

新安江水库(千岛湖)热力学状况及热力分层研究*

刘明亮¹, 吴志旭², 何剑波¹, 沈旭¹, 高玉蓉¹, 虞左明^{1**}
(1: 杭州市环境保护科学研究院, 杭州 310014)
(2: 淳安县环境保护监测站, 淳安 311700)

摘要: 利用2012年1-12月在新安江水库(千岛湖)6个点的每月一次的水温及其他环境因子的周年观测资料, 分析了水库水温逐月变化、季节变化、垂直分布及温跃层的形成与变化, 探讨了温跃层特征量(温跃层深度、厚度、强度)与表层水温、水体透明度的关系。新安江水库表层和中层水温与气温存在显著的线性相关, 又以表层水温线性关系最好, 而下层水温与气温没有显著相关性, 说明下层水温受气温的影响很小, 全年处于相对恒温状态。水库表层和中层水温逐月变化明显, 呈现夏季最高、春秋季节次之、冬季最低的变化趋势, 其中中层水温最高值出现的季节较表层水温明显后延, 下层水温没有明显的逐月变化和季节变化。水温垂直分布显示, 4个季节均存在不同程度的温跃层和温度分层现象, 其中水深最深的大坝前水温分层最明显。小金山、三潭岛和大坝前3个典型点位从春季的4月份到冬季的2月份温跃层深度由 1.61 ± 0.47 m 逐渐增加至 39.37 ± 5.35 m, 而温跃层厚度和强度则在夏季最高、冬季最低, 温跃层随着季节的变化呈现增强-稳定-减弱-消失的周期变化。温跃层深度与水体透明度存在显著正相关, 与表层水温存在显著负相关, 并基于透明度和表层水温建立温跃层深度的多元线性回归模型。

关键词: 新安江水库(千岛湖); 垂直分布; 温跃层深度; 热力分层; 透明度

Thermodynamics and stratification in Xin'anjiang Reservoir(Lake Qiandao)

LIU Mingliang¹, WU Zhixu², HE Jianbo¹, SHEN Xu¹, GAO Yurong¹ & YU Zuoming¹
(1: Hangzhou Institute of Environmental Science, Hangzhou 310014, P. R. China)
(2: Chun'an Environmental Monitoring Station, Chun'an 311700, P. R. China)

Abstract: Based on the *in situ* investigation data obtained during the period from January to December in 2012 in Xin'anjiang Reservoir, the monthly and seasonal variations, and vertical distributions of water temperature are analyzed. In addition, the thermocline depth, thickness and strength were calculated and the correlations between thermocline depth and water temperature at the surface and secchi disc depth were developed. Significant and positive linear relationships were found between air temperature and water temperature at the surface and middle layers with the marked high correlation coefficient for water temperature at the surface layer. However, no significantly positive relationship was found between air temperature and water temperature at the bottom layer where temperature was maintained almost as an approximate constant indicating that water temperature at the bottom layer was not affected by air temperature. The monthly and seasonal variations of water temperature at the surface and middle layers were as follows: summer > spring, autumn > winter, with a maximum in July or August and a minimum in February or March. The maximal water temperature at the middle layer was lagged to September or October compared to that of the surface layer. In addition, no marked monthly and seasonal variations were found for water temperature at the bottom layer. There is no obvious temperature differences and thermal stratification between the surface and the deep layer water in all four seasons. From April to February, the mean thermocline depth gradually increased from 1.61 ± 0.47 m to 39.37 ± 5.35 m for the three typical sites (Xiaojinshan, Santandao and Dabaqian). In contrast, the thermocline thickness and strength had the highest values in summer and the lowest values in winter. Seasonally, a periodic variation of thermocline from amplification to stabilization, to weakness and further to disappear-

* 杭州市科技局重大项目(20122513A01)、杭州市环境保护科研计划项目(2010006)、浙江省自然科学基金项目(Y5110314)和杭州市科技发展计划项目(20120433B02)联合资助。2013-05-16 收稿;2013-09-28 收修改稿。刘明亮(1983~),男,硕士,工程师;E-mail:lmillyx@163.com。

** 通信作者;E-mail:yzm0571@163.com。

ance was recorded from April to March. Significant and positive linear relationships between the thermocline depth and secchi disc depth, but negative linear relationships between the thermocline depth and water temperature at the surface layer were found. A multiple linear regression model between the thermocline depth and secchi disc depth, water temperature at the surface layer was developed to model the thermocline depth in Xin'anjiang Reservoir.

