

水塘静水冰生消过程及冰盖演变原型试验

石慧强, 冀鸿兰

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要:为研究静水冰生消过程及冰盖演变规律,于2014年11月中旬至2015年3月中旬对内蒙古自治区托克托县南湖水塘的冰情变化进行原型试验,研究不同时段气温、不同水深对静水冰生消过程、冰盖演变及水温分布、冰面温度的影响。试验结果表明:气温是影响静水冰情的主要因素,在冰盖增长期,冰厚与累积日均负气温线性相关;冰盖不稳定变化期和消融后期,冰厚及冰盖增长率主要受时段气温影响;水深对最大冰厚和冰融化消失时间有影响,对冰盖演变过程的影响不明显;气温变化对表层水温的影响较大,对深层水温的影响相对较小;冰面温度与气温变化同步。

关键词:静水冰;生消过程;冰盖演变;原型试验;水深;气温;水温

中图分类号:TV882.9

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2016)04-0025-06

Prototype experimental study on growth and decay processes of ice in still water and evolution of ice cover//SHI Huiqiang, JI Honglan (*College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China*)

Abstract: In order to investigate the growth and decay processes of ice in still water and the evolution of ice cover, a prototype experiment was carried out to study the ice regime in the Nanhu Pond in Tuoketuo County, in the Inner Mongolia Autonomous Region during the period from the middle of November 2014 to the middle of March 2015. The influence of air temperature in different periods and water depth on the growth and decay processes of ice in still water, the evolution of ice cover, water temperature distribution, and temperature at the ice surface were studied. The experimental results show that the air temperature was the main factor that influences the regime of ice in still water. The ice thickness was linearly correlated with the accumulated daily mean negative temperature during the growth period of the ice cover. The slope of the increasing of ice thickness and ice cover during the unstable and late melting periods was mainly affected by the air temperature. The water depth affected the greatest ice thickness and ice melting time, while its impact on the evolution of the ice cover was not significant. The water temperature in the surface layer was significantly influenced by the variation of the air temperature, while the deep layer was less influenced. The temperature at the ice surface showed a synchronized change with the air temperature.

Key words: ice in static water; growth and decay process; evolution of ice cover; prototype experiment; water depth; air temperature; water temperature

寒区河流、水库和湖泊冰盖的生长与消融,是一种非常普遍的自然现象。当水体表面温度达到冻结点时,进一步失热将导致冰的形成^[1],冰晶相连、形成冰盖,改变了水体的水力条件、热力条件和几何边界条件^[2]。

有关冰盖的生长消融的冰情研究中,国内外学者积累了丰富的研究成果。前苏联通过大量试验研究得到了水库的冰厚以及封库开库日期的计算和预报方法^[3]。沈洪道^[4]耦合大气、冰、水、河床各系统,建立了河流冰盖生消的数学模型,成功地模拟了

河流冰厚和水温。郝红升等^[5]通过室内静水结冰实验,得到了冰盖厚度、水温和冰内温度随时间的变化过程,并建立了水温与冰盖生长、消融相互作用的耦合模型。张学成等^[6]以物理机制和数学推导为基础,建立了黄河初始冰盖形成后冰盖厚度演变计算的数学模型。冀鸿兰等^[7]提出可变模糊聚类循环迭代模型模拟并预报黄河冰情生消过程。卞雪军等^[8]开发了一套适用于黄河内蒙古段黄河冰情的预报系统。王祚等^[9]基于GIS(地理信息系统)对黄河内蒙古段冰下河床进行可视化分析评价,Abuda

基金项目:国家自然科学基金(51369017)

作者简介:石慧强(1991—),男,硕士研究生,主要从事河冰水力学及冰工程防灾减灾研究。E-mail:573412014@qq.com

通信作者:冀鸿兰(1970—),女,教授,主要从事水文水资源及工程模糊集研究。E-mail:honglanji@163.com

等^[10]将 SRM(融雪径流模型)用于冰雪为主的中国西北山区以模拟及预测融雪径流过程。冰盖的生长和消融过程受多种因素影响,是一个非常复杂的问题,其试验研究和理论研究都有待充实。滕辉等^[11]通过室内静水结冰试验得到了结冰历时、垂向温度、冰盖厚度的演变过程,但整个冰盖增长期间气温稳定,无法真实模拟野外气温变化对冰盖演变的影响。李志军等^[12]对黑龙江红旗泡水库冰情进行原型研究,结果表明近冰面冰温同冰面总辐射呈现相同的变化趋势,积雪影响冰厚度在水库内的一致性,总体满足热力学生长规律,但未对冰面温度和气温关系作深入研究。

