Yale 耶鲁大学-南京信息工程大学大气环境中心
Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment

太湖水温的热力层结和垂直混合变化特征研究

杨亦辰

2017年5月11日

研究意义及目的

- 湖泊的温度状况，是引起湖水中各种理化过程和动力现象的主要因素，其作为湖泊生物界最重要的环境条件，对湖泊生物的生产量有重要影响。在对湖泊温度的众多研究中，湖泊水体热力分层现象引起了广泛关注。
- 湖水热力层结处于稳定状态时，将限制溶解性气体的垂直输送，影响水体生物的养分供给（Nurnberg, G.K.:1984等），并且将浮游生物（如蓝藻）困在表层阳光充足的富营养区域内，增加了水质问题爆发的风险（JC Patterson et al. 1984等）。同时，湖体温度层结影响着底泥中化学元素的释放和累积（Courtney D.Giles, 2016）。此外，湖泊水体温度的变化决定了湖泊对大气强迫的响应（Oswald et al., 2004），并改变湖体上方的风场和热通量交换（Liu et al., 2014），从而影响局地天气和气候的变化，研究其变化规律是改善数值天气预报的重要手段（Heo and Ha, 2010）。

研究意义及目的

- 湖泊的地理位置和深度直接决定了湖体温度分布的格局。对于大部分地处温带的深水湖来说，较大的储热量有利于维持湖体稳定度。因此尽管有风力扰动、生物扰动和盐度等因素的影响，深水湖热力层结主要对太阳辐射季节变化做响应，体现为双季节对流混合型（dimictic）/暖单次混合型(warm monomictic）；而浅水湖由于储热较小，难以维持长时间的热力层结，在日变化的基础上，热力层结还受气象条件、湖表热通量、藻华堆积，沉水植物高度等因子的影响，具有独特性。
- 太湖是中国第三大浅水湖，位于“长江三角洲”地区城市群之中，人口密集，城市化水平高。太湖不仅是重要的水资源和粮食的供给来源，还对周遭的气候环境有着关键的调节作用。湖泊面积为2338km2，平均水深1.9m，西北水域较深，约为2.5m，东部水域较浅，小于1.5m（Qin et al. 2007）。

研究意义及目的

- 本文基于为期一年的太湖湖水温度的观测资料开展研究，拟探讨以下科学问题：
- 1.太湖水温的垂向分布在不同季节有怎样的变化特征？它对不同的天气过程响应如何？
- 2.太湖混合层厚度如何量化，其变化主要受哪些因子的控制？太湖水体的热力层结对这些主导因子在不同情况下会有怎样的响应？
- 3.太湖是一个浅水湖，它的热力层结转化存在怎样的机制？

研究内容

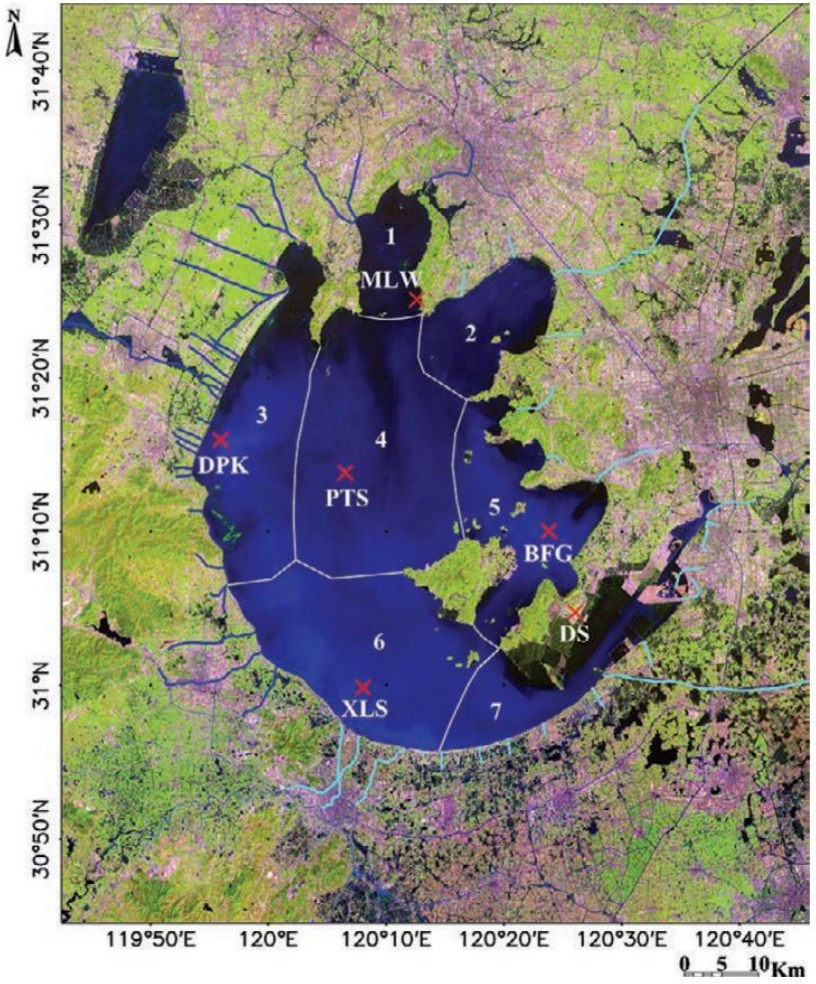
- 根据以上研究问题，本文研究了太湖热力层结在一整年中的变化特征以及季节差异，根据热力层结对天气特征的响应，归纳主要影响因子。然后，选择合适的判据来量化混合层深度，并研究这些因子对热力层结的影响规律，获得代表性的结果。最后本文着眼于热力层结发展和消退的具体过程，寻找太湖中热力层结转化的特点，作出统计结果。

研究方法

➢ 资料来源

Data Source

Site	PTS
Location	31.2323°N/ 120.1086°E (center part)
Period	2015:Jan,April,July, October
Mean Depth	2.8



研究方法

混合层深度（MLD）判据的选择

意义

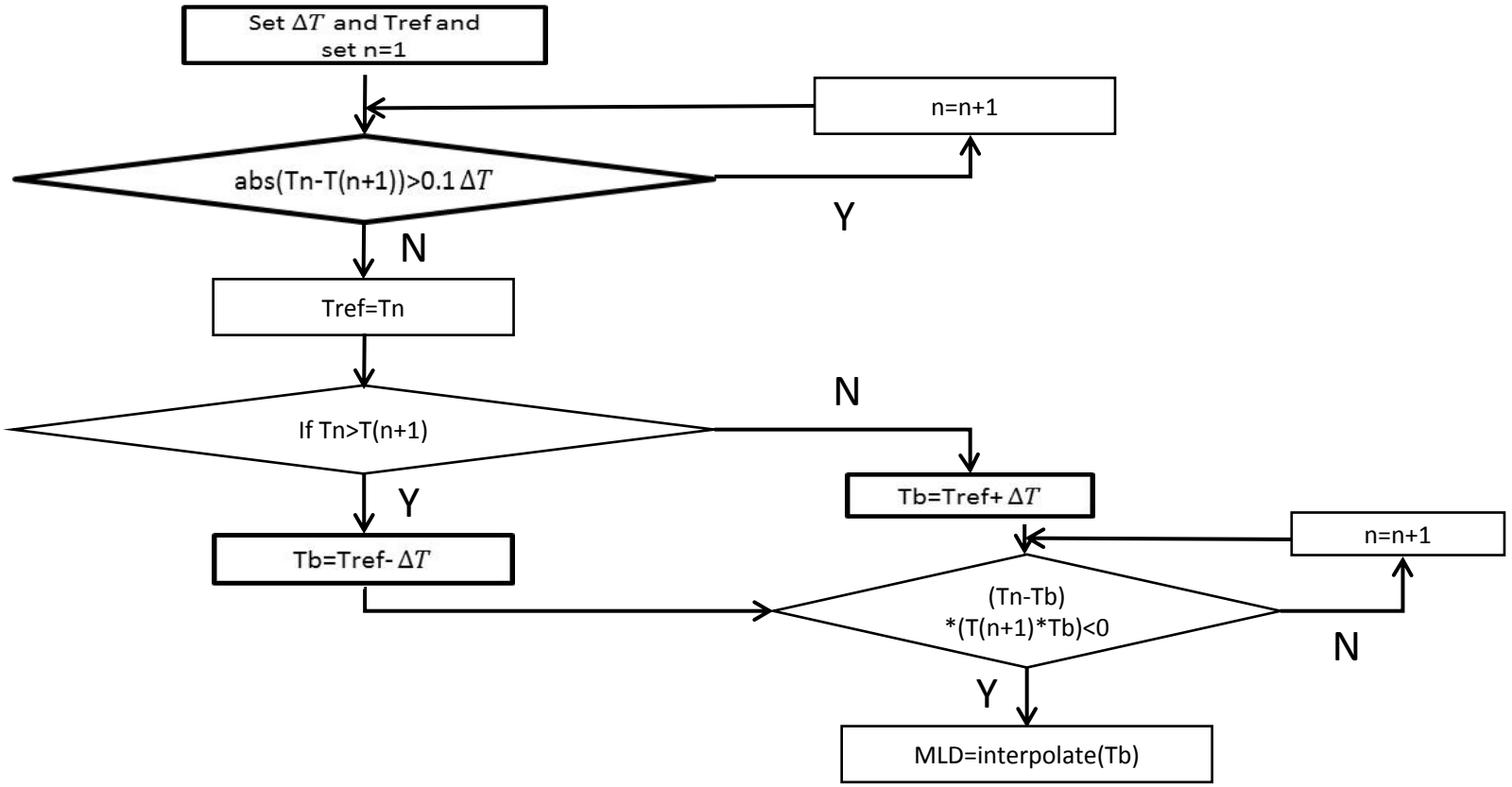
混合层深度的确定对量化研究湖体层结变化问题至关重要。混合层是对“等温层”或“密度常值层”的一个大体表述（Peter C.：2011），该混合层的特点是湍流作用显著，温度、密度以及水平流场在垂直方向上基本均匀分布（Kara A B：2000）。合理地确定混合层深度是一项极具意义的工作，它可以支撑湖泊陆面过程参数化方案中水体“对流混合”机理的引入和发展（Sun, 2007），同时通过观测数据来校准模式中混合层深度预测的表现。