Keywords: Xin'anjiang Reservoir (Lake Qiandao); vertical distribution; thermocline depth; thermal stratification; secchi disc depth

湖泊/水库热力学状况是湖泊/水库系统中最基本的物理过程,对生物的新陈代谢和物质分解起着非常重要的作用,因此水温及其季节变化决定生物群落结构和水生生态系统生产力^[1-3].而对于深水湖泊/水库而言,水温差异形成的热力分层还是引起水体各种理化过程(如溶解氧分布、底泥营养盐释放)、上下层水流混合和对流等动力现象的主要因素^[4,6],如热力分层形成的水密度分层阻碍了表层和底层水的对流交换,使得下层均温层内营养充分但光照不足,而上层变温层内光照充足但营养不足,从而限制了水体的浮游植物生长和初级生产力.另外,20世纪以来随着全球气候变暖,全球范围内有害藻华的发生和急剧扩散与全球气温上升也密切相关^[7-8],而湖泊/水库表层水温与地区气温基本上同步变化、高度相关^[1,9-10].此外,全球增温还会改变水体的热结构,影响温跃层深度、热力分层和热力循环^[5,11].因此开展湖泊/水库热力学状况及温度分层研究有助于进一步深化湖泊/水库物理、化学和生物生态过程认识,也可以了解湖泊/水库对区域以及全球气候变化的响应和反馈.

针对深水湖泊/水库的温度分层,温跃层的形成与消失以及水体分层对营养盐、浮游植物分布的影响,国内外学者开展了广泛研究^[3,6,12-15],但国内对于内陆湖泊/水库温跃层的定量描述研究不多.此外,对于新安江水库这样一个典型的深水水库其热力学状况,温度分层的季节变化,温跃层深度、厚度和强度等均缺乏系统而详尽的研究.水库热力学结构认识的缺失使得我们对新安江水库水质演变和生态系统演化的原因和未来发展趋势认识不足.而新安江水库作为国家战略水源地,对杭州市、浙江省乃至整个长三角地区的经济社会发展具有极其重要的战略地位.因此新安江水库热力学状况及温度分层变化规律的研究对于了解水库的物理、化学和生物过程以及制定水质保护措施和规划尤为重要.本文根据2012年全库典型断面水温垂直剖面周年观测资料,旨在探讨新安江水库水温的季节变化、垂直分布以及水库热力学结构,服务于新安江水库生态环境研究以及水库水质保护.

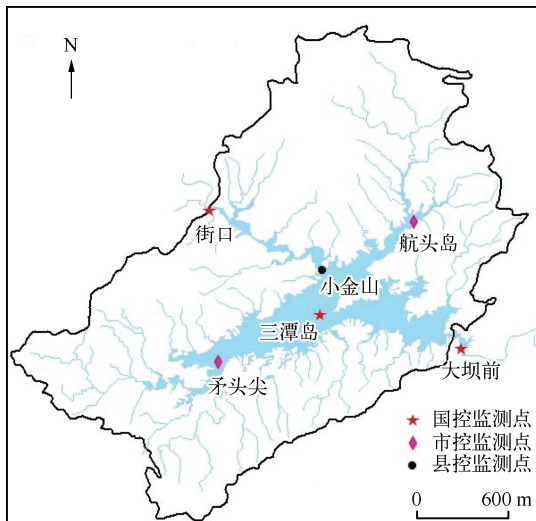


图1 新安江水库采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Xin'anjiang Reservoir

1 材料与方法

1.1 采样时间和点位

新安江水库枝杈和库湾较多,从大坝至新安江入口(街口断面)纵长150 km,水面最宽处约50 km,岸线总长度1406 km,水库面积在水位达到正常蓄水水位108 m时为580 km²,正常蓄水水位库容为 178.4×10^8 m³,平均水深31 m^[3].依据其地形地貌、入库河道、周边社会经济发展状况,在水库3个国控断面监测点(街口、三潭岛、大坝前)、2个市控断面监测点(航头岛、矛头尖)和1个县控断面监测点(小金山)共布设6个采样点.采样点均采用全球定位系统(GPS3000型导航仪)现场空间定位,误差小于2 m,其具体位置见图1.2012年1—12月每月月初(基本上在5日之前)进行各点位水温垂直剖面测量.

1.2 参数测定与计算方法

水深采用美国中西公司PONI-Ponoldepth-DDS型便携式超声波水深仪测定.气温采用美国

NK公司的Kestrel 4500型手持气象站测定(由于仪器损坏,6、7、9月气温未能测定).透明度采用赛氏透明度盘测定.水温垂直剖面采用加拿大RBR公司的XRX-620型快速多参数水质剖面仪进行测定,水温测定精度为 $\pm 0.002^{\circ}\text{C}$.XRX-620固定在一自动绞车上,按 10 cm/s 速度自水面匀速往水下放,根据现场测定水深大致确定水温测定深度,仪器每隔 2 s (相对于每隔 0.2 m)记录1个数据并存储到其自带的存储器内.