笔者选择内蒙古自治区托克托县南湖水塘进行静水冰生消的原型试验,进行了不同水深、日内不同时段条件下的静水冰生消和冰盖演变试验,探究气温变化、不同水深对静水冰生消的影响,以及水温和冰面温度变化规律。

1 静水冰生消观测

1.1 试验水塘概况

南湖水塘位于北纬 $46^{\circ}16'$,东经 $111^{\circ}8'$,在托克托县双河镇西南 2 km 处,中滩乡政府旁,西临黄河。水塘形状为梯形,周长 307.3 m,面积 5 673 m^2 ,深水处水深可达 3~4 m。每年 4 月下旬至 10 月下旬黄河补给水塘,冬季结冰前停止补水。每年 11 月中下旬至 12 月初水塘开始结冰,翌年 3 月中下旬融化,冰期 3~4 个月。由于当地冬季气候相对温和,整个冬季水塘结冰厚度相对较薄,为 0.3~0.4 m。

1.2 观测方式

观测期从 2014 年 11 月 23 日开始,到 2015 年 3 月 23 日结束,在结冰期和消融期,每日上午、下午进行观测;在稳封期,每周 2 次进行周期性观测。水塘监测垂线平面布置如图 1 所示,按水深由浅至深顺序以 1~5 编号,各垂线对应的水深分别为 20 cm、30 cm、50 cm、70 cm、120 cm,其中极浅水深 20 cm 作

为辅助对照。由于表层水体温度变化较大,在各垂线上水深 25 cm 范围内每隔 5 cm 布置 1 个温度探头,其中水面(水深 0 cm)处布设温度探头用于量测结冰时冰表面温度。水温 and 冰温测量使用精密温度计,测量精度为 $\pm 0.1^{\circ}C$ 。冰厚测量采用直角拐尺,测量精度为 0.1 cm。

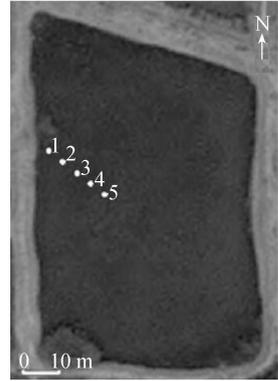


图 1 监测垂线平面布置

1.3 观测结果

水塘在不同水深条件下冰生消过程以及每日不同时段冰情的变化如表 1 所示,观测时间 8 时和 14 时分别代表 2 个分析时段。

2 观测结果分析

2.1 冰情生消现象

静水结冰的实质是持续负气温导致水体过冷却,冰晶上升聚集形成初始冰盖的过程^[13]。水塘结冰沿岸开始,在岸边形成冰带;随着气温继续降低,水塘深水处结冰,除少数敞露水面部分外,整个水塘冰形成整体(图 2(a))。消融期,随着持续正气温,水塘开始逐渐消融,消融过程始于水塘岸边(图 2(b)),然后不断发展到水塘中心,形成岸边冰先消失中心冰后消失的现象。

结冰时由于水塘岸边水深小,单位面积水体蓄热量较小,受气温降低影响水体降温较快;另一方面,水塘边界的陆地土壤比热容较小,低温作用使其

表 1 试验成果

垂线	观测时间	初始冰盖厚度/cm	初期冰盖平均增长速率/ ($cm \cdot d^{-1}$)	初期冰盖最大增长速率/ ($cm \cdot d^{-1}$)	冰盖平均消融速率/ ($cm \cdot d^{-1}$)	初期最大冰厚/cm	稳封期最大冰厚/cm	消融时间/d
1	8:00	2.3	1.0	2.0	2.0	19.0	20.0	3.20
	14:00	1.4	1.0	1.9	2.5	18.8	20.0	3.20
2	8:00	2.8	1.1	1.9	1.9	25.3	29.0	3.20
	14:00	1.3	1.2	2.1	2.2	24.8	29.0	3.20
3	8:00	2.6	1.2	1.9	1.8	23.8	30.0	3.21
	14:00	1.3	1.1	2.0	2.2	23.3	30.0	3.21
4	8:00	2.5	1.1	1.8	2.0	23.3	35.0	3.23
	14:00	1.6	1.1	1.9	2.4	22.8	35.0	3.23
5	8:00	2.4	1.1	1.9	2.1	25.5	39.5	3.23
	14:00	1.5	1.2	2.1	2.5	24.8	39.5	3.23



(a) 水塘全部封冻

(b) 水塘开始消融

图2 水塘冰生消现象

降温幅度大于水体,水体与边界的热交换作用加速了岸边水体的降温过程,岸边先出现冰带;中心水塘水深较深,储热量较大,相对岸边结冰晚。消融时,由于岸边水浅,冰厚相对较薄,冰、水、气热交换较快,消融时间相对较短。

