

鄱阳湖水体垂向分层状况调查研究*¹

李云良^{1,2} 姚静² 张小琳^{2,3} 张奇^{2,4}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 流域地理学重点实验室, 江苏 南京
210008;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 江西师范大学, 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西 南昌 330022)

【摘要】: 湖泊水体混合或分层对环境和生态具有显著指示意义, 能够提高对未来湖泊水环境状况的评价与管理。针对洪泛鄱阳湖水位季节性变化显著等特点, 基于剖面温度和稳定氢氧同位素的调查分析来探明多因素影响下鄱阳湖水体垂向分层或混合状况。结果发现: 鄱阳湖枯水期和洪水期水体垂向温差大多处于0~1.0 °C, 大部分水域温差小于0.5 °C, 但偶见洪水期部分水域会达到1.5 °C的较大温差。总体表明, 在季节变化尺度上, 鄱阳湖具有较为稳定的等温层, 没有明显温度分层特征。同位素分析结果得出, 枯水期和洪水期的氢氧稳定同位素值在深度剖面上呈均一分布, 表明鄱阳湖水体混合状况较好或完全混合。虽然湖区气象条件和水文条件均是影响鄱阳湖水体分层或混合的重要因素, 但鄱阳湖入流和出流等水文条件是影响鄱阳湖水体垂向混合的主要因素。鄱阳湖水体混合同时对湖泊水环境因子的垂向分布特征可能产生重要的影响或控制作用。首次基于大量野外监测有针对性地开展鄱阳湖水体分层研究, 结果有助于对湖泊水流结构的深入认识, 可为湖区水体污染物的输移模拟与作用机制阐释等方面提供科学参考。

【关键词】: 洪泛鄱阳湖; 水体分层或混合; 水温; 氢氧同位素; 水环境因子; 影响因素

【中图分类号】: P339 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2017)06-0915-10

¹ 收稿日期: 2016-10-09; 修回日期: 2016-11-23

基金项目: 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金(2014491611) [Open Foundation of State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering (2014491611)]; 江西省重大生态安全问题监控协同创新中心项目(JXS-EW-00) [Collaborative Innovation Center for Major Ecological Security Issues of Jiangxi Province and Monitoring Implementation (JXS-EW-00)]; 国家自然科学基金项目(41401031, 41371062, 41301023) [National Natural Science Foundation of China (41401031, 41371062 and 41301023)]

作者简介: 李云良(1983~), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事湖泊流域系统水文水动力过程联合模拟研究. E-mail: yunliangli@niglas.ac.cn

湖泊是全球陆地水系统中的重要组分, 因其具有丰富的地表水资源和高度的生态价值, 湖泊是人们休闲娱乐、工农业用水和发展渔业的重要场所, 也是众多生物群赖以生存的必需环境^[1]。湖泊水体混合或分层状况有显著的环境和生态指示意义, 尤其是在分析底层溶解氧消耗^[2]以及营养盐和主要生产者分布^[3]等方面。湖泊水体混合或分层可能是长达几十年的持续过程, 也有可能仅是几个小时的短暂过程^[4], 主要取决于以下几个主要影响因素^[5]: (1) 湖泊入流所携带的混合能量; (2) 湖泊流出和取水等所引起的混合能量; (3) 由风、太阳辐射及其它气象要素导致的水-气界面能量迁移。因此, 在湖泊水体复杂水动力环境作用下, 水体分层的调查分析与研究能够提高对未来湖泊水环境状况的评价与可持续管理, 具有重大实际意义。

文献调研发现, 国内外已经针对不同复杂程度、不同尺度的湖泊系统, 采用野外调查和水动力模型开展了水体混合或分层以及影响因素研究^[6~16], 但多数集中在对国外湖泊的研究。总结发现, 先前研究涵盖了浅水湖泊、深水湖泊以及洪泛湖泊等主要湖泊类型, 采用了温度监测^[6, 7]、稳定同位素^[8]与数值模型^[9, 10]等调查方法。研究发现, 受气温、风、降雨等气象条件以及湖泊水文水动力条件的影响, 这些湖泊的水体分层或混合状况呈现出显著时空变异性。无论是深水湖泊还是浅水湖泊, 鉴于这些湖泊系统的主要影响因素存在差异, 不同湖泊的水体垂向分层状况具有明显的局地性, 应开展有针对性的相关研究。

鄱阳湖是我国最大的淡水湖泊, 也是长江中下游极具代表性的大型通江湖泊, 在优质淡水供给、洪水调控和生物多样性保护等方面起着重要作用^[17]。另外, 鄱阳湖也是全球重要生态区, 承载着鄱阳湖生态经济区的可持续发展, 以占长江约 16% 的年径流量影响着长江中下游供水和用水安全^[18]。鄱阳湖水位的高度动态变化, 导致湖泊水体面积呈现年内显著的萎缩与扩张, 进而使得湖区洪旱灾害频发^[19]。流域 5 河来水的入湖径流对湖泊水位起着主控作用, 其次, 鄱阳湖与长江的水量交换也对湖泊水位形成季节性的顶托和拉空作用^[20]。但随着鄱阳湖周边工业化与城镇化加快以及人口的急剧增长, 污水和废水排放持续增加, 给鄱阳湖水质水环境保护造成了严重威胁^[18]。虽然以往不少研究已经关注鄱阳的水环境变化, 但这些研究主要基于湖区空间表层水体的采样与分析, 对有可能引起水环境变化的水体分层特征研究鲜有报道。近些年来, 不少学者通过构建二维水动力数值模型调查鄱阳湖空间上的水文水动力特征, 尽管这些模型取得了广泛应用和发展, 但均未考虑鄱阳湖的水体垂向分层状况, 进而缺乏用来进一步评估湖区生物化学过程与作用的水质模型^[21~23]。虽然诸多学者普遍接受鄱阳湖是一个浅水型湖泊, 可以忽略其垂向结构特征与变化, 但没有足够的支撑来加以佐证和参考。考虑到鄱阳湖地表水力联系复杂以及水深季节性变化显著等特点, 开展湖泊水体垂向分层调查与分析不仅是一项基础研究, 也是应对当前鄱阳湖水环境恶化的一个重要任务。

本文以大型通江洪泛鄱阳湖为研究对象, 基于剖面温度与稳定氢氧同位素的调查分析为研究手段, 开展季节性水位变化影响下鄱阳湖水体垂向分层调查分析及影响因素研究。本文主要研究目标为分析典型水位变化期、特定断面的水体垂向温度和稳定氢氧同位素的变化特征, 根据剖面变化信息来评估鄱阳湖水体季节性混合或分层状况, 并探讨分层影响因素及其与水环境因子的联系。本文首次针对鄱阳湖水体分层开展研究, 大量的基础数据获取可用于后续的三维数值模型发展, 研究结果有助于对湖泊水流结构与格局的深入认识, 也可为湖区水体污染物的输移模拟与作用机制阐释等方面提供科学参考。

1 研究区介绍

鄱阳湖位于江西省北部以及长江中游南岸, 南北长约 173 km, 东西最大宽度约 74 km, 北部入江水道最窄处宽度约 2.8 km, 湖岸线总长达 1 200 km (图 1)。鄱阳湖大致包括主河道、岛屿、洪泛洲滩等典型地貌。湖盆高程总体呈南高北低的趋势, 最大高程差可达 13 m, 南、北部平均高程相差约 6.5 m (图 1)。在高洪水位时期, 约 85% 的鄱阳湖区平均水深小于 6 m, 最大水深可达 30 m^[22]。鄱阳湖主要承纳赣江、抚河、信江、饶河与修水 5 大河流来水, 经调蓄后注入长江, 其与 5 河及长江之间频繁的水量交换形成了鄱阳湖高动态的水位-水面积变化。从季节性水位波动上, 鄱阳湖可以划分为 4 个水位变化期, 即涨水期 (4~5 月)、洪水期 (7~9 月)、退水期 (10~11 月) 与枯水期 (12~次年 3 月)。鄱阳湖洪、枯季节的水位差可达 15 m, 枯水季节的空间水位差可达 5 m, 而洪水季节整个湖区水位基本保持一致^[22]。丰水期鄱阳湖水面积可达 3 000 km², 而枯水期萎缩至不足 1 000 km²^[24], 呈现“洪水一片, 枯水一线”的独特洪泛特征。根据实测水文气象资料统计发现, 湖区气象条件空间差异较小, 主要表现在季

