

水面薄层热结构变化诱发机制的 模拟研究

——空气冷/暖平流效应*

吴永森 吴隆业 纪育强 马小兵 张士魁

(国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266003)

提要 利用 HDG-高灵敏度红外测温仪和常规测试仪器在低温实验室的水槽中,对气温可控条件下模拟形成空气冷/暖平流流经水面过程中的静态水面薄层热结构进行了分层同步测量。数据分析表明,在空气暖平流过程中,气温骤增 21.5℃,水面皮温几乎同步增加达 1.57℃,温度响应系数为 +0.073。这种温度响应系数在升温过程中,其平均值为 0.046;而在冷平流(降温)过程中,则为 -0.022,个别情况下,皮温降低幅度是气温降幅的 9.4%。水温对气温的响应率是作用时间和水深的函数,且随水深递减,水温值对气温的增减、响应亦随深度加深而降低,在一定深度和时间,这种影响为零。

关键词 水面薄层 热结构 诱发机制 模拟研究 平流效应

学科分类号 P733.4

在大气对海洋、海洋对大气相互作用,全球气候变化的数值模拟研究中,通常输入模式或用于验证模式的数据多用在现场表层(水深 0.5—1.0m)或更深水层上的温度测值。由于海上浮标、测站和观测船的实测数据极为有限,使众多研究受到了限制。最近研究表明,利用现有和历史的卫星观测数据可能是解决研究资料、数据不足的重要途径之一(Yokoyama, 1993)。而这种数据真正客观地修正很大程度上取决于对水面薄层和皮层变化物理机制的了解和认识。水面薄层的研究虽然在实验室和现场取得了不少成果(Andreyev, 1969; Saunders, 1967; 吴永森等, 1994),但许多问题仍不完全清楚,如空气冷/暖平流对水面薄层的影响效应就是一例。大气中的冷/暖平流对海洋水体可产生巨大的影响,如冬季强冷空气爆发,海面的结冰就是气-水相互作用的结果。由于现场难以获取过程的连续同步数据,因此本文研究在分析国内、外研究成果的基础上,对空气冷/暖平流的爆发对水面薄层热结构的影响在实验室进行了实验模拟测量。

1 原理与方法

1.1 红外测温仪测温原理与方法

* 国家自然科学基金重点资助项目, 49336070号。吴永森, 男, 出生于1954年2月, 副研究员, Fax: 0086-532-2879562

收稿日期: 1996-12-30, 收修改稿日期: 1999-05-29

水表层的水分子在与影响它的大气间不断进行热交换、热平衡的过程中向空间发射红外辐射。也正是这些位于水面皮层水分子的群体辐射效应控制着空间传感器接收、观测到的水面辐射温度。

从技术上讲,红外测温仪实际上是一种遥感测温的红外辐射温度计。它接收被测目标的红外辐射,由红外探测器将红外辐射能量转换成电信号,经电子学处理和黑体分度定标后,即可用来测定目标温度。HDG-高灵敏度红外测温仪选用通道为8—14 μm 的光学滤波器,以消除大气衰减和其他干扰影响,并同时考虑了发射率和目标受到的环境辐射影响的订正,进而可用来直接测量灰体目标的表面真实温度(张才根,1989;康伦华,1985)。

在测量目标温度时,在 λ_1 — λ_2 波段内,来自目标的总入射能量包括目标自身辐射及其反射的环境辐射。该目标水体为朗伯体,比辐射率为 ε ,反射率 $\rho = 1 - \varepsilon$,水面皮层真实温度为 T_{st} ,环境辐射等效黑体温度为 T_e ,亮度温度为 T_b 的等效黑体辐射来表示,测量仪的斩波器温度为 T_0 ,其比辐射率 $\varepsilon = 1$ 。经热电转换,电子学处理和黑体分度定标后,输出的直流信号电压

$$V_s = \varepsilon V(T_{st}) + (1 - \varepsilon)V(T_e) - V(T_0) \quad (1)$$

其中 $V(T_{st}) = K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda, T_{st}) d\lambda = K\eta_T \sigma T_{st}^4$,表示(热力学)温度为 T_{st} 、 T_e 、 T_0 的黑体辐射相

应的直流信号电压; $\eta_T = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda, T_{st}) d\lambda / \sigma T_{st}^4$,表示温度为 T_{st}^4 的黑体在 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 波段内的