由表1可知,结冰初期不同时段初始冰厚不同,气温对各时段初始冰厚的形成有较大的影响,如8时的初始冰厚平均为2.5 cm,14时为1.4 cm,这是由于初期冰厚较薄,14时气温较8时高,冰与大气之间的热交换很快影响到冰盖下表面,导致冰厚变薄。

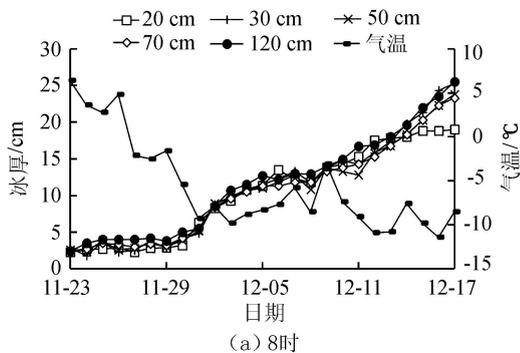
在冰盖增长期,不同时段不同水深冰盖平均增长速率相近,如8时和14时初期冰盖平均增长速率分别为1.10 cm/d和1.12 cm/d,表明时段气温对冰盖的增长过程无明显影响;不同水深对初期冰盖最大增长速率无明显影响。在稳封期,水深对最大冰厚影响较明显,如水深20 cm与50 cm的初期冰盖最大增长速率分别为2.0 cm/d和1.9 cm/d,而稳封期最大冰厚分别为20 cm和30 cm,原因是浅水冰盖增长到接近水深时无法继续冻结,冰厚较薄,此时深水由于持续低温,冰下水体继续失热结冰,冰盖继续增长,最终深水冰较浅水冰厚,而初期冰盖最大增长速率主要受气温影响,水深对其影响不明显。

消融期,冰盖消融速率受时段气温影响明显,高气温时段较低气温时段消融速率大,冰盖平均消融速率14时比8时大,8时冰盖平均消融速率为1.9 cm/d,14时为2.4 cm/d,主要原因是14时气温较8时高,冰、气热交换快,冰盖消融相对较快;水深对冰盖全部消融时间有影响,水深越深,冰盖相对较厚,吸热量越大,冰体吸热至完全消融所需时间越长,如水深70 cm处的冰盖比30 cm处的冰盖全部融化时间滞后3 d。

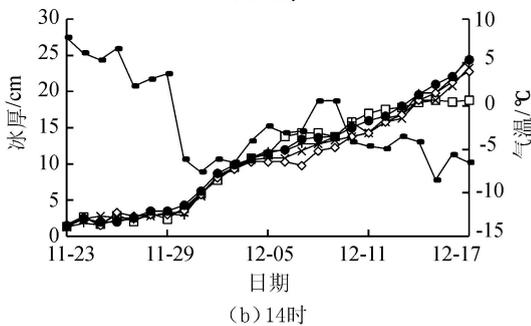
2.2 冰盖演变

2.2.1 冰盖的增长

图3为不同水深在结冰期(2014年11月23日至12月17日)不同时段冰盖厚度的演变过程。从图中可以看出,8时和14时冰盖变化趋势一致,11月23—29日由于气温的不稳定升降,形成的薄层冰



(a) 8时



(b) 14时

图3 结冰期不同水深冰盖增长过程

盖受气温影响较大,冰盖厚度不稳定增减,变化幅度在0.5~1.5 cm之间;11月29日至12月5日,随着气温继续下降,冰盖快速增长,不同时段平均增长速率均为2.0 cm/d,为冰厚增长最快时期;12月5—17日,冰盖厚度缓慢增长,平均增长速率为1.1 cm/d。

封冻初期,短期负气温使水体结冰,由于气温的不稳定变化,正负气温交替,导致冰盖厚度不稳定变化;随着气温持续降低,平均负气温达到 -7.1°C ,冰盖表面温度与气温相差较大,冰与大气的热交换量也较大,冰盖增长速率较快;随着冰盖厚度的增加,冰下水体热量散失逐渐减慢,冰盖的增长速率相应减小,进入稳定增长期。

对比图3(a)与(b)可见,在冰盖不稳定变化期(11月23—29日),日内不同时段,冰厚变化较大,最大达1.3 cm,这是由于初冰厚度较小,时段气温不稳定,冰气热交换过程很快影响到冰盖下表面,致使冰厚出现短期生消现象;在冰盖稳定增长期,不同时段各垂线平均冰盖增长速率相近,8时的平均增长速率为1.1 cm/d,14时为1.2 cm/d,表明时段气温对冰厚影响在冰盖增长期较小,仅在冰盖不稳定变化期明显,同时水深在冰盖增长期的作用也不明显。