温跃层是指水体温度垂直梯度上出现突变或不连续剧变的水层^[16].在温跃层的分析过程中,通常以温跃层深度、强度和层厚度作为描述温跃层的特征量.如果自水面到水底将水体分成 K 层,各层的深度和水温标号为 Z_1, Z_2, \dots, Z_K 和 T_1, T_2, \dots, T_K .温跃层的数学表达可以表示为:

$$\frac{\partial T}{\partial Z} = \frac{T_{K-1} - T_K}{Z_K - Z_{K-1}} \quad (1)$$

如果其值大于零,称作正常分布;反之,则称为逆温层.温跃层的划分标准,根据所处位置水深不同而取值不同.根据《海洋调查规范》^[16],浅海(水深 $\leq 200\text{ m}$)中水温梯度超过 0.2°C/m 的水层为温跃层,深海(水深 $> 200\text{ m}$)中水温梯度超过 0.05°C/m 的水层为温跃层.以往在抚仙湖热学状况的研究中也将水温梯度超过 0.2°C/m 的水层定义为温跃层^[15].根据新安江水库实测的温度剖面曲线,参照抚仙湖研究结果,将水温梯度超过 0.2°C/m 的水层定义为温跃层.另外,根据文献报道一般将表层 1 m 排除在温跃层之外^[12].温跃层深度是指温跃层上界的深度,即温度垂直分布曲线上,一般在温跃层的上、下各有一个极大曲率点,即最浅的极大曲率点所在的深度.温跃层厚度即上、下2个极大曲率点的垂直距离.温跃层范围内上下界 $\partial T/\partial Z$ 的平均值即为温跃层强度^[15-16].

1.3 统计分析

运用SPSS 16.0进行数据统计分析,线性回归中显著性水平 P 值小于 0.05 表示存在显著差异.

2 结果与分析

2.1 新安江水库气温与水温的关系

新安江水库同步测定的气温与表层、中层、下层水温之间的关系可知,表层($0\sim 2\text{ m}$)水温与气温存在极显著线性正相关,决定系数高达 0.86 (图2a),这与其它研究结果相一致^[1,9-10,12],因此在缺少水温观测的湖泊/水库也可用同类地区湖泊/水库建立起来的气温和水温关系来反推得到表层水温.中层($19\sim 21\text{ m}$)水温尽管仍与气温存在显著线性正相关,但决定系数要低得多,仅为 0.20 (图2b),而下层水温则与气温未检测到显著正相关关系(图2c).由此说明,在新安江水库这类深水水库,气温对水温的影响主要作用于水库表层,随水深增加,由于水体内部搅动下降,会形成热力分层,使得表层水体接收到的太阳辐射热量很难转递到中层以及下层水体,从而使下层水体水温很难受水面气温的影响,全年维持在恒温状态.

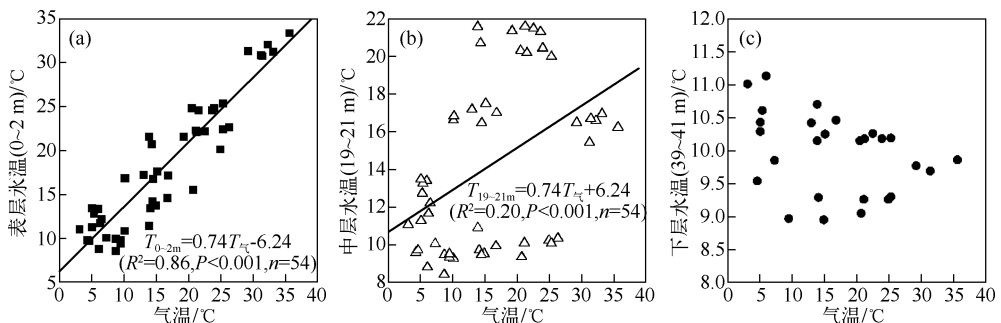


图2 气温与表层($0\sim 2\text{ m}$)(a)、中层($19\sim 21\text{ m}$)(b)和下层($39\sim 41\text{ m}$)(c)水温的线性关系

Fig. 2 Linear relationships between air temperature and water temperature of surface ($0\sim 2\text{ m}$)(a), middle ($19\sim 21\text{ m}$)(b) and bottom ($39\sim 41\text{ m}$)(c) layers

