛西侧的云团同位素组成偏负,其河水的同位素组成最偏负.

4 结论和展望

(1)海南岛河水同位素具有显著的空间分布规律性,东西方向上以 109.6°E 为界,西部昌化江河水同位素最负,东部河水同位素随着经度的增加而逐渐正偏.南北方向上中部山区的河水同位素最负,南北两侧河水同位素值对称分布.

(2)相关性研究和主成分分析发现,河水同位素与降水量、海拔、以及 d-excess 值均具有一定的相关性,其中海拔所代表的地形是控制海南岛河水同位素空间分布的最重要因素.

(3)河水同位素的空间分布特征和各河流同位素与环境地理因素的研究发现,海南岛旱季水汽主要的主要输送路径为东西方向,水汽来源主要为南海和西太平洋地区.由于中部山地的阻挡,海南岛西部形成了明显的“雨影”区.

(4)通过河水同位素,对海南岛小尺度水汽输送特征进行研究,验证了河水同位素对地形、降水量等因素敏感性,同时也展示了热带地区同位素分布和控制因素的复杂性.在古水文环境研究中,热带地区沉积物样品识别的氢氧同位素变化往往被归因于降水量的变化,而通过本文的分析可知,地形、水汽来源和水汽输送路径的改变都有可能是导致水体稳定同位素发生改变的重要原因.因此,在利用同位素重建古环境和古气候时,应注意同位素的多解性,结合多种指标综合分析.

References

- Acharya, S., Yang, X.X., Yao, T.D., et al., 2020. Stable Isotopes of Precipitation in Nepal Himalaya Highlight the Topographic Influence on Moisture Transport. *Quaternary International*, 565:22–30. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.09.052>
- Chen, J.S., Wang, Z., 1993. A Study on Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen in Rain Water, River Water and Groundwater from Hainan Island of China. *Scientia Geographica Sinica*, 13(3): 273–278, 296(in Chinese with English abstract).
- Chen, X.M., Gan, Y.Q., Liu, Y.D., et al., 2011. Spatial Distribution Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Mainstream of Yangtze River. *Geological Science and Technology Information*, 30(5):110–114(in Chinese with English abstract).
- Cockerton, H.E., Street-Perrott, F.A., Leng, M.J., et al., 2013. Stable-Isotope (H, O, and Si) Evidence for Seasonal Variations in Hydrology and Si Cycling from Modern Waters in the Nile Basin: Implications for Interpreting the Quaternary Record. *Quaternary Science Reviews*, 66:4–21. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.12.005>
- Craig, H., 1961. Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science*, 133(3465): 1702–1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>
- Dansgaard, W., 1964. Stable Isotopes in Precipitation. *Tellus*, 16(4): 436–468. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x>
- Esquivel-Hernández, G., Mosquera, G.M., Sánchez-Murillo, R., et al., 2019. Moisture Transport and Seasonal Variations in the Stable Isotopic Composition of Rainfall in Central American and Andean Páramo during El Niño Conditions (2015–2016). *Hydrological Processes*, 33(13):1802–1817. <https://doi.org/10.1002/hyp.13438>
- Feng, F., Li, Z.Q., Jin, S., et al., 2013. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in Precipitation and Its Water Vapor Sources in the Upper Urumqi River Basin, Eastern Tianshan. *Advances in Water Science*, 24(5): 634–641(in Chinese with English abstract).
- Guo, E.H., Wang, D.X., Chen, L., 1982. Relationship between Precipitation and Monsoon in Hainan Island. *Tropical Geography*, 2(1):15–20, 64(in Chinese with English abstract).
- Jian, Z.M., Jin, H.Y., 2008. Ocean Carbon Cycle and Tropical Forcing of Climate Evolution. *Advances in Earth Science*, 23(3):221–227(in Chinese with English abstract).
- Li, G.C., Gao, S., Dai, C., 2016. Geomorphological Evolution of Major Catchment Basins of Hainan Island, Southern China. *Quaternary Sciences*, 36(1): 121–130(in Chinese with English abstract).
- Li, Z.X., Zhang, B.J., Feng, Q., et al., 2023. A Review of Isotope Ecohydrology in the Cold Regions of Western China. *Earth Science*, 48(3): 1156–1178(in Chinese with English abstract).
- Liu, X.C., Zhao, J.J., Zhang, H.Y., et al., 2015. Accuracy Validation and Application of TRMM Precipitation Data in Northeast China. *Journal of Natural Resources*, 30(6): 1047–1056(in Chinese with English abstract).
- Liu, J.Q., Yin, P., Gao, F., et al., 2018. Water H-O Isotopic Characteristics of Nandu River Estuary and Their Response to Typhoon “Kalmaegi”. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 38(1): 170–177(in Chinese with English abstract).
- Luo, T., Wang, Y.Q., Li, L.P., 2020. Characteristics of Typhoon Rainfall Affecting Hainan Island and Its Water Vapor Sources. *Journal of Meteorology and Environ-*