水塘不同水深在整个冰封期冰盖演变如图4所示,由图4可知冰厚的变化在整个冰封期呈现“不稳定—快—慢—快”的演变规律。

2.2.2 冰盖的消融

图5为不同水深在消融期8时、14时冰厚的变化过程。由图5可知,不同时段冰厚消融速度均先缓后疾,且同时段各水深消融速率相近。消融前期

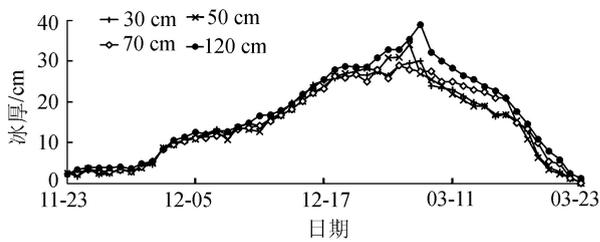
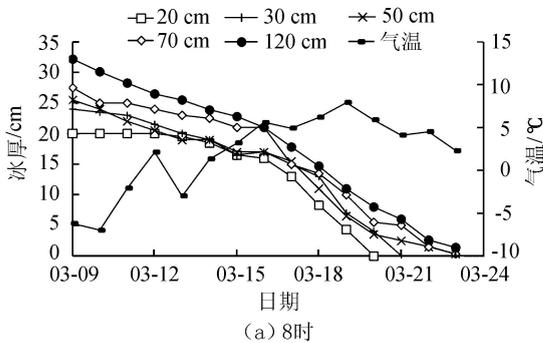
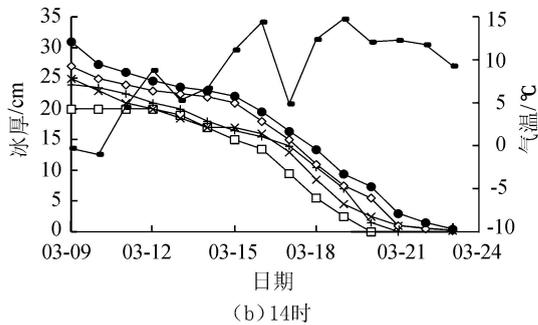


图4 封冻期不同水深冰厚变化过程



(a) 8时



(b) 14时

图5 不同水深冰盖消融过程

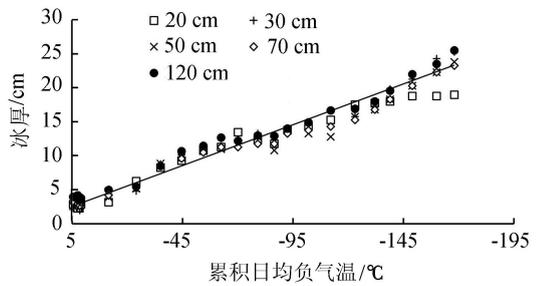
(3月9—15日)8时的平均消融速率为1.3 cm/d, 14时为1.6 cm/d; 而消融后期(3月15—23日)8时和14时平均消融速率约为前期的2.7倍,这是由于前期平均气温较低,在0℃左右,且冰盖相对较厚,大气到冰盖底面的热通量较小,消融缓慢;而后期平均正气温达到5.9℃,热力和风动力因素对冰盖的共同作用有所增强,加速了融冰作用。

消融后期,各水深冰厚在日内不同时段相差较大,14时冰厚较8时平均减少3.2 cm,原因是融冰后期,14时气温较8时平均高6.7℃,加速了冰气热交换过程,使得高温时段较低温时段冰盖消融较快,冰厚相差较大,表明消融后期,时段气温在冰盖消融中作用明显。

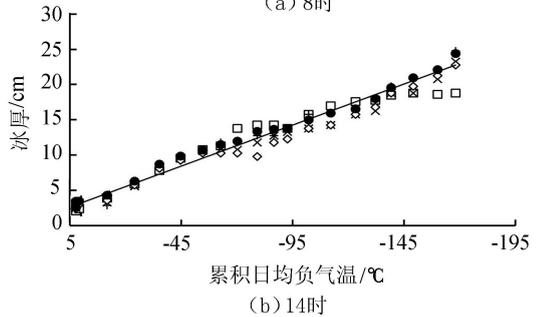
2.2.3 冰盖厚度与累积日均负气温的关系

冰盖生长期(2014年11月23日至2014年12月17日)不同水深冰盖厚度与累积日均负气温的关系如图6所示,8时、14时冰厚与累积日均负气温基本呈线性关系,14时的斜率比8时的略低,冰厚与累积日均负气温的关系式为

$$H = \begin{cases} -0.120T + 3.129 & 8 \text{ 时} \\ -0.116T + 3.204 & 14 \text{ 时} \end{cases} \quad (1)$$