2.2 水温逐月变化及季节变化

由于水库所接收的太阳辐射存在明显的逐月变化和季节变化,从而使水温也发生明显的年内变化.对于表层水而言,新安江水库 2012 年水温的逐月变化特点是:最大值出现在 7、8 月,最小值出现在 2、3 月,由于每次采样选择在月初(一般 5 日之前),因此使得最小值出现的月份相比其它同区域内水库稍有后延^[13].季节上呈现夏季高、春秋季节次之、冬季最小;4—7 月为增温期,8 月至次年 3 月为降温期;6 个点位平均表层水温的年变化为 $9.39 \pm 0.59^\circ\text{C}$ 到 $31.57 \pm 0.99^\circ\text{C}$,年变幅在 20°C 以上(图 3).中层水温的年变化与表层水类似,最低值出现在冬末春初的 2、3 月份,为 $9.31 \pm 0.60^\circ\text{C}$,但最高值出现的季节较表层水要往后延,出现在秋季的 9、10 月份,为 $21.34 \pm 0.33^\circ\text{C}$,并且年变幅要小得多,为 10°C 左右(图 3),这与其它一些水库观测结果一致^[4,13].而下层水则没有明显的逐月变化和季节变化,全年均维持在 10°C 左右,处于一种恒温状态(图 3),下层水温恒温分布层在类似的深水水体被广泛观测到^[15,17-18],如在抚仙湖观测到 50 m 以下深度水温常年维持在 13°C 左右^[15].不同水层水温的季节变化反映了水体热量的收入和支出主要通过湖面进行,通过热量的交换和风扰动引起的水体混合从而将表层水接收到的能量传递到中层水.

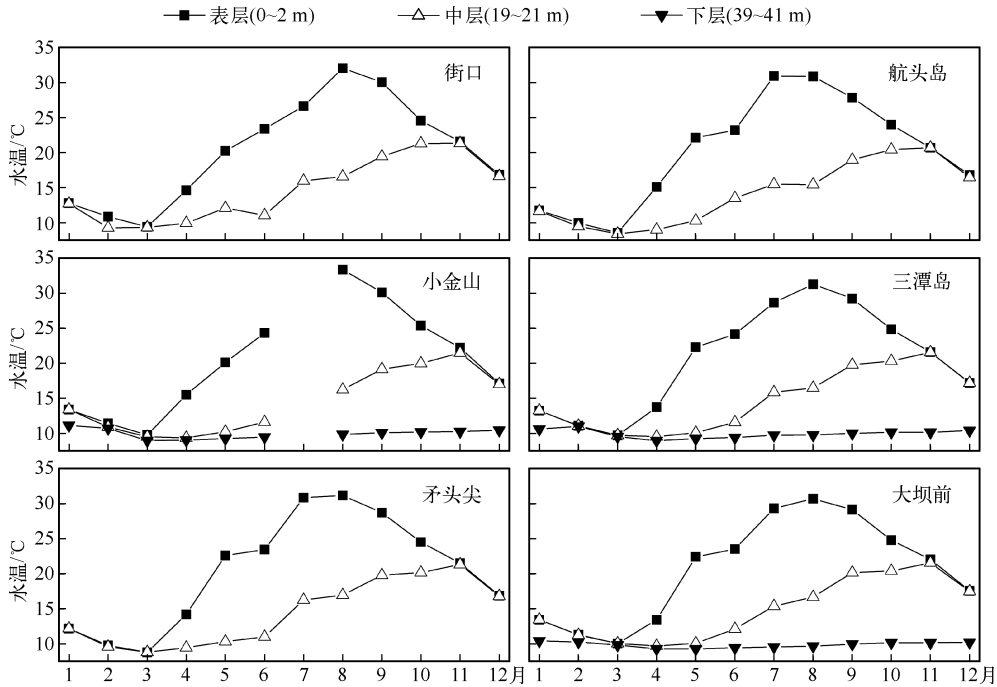


图 3 新安江水库 6 个点位表层(0~2 m)、中层(19~21 m)和下层(39~41 m)水温月变化(街口、航头岛、矛头尖 3 个点位因为水深较浅没有下层水温数据)

Fig. 3 Monthly variations of water temperature of surface (0–2 m), middle (19–21 m) and bottom (39–41 m) layers at the six typical sites in Xin'anjiang Reservoir

2.3 水温垂直分布

由于上下层水体的增温与冷却不一致,致使水温沿垂线方向呈现一定的变化.新安江水库 6 个站点冬季(2 月)、春季(5 月)、夏季(8 月)、秋季(11 月)水温的垂直分布可以看出(图 4),在冬季的 2 月份,表、中、下层温差比较小,在 0~30 m 范围内水温垂直分布大致呈均温层,再往底层水温会出现跃变,但水温变化幅度非常有限,大概在 1°C 左右,水温垂直分层不是很明显.在春、夏、秋 3 个季节,水温垂直分布均存在明显的分层现象,其中春、夏季水温从表层往下呈现跃变趋势,到 20~30 m 之间为跃变的下界,之后再往下层水温则维持在 $9\sim 10^\circ\text{C}$ 恒温水平.秋季的水温垂直分布不同于春、夏季,在上层的 0~20 m 范围内为均温层,20~30 m 之间水温出现跃变,为温跃层,而在 30 m 以下又为均温层,水温垂直分布呈 3 层结构,即变温层、温跃