- ment, 36(6):42—49(in Chinese with English abstract).
- Mao, L.F., Fu, S., Liu, H., et al., 2023. Analysis of Recharge Source of Karst Spring Water Based on Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes. *Earth Science*, 48(9): 3480—3493 (in Chinese with English abstract).
- Miljević, N., Golobočanin, D., Ogrinc, N., et al., 2008. Distribution of Stable Isotopes in Surface Water along the Danube River in Serbia. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 44(2): 137—148. <https://doi.org/10.1080/10256010802066141>
- Peng, J.C., Zheng, X., Wu, W.H., 2022. Surface and Subsurface Chemical Weathering in Tropical Hainan Island: Implications for Global Carbon Cycle and Seawater Sr Isotope Evolution. *Geological Journal of China Universities*, 28(6):849—860(in Chinese with English abstract).
- Peng, T.R., Liu, K.K., Wang, C.H., et al., 2011. A Water Isotope Approach to Assessing Moisture Recycling in the Island-Based Precipitation of Taiwan: A Case Study in the Western Pacific. *Water Resources Research*, 47. <https://doi.org/10.1029/2010wr009890>
- Peng, T.R., Wang, C.H., Huang, C.C., et al., 2010. Stable Isotopic Characteristic of Taiwan's Precipitation: A Case Study of Western Pacific Monsoon Region. *Earth and Planetary Science Letters*, 289(3—4): 357—366. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.11.024>
- Ramesh, R., Sarin, M.M., 1992. Stable Isotope Study of the Ganga (Ganges) River System. *Journal of Hydrology*, 139(1—4): 49—62. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(92\)90194-z](https://doi.org/10.1016/0022-1694(92)90194-z)
- Rangarajan, R., Laskar, A.H., Bhattacharya, S.K., 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>
- Shi, R., Cai, Q.B., Dong, L.Y., et al., 2019. Response of the Diurnal Cycle of Summer Rainfall to Large-Scale Circulation and Coastal Upwelling at Hainan, South China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(7): 3702—3725. <https://doi.org/10.1029/2018jd029528>
- Tian, L.D., Yao, T.D., White, J.W.C., et al., 2005. Westerly Moisture Transport to the Middle of Himalayas Revealed from the High Deuterium Excess. *Chinese Science Bulletin*, 50(10): 1026—1030. <https://doi.org/10.1360/04wd0030>
- Wang, B., Huang, F., Wu, Z.W., et al., 2009. Multi-Scale Climate Variability of the South China Sea Monsoon: A Review. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 47(1—3): 15—37. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2008.09.004>
- Wang, H., Gu, H.B., Jiang, J.Y., et al., 2016. Hydrochemical Characteristics and Origin Including Isotope Technique of the River Water in the Yili River Basin, Xinjiang. *Quaternary Sciences*, 36(6):1383—1392(in Chinese with English abstract).
- Xu, G.X., Guo, Q.S., Niu, S.K., et al., 2013. Research on Climate Change Characteristics of Different Climatic Regions in Hainan Island in the Last 50 Years. *Journal of Natural Resources*, 28(5):799—810(in Chinese with English abstract).
- Xu, S.Y., Xu, M.Y., Gao, Y.X., 1954. The Climate of Hainan Island. *Acta Meteorologica Sinica*, 12(3): 195—212(in Chinese).
- Yao, J.Q., Liu, X.C., Hu, W.F., 2021. Stable Isotope Compositions of Precipitation over Central Asia. *Peer. J.*, 9: e11312. <https://doi.org/10.7717/peerj.11312>
- Yao, T.D., Masson-Delmotte, V., Gao, J., et al., 2013. A Review of Climatic Controls on $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation over the Tibetan Plateau: Observations and Simulations. *Reviews of Geophysics*, 51(4): 525—548. <https://doi.org/10.1002/rog.20023>
- Zhang, B.B., Xu, Q., Gao, D.Q., et al., 2022. Characteristics and Drivers of δD and $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation over Subtropical China. *Terrestrial Ecosystem and Conservation*, 2(4): 13—20(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q.Z., Tao, Z., Ma, Z.W., et al., 2016. Riverine Hydrochemistry and CO_2 Consumption in the Tropic Monsoon Region: A Case Study in a Granite-Hosted Basin, Hainan Island, China. *Environmental Earth Sciences*, 75(5): 436. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5250-0>
- Zhong, J., Wallin, M.B., Wang, W.F., et al., 2021. Synchronous Evaporation and Aquatic Primary Production in Tropical River Networks. *Water Research*, 200: 117272. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117272>
- Zhou, N., Liu, S.M., Song, G.D., et al., 2022. Responses of Nutrient Biogeochemistry and Nitrogen Cycle to Seasonal Upwelling in Coastal Waters of the Eastern Hainan Island. *Acta Oceanologica Sinica*, 41(6): 99—113. <https://doi.org/10.1007/s13131-021-1934-8>
- Zhou, S.Z., 1981. On the Climatic Features of Hainan Island. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, (1): 61—71(in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 陈静生,王忠,1993.海南岛雨水、河水、地下水氢氧稳定同位素特征及其关系.地理科学,13(3):273—278.
- 陈新明,甘义群,刘运德,等,2011.长江干流水体氢氧同位素