辐射占总辐射的比率; $K = K_e \cdot K_0$ 表示仪器的总增益; K_e 为电子学增益; K_0 为光学增益; $M(\lambda, T_{st}) = C_1 \lambda^{-5} / [\exp(C_2 / \lambda T_{st}) - 1]$ 为普朗克(Planck)辐射定律; $\sigma = 5.6697 \times 10^{-8}$ ($J \cdot K^{-4} \cdot M^{-2} \cdot S^{-1}$)。经仪器内部进行斩波器温度补偿后,输出直流信号电压:

$$V(T_b) = V_s + V(T_0) \quad (2)$$

又可表示为: $V(T_b) = \varepsilon V(T_{st}) + (1 - \varepsilon)V(T_0)$ (3)

(3)式表示用亮度法测得的亮度温度(T_b),它包括目标(水体)自身辐射和其反射的包括环境在内的总辐射相应的等效黑体辐射。

为直接用红外测温仪测量目标体的表面真温 T_{st} ,将(1)式改写为:

$$V(T_{st}) = [V_s + V(T_0) - V(T_e)] / \varepsilon + V(T_e) \quad (4)$$

(4)式表示当用红外测温仪测量常温灰体目标表面真温 T_{st} 时,除对斩波器温度 T_0 进行补偿外,还需对目标发射率(比辐射率) ε 和环境辐射等效黑体温度 T_e 进行订正。当外部环境影响完全补偿时,仪器输出的直流电压则为:

$$V = V(T_{st}) = K\eta_T \sigma T_{st}^4, \quad (5)$$

(5)式表明,输出电压仅是目标表面真温的单一函数。经线性化处理,A/D转换后,红外测温仪显示/输出的温度仅表示目标表面皮层真温(T_{st}),其中不再包括环境辐射影响在内的亮温度项,进而达到直接给出目标(水体)真温的目的。

1.2 实验模拟装置及实验室

本实验是在中国极地研究所低温实验室进行的。实验室分 -40°C 和 -60°C 两室,其

中 - 40℃ 实验室空间尺寸为 4.61m × 4.00m × 2.37m；- 60℃ 实验室空间尺寸为 4.40m × 3.05m × 2.40m。制冷系统由单和双压缩机制冷、控温，其设计按低温冷冻要求设计，可满足各种低温实验之需要。

实验装置主要包括实验水槽(100cm × 100cm × 34cm)和测试仪器两部分。其中测试仪器包括 HDG-高灵敏度红外测温仪和由集成温度传感器-AD590组成的微尺度温度梯度仪，仪器技术指标如下。

(1) HDG-高灵敏度红外测温仪

响应光谱范围	8—14μm
视场角	4.70°
噪声等效温度 (NETD)	≤0.01℃
响应时间	0.25S (达终值的 90%)
测温精度	± 读数的 1%
输出模拟	10mV / °C
发射率ε修正	0.01—1.00 连续可调
环境辐射等效温度修正	- 50—80℃ 连续可调

(2) AD590 测温探头 (WNS-1型数字式温度仪)

分辨率	0.1℃
采样速度	3 次 / s
消耗功率	< 18mW
测温范围	- 50℃—150℃
基本误差	± 0.5%FS, - 30—100℃

仪器安装及模拟水槽见图 1。

2 测量结果与讨论

2.1 测量结果

根据上述测量方法和模拟过程设计，测得在气温从 - 22℃ 升高至 25℃ 的条件下，不同升、降温过程中的水面至以下各层温度动态演变过程见图 2, 3。图 2 给出，当初始状态 $T_a > T_w$ 条件下，冷 / 暖空气作用于水面过程中各层温度演变曲线；图 3 给出，当初始状态 $T_a < T_w$ 条件下，暖空气作用于水面过程中各层温度演变曲线。其中 T_{si} 为由 HDG-高灵敏度红外测温仪测得的水下 20μm 深之内平均水面皮温值，图 3 给出的数值为修正后所得到的真温值， T_a 为环境气温 (水面以上 70cm 处)，而 $T_{w0.5}$ 和 T_{w10} 分别为水下 5cm 和 10cm 处固定深度的水温值。模拟测量过程中的环境参数见表 1。