层和均温层. 从4个季节水温的垂直分布来看,新安江水库水温垂直分布的形式都呈现正温分布,即使在温度最低的2、3月份,也没有观测到逆温层,这与新安江水库地处北亚热带季风气候区有关. 而对于不同点位,由于水深、离岸距离等不一样,水温垂直分层也不尽相同. 航头岛与矛头尖2个点位由于水深较浅,在冬季出现均温层,而其它4个点位出现比较弱的温度分层现象,这与之前吴志旭等^[3]认为的新安江水库冬季无分层现象不尽相同. 春、夏、秋季所有6个点位均出现不同程度的温度分层现象,纵观6个点位全年水温垂直分布,最深的大坝前这个点位水温垂直分层现象最为明显.

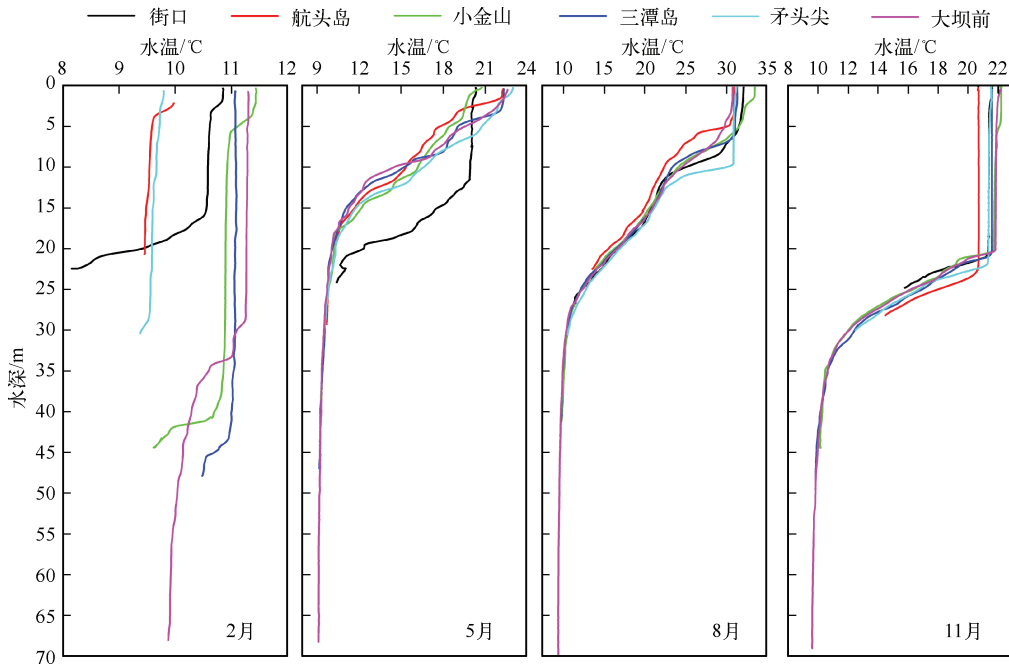


图4 新安江水库6个点位冬季(2月)、春季(5月)、夏季(8月)和秋季(11月)水温垂直分布

Fig. 4 Vertical depth profiles of water temperature in winter (February), spring (May), summer (August) and autumn (November) at the six sites in Xin'anjiang Reservoir