节性变化，多年平均降雨量和蒸发量分别为 1 766 和 1 236 mm^[17]。整个湖区年风向变化主要以 NE 向为主，年内平均风速约为 3.03 m/s^[25]。此外，赣江流域入湖径流约占年入湖总量 62%、抚河流域约占 11%、信江流域约占 16%、饶河流域和修水流域分别约占 8%和 3%^[26]，体现出流域 5 河入流的空间变异性。

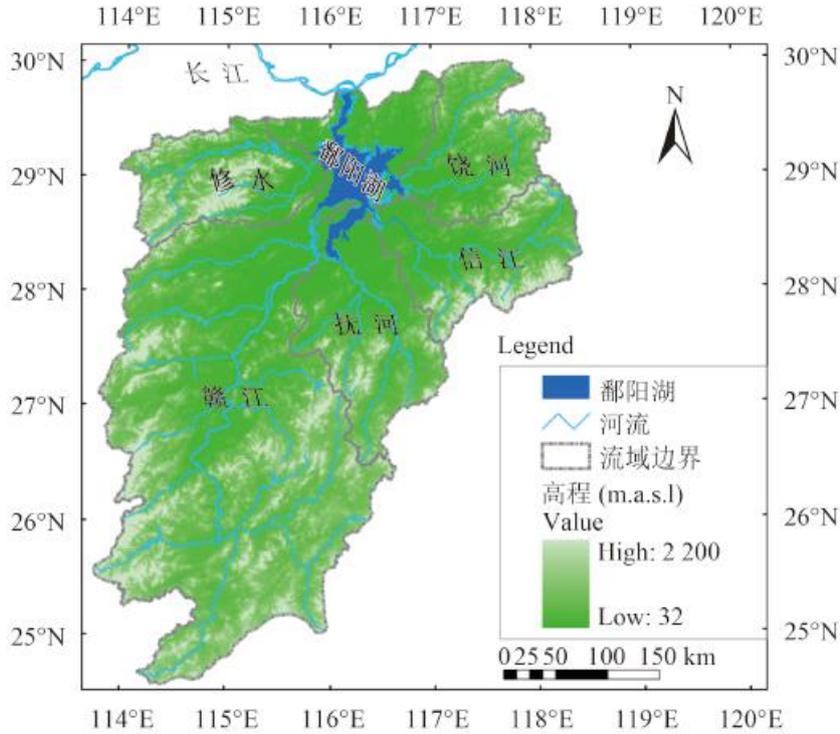


图 1 鄱阳湖周边水系分布示意图

Fig.1 Distribution of Inflow Rivers of the Poyang Lake

2 采样策略与测试分析

于 2015 年在鄱阳湖选择了两个典型水位期进行水体温度现场监测和氢氧同位素采样分析(图 2)，分别是枯水期(2 月 4 日)和洪水期(7 月 20 日)。因为鄱阳湖水面积具有显著的季节性变化，所以监测断面的长度在不同水位期发生明显变化，断面上采样点的水平位置也随之发生变化。选择星子和湖口作为鄱阳湖北部湖区的两个代表性监测断面，采用加拿大 Solinst 公司 Levellogger 传感器(精度±0.05 °C)进行断面上不同水平点位的水体剖面温度连续监测(监测频率 5 s)，同时获取相应的水深和温度实时传输数据。湖泊水体氢氧稳定同位素样品(2H 和 18O)采集主要在湖口、星子、都昌以及棠荫-康山断面上进行(图 2)，其中，湖口和星子断面的同位素样品在深度上采集间隔约 1~2 m，采集点位与温度监测点保持一致，都昌和棠荫-康山断面的水体同位素样品采集间隔约 4 m。所有水样在采集后立即装入 50 mL 细颈塑料螺丝盖水样瓶中，且保持采样瓶内无气泡，立即用 parafilm 膜密封，装满并冷藏保存，共计采集样品 152 个，用于 2H 和 18O 稳定同位素测试分析。为了提供鄱阳湖地区大气降水同位素的背景资料，在星子站周边湖区开展大气降水稳定氢氧同位素样品的收集，采集时间为 2014 年 3 月至 2015 年 3 月，共收集降水样品 57 个。为了探讨湖泊水体混合或分层与水环境因子深度变化特征之间的联系，作者于 2015 年 8 月份选择湖口、星子、都昌、棠荫和康山分别进行水体表层(0.2 m 水深)、中间层(视水深而定)和底层的水样采集与分析。

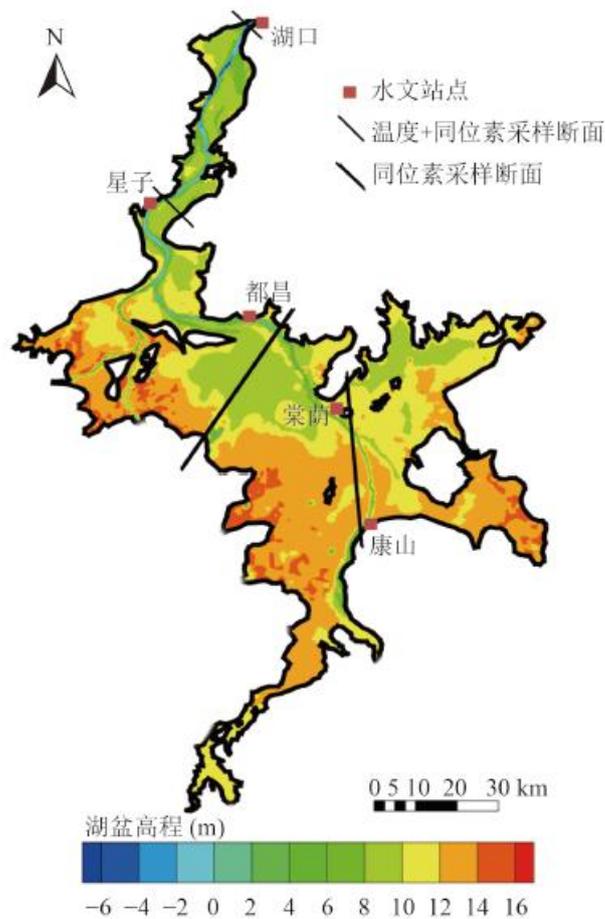


图 2 鄱阳湖水体温度和同位素采集断面示意图

Fig.2 Schematic Diagram of Sampling Profiles for Water Temperature and Isotope Within Poyang Lake

水样的氢氧稳定同位素在中国科学院农业水资源国家重点实验室稳定同位素分析实验室测定，采用基于波长扫描光腔衰荡光谱技术(WS-CRDS)的美国 Picarro L2120-i 液态水同位素分析仪， $\delta^{2}\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的分析精度分别为 $\pm 0.2\%$ 和 $\pm 0.07\%$ 。所有水样测定结果均用以 VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) 为标准的千分偏差表示。湖泊悬浮泥沙浓度在实验室采用常规的过滤称量法，测定泥沙含量，从而推求悬浮泥沙的浓度。总氮和总磷采用实验室离子色谱仪进行测试分析，可实现总氮和总磷的快速、精确和稳定检测。