(a) 8时



(b) 14时

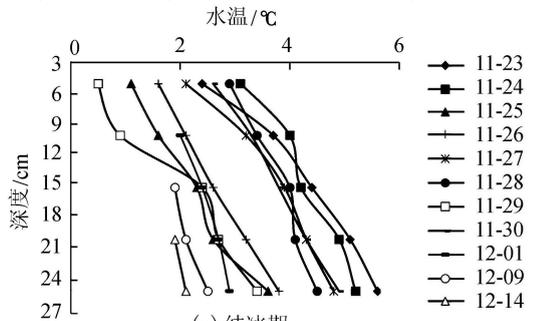
图6 不同水深冰厚与累积日均气温关系

式中: T 为累积小时负气温,℃; H 为冰厚,cm。8时和14时冰厚的增长速率分别为0.120 cm/(℃·d)和0.116 cm/(℃·d),表明日内时段气温影响冰盖增长,时段气温越高,冰盖增长越慢。8时和14时相关系数分别为0.9843和0.9864,可以认为在冰盖增长期,冰厚与累积日均负气温线性相关。

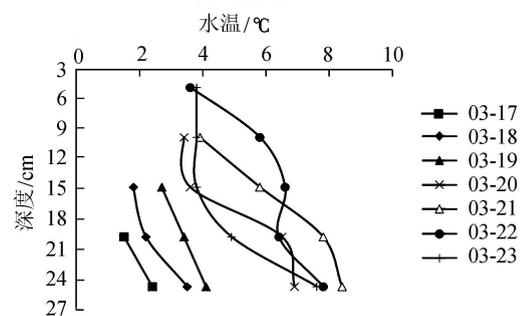
2.3 冰下水温变化

2.3.1 垂向水温变化

图7为70 cm水深处垂向水温分布,结冰期整个水体自下而上逆温分布,越靠近冰盖下表面,水体降温速度越快,11月23—30日,表层水温受气温影响明显,变动较大,最大相差接近3℃,底层水温受



(a) 结冰期



(b) 消融期

图7 4号垂线垂向水温变化过程

气温影响较小,最大相差 1.5℃,除 11 月 25 日、26 日、29 日垂向水温线分布较远外,其余日期垂向水温线分布较密集,且各层水温均相差 1℃左右,这是由于此阶段气温温和,各层水温无明显变化,而 11 月 25 日、26 日、29 日气温降幅较大,各层水温明显降低,偏离水温线密集部分较远。12 月 1 日起,气温持续下降,受负气温影响,水体逐层结冰,各层水温开始降低,最终稳定在 2℃左右。

融冰期,随着持续正气温,水体自下而上逐层消融,水温逐渐升高,各层水温变化明显,水体升温速率最大达到 3.1℃/d,表明消融期水温随气温升高,变化幅度较大。

2.3.2 水温随气温的变化

图 8 为垂线 4(水深 70 cm)在结冰期 8 时和 14 时的水温随气温变化过程,在 11 月 23 日至 12 月 1 日冰下水温随气温升降而升降,其中表层 10 cm 内、15 cm、20 cm 以下深度日内变化均值分别约为 1.7℃、1.4℃、1.1℃,表明表层水温受气温变化影响明显,随着深度的增加,水温变化相对缓慢。12 月 1 日起,随着气温持续降低,水体继续失热,各层水温不断降低。对比图 8(a)与图 8(b)可以看出 14 时各层水温整体分布比 8 时的高,这是由于下午气温较高,使得水温分层现象更明显。

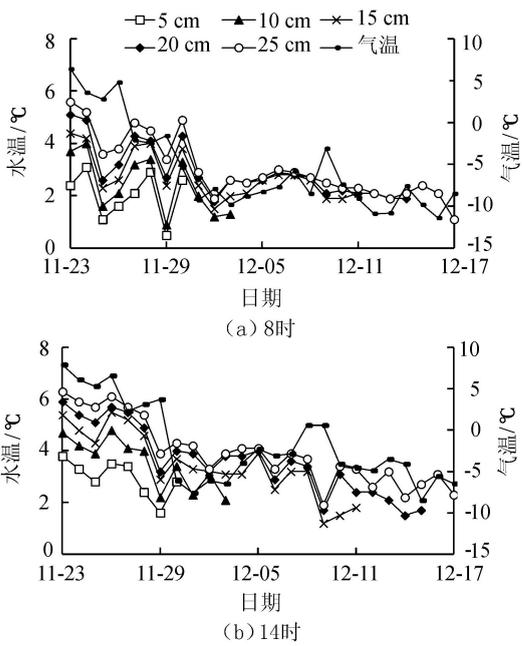


图 8 垂线 4 不同深度冰下水温随气温的变化

图 9 为垂线 4 在消融期 8 时和 14 时各层水温变化过程。2015 年 3 月 15 日以前,25 cm 深度处水温接近 0℃,升温缓慢,这是由于此时冰厚略小于 25 cm,接近冰水交界面。从 3 月 15 日开始,受正气温影响,冰盖逐层消融,水体升温速度加快,平均升温速率约 1.2℃/d,对比图 9(a)与图 9(b)可以看