2.4 温跃层特征量分析

为定量表征新安江水库温跃层的形成、消失和热力分层现象,对2012年1—12月各点位温跃层深度、厚度和强度3个特征量进行测定,结果见表1. 在冬季的1、2月份以及初春3月份新安江水库温度分层不是很明显,有些点位没有温跃层存在,即便存在温跃层,温跃层深度比较深,厚度比较薄,强度比较小(表1),这与抚仙湖的观测结果一致^[15]. 如抚仙湖在3月份温跃层有时形成有时消失,在3月下旬时温跃层强度仅为 $0.28^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ^[15]. 由于街口、航头岛、矛头尖3个点位水深比较浅,夏、秋季时温跃层深度已延伸到野外水温观测的深度,使得这些点位在部分月份温跃层特征量的判别上会带来一些误差和不确定性. 为了更准确地分析新安江水库温跃层特征量随季节的变化,本文选取水深较深的小金山、三潭岛和大坝前3个点位进行分析. 图5为3个点位温跃层深度、厚度、强度平均值的月变化. 3月份这3个点位未出现水温分层现象,温跃层厚度和强度均为0,从4月份开始出现明显的水温分层现象,温跃层深度由4月份最开始的 $1.61 \pm 0.47 \text{ m}$ 逐渐增加到2月份的 $39.37 \pm 5.35 \text{ m}$ (图5). 伴随着稳定的温跃层出现,温跃层的厚度和强度逐渐增强,在夏季的7、8月份达到最大值,表明新安江水库夏季水温分层最明显. 随着秋季气温逐渐下降,温跃层的厚度和强度也开始逐渐下降,在冬季的2月份温跃层厚度最薄,强度最弱,至3月份温跃层消失,上、中、下水层水温趋于均一,形成均温层. 温跃层随着季节的变化而呈现增强—稳定—减弱—消失的周期变化. 3个站点全年温跃层平均深度为 14.70 m ,这与基于湖泊面积利用全球湖泊温跃层预测模型计算得到的值(14.87 m)非常接近^[19]. 温跃层的深度与厚度、强度的变化趋势相反,因此温跃层深度与厚度、强度呈现显著的负相关关系

(厚度: $R^2 = 0.42, P < 0.001$; 强度: $R^2 = 0.10, P < 0.05$) (图 5). 参照湖泊分类方案, 基于新安江水库水温温跃层的形成、发展和消失以及引起的水库分层现象, 如果从水库水温的变化对新安江水库进行归类, 其属于典型的暖单次混合型水库^[19].

表 1 新安江水库 6 个点位 2012 年 1—12 月各点位温跃层深度(m)、厚度(m)和强度($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)
Tab. 1 Thermocline depth, thickness and strength from January to December in 2012
at the six sites in Xin'anjiang Reservoir

站点	参数	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
街口	深度	20.62	17.59	20.93	10.92	11.49	6.98	1.85	4.19	5.79	16.08	20.84	20.19
	厚度	1.35	4.76	1.12	7.16	10.36	13.43	10.33	21.64	19.66	10.86	3.84	1.66
	强度	0.55	0.40	0.36	0.46	0.73	0.83	0.39	0.93	0.81	0.94	1.01	0.68
航头岛	深度	—	—	—	2.21	6.00	1.63	2.32	4.60	8.10	15.20	22.59	22.30
	厚度	0	0	0	3.62	11.17	21.15	23.94	17.85	21.22	12.77	5.36	0.65
	强度	0	0	0	0.60	0.58	0.55	0.82	0.90	0.76	0.87	1.08	0.25
小金山	深度	34.25	40.77	—	1.52	3.53	4.64	/	3.84	5.38	15.89	20.19	25.65
	厚度	5.00	1.17	0	8.79	14.39	18.25	/	24.97	25.27	19.33	14.32	8.57
	强度	0.35	0.43	0	0.51	0.62	0.70	/	0.84	0.72	0.69	0.78	0.70
三潭岛	深度	36.55	43.88	—	2.12	2.75	2.53	1.95	5.62	9.66	16.61	20.59	26.66
	厚度	1.44	1.48	0	5.16	14.75	21.08	26.07	23.24	23.93	14.84	13.65	6.42
	强度	0.45	0.24	0	0.59	0.65	0.66	0.68	0.86	0.77	0.82	0.73	0.56
矛头尖	深度	—	—	—	2.61	2.90	8.75	3.16	9.50	11.00	17.09	21.77	27.53
	厚度	0	0	0	5.46	15.38	14.14	21.61	19.14	20.01	12.86	8.05	3.33
	强度	0	0	0	0.65	0.71	0.84	0.69	0.77	0.80	0.91	1.02	0.59
大坝前	深度	30.84	33.45	—	1.19	1.24	3.81	3.28	3.14	9.65	14.33	20.16	24.58
	厚度	2.64	0.61	0	5.66	13.60	20.31	25.09	25.00	23.62	18.00	13.49	8.53
	强度	0.48	0.39	0	0.49	0.69	0.65	0.72	0.79	0.76	0.74	0.82	0.72

—表示无明显温跃层出现, 温跃层厚度和强度对应为 0; / 表示数据缺失.