3 结果分析

3.1 大气降水与湖水同位素组成

2014~2015 年的鄱阳湖区大气降水线 (LMWL) 斜率 (8.4%) 和截距 (14%) 均大于全球大气降水线的 8% 和 10%，表明了该地区湿润气候条件的影响作用 (图 3a)。图 3a 数据结果得出，鄱阳湖地区大气降水的 $\delta^{2}\text{H}$ 值变化范围为 -98.3% ~ 36.1% ， $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围 -13.2% ~ -3.4% 。 $\delta^{2}\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的最小值分别为 -60.4% (8 月) 和 -8.4% (7 月)，而最大值分别为 3.6% (12 月) 和 -0.9% (2 月)，即夏季月份的降雨氢氧同位素值 (6~9 月份) 要明显小于冬季等其它月份 (图 3b)。降水同位素的这种季节性变化与鄱阳湖地区降水量的变化格局基本相反，表明了 6~9 月份的集中降雨显著控制了 $\delta^{2}\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 水平，即所谓的同位素“降

水效应”。从图 3a 还可以发现，相对于降水同位素的分布，湖水同位素的分布要更加集中，湖水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值与当地大气降水的同位素值十分接近，且两者分布几乎在同一条直线上(LMWL)，表明了大气降水是湖水的最初始来源。

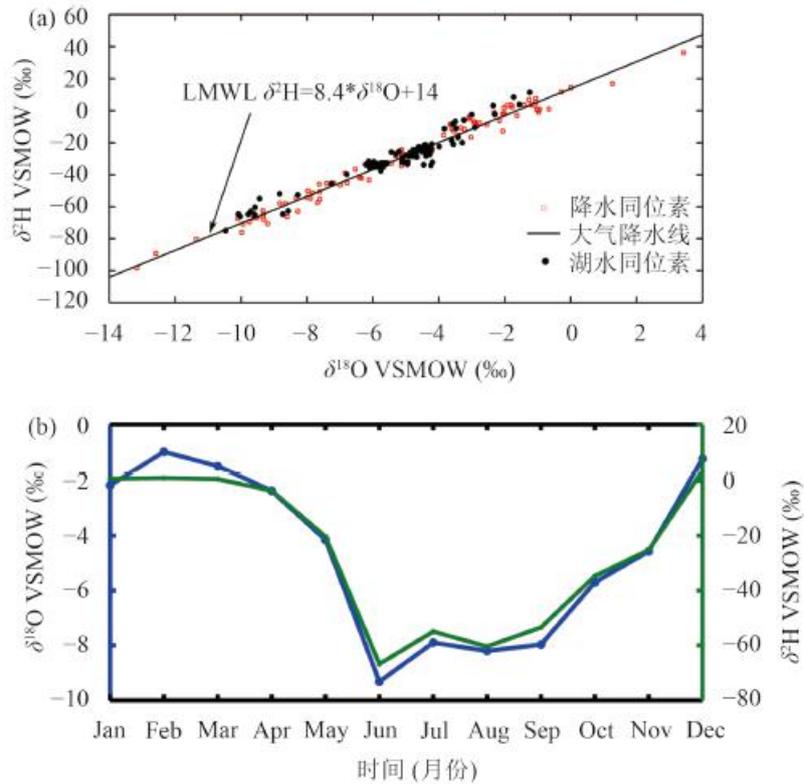


图 3 鄱阳湖大气降水氢氧同位素组成(a)及其季节变化特征(b)
 Fig.3 Hydrogen and Oxygen Compositions of Precipitation in Poyang Lake (a) and Their Seasonal Variations (b)

3.2 湖泊水体水温和氢氧同位素垂向分布特征

图 4 和图 5 分别代表枯水季节湖口和星子断面上不同采样点(以五角星表示,下同)的水温和氢氧同位素垂向变化与分布特征。因为鄱阳湖具有典型的主河道和浅水洪泛区,分别在湖口和星子断面选择了 4 个和 8 个水平方向上的采样点,采样点水深介于 1~12 m。受外界气候影响较大,湖口和星子断面部分采样点在表层 2 m 水深内存在明显的水体水温差异或波动,尤其是星子断面采样点,但湖口断面大部分采样点的水体水温垂向差异小于 0.5 °C(图 4),星子断面的水体水温差异约小于 1.0 °C(图 5)。此外,可见枯水期部分监测点湖泊水体水温呈“上低下高”的垂向分布格局,可能是因为湖泊表层水温由于昼夜气候条件变化影响降低地较为明显,而底层水温由于受白天太阳辐射升温影响却未能迅速降低,但总体上垂向温差较小。同位素分析结果发现, $\delta^2\text{H}$ 值的垂向分布呈现出较大的波动 -75.2‰~12.1‰,但 $\delta^{18}\text{O}$ 值垂向分布差异却相对较小,变化范围为 -10.4‰~-3.0‰(图 4、图 5),表明上下层水体具有几乎等同的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。总体来说,枯水期湖泊表层水和底层水的垂向温差基本小于 1.0 °C,绝大部分水域温差小于 0.5 °C,稳定同位素值的垂向分布可视为几乎均一,水温和同位素均表现出深度剖面上的较小差异,由此表明鄱阳湖枯水季节水体混合状况较好,没有明显的分层特征。