方法分类	判据	特点
主观方法	人为ΔT $(\Delta\rho)/\frac{\partial T}{\partial z}$ $(\frac{\partial \rho}{\partial z})$	简单高效，主观性强，少有最佳方案
客观方法	最大$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}(\frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2})$	客观，廓线垂直精度要高，不适应噪声数据

可见，在太湖观测系统中，温度判据和密度判据一致，且主观方法更合适。

- 太湖MLD判据选择
  - Kara的“最佳”标准

逐层寻找确定混合区域，适合海洋中的各种层结变化。



- 传统的主观差值标准

MLD为温度低于表面（此处为0.2m深度处）ΔT 的深度。

- 比较选择

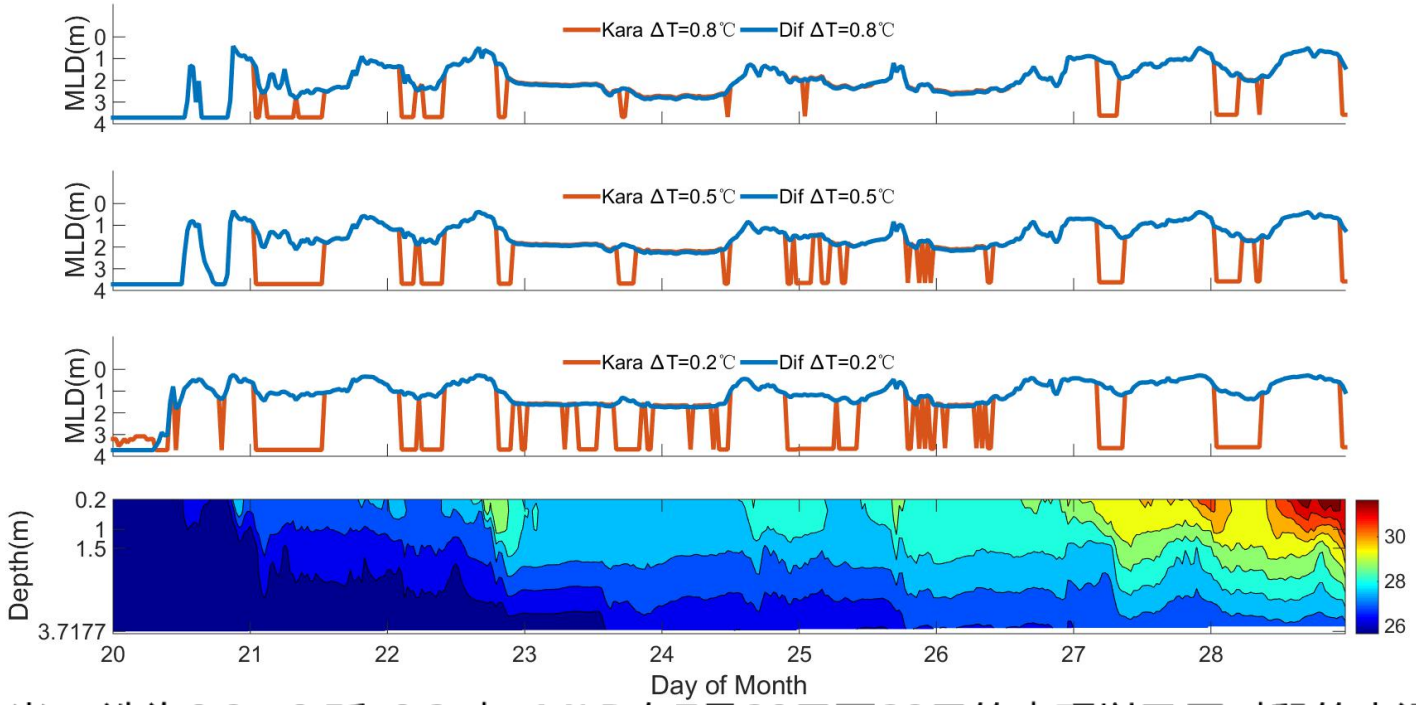


图1、当ΔT选为0.8、0.5和0.2时，MLD在7月20日至28日的表现以及同时段的水温变化。

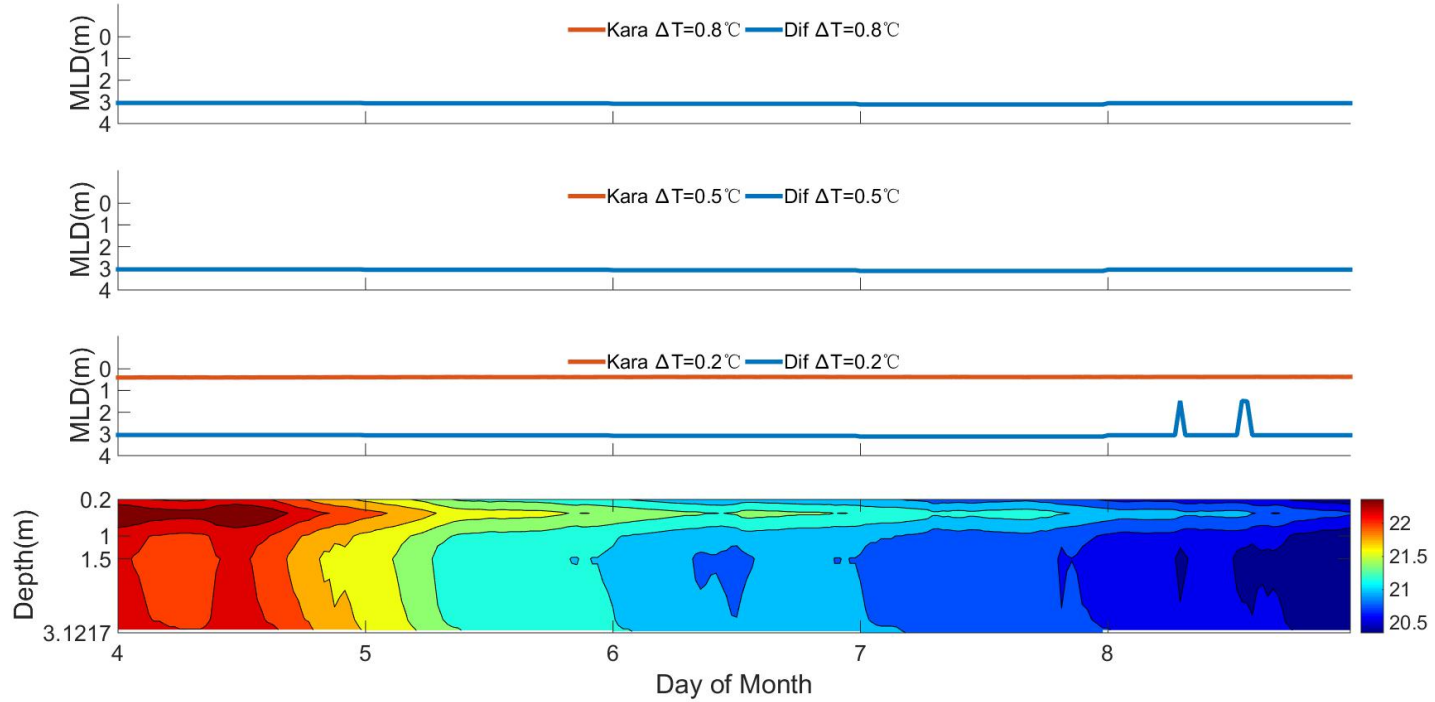


图2、当ΔT选为0.8、0.5和0.2时，MLD在10月4日至8日的表现以及同时段的水温变化。

以上两种误判发生的原因是相同的。Kara的“最佳标准”在算法上是一个分段函数，它能够很好地应对海洋中出现的逆温层结，此时T_b将大于T_{ref}。但当它被应用于太湖中温差较小、深度较浅的逆温时，会出现这两种极端情况。传统的差值标准更加合适。