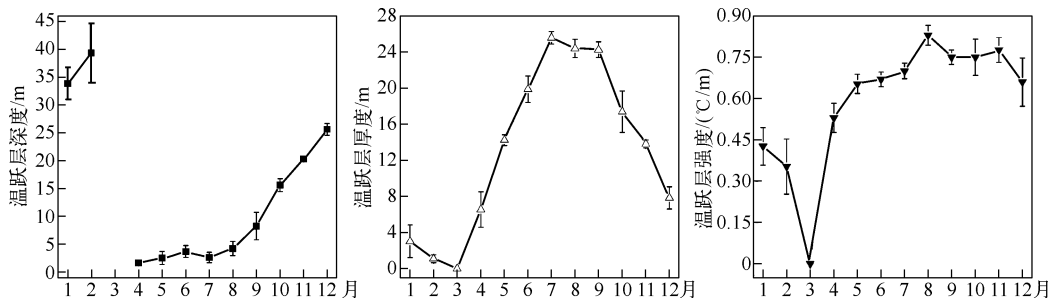


图 5 新安江水库小金山、三潭岛和大坝前 3 个点位平均温跃层深度、厚度和强度月变化

Fig. 5 Monthly variations of mean thermocline depth, thickness and strength at the three sites of Xiaojinshan, Santandao and Dabaqian in Xin'anjiang Reservoir

3 讨论

湖泊/水库温跃层深度的影响因素包括自然因素和人为因素^[20]. 自然因素包括水体形状(长度、宽度)、

面积、风区长度和光穿透深度(透明度)^[12,17,19,21].一些研究者基于某一区域或者全球湖泊/水库水温观测数据发展了许多基于湖泊/水库面积、风区长度和透明度计算湖泊/水库温跃层深度的模型.对于同一个湖泊/水库其温跃层时空变化则主要受制于风区长度、透明度和热量收支(水温),由于各点位不同风向向下风区长度不一样,而综合考虑风向下的风区长度计算繁琐,因此在此主要探讨透明度和水温对各点位温跃层深度的影响.将6个点位计算得到的温跃层深度与实测透明度进行线性拟合发现,温跃层深度与透明度存在极显著线性正相关($R^2 = 0.18, P < 0.001$),证明随透明度增加,太阳辐射能穿透的水层比较深,使得深层水体能接收到太阳辐射能量,从而增加温跃层深度.同时由于不同季节温跃层深度差异显著(图5),温跃层深度与表层水温(0~2 m)存在极显著负相关($R^2 = 0.34, P < 0.001$).综合考虑温度、透明度对温跃层深度的影响,以表层水温(0~2 m)和透明度作为输入参数进行多元线性回归,线性回归决定系数相比单独用表层水温和透明度作为输入参数要明显提高,由此得到新安江水库温跃层深度的多元线性回归模型:

$$Z_t = 2.42Z_{SD} - 1.05T_{0-2m} + 25.10 (R^2 = 0.52, P < 0.001, n = 55) \quad (2)$$

式中, Z_t 、 Z_{SD} 和 T_{0-2m} 分别为温跃层深度、透明度和表层水温.

人为因素方面,水库的入库流量和出库流量,出水口深度等水库运行、调度等管理措施通过影响水的滞留时间、水库水动力过程进而对水库温跃层产生影响^[20].如对广东流溪河水库的野外观测和数值模拟研究发现,夏季洪水季节以下溢的方式进入水库的入库流量会明显影响到水库温跃层,造成10~15 m的混合层出现^[20].从新安江水库2012年入库流量和出库流量的逐月变化来看(表2),入库流量和出库流量基本一致并且高值出现在温跃层形成的初期,加之出水口位于大坝70 m以下深度,而上游来水水域水深较浅,水库面积较大,水力滞留时间为630 d,缓流至水深较深的水域时其对温跃层的破坏不大,因此相比于自然因素的影响,水库运行、调度等人为因素对新安江水库温跃层的影响可能要小得多.

表2 新安江水库2012年入库流量和出库流量逐月变化(m^3/s)

Tab. 2 Monthly variations of inflow and outflow amounts from January to December in 2012 in Xin'anjiang Reservoir

流量	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
入库流量	132.1	430.0	916.4	755.9	526.7	848.2	136.7	435.4	228.5	27.1	66.3	205.8
出库流量	146	361	677	657	884	389	174	188	245	107	64	277

4 结论

1) 新安江水库表层和中层水温存在明显的逐月变化和季节变化,水温受气温影响呈现夏季高、春秋季节次之、冬季最低的变化规律,而下层水温没有月变化和季节变化.

2) 新安江水库全年均存在不同程度的热力分层和温跃层,小金山、三潭岛和大坝前3个典型点位平均温跃层深度在 1.61 ± 0.47 m与 39.37 ± 5.35 m之间,平均温跃层厚度在 1.09 ± 0.44 m与 25.58 ± 0.69 m之间,温跃层深度与厚度和强度呈显著负相关,从春季的4月份到冬末春初的3月份温跃层随着季节的变化呈现增强—稳定—减弱—消失的周期变化.