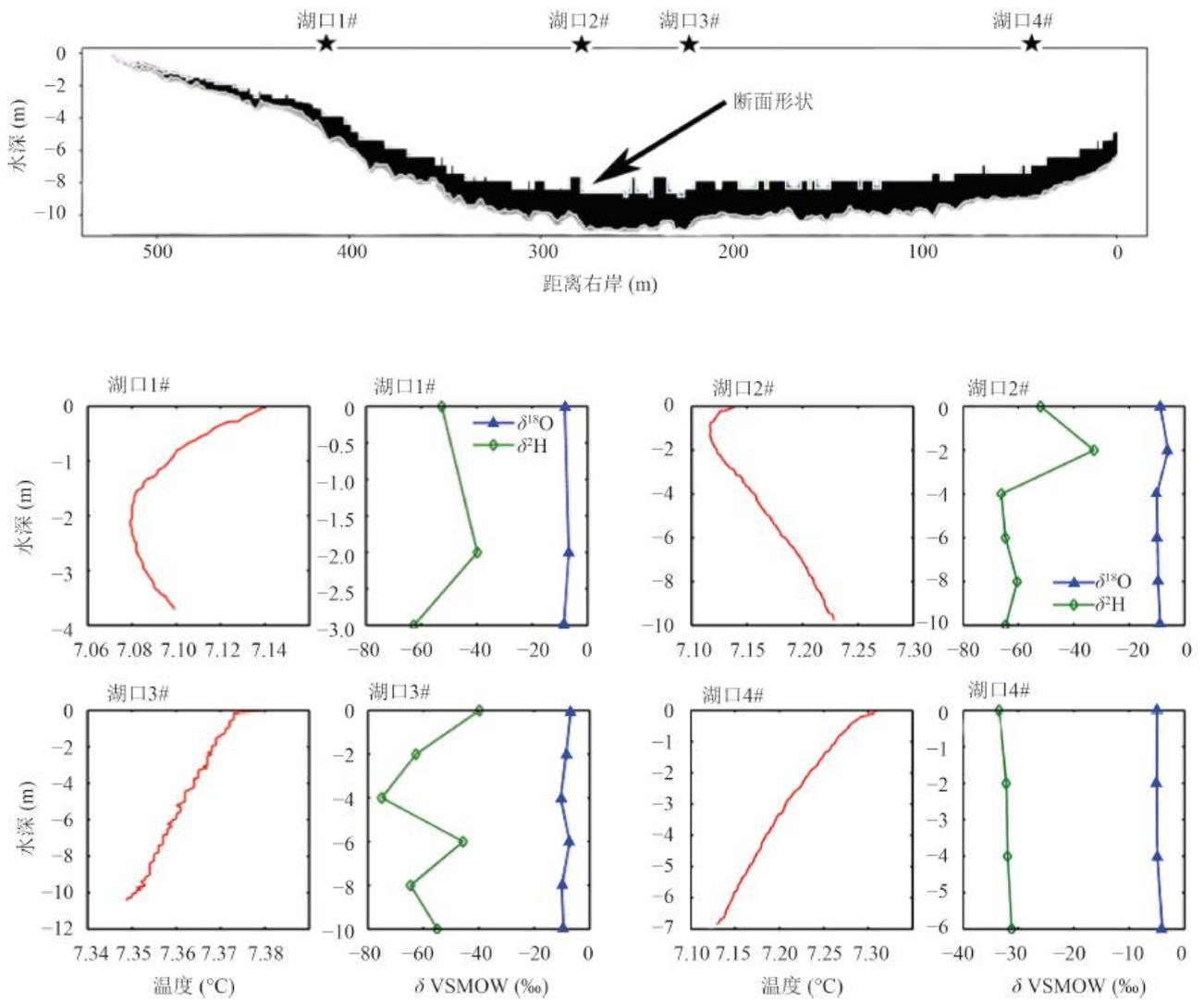
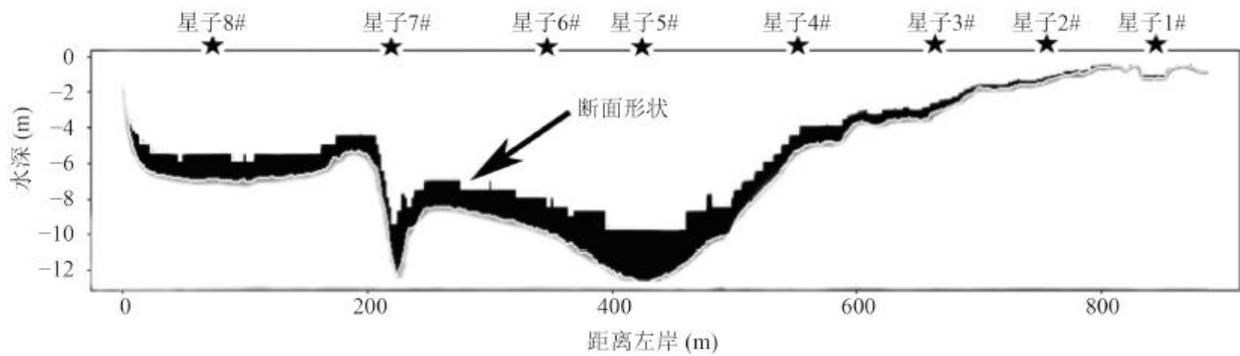


图4 枯水期湖口断面水温和氢氧同位素垂向分布

Fig.4 Vertical Distributions of Water Temperature and Isotopes at Hukou Cross-section During Dry Period



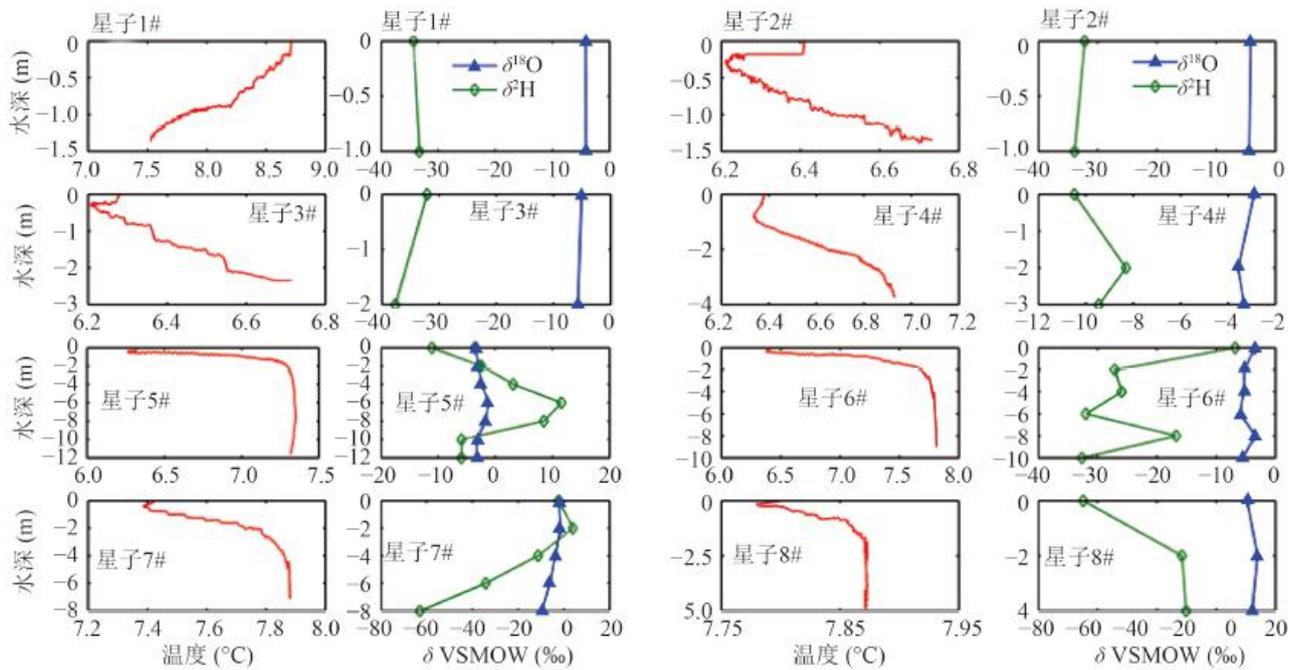
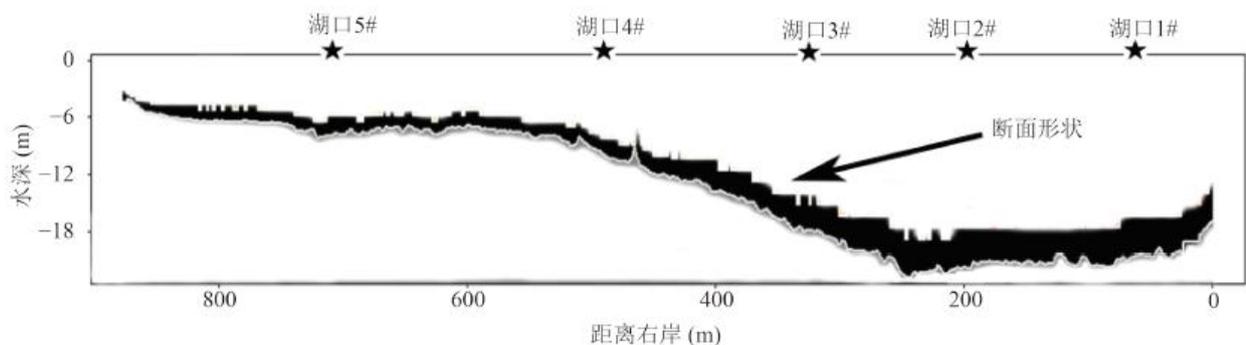


图 5 枯水期星子断面水温和氢氧同位素垂向分布

Fig.5 Vertical Distributions of Water Temperature and Isotopes at Xingzi Cross-section During Dry Period