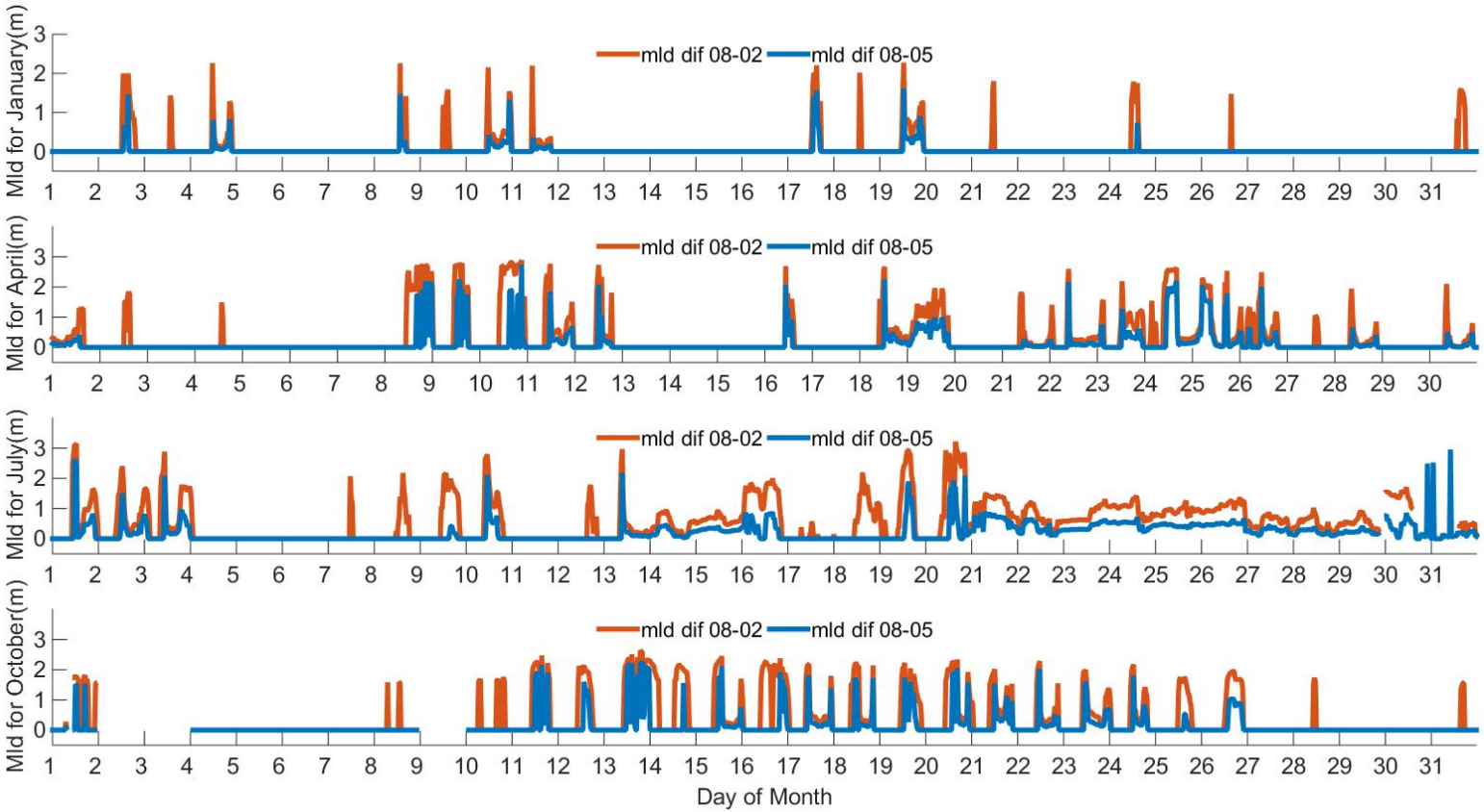


图3、选取差值标准时，ΔT=0.8℃和ΔT=0.5℃时的MLD值分别减去ΔT=0.2℃的MLD值在四季的表现。

由于不同ΔT值可以带来不同的MLD值，为了客观研究热力层结变化的规律，应该确定一个最合适的ΔT值。在差值标准中，当ΔT取值越小，MLD值越大（见图、3）。其中，当ΔT=0.2时，其判断结果会经常出先ΔT=0.5℃和ΔT=0.8℃时没有的热力层结。

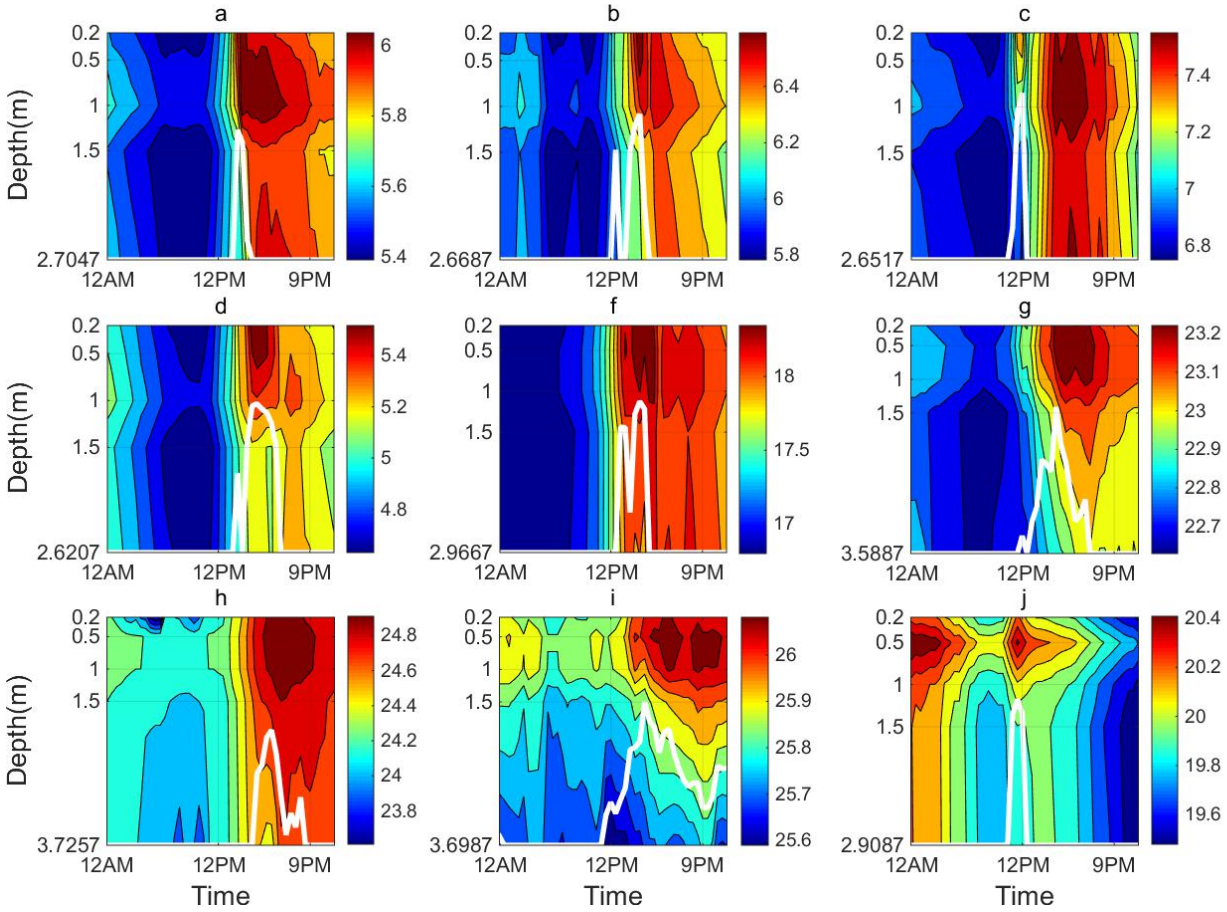
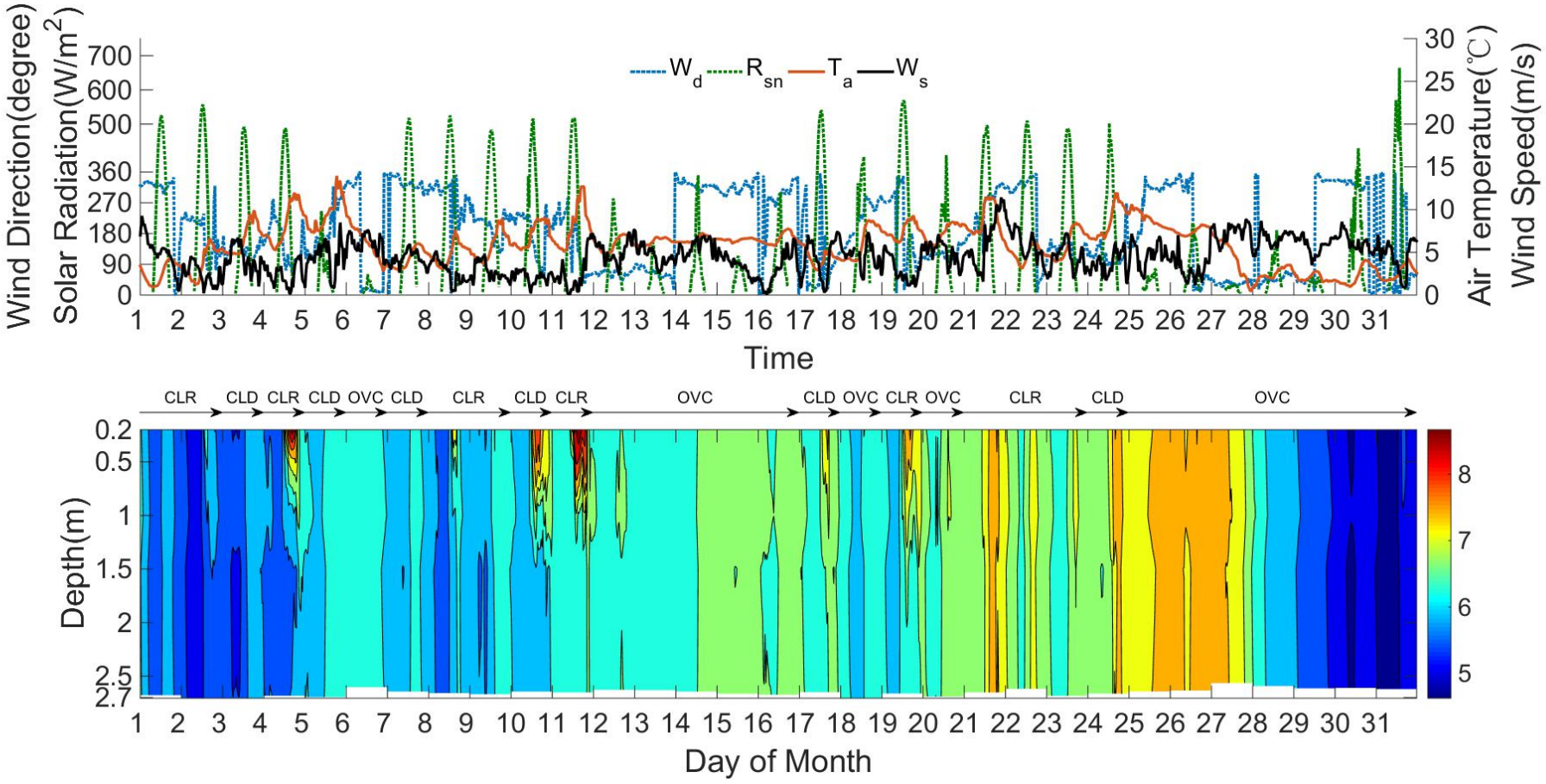