2.2 讨论

2.2.1 水面皮温对冷 / 暖空气平流响应测量的可

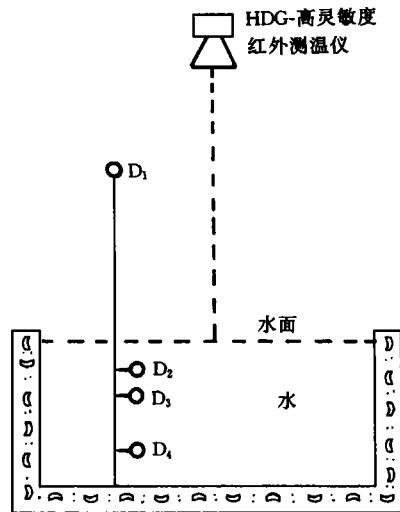


图1 低温实验室模拟测量装置

Fig.1 Sketch of simulating measurement in the low temperature laboratory

D1—D4为测温探头1—4

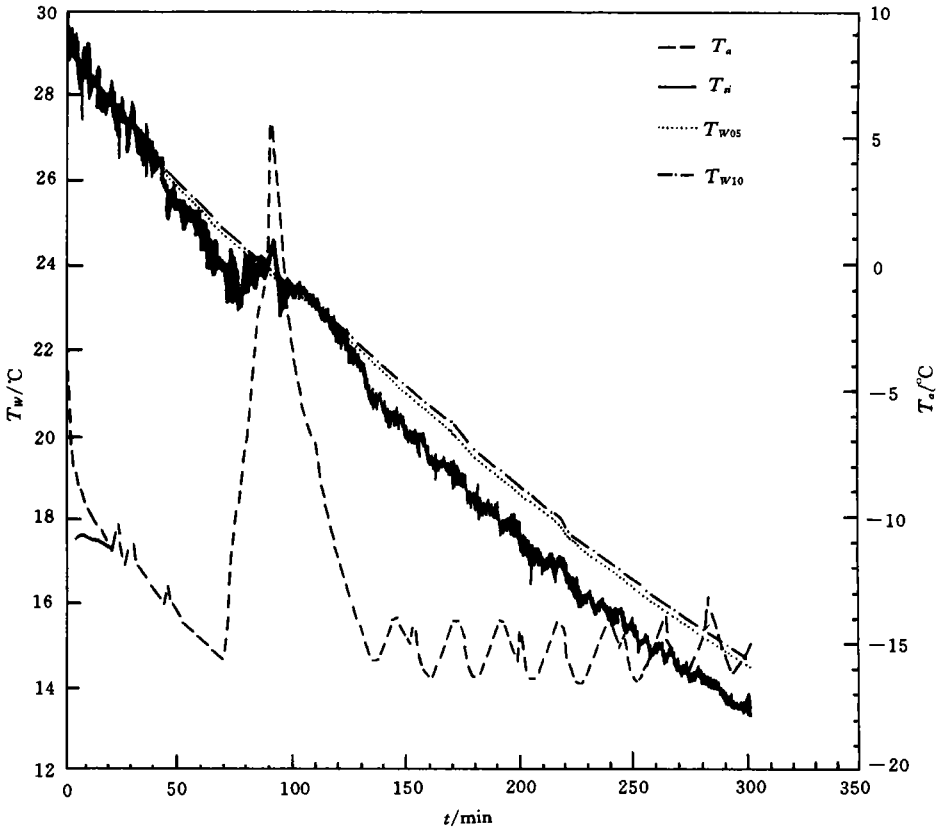


图2 冷/暖空气作用于水面过程中的分层温度演变曲线
 Fig.2 Curves of temperature evolution in each depth during the action of acting cool/warm air on the water surface

表1 模拟测量过程中的环境参数

Tab.1 Environmental parameters for the process simulation measurements

环境参数	量 值
气 压 (mm)	762.0
气 温 (°C)	25.5
相对湿度 (%)	74

可靠性 仪器的测温原理在第一部分业已阐明。对空气冷/暖平流影响水面皮温数据测量的可靠性分析认为,实验室由各种建筑材料所产生的环境热辐射(包括环境物质(物体)材料发射的热辐射和空气发射的热辐射)仍服从普朗克辐射定律,且在本环境条件下,在相对测量中,这种热辐射可近似视为定值。