图 6~9 呈现了鄱阳湖洪水季节湖口 (5 个采样点)、星子 (5 个采样点)、都昌 (6 个采样点) 以及棠荫-康山断面上 (4 个采样点) 不同采样点水温和氢氧同位素垂向变化与分布。洪水季节不同采样点的水深大致为 3~20 m。监测结果发现, 湖口和星子断面大部分采样点的水体水温垂向差异小于 1.0 °C (图 6、图 7), 偶见湖口和星子断面少部分采样点的水温差异达到 1.5 °C (例如, 湖口 1# 和星子 4#)。虽然监测到湖口和星子断面部分采样点 (湖口 1# 和星子 1#) 的水体水温呈正温层分布, 但绝大部分采样点却呈现出先前未预料到的逆温层 (图 6、图 7), 原因可能是由于本研究采样时间集中于上午, 湖区表层水体尚未受到太阳辐射的影响, 再加上昼夜气候波动的影响, 表层水温迅速降低, 底层水体在白天太阳辐射加热影响下仍然保持着相对较高的水温。不同断面的同位素分析结果发现, 所有深度的采样点 $\delta^{2}\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值垂向分布几乎均一 (图 6~图 9)。就平均值而言, $\delta^{2}\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 -36.88‰ 和 -5.8‰。尽管鄱阳湖洪水期水深较大以及流速较缓, 但概括而言, 不同湖泊水域表层水和底层水的温差大多小于 1.0 °C, 偶见部分水域会达到 1.5 °C 的较大垂向温差, 而氢氧稳定同位素在深度剖面上几乎等值, 表明鄱阳湖不同深度水体的混合状况依然较好, 未监测到明显的分层特征。



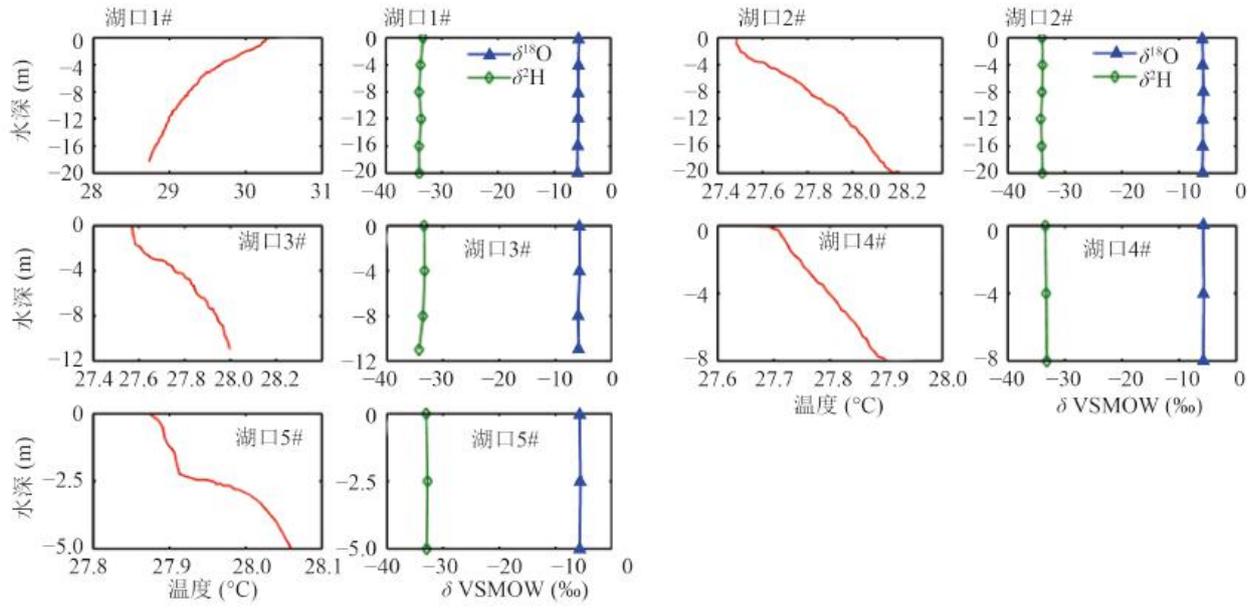
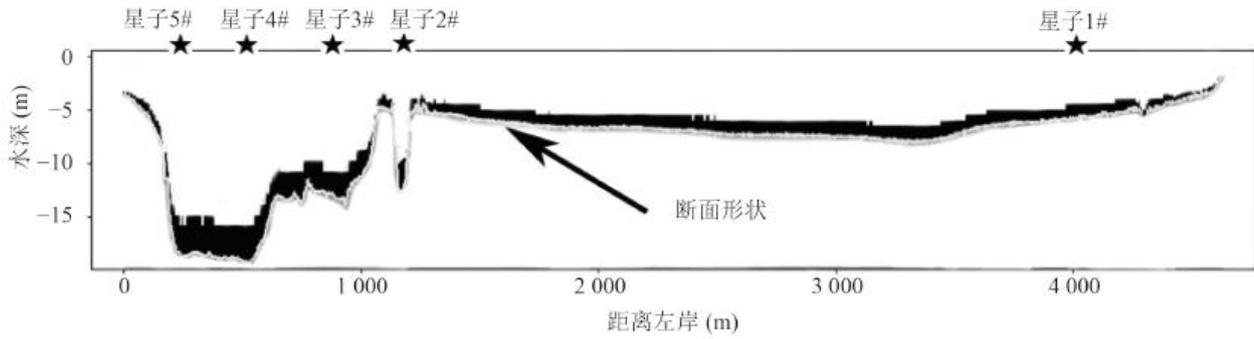


图6 洪水期湖口断面水温和氢氧同位素垂向分布

Fig.6 Vertical Distributions of Water Temperature and Isotopes at Hukou Cross-section During Flood Period



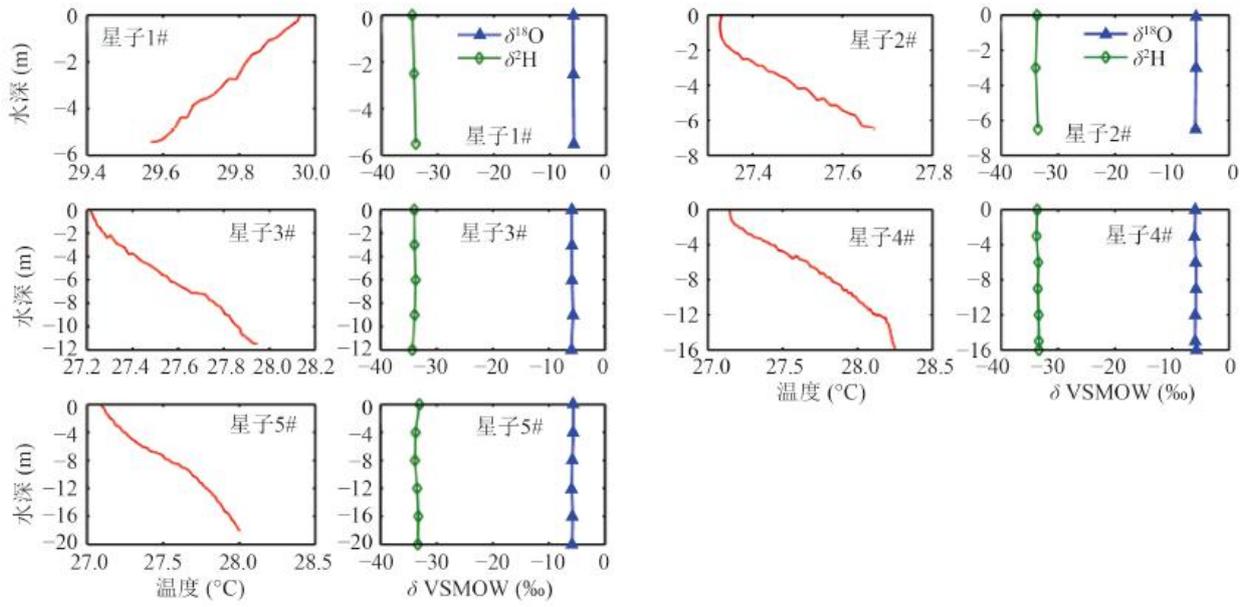
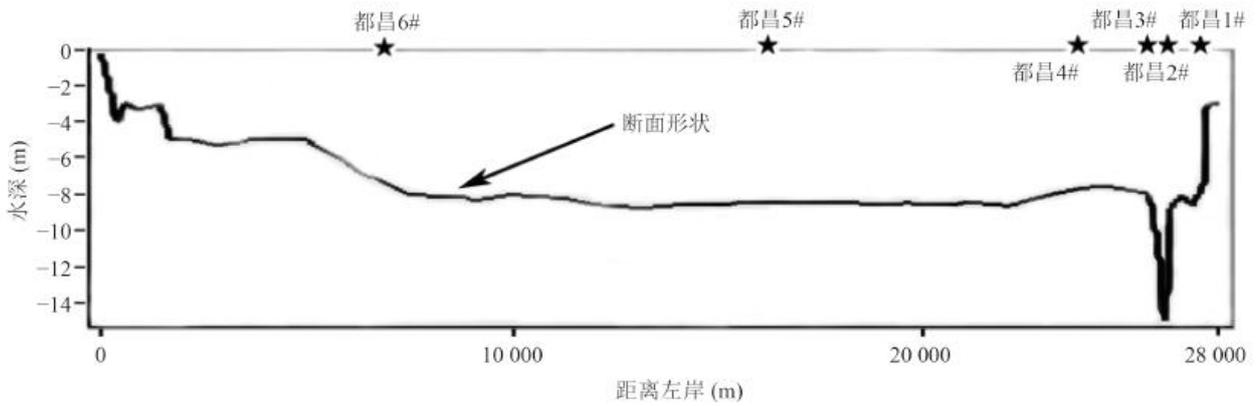