图4、选取满足条件“ΔT=0.8℃和ΔT=0.5℃时水体判断为完全混合但ΔT=0.2℃时存在热力层结”的部分个例，包括a: 1月3日、b: 1月9日、c: 1月21日、d: 1月31日、e: 4月2日、f: 7月8日、g: 7月12日、h: 7月18日和i: 10月28日的水温变化和MLD变化。白线代表该时刻的MLD值（ΔT=0.2℃）。

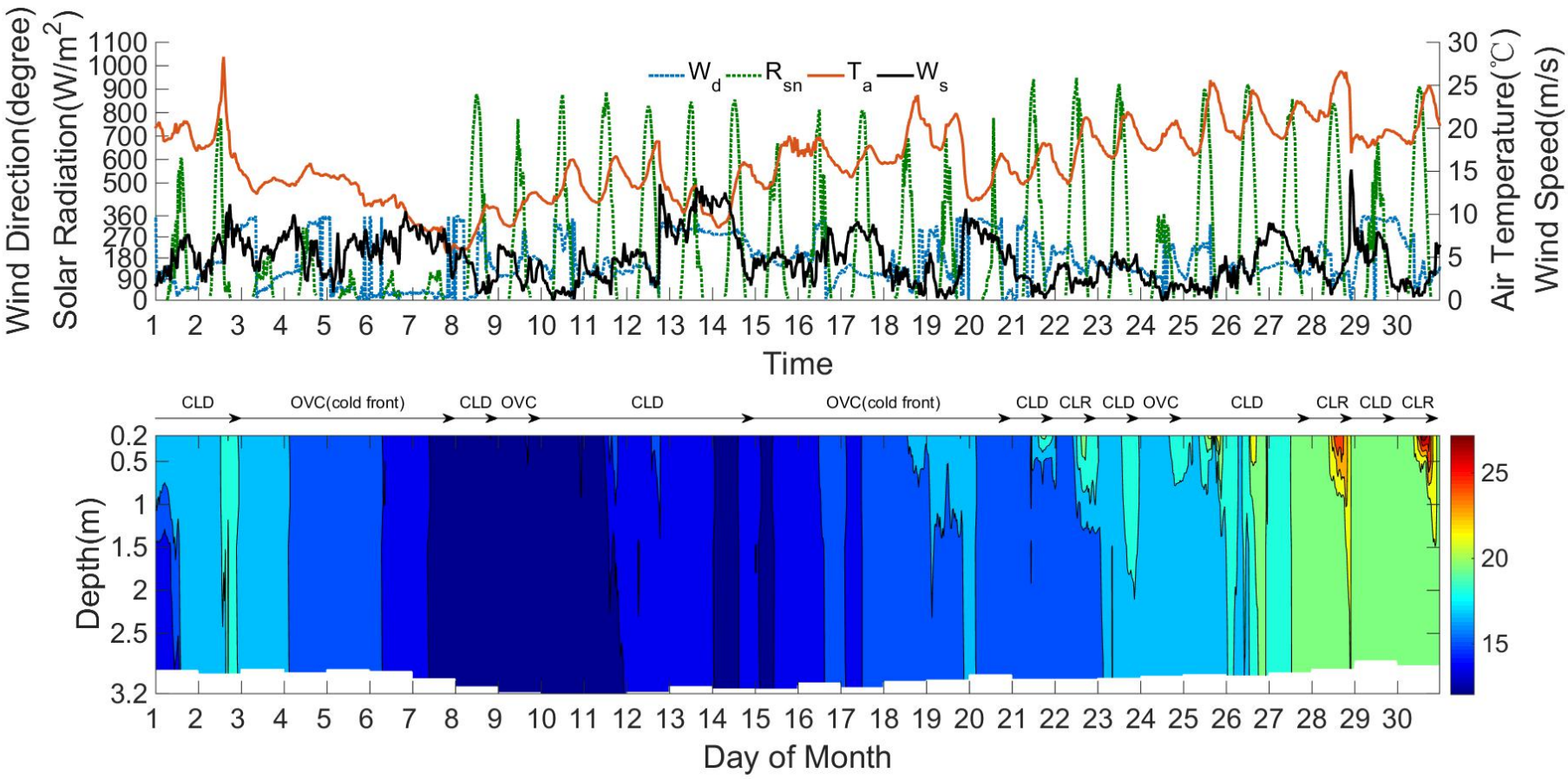
由于可以更好地区分弱热力层结和混合状态，以及更好地研究MLD变化规律，选择差值标准（ ΔT=0.2℃ ）。