出,14 时的水温变化较 8 时剧烈,这是由于 14 时的气温波动较大,水温对气温变化响应明显。在结冰期和消融期,气温是影响水温分布的主要因素。

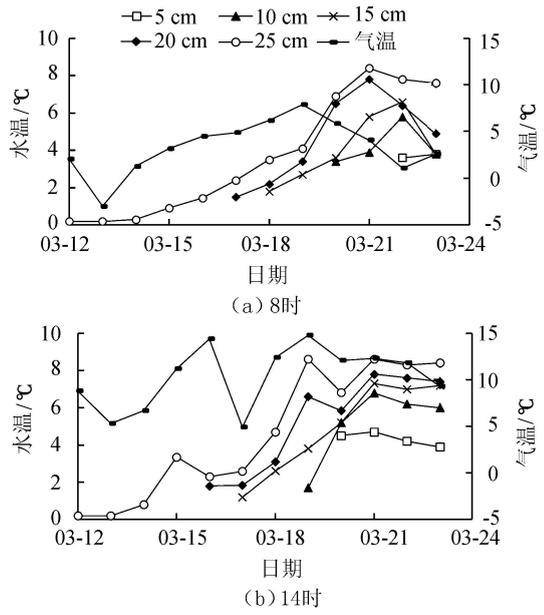


图 9 垂线 4 不同深度冰下水温随气温的变化

2.3.3 水体蓄热量变化

水体蓄热量计算公式为

$$Q = \int_V \rho C_p T dV \quad (2)$$

式中: Q 为水体蓄热量(相当于 0℃的水体),kJ; ρ 为水的密度,kg/m³; C_p 为水的比热容,kJ/(kg·K); T 为水温,℃; V 为水的体积,m³。其中, V 取温度探头所在测点为中心 1 单位的水体。

水体蓄热量变化过程如图 10 所示,其中 Q_0 为开始时刻水体蓄热量。冰盖增长初期,由于负气温作用,水体持续失热,形成冰盖。11 月 23—29 日气温的不稳定升降,使水体蓄热量变化不稳定。11 月

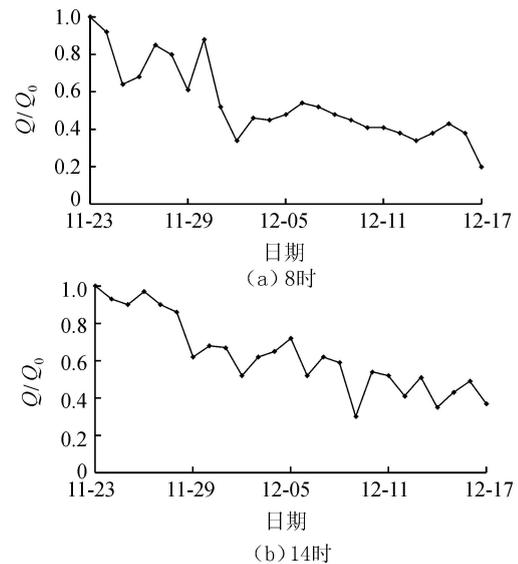


图 10 结冰期垂线 4 水体蓄热量变化过程

29日开始,随着气温持续降低,水体蓄热量总体呈下降趋势,仅局部水体蓄热量变化不稳定。8时的水体蓄热量较14时降低较快,主要原因是8时气温较14时低,水体放热较快;14时的水体蓄热量较8时变化剧烈,是由于14时气温变化相对8时较大,水温升降幅度较大,表明时段气温对水体蓄热量变化过程有明显影响。

2.4 冰面温度变化

结冰期冰面温度(深度0 cm处温度)变化过程如图11(a)与图11(b)所示。11月23—29日,气温相对温和,冰温变化较缓,接近0℃;11月29日开始,降温明显,冰面温度随之降低,其中8时冰温波动较14时剧烈,降幅最大达到7.6℃,而14时升降幅度在2.3℃以内,这是由于14时气温相对8时较