- 空间分布特征.地质科技情报,30(5):110—114.
- 冯芳,李忠勤,金爽,等,2013.天山乌鲁木齐河流域山区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 特征及水汽来源分析.水科学进展,24(5):634—641.
- 郭恩华,王鼎祥,陈琍,1982.海南岛降水与季风的.热带地理,2(1):15—20,64.
- 翦知潜,金海燕,2008.大洋碳循环与气候演变的热带驱动.地球科学进展,23(3):221—227.
- 李高聪,高抒,戴晨,2016.海南岛主要入海河流域地貌演化.第四纪研究,36(1):121—130.
- 李宗省,张百娟,冯起,等,2023.我国西部高寒山区同位素生态水文研究进展.地球科学,48(3):1156—1178.
- 刘金庆,印萍,高飞,等,2018.南渡江河口水体氢氧同位素特征及对台风“海鸥”的响应.海洋地质与第四纪地质,38(1):170—177.
- 刘小婵,赵建军,张洪岩,等,2015. TRMM 降水数据在东北地区的精度验证与应用.自然资源学报,30(6):1047—1056.
- 罗婷,王远清,李丽平,2020.影响海南岛的台风降水及水汽输送源地分析.气象与环境学报,36(6):42—49.
- 毛龙富,付舒,刘宏,等,2023.基于氢氧稳定同位素的喀斯特泉水补给来源分析.地球科学,48(9):3480—3493.
- 彭精诚,郑栩,吴卫华,2022.热带海南岛地表和地下化学风化:对全球碳循环及海水 Sr 同位素演化研究的启示.高校地质学报,28(6):849—860.
- 王贺,谷洪彪,姜纪沂,等,2016.新疆伊犁河流域河水同位素与水化学特征及成因.第四纪研究,36(6):1383—1392.
- 许格希,郭泉水,牛树奎,等,2013.近 50a 来海南岛不同气候区气候变化特征研究.自然资源学报,28(5):799—810.
- 徐淑英,许孟英,高由禧,1954.海南岛的气候.气象学报,12(3):195—212.
- 张蓓蓓,徐庆,高德强,等,2022.中国亚热带大气降水氢氧稳定同位素特征及其影响因素.陆地生态系统与保护学报,(24):13—20.
- 周淑贞,1981.海南岛的气候特征.华东师范大学学报(自然科学版),(1):61—71.