研究结果

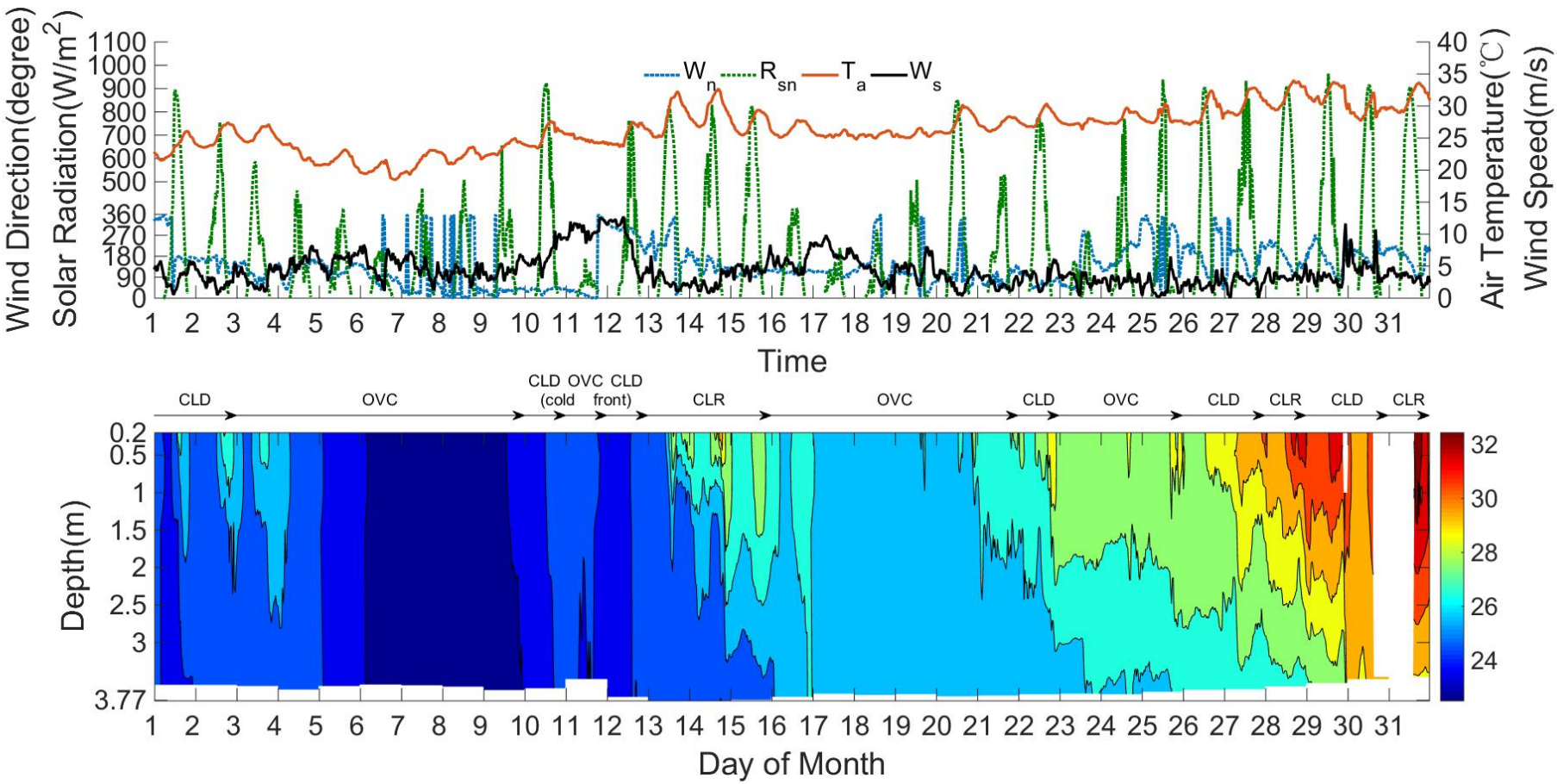
➢ 1、太湖热力层结季节特征



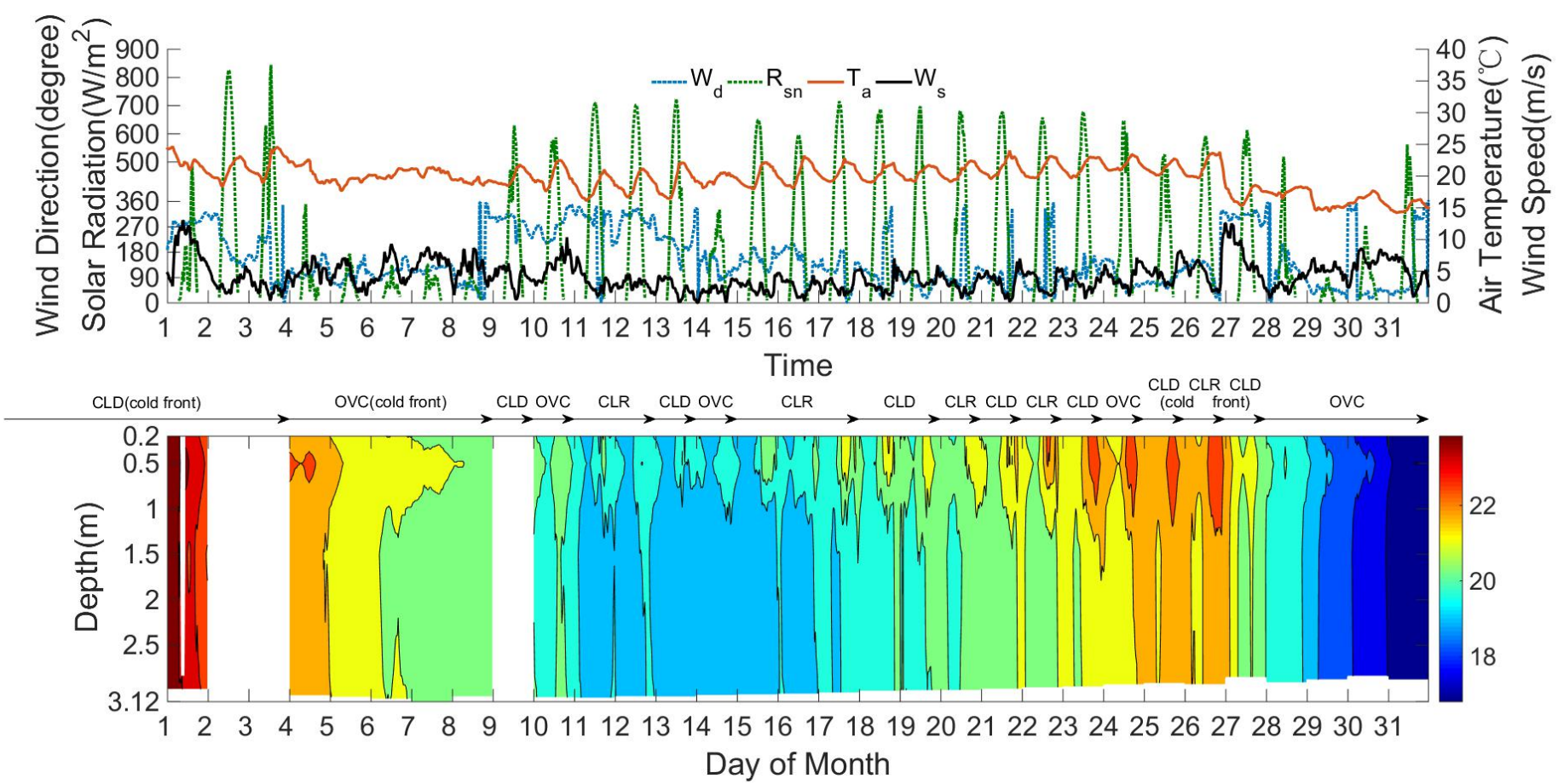
a


Wind Direction(degree)
Solar Radiation(W/m2)
Air Temperature(℃)
Wind Speed(m/s)
Wd
Rsn
Ta
Ws
Time
CLD
OVC(cold front)
CLD OVC
CLD
OVC(cold front)
CLD CLR CLD OVC
CLD
CLR CLD CLR
Depth(m)
Day of Month

b


Wind Direction(degree)
Solar Radiation(W/m2)
Air Temperature(℃)
Wind Speed(m/s)
Wn
Rsn
Ta
Ws
Time
CLD
OVC
CLD (cold front)
OVC
CLR
CLD
OVC
CLD
CLR
CLD
CLR
Depth(m)
Day of Month

c



d

图5、四个季节中水温垂直分布随时间的变化特征，同时结合了同时段的太阳辐射（R_{sn}，此处为净短波辐射）、气温（T_a）、风速(W_s)和风向(W_d)四个气象要素的时间变化。CLR代表晴天，CLD代表多云，OVC代表阴天（其中，冷锋和台风这样的天气系统带来了降水和大风，其对应时段多属于阴天和多云）。(a)一月份代表冬季特征。(b)四月份代表春季特征。(c)七月份代表夏季特征。(d)十月份代表秋季特征。