图 7 洪水期星子断面水温和氢氧同位素垂向分布

Fig.7 Vertical Distributions of Water Temperature and Isotopes at Xingzi Cross-section During Flood Period



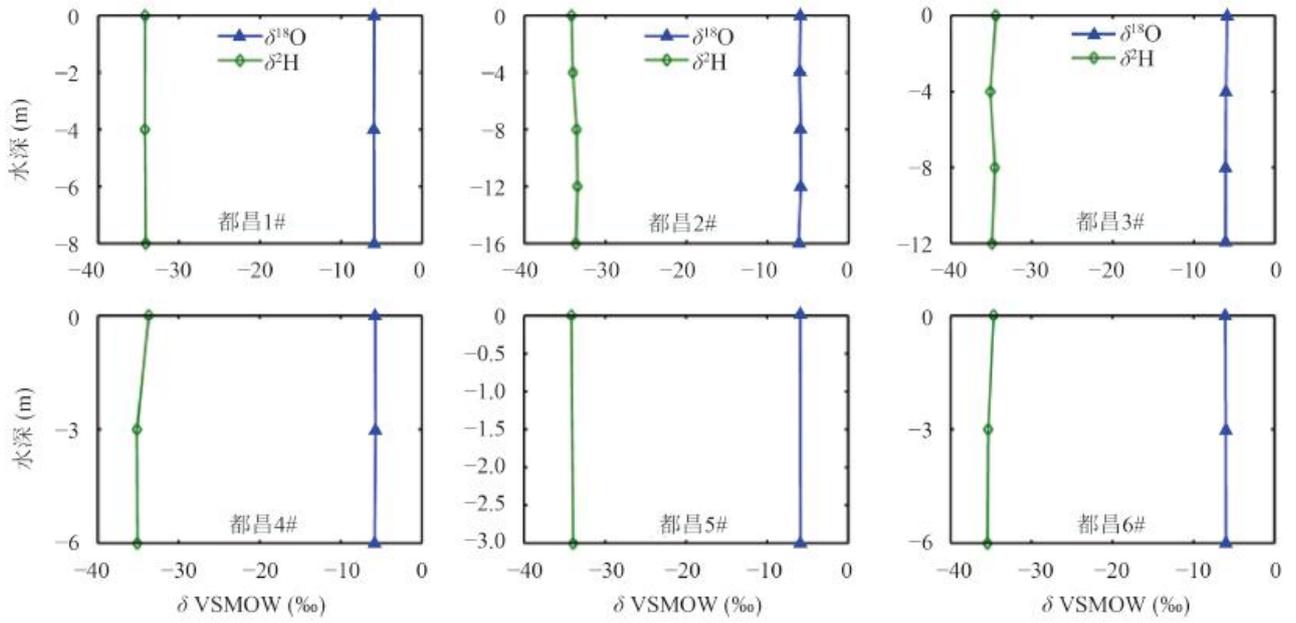


图 8 洪水期都昌断面氢氧同位素垂向分布

Fig.8 Vertical Distributions of Isotopes at Duchang Cross-section During Flood Period

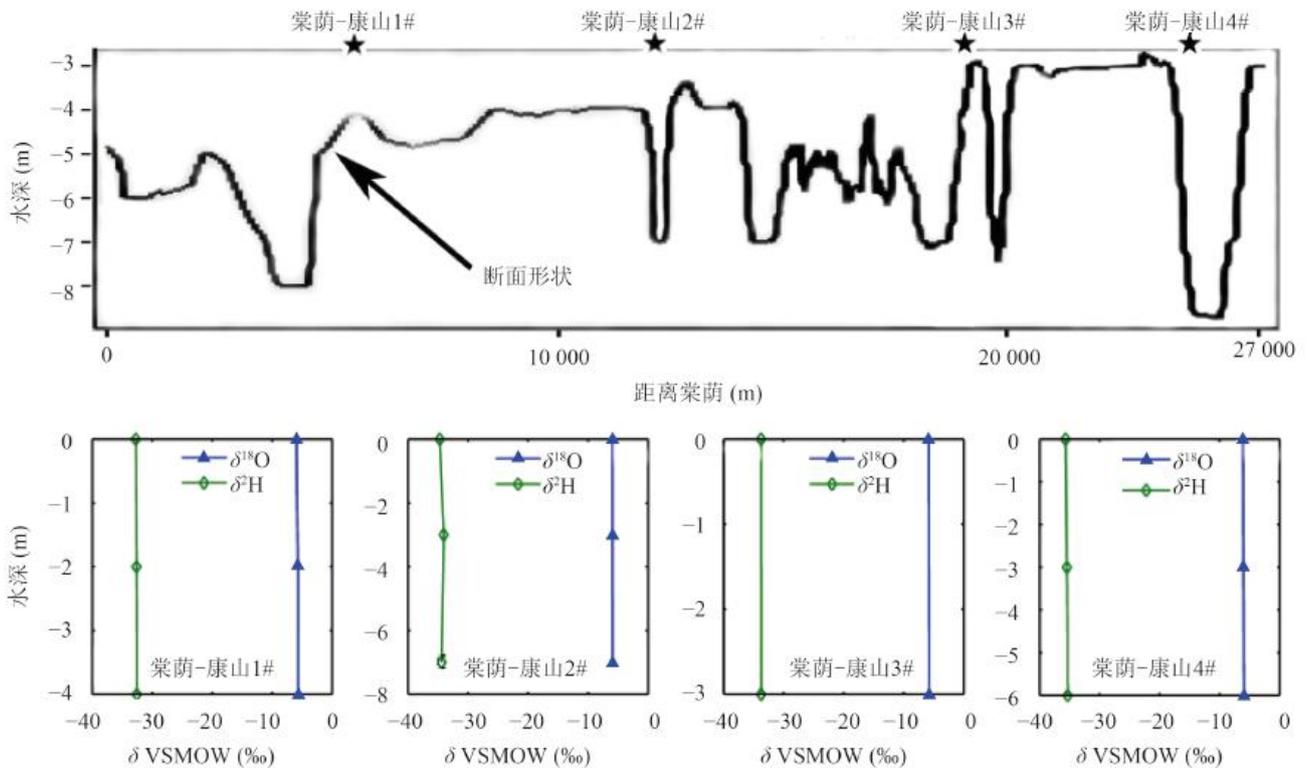


图 9 洪水期棠荫-康山断面氢氧同位素垂向分布

Fig.9 Vertical Distributions of Isotopes at Tangyin-Kangshan Cross-section During Flood Period