由分析知,目标(水体)的光谱出射度变化由下式推得:

$$M_{\Delta\lambda rj} = \varepsilon M_{\Delta\lambda bj} \tag{6}$$

其中 $M_{\Delta\lambda bj} = \frac{C_1 \pi^4}{15C_2^4} T_{sij}^4$, 为斯蒂芬-玻耳兹曼定律; $M_{\Delta\lambda rj}$ 为窗区波长 $\Delta\lambda$ 内实际目标(水体)

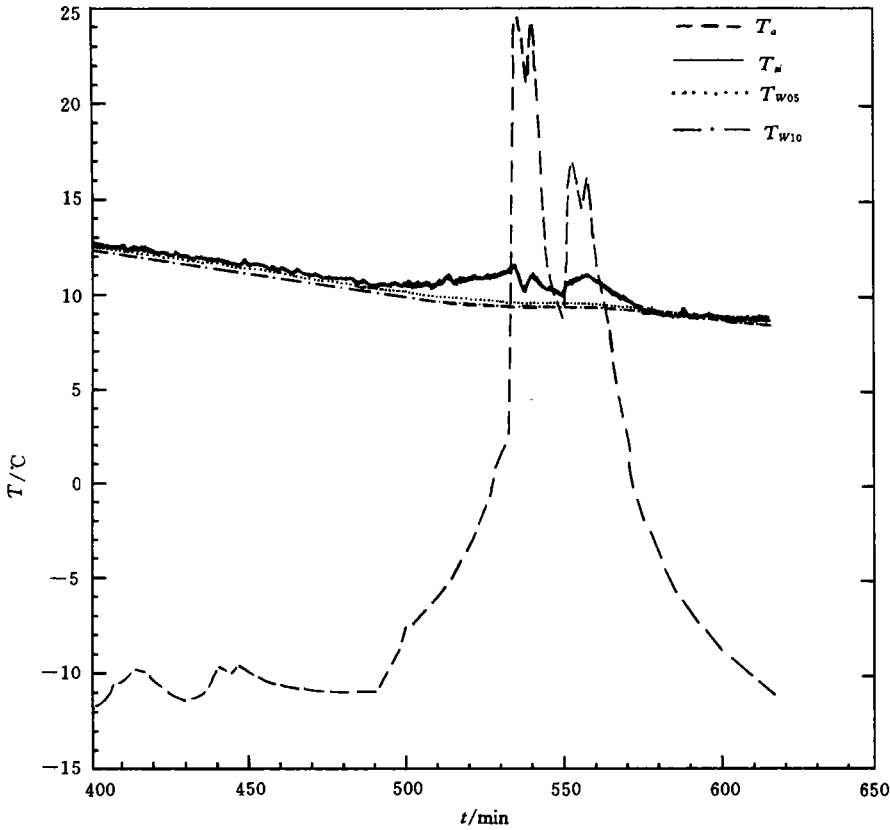


图3 暖空气作用于水面过程中的分层温度演变曲线

Fig.3 Curves of temperature evolution in each depth during the action of warm air on the water surface

的光谱出射度; $M_{\Delta\lambda bj}$ 为同温度下窗口波长 $\Delta\lambda$ 内目标的黑体光谱出射度; $\Delta\lambda$ 为仪器选用的窗区波长; C_1 为第一辐射常数; C_2 为第二辐射常数; ε 为物体(水体)发射率; T_{sij} 为水面皮温值的 j 时间序列; $j = 1(0, 1, 2, \dots, n-1, n)$ 时间序列。

$$\text{当取 } j = 1 \text{ 时, 水面皮温取值} \quad T_{sij} = T_{si1} \quad (7)$$

$$\text{当 } j = 0 \text{ 时, 水温皮温取值} \quad T_{sij} = T_{si0} \quad (8)$$

将(7)和(8)分别代入(6)式, 得:

$$M_{\Delta\lambda r1} = \varepsilon \frac{C_1 \pi^4}{15C_2^4} T_{si1}^4 \quad (9)$$

$$M_{\Delta\lambda r0} = \varepsilon \frac{C_1 \pi^4}{15C_2^4} T_{si0}^4 \quad (10)$$

$$\Delta M = M_{\Delta\lambda r1} - M_{\Delta\lambda r0}$$

$$\text{则} \quad = \varepsilon \frac{C_1 \pi^4}{15C_2^4} (T_{si1}^3 + T_{si0}^2)(T_{si1} + T_{si0}) \cdot \Delta T_{si} \quad (11)$$