天气特征	水温特征
晴天少云（云量：0~3）	强热力层结经常出现
阴天（云量：8~10）	基本混合
多云（云量:3~8）	热力层结较晴天弱

特力层结特征	千岛湖	太湖
深度	位于表层水以下，变化范围几米至几十米	位于湖表/湖上层。从上至下延伸，温度递减。
变化周期	暖单次混合型：夏季成层，其他季节混合。变化周期一年。	暖多次混合型：白天成层，夜晚混合。变化周期一天至几天。
强度（温度梯度）	小于1℃/m	经常大于1℃/m，峰值可大于 5℃/m。
对气象条件响应速度	响应速度随深度增加而减少，底层水无响应。	整层水体响应较快，变化一致。

因此，比起纬度相近的深水湖，太湖热力层结的季节差异小，短期变化（一天至几天）较剧烈。

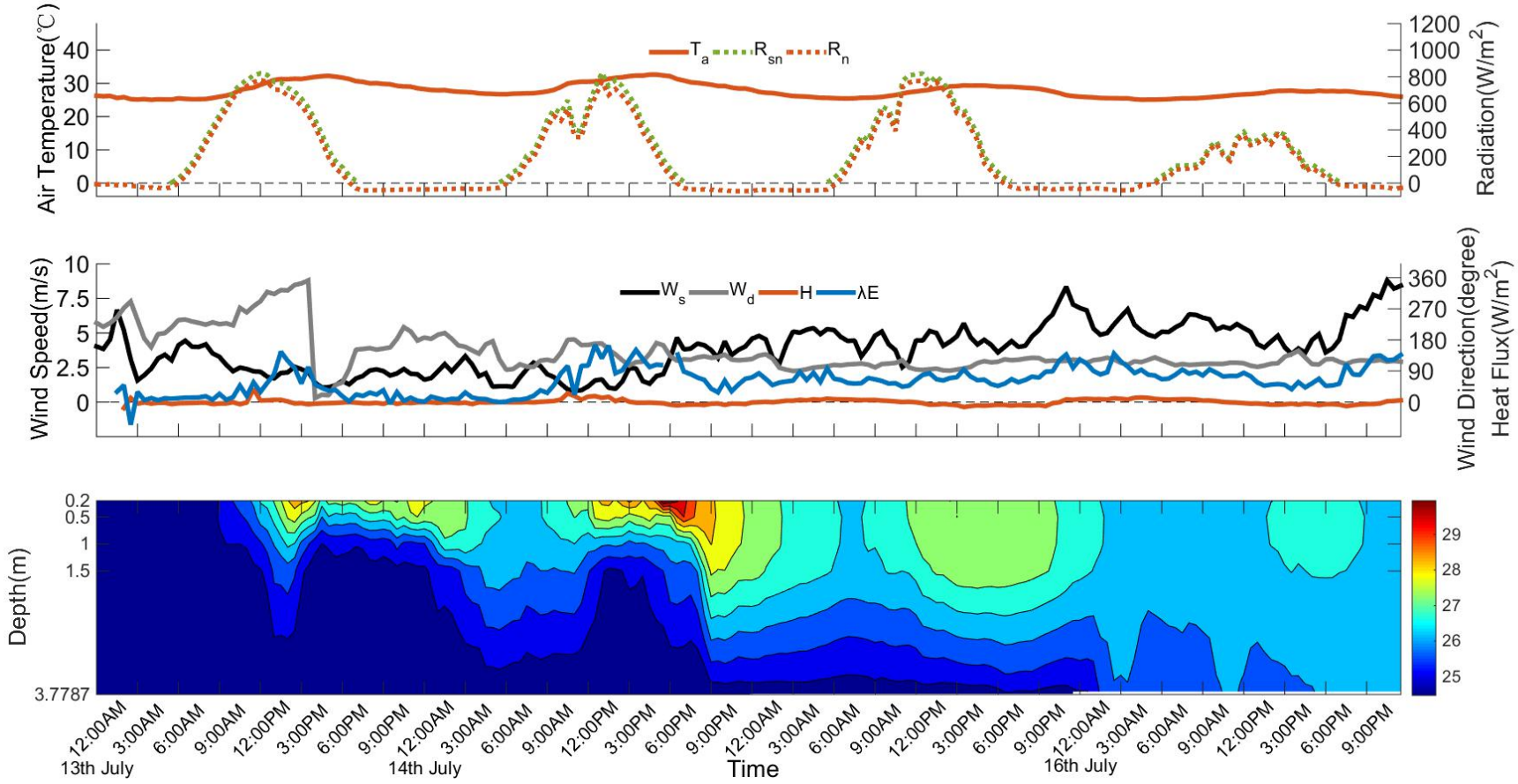


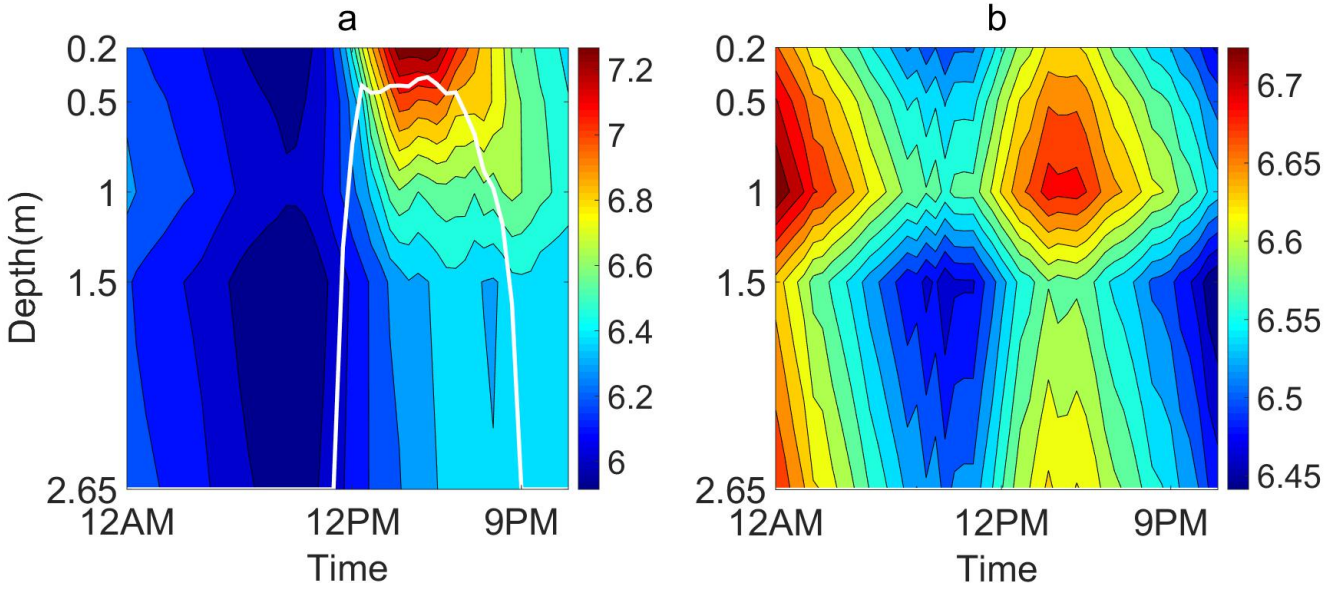
图6、7月13日至7月16日的气象要素和湖表通量。包括气温（T_a）、风向（W_d）、风速（W_s），太阳辐射(R_{sn})、净辐射(R_n)、感热(H)、潜热(λE)和水温变化特征。