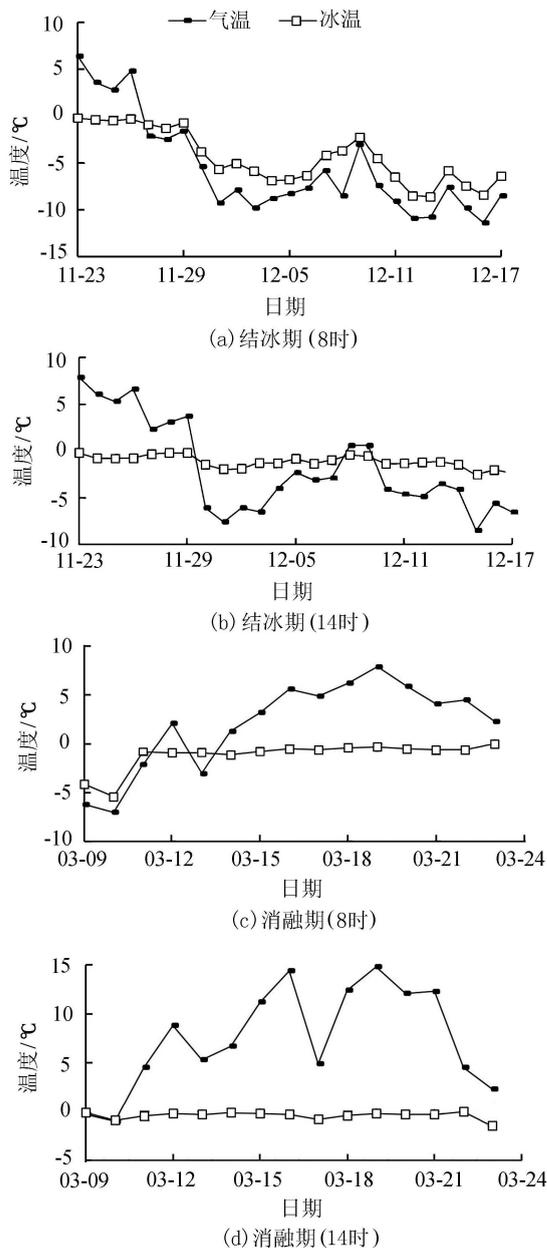


图11 冰面温度变化过程

高,冰温升高至接近0℃,整体波动相对较缓。

消融期冰面温度变化过程如图11(c)与图11(d)所示,2015年3月9—11日,冰温波动较强,8时的波动峰值达4.5℃,14时的为1.2℃,这是由于这段时间,8时较14时气温由低温抬升较快,冰面温度受影响明显,变动较大;3月11日起,随气温升高,冰面温度接近0℃,波动较缓,均在1℃以内波动,随气温升降小幅度变化,表明消融后期,冰面温度波动减弱。结冰期和消融期,冰面温度变化与气温变化同步,冰面温度的变化反应出气温的变化情况。

3 结论

a. 冰盖的消融主要受气温影响,冰盖不稳定变化期和消融后期冰厚受时间段气温影响明显,日内变化较大,冰盖的稳定增长期冰厚主要受累积日均负气温影响,日内时间段气温对其影响较小。

b. 在冰盖增长期,日内不同时间段的冰盖增长率不同,日内时段气温越高,冰盖增长率越低,14时的冰盖增长率比8时的低。

c. 水深对冰盖演变过程影响较小,对最大冰厚和冰完全消融时间有所影响,水深越深,冰厚相对越大,冰融化至消失时间越长。

d. 在冰盖生长过程中,水体垂向上呈逆温分布,气温对水体的分层结构有影响;气温变化对表层水温的影响较大,对深层水温的影响相对较小;14时与8时相比,同深度的水温偏高,且整体水温抬升。融冰期随着气温升高,水体升温先慢后快,各层水温变化幅度较大,14时的水温变化较8时剧烈。

e. 冰盖消融过程中,冰面温度受时段气温影响明显,随气温波动同步变化,气温越高,冰面温度越接近0℃,气温越低,冰面温度越低。

参考文献:

[1] 蔡琳. 中国江河冰凌[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2008.
 [2] 王军. 河冰形成和演变分析[M]. 合肥:合肥工业大学出版社, 2004.
 [3] 多钦科. 苏联河流冰情[M]. 北京:中国科学技术出版社, 1990.
 [4] 沈洪道. 河冰研究[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2010.
 [5] 郝红升, 邓云, 李嘉, 等. 冰盖生长和消融的实验研究与数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2009, 24(3): 374-380. (HAO Hongsheng, DENG Yun, LI Jia, et al. Numerical simulation and experimental study on growth and decay of ice-cover [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2009, 24(3): 374-380. (in Chinese))

(下转第88页)