4 讨论与展望

4.1 湖泊水体分层影响因素

大多数自然淡水湖泊水体主要受湖泊入流、出流以及湖区气象条件等多因素影响^[5]。因此，鄱阳湖水体分层或混合与气温、降雨、风速以及湖泊出入流等密切相关。本研究发现鄱阳湖水体具有冬天温度较低与夏天温度较高的等温层，主要与湖区气温的季节性变化有关。在季节变化尺度上，监测结果显示鄱阳湖水体垂向混合程度较好，水体温差基本小于 1.0 °C，但同时存在逆温层，原因可归结为气象条件和水动力条件的共同作用所致^[27]。气温变化对一些深水湖泊和封闭性湖泊水体起着重要影响作用，但其通常对鄱阳湖这样一些地表水力联系频繁的浅水洪泛湖泊影响相对较小^[3]。本文采样主要选择在晴朗天气条件下进行，降雨对湖泊水体的混合作用可以不予考虑与分析。先前研究得出强风(约大于 4~6 m/s)能够加速浅层湖泊水体的混合^[28]，但本文采样期间鄱阳湖的平均风速基本小于 2.9 m/s(康山气象站资料)，加上夏季鄱阳湖的水深能够达到 20 m，风不足以导致整个垂向水体的混合，其不是影响鄱阳湖水体混合的主要因素。相关研究表明，风场变化对洪水期鄱阳湖东北部浅水低流速湖区的水文水动力产生明显影响^[25]，这就意味着风可能会对这些局部湖区的水体垂向混合带来一定的影响作用。大量研究已经得出，鄱阳湖排泄长江水量与流域 5 河入湖量基本相当，湖泊水文水动力条件主要受流域 5 河来水以及长江径流情势共同影响^[20]，这就导致了全湖整体上由南向北的水流格局以及垂向差异较小的流速分布^[29]，表明了湖泊入流与出流等地表水文条件对鄱阳湖水体混合起着主要影响作用。世界其它国家的淡水湖泊，受气象条件影响，水体具有明显分层或存在部分混合^[6~16]。相比而言，鄱阳湖水体在地表入流和出流等主导因素作用下，呈现出垂向混合良好的特征。虽然鄱阳湖与其它的一些洪泛湖泊具有相似的水力驱动特点，但相比于其它洪泛湖泊短暂出现的显著温度分层现象^[11, 12]，鄱阳湖的垂向完全混合似乎要更加稳定和持久。

4.2 湖泊水体分层与水环境因子的关系

湖泊水体的季节性分层或混合可能对所有水环境演化过程起着控制或者影响作用。因此，探讨鄱阳湖水体分层与重要水环境因子之间的联系至关重要。监测数据表明，在变化范围约 6~15 m 的深度剖面上，鄱阳湖重点湖区的悬浮泥沙、总氮和总磷的垂向浓度变化相对较小，分别小于 10、0.4 和 0.05 mg/L(图 10)，其与水体水温、氢氧同位素垂向分布特征的一致性很大程度上表明了湖泊水体混合可能对水环境因子的重要影响。未来研究工作需要连续监测鄱阳湖水体的垂向混合状况以及关键水环境因子的动态变化，尤其是在一些换水周期较慢且水质条件较差的东北部湖湾区^[30]。此外，拟建鄱阳湖水利枢纽过程无疑将改变鄱阳湖原本的水文水动力条件，增加不同湖区水体的换水周期^[31]，未来工作重点可依托本研究的野外监测数据构建考虑水利枢纽过程影响的三维水动力模型，基于小时尺度或者日尺度的精细模拟研究来阐明鄱阳湖水体的混合状况及其与水环境因子之间的作用机制。

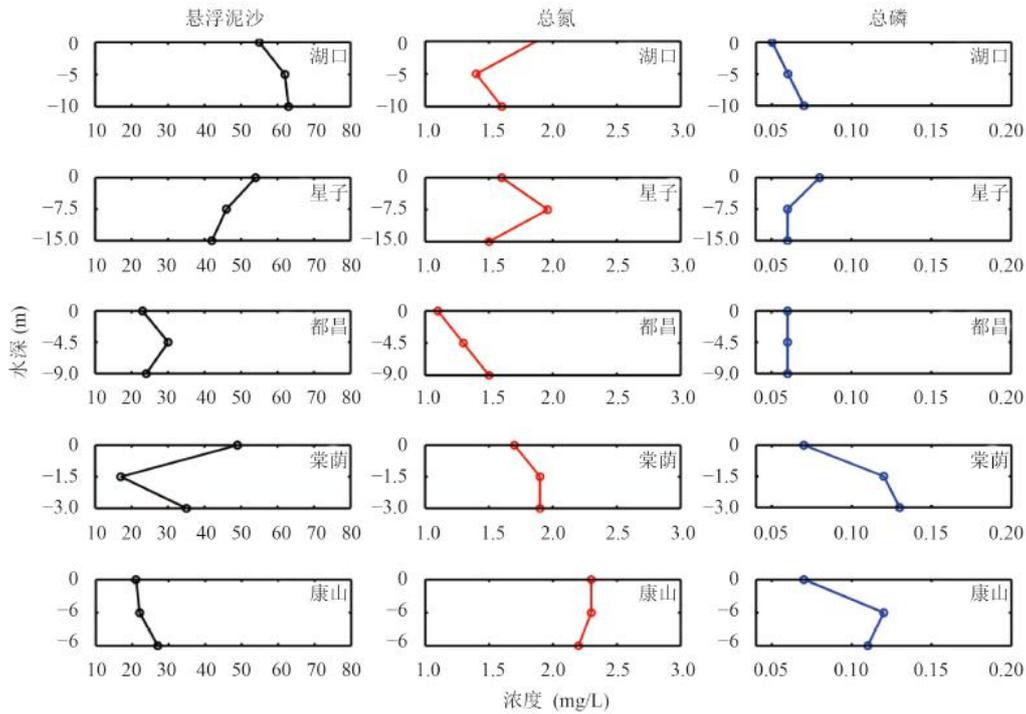


图 10 洪水期鄱阳湖主要水文站点的悬浮泥沙、总氮和总磷垂向分布监测结果(2015年8月3~6日)

Fig.10 Vertical Distributions of Measured Suspended Sediment, TN and TP at Major Hydrological Gauging Stations of Poyang Lake During Period from August 3rd, 2015 to August 6th, 2015

5 结论

本文以鄱阳湖水体为研究对象，针对洪泛湖泊水位季节性变化显著等特点，基于剖面温度和稳定氢氧同位素的调查分析来开展典型时期鄱阳湖水体垂向分层状况及影响因素研究，以此探求多因素影响下鄱阳湖水体的分层或混合状况，为湖区水体污染物的输移模拟与作用机制阐释等方面提供数据支撑与科学参考。本研究主要得出以下几点结论：