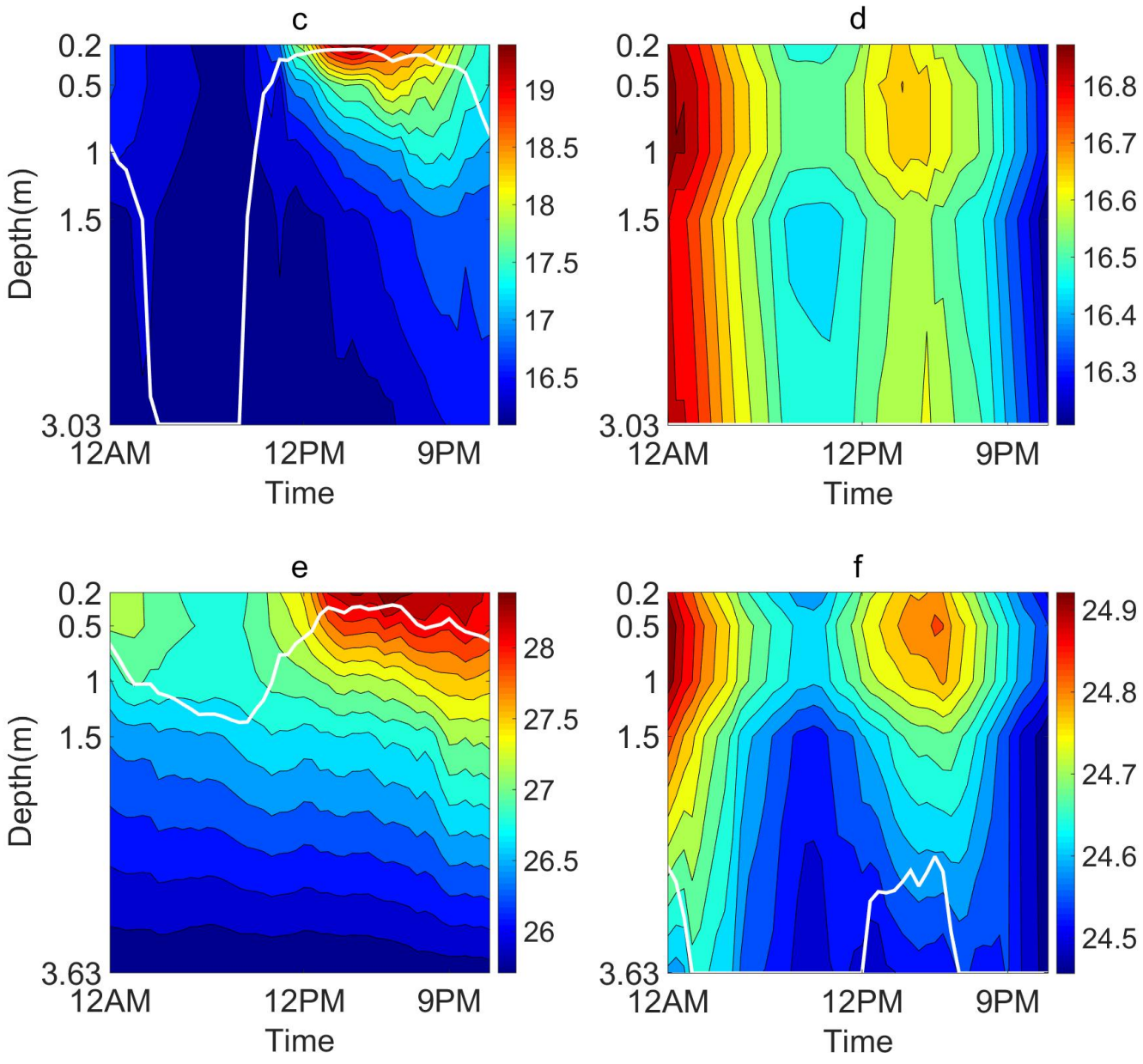
白天太阳辐射输入热量导致分层，夜晚长波、潜热感热的冷却促进混合，但风力的混合作用更剧烈。

研究结果

➢ 2、热力层结对主导因子的平均响应结果

以1月、4月、7月和10月中的R_{sn}和W_s的月平均值作为阈值，并将日平均R_{sn}高于阈值且日平均W_s小于阈值的情况归类为Type 1，将日平均R_{sn}低于阈值且日平均W_s高于阈值的情况归类为Type 2。通过研究不同季节中，两种类型条件下的水温平均日变化和对应的MLD值，得到的太湖热力结构的响应更具代表性。




c
d
e
f
Depth(m)
Time
12AM
12PM
9PM
0.2
0.5
1
1.5
3.03
3.63
19
18.5
18
17.5
17
16.5
16.8
16.7
16.6
16.5
16.4
16.3
28
27.5
27
26.5
26
24.9
24.8
24.7
24.6
24.5

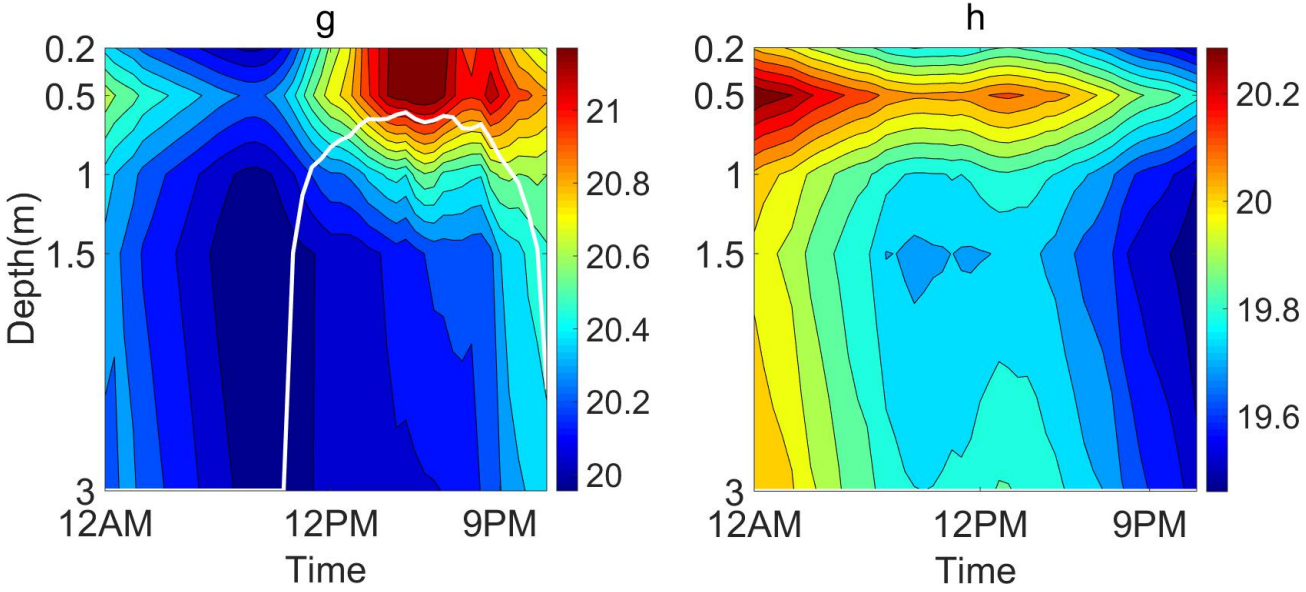


图7、 平台山2015年四季水温和混合层深度在两种极端条件的平均响应情况。其中，a, c, e, g为1月、4月、7月、10月的Type1，b, d, f, h为1月、4月、7月、10月的Type2。