- 混凝土扩散系数影响的表征[J]. 中外公路, 2011, 31(5): 201-204. (CHEN Shuanfa, LI Huaping, LI Zuzhong, et al. Characterization of sulfate attack of concrete diffusion coefficient of alternating loads [J]. Journal of Foreign Highway, 2011, 31(5): 201-204. (in Chinese))
- [70] 余振新, 高建明, 宋鲁光, 等. 荷载-干湿交替-硫酸盐耦合作用下混凝土损伤过程[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(3): 487-491. (YU Zhenxin, GAO Jianming, SONG Luguang, et al. Damage process of concrete exposed to sulfate attack under drying-wetting cycles and loading [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42(3): 487-491. (in Chinese))
- [71] BASSUONI M T, NEHDI M L. Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading[J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(3): 206-226.
- [72] GAO R, LI Q, ZHAO S, YANG X. Deterioration mechanisms of sulfate attack on concrete under alternate action[J]. Journal of Wuhan University of Technology, Materials Science Edition, 2010, 25(2): 355-359.
- [73] WANG Z, ZENG Q, WU Y, et al. Relative humidity and deterioration of concrete under freeze-thaw load [J]. Construction and Building Materials, 2014, 62: 18-27.
- [74] WANG Z, ZENG Q, WANG L, et al. Corrosion of rebar in concrete under cyclic freeze-thaw and chloride salt action [J]. Construction and Building Materials, 2014, 53: 40-47.
- [75] SUN W, ZHANG Y M, YAN H D, et al. Damage and damage resistance of high strength concrete under the action of load and freeze-thaw cycles [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(9): 1519-1523.
- [76] de SORTIS A, PAOLIANI P. Statistical analysis and structural identification in concrete dam monitoring [J]. Engineering Structures, 2007, 29(1): 110-120.
- [77] CHENG L, ZHENG D. Two online dam safety monitoring models based on the process of extracting environmental effect [J]. Advances in Engineering Software, 2013, 57: 48-56.

(收稿日期: 2015-06-16 编辑: 骆超)

(上接第 30 页)

- [6] 张学成, 可素娟, 潘启民, 等. 黄河冰盖厚度演变数学模型[J]. 冰川冻土, 2002, 24(2): 203-205. (ZHANG Xuecheng, KE Sujuan, PAN Qimin, et al. Mathematical model of ice cover thickness evolution in the Yellow River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(2): 203-205. (in Chinese))
- [7] 冀鸿兰, 卞雪军, 徐晶. 黄河内蒙古段流凌预报可变模糊聚类循环迭代模型[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(4): 14-17. (JI Honglan, BIAN Xuejun, XU Jing. Variable fuzzy clustering loop iteration model for ice-run forecast in Inner Mongolia Reach of Yellow River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(4): 14-17. (in Chinese))
- [8] 卞雪军, 冀鸿兰, 姜新华, 等. 黄河内蒙古段冰情预报系统的开发[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(4): 62-65. (BIAN Xuejun, JI Honglan, JIANG Xinhua, et al. Development and application analyze of forecasting system of ice conditions in Inner Mongolia Reach of Yellow River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(4): 62-65. (in Chinese))
- [9] 王祚, 李畅游, 冀鸿兰, 等. 基于 GIS 的黄河内蒙古段冰下河床三维可视化方法与应用[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(4): 80-84. (WANG Zuo, LI Changyou, JI Honglan, et al. Three-dimensional visualization method and its application on riverbed under ice of Yellow River in Inner Mongolia based on geographic information system [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(4): 80-84. (in Chinese))
- [10] ABUDU Shalamu, CUI Chunliang, SAYDI Muattar, et al. Application of snowmelt runoff model (SRM) in mountainous watersheds: a review [J]. Water Science and Engineering. 2012, 5(2): 123-136.
- [11] 滕晖, 邓云, 黄奉斌, 等. 水库静水结冰过程及冰盖热力变化的模拟试验研究[J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 720-726. (TENG Hui, DENG Yun, HUANG Fengbin, et al. Experimental study on the simulation of freezing processes in calm waters and thermal changes on reservoir ice cover [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(5): 720-726. (in Chinese))
- [12] 李志军, 杨宇, 彭旭明, 等. 黑龙江红旗泡水库冰生长过程现场观测数据的剖析[J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(3): 270-274. (LI Zhijun, YANG Yu, PENG Xuming, et al. The analysis of the field observation data of fresh ice growing Process in Hongqipao Reservoir of Heilongjiang [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2009, 25(3): 270-274. (in Chinese))
- [13] 练继建, 赵新. 静动水冰厚生长消融全过程的辐射冰冻度-日法预测研究[J]. 水利学报, 2011, 42(11): 1261-1267. (LIAN Jijian, ZHAO Xin. Radiation degree-day method for predicting the development of ice cover thickness under the hydrostatic and non-hydrostatic conditions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(11): 1261-1267. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-09-23 编辑: 郑孝宇)