3) 温跃层深度与水体透明度存在显著的正相关,与表层水温存在显著负相关,基于透明度和表层水温建立新安江水库温跃层深度的多元线性回归模型,温跃层主要受自然因素的影响.

4) 新安江水库热力分层会显著影响湖泊物理、化学和生物过程,而目前全球气候变暖也会改变水库热力学结构,因此需要进一步加强水库热力学的长期观测以及水库热力学过程与湖泊物理、化学、生物过程耦合作用机制研究.

致谢:感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所张运林研究员对本文的建议和指导.

5 参考文献

- [1] O'Reilly CM, Alin SR, Plisnier PD *et al.* Climate change decreases aquatic ecosystem productivity of Lake Tanganyika,

- Africa. *Nature*, 2003, **424**(6950): 766-768.
- [2] 张运林,秦伯强,陈伟民等. 太湖梅梁湾浮游植物叶绿素 a 和初级生产力. *应用生态学报*, 2004, **15**(11): 2127-2131.
- [3] 吴志旭,刘明亮,兰 佳等. 新安江水库(千岛湖)湖泊区夏季热分层期间垂向理化及浮游植物特征. *湖泊科学*, 2012, **24**(3): 460-465.
- [4] Merino-Ibarra M, Monroy-Rios E, Vilaclara G *et al.* Physical and chemical limnology of a wind-swept tropical highland reservoir. *Aquatic Ecology*, 2008, **42**(3): 335-345.
- [5] Wilhelm S, Adrian R. Impact of summer warming on the thermal characteristics of a polymictic lake and consequences for oxygen, nutrients and phytoplankton. *Freshwater Biology*, 2008, **53**(2): 226-237.
- [6] Minns CK, Moore JE, Doka SE *et al.* Temporal trends and spatial patterns in the temperature and oxygen regimes in the Bay of Quinte, Lake Ontario, 1972–2008. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 2011, **14**(1): 9-20.
- [7] Qin BQ, Zhu GW, Gao G *et al.* A drinking water crisis in Lake Taihu, China: linkage to climatic variability and lake management. *Environmental Management*, 2010, **45**(1): 105-112.
- [8] Paerl HW, Hall NS, Calandrino ES. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a world experiencing anthropogenic and climatic-induced change. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(10): 1739-1745.
- [9] Hampton SE, Izmet'eva LR, Moore MV *et al.* Sixty years of environmental change in the world's largest freshwater lake—Lake Baikal, Siberia. *Global Change Biology*, 2008, **14**(8): 1947-1958.
- [10] Adrian R, O'Reilly CM, Zagarese H *et al.* Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography*, 2009, **54**(6): 2283-2297.
- [11] Lee HW, Kim EJ, Park SS *et al.* Effects of climate change on the thermal structure of lakes in the Asian Monsoon Area. *Climatic Change*, 2012, **112**(3/4): 859-880.
- [12] Jones JR, Knowlton MF, Obrecht DV *et al.* Temperature and oxygen in Missouri reservoirs. *Lake and Reservoir Management*, 2011, **27**(2): 173-182.
- [13] 张运林,陈伟民,杨顶田等. 天目湖热力学状况的监测与分析. *水科学进展*, 2004, **15**(1): 61-67.
- [14] Li WC, Yang XD, Yin Y *et al.* Thermal stratification in Lake Zige Tangco, Central Tibetan Plateau. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2005, **10**(4): 689-693.
- [15] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 抚仙湖. 北京:海洋出版社, 1990: 82-115.
- [16] 国家技术监督局. 海洋调查规范——海洋调查资料处理(中华人民共和国国家标准 GB/T 12763.7—1991). 北京:中国标准出版社, 1992: 67-70.
- [17] Hambricht KD, Gophen M, Serruya S. Influence of long-term climatic changes on the stratification of a subtropical, warm monomictic lake. *Limnology and Oceanography*, 1994, **39**(5): 1233-1242.
- [18] Naithani J, Deleersnijder E, Plisnier PD. Analysis of wind-induced thermocline oscillations of Lake Tanganyika. *Environmental Fluid Mechanics*, 2003, **3**(1): 23-39.
- [19] Jacob K 著. 古滨河,刘正文,李宽意等译. 湖沼学:内陆生态系统. 北京:高等教育出版社, 2011: 179-209.
- [20] Wang S, Qian X, Han BP *et al.* Effects of local climate and hydrological conditions on the thermal regime of a reservoir at Tropic of Cancer, in southern China. *Water Research*, 2012, **46**(8): 2591-2604.
- [21] Fee EJ, Hecky RE, Kasian SEM *et al.* Effects of lake size, water clarity, and climatic variability on mixing depths in Canadian Shield lakes. *Limnology and Oceanography*, 1996, **41**(5): 912-920.