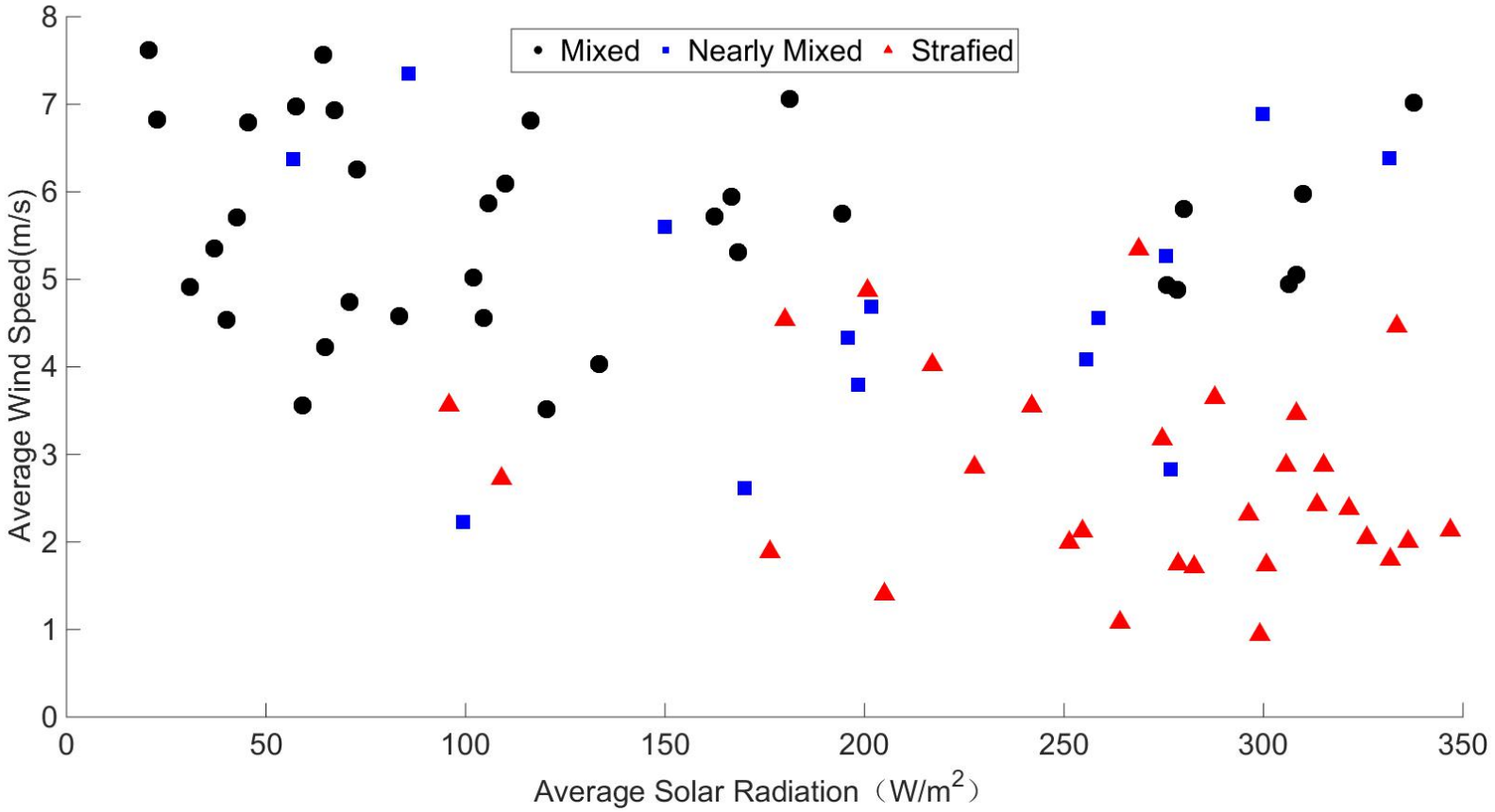


图8、 平台山2015年白天不同强度的热力层结（黑点：完全混合，白天平均RMLD值等于100%；蓝点：近混合，白天平均RMLD介于85%和100%之间；红点：明显层结：白天平均RMLD值小于85%）以及它们所对应的白天平均R_{sn}和W_s。作平均的原因是减少个别数据异常带来的误差。（RMLD为相对MLD值，即MLD值比上当天最大深度）

研究结果

➢ 3、风力翻转

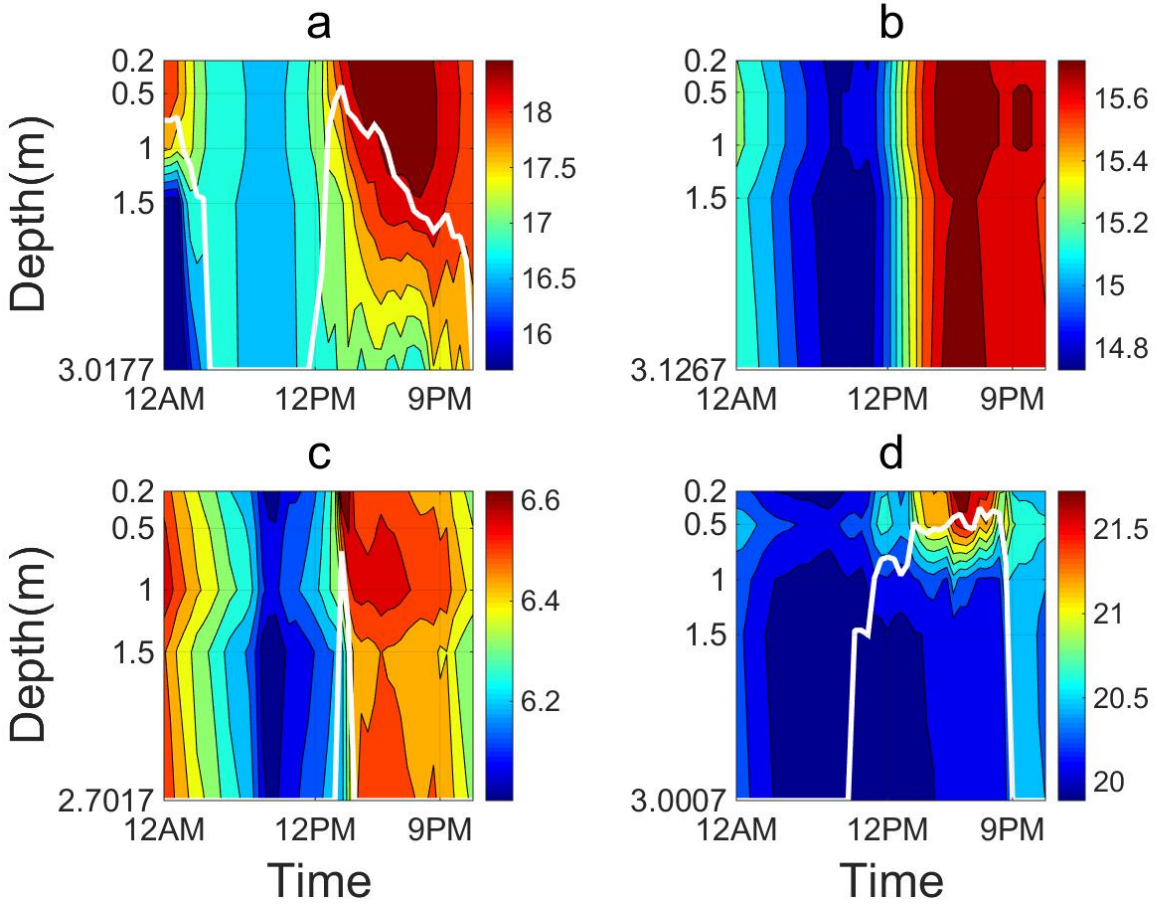


图9、水体温度和MLD值日变化的四个典型个例：a: 在4月23日，白天产生的热力层结最终到夜晚缓慢消散。b: 在4月17日，全天水体为完全混合状态。c: 在1月18日，白天产生的热力层结于白天突然消散。d: 在10月18日，白天产生的热力层结于夜晚突然消散。

季节	全天混合	层结出现	白天翻转			夜晚翻转		
			天数	值		天数	值	
春季(30天)	10	20	4	MLD	1.22m	11	MLD	0.29m
				W_s	4.04m/s		W_s	2.04m/s
夏季(28天)	4	24	1	MLD	2.33m	4	MLD	0.78m
				W_s	4.46m/s		W_s	3.91m/s
秋季(27他)	7	20	2	MLD	1.23m	17	MLD	0.42m
				W_s	2.77m/s		W_s	1.91m/s
冬季(31天)	17	14	6	MLD	0.85m	7	MLD	0.30m
				W_s	2.43m/s		W_s	2.41m/s

白天翻转前的最小MLD值和翻转时最小W_s明显大于夜间，夜晚更容易发生翻转。夏季最容易产生热力层结，最难翻转，秋冬两季翻转频繁。

总结和结论

- 在太湖中，热力层结的变化对天气特征响应明显，实际上，这些过程主要受到太阳辐射的热力分层作用和风力扰动的混合作用控制。这使得太湖的热力层结深度变化小，基本处在湖表或湖体中上部。同时，太湖属于暖多次混合型湖泊，热力层结变化周期短（一天到几天）但强度很大（温度梯度最高可达5℃/m以上），对气象条件响应较快，具有整层水温变化一致的特征。因此，太湖热力层结比起同纬度的深水湖来说，短期变化更剧烈但季节差异小。
- 当我们试图量化太湖湖水的热力层结强度时，发现利用$\Delta T = 0.2℃$的差值标准在确定混合层深度（MLD）的时能够更好地反应热力层结的变化过程。太阳辐射和风速是两个具有对抗作用的因子，当辐射比较强时，需要更强的风力驱动，才能抑制热力层结的发展。在太湖上，当风速大于6m/s时，太湖水体基本保持混合状态。
- 另外，本文发现了在太湖热力层结的发展和消退过程中，经常发生风力主导的翻转现象。由于太阳辐射的加热分层作用，白天比夜晚更难发生风力翻转，夏季热力层结持久稳定，风力翻转较难发生，但秋冬两季风力翻转旺盛。

下一步工作

- 本研究选取了水质较好、水生植物较少、位置开阔的平台山站以代表太湖整体情况，主要研究气象条件对太湖热力分层的影响，而后续研究应着眼于太湖其他区域，以将蓝藻水华、沉水植物和周遭地理环境等因素纳入考虑。
- 在本次研究中，由于案例有限，使水体保持混合的风速阈值只是一个估计量，具体的数值关系有待后续研究。
- 翻转现象作为一种湖体热力结构的明显变化，在深水湖中主要是热力性质变化主导的，具有季节性（Mixing in Lakes and Reservoirs），对藻类的生长有促进作用（Wilhelm and Adrian 2008; MONICA A. GONCALVES, 2016），对物质的分布也有重要影响（Tina K. Bayer, 2016）。但本文发现，在太湖这样的浅水湖中，风力驱动对剧烈的“日翻转”现象有更重要贡献，这个结论有助于未来在太湖开展湖泊通量不确定性和蓝藻水华问题的研究。在对翻转的研究中，本文仅用MLD的变化描绘了它的一维状态，为了深度剖析翻转发生的过程和机理，需要进一步考虑三维空间的流场以及直接影响三维流场的重要因子（如沉水植物），因此，后续的观测和模拟工作是十分重要的。

谢 谢