(1) 鄱阳湖枯水期水体垂向温差大多处于 0~1.0 °C，绝大部分水域温差小于 0.5 °C；洪水期不同湖区水体垂向温差基本小于 1.0 °C，偶见部分水域会达到 1.5 °C 的较大温差。结果表明，季节变化尺度上鄱阳湖具有上下层水体之间较为稳定的等温层，没有明显的温度分层特征。

(2) 同位素测试分析结果发现，尽管枯水期和洪水期的氢氧稳定同位素值存在剖面深度上的波动，但 $\delta^{2}\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值基本上呈均一分布。结果表明，鄱阳湖水体垂向混合程度较好或完全混合，未监测到明显的水体分层现象。

(3) 影响湖泊水体分层或混合的因素主要为湖区外部气象条件和水文条件，而鄱阳湖强大的入流和出流等水文驱动因子是影响鄱阳湖水体混合的主要因素，同时水体混合状况对湖泊水环境因子的垂向分布特征可能起着重要的影响或控制作用，应引起足够重视。

致谢：感谢江西师范大学张俐老师提供鄱阳湖水环境因子监测数据。

参考文献：

-
- [1] READ J S, WINSLOW L A, HANSEN G J A, et al. Simulating 2368 temperate lakes reveals weak coherence in stratification phenology[J]. *Ecological Modelling*, 2014, 291: 142 - 150.
- [2] BOUFFARD D, BOEGMAN L, ACKERMAN J D, et al. Near-inertial wave driven dissolved oxygen transfer through the thermocline of a large lake[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, 40(2): 300 - 307.
- [3] BERTONE E, STEWART R A, ZHANG H, et al. Analysis of the mixing processes in the subtropical Advancetown Lake, Australia[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 522: 67 - 79.
- [4] READ J S, HAMILTON D P, JONES I D, et al. Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26(11):1325 - 1336.
- [5] MARTIN J L, MCCUTCHEON S C. *Hydrodynamics and transport for water quality modeling*[M]. Boca Raton: CRC Press, 1998: 355 - 420.
- [6] ELÇI Ş. Effects of thermal stratification and mixing on reservoir water quality[J]. *Limnology*, 2008, 9(2): 135 - 142.
- [7] CHOWDHURY M R, WELLS M G, COSSU R. Observations and environmental implications of variability in the vertical turbulent mixing in Lake Simcoe[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2015, 41(4): 995 - 1009.
- [8] HALDER J, DECROUY L, VENNEMANN T W. Mixing of Rhône River water in Lake Geneva (Switzerland-France) inferred from stable hydrogen and oxygen isotope profiles[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 477: 152 - 164.
- [9] TUAN N V, HAMAGAMI K, MORI K, et al. Mixing by windinduced flow and thermal convection in a small, shallow and stratified lake[J]. *Paddy and Water Environment*, 2009, 7(2): 83 - 93.
- [10] HERB W R, STEFAN H G. Dynamics of vertical mixing in a shallow lake with submersed macrophytes[J]. *Water Resources Research*, 2005, 41(2): W02023.
- [11] TOWNSEND S A. Hydraulic phases, persistent stratification, and phytoplankton in a tropical floodplain lake (Mary River, Northern Australia) [J]. *Hydrobiologia*, 2006, 556(1): 163 - 179.
- [12] ENGLE D, MELACK J M. Methane emissions from an Amazon floodplain lake: Enhanced release during episodic mixing and during falling water[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 51(1): 71 - 90.
- [13] FORD P W, BOON P I, LEE K. Methane and oxygen dynamics in a shallow floodplain lake: the significance of periodic stratification[J]. *Hydrobiologia*, 2002, 485(1): 97 - 110.
- [14] 赵林林, 朱广伟, 陈元芳, 等. 太湖水体水温垂向分层特征及其影响因素[J]. *水科学进展*, 2011, 22(6): 844 - 850.
- 【ZHAO L L, ZHU G W, CHEN Y F, et al. Thermal stratification and its influence factors in a large-sized and shallow Lake Taihu[J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(6): 844 - 850.】

-
- [15] 董春颖, 虞左明, 吴志旭, 等. 千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2574 - 2581.
- 【DONG C Y, YU Z M, WU Z Y, et al. Study on seasonal characteristics of thermal stratification in Lacustrine zone of Lake Qiandao[J]. Environmental Science, 2013, 34(7): 2574 - 2581.】
- [16] 赵巧华, 孙绩华. 夏秋两季洱海、太湖表层混合层的深度变化特征及其机理分析[J]. 物理学报, 2013, 62(3): 039203.
- 【ZHAO Q H, SUN J H. The variation features of the surface mixed layer depth in Erhai Lake and Taihu Lake in spring and autumn and their mechanism analyses[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(3):039203.】
- [17] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [18] LI X, ZHANG L, YANG G, et al. Impacts of human activities and climate change on the water environment of Lake Poyang Basin, China[J]. Geoenvironmental Disasters, 2015, 2(1): 22.
- [19] SHANKMAN D, KEIM B D, SONG J. Flood frequency in China's Poyang Lake region: trends and teleconnections[J]. International Journal of Climatology, 2006, 26(9): 1255 - 1266.
- [20] HU Q, FENG S, GUO H, et al. Interactions of the Yangtze River flow and hydrologic processes of the Poyang Lake, China[J]. Journal of Hydrology, 2007, 347(1/2): 90 - 100.
- [21] LAI X J, JIANG J H, LIANG Q H, et al. Large-scale hydrodynamic modeling of the middle Yangtze River Basin with complex river-lake interactions[J]. Journal of Hydrology, 2013, 492: 228 - 243.
- [22] LI Y L, ZHANG Q, YAO J, et al. Hydrodynamic and hydrological modeling of the Poyang Lake catchment system in China[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19(3): 607 - 616.
- [23] WANG P, LAI G Y, LI L. Predicting the hydrological impacts of the Poyang Lake project using an EFDC model[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2015, 20(12), doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001240.
- [24] FENG L, HU C M, CHEN X L, et al. Assessment of inundation changes of Poyang Lake using MODIS observations between 2000 and 2010[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 121: 80 - 92.
- [25] 姚 静, 张 奇, 李云良, 等. 定常风对鄱阳湖水动力的影响[J]. 湖泊科学, 2016, 28(1): 225 - 236.
- 【YAO J, ZHANG Q, LI Y L, et al. The influence of uniform winds on hydrodynamics of Lake Poyang[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(1): 225 - 236.】
- [26] LI Y L, ZHANG Q, WERNER A D, et al. Investigating a complex lake-catchment-river system using artificial neural networks: Poyang Lake (China) [J]. Hydrology Research, 2015, 12(22): 912 - 928.
- [27] SÁNCHEZ-ESPAÑA J, ERCILLA M D, CERDÁN F P, et al. Hydrological investigation of a multi-stratified pit lake

using radioactive and stable isotopes combined with hydrometric monitoring[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 511: 494 - 508.

[28] SHINADA A, OMORI H, TADA M, et al. Effect of wind on behavior of hypoxic water in Lake Notoro[J]. *Scientific Reports of Hokkaido Fisheries Experimental Station*, 2009, 75: 1 - 5.

[29] LI Y L, ZHANG Q, WERNER A D, et al. The influence of river-to-lake backflow on the hydrodynamics of a large floodplain lake system (Poyang Lake, China)[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(1):117 - 132, doi: 10.1002/hyp.10979.

[30] LI Y L, ZHANG Q, YAO J. Investigation of residence and travel times in a large floodplain lake with complex lake-river interactions: Poyang Lake (China)[J]. *Water*, 2015, 7(5): 1991 - 2012.

[31] LIU X, QIAN K M, CHEN Y W. Effects of water level fluctuations on phytoplankton in a Changjiang River floodplain lake (Poyang Lake): Implications for dam operations[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2015, 41(3): 770 - 779.