其中, $\Delta T_{st} = T_{st1} - T_{st0}$, (11)式给出了目标水体的光谱出射度的时变量与受外界加热后水面皮温变化量、水面皮温间的关系。

实验中,仪器测得的水面在受热或冷却过程中光谱出射度变化值,在经转换、反演后,直接给出了水面皮温的温度变化。这种变化恰巧反映了水面对外加热源或对外界的热响应。

实验前测得红外测温仪的仪器稳定性为 $0.2^{\circ}\text{C} / 13\text{h}$ 。

综上分析表明,这种测量不仅在理论上,而且在技术上是可靠可行的。

2.2.2 水面的温度响应系数和极值 在水面静止、稳定条件下,使模拟的空气冷、暖平流流经水面。因此,局部水面温度(即仪器局部定点所测得的温度)变化纯粹由空气温度平流变化所致。

当空气冷/暖平流过境局地水面时,由于气-水间温差的存在,致使空气和水体间产生热量的交换。其结果是使两者趋于热平衡。这种相互作用的结果可用温度响应系数(R)来表示:

$$R = \frac{\Delta T_{st\Delta t}}{\Delta T_{a\Delta t}} \quad (12)$$

其中, $\Delta T_{st\Delta t} = T_{stj} - T_{stj-1}$ ($j = 0, 1, \dots, j-1, j$); T_{stj-1} 为 t_{j-1} 时刻红外测温仪测得的水面皮温值($^{\circ}\text{C}$); T_{stj} 为 t_j 时刻红外测温仪测得的水面皮温值($^{\circ}\text{C}$); $\Delta T_{a\Delta t} = T_{aj} - T_{aj-1}$ ($j = 0, 1, \dots, j-1, j$); T_{aj-1} 为 t_{j-1} 时刻的气温值($^{\circ}\text{C}$); T_{aj} 为 t_j 时刻的气温值($^{\circ}\text{C}$)。

在此仅讨论水面对空气加热和空气对水面加热的情况。由升、降温两种过程模拟测得的数据分析表明,升温过程中,水对空气的温度响应系数(R)值为正值,且随着水深而变化;在降温过程中, R 为负值,随水深变化规律相同(表2)。其中正值表示升温。分析这种变化机制认为,水面从空气中获得热量,提高了水面温度;相反,负值表示水面失去热量,水面温度下降。随深度的变化主要与块体水温加热的后滞效应和传热有关。

表2 不同过程的温度响应系数值统计

Tab.2 Statistics of temperature responding coefficients for the different experiments

序号	R_1	R_2	R_3	R_4	温度($^{\circ}\text{C}$)	样本数 (n)
升						
1	$+0.100 \pm 0.126$	$+0.040 \pm 0.024$	$+0.062 \pm 0.025$	$+0.053 \pm 0.024$	$-15.4 \rightarrow +8.48$	30
温						
2	$+0.023 \pm 0.029$	$+0.028 \pm 0.032$	$+0.027 \pm 0.025$	$+0.028 \pm 0.026$	$-7.43 \rightarrow +24.32$	111
过						
Σ	+0.123	+0.068	+0.089	+0.081	-	-
程						
$\bar{\Sigma}$	+0.062	+0.034	+0.045	+0.041	-	-
降						
1	-0.036 ± 0.007	-0.012 ± 0.012	-0.002 ± 0.003	-0.004 ± 0.018	$+24.24 \rightarrow +8.85$	31
温						
2	-0.088 ± 0.029	-0.018 ± 0.025	-0.010 ± 0.020	-0.005 ± 0.005	$+16.12 \rightarrow -1.47$	55
过						
Σ	-0.124	-0.030	-0.012	-0.009	-	-
程						
$\bar{\Sigma}$	-0.062	-0.015	-0.006	-0.005	-	-

注: R_1, R_2, R_3, R_4 分别为过程1, 2, 3, 4所计算得到的温度响应系数

由过程模拟测量分析可见,气温升、降过程的开始和终止,水皮温度的升、降与之同位相,只是其振幅有别。分层测得的数据表明,水面稳定条件下,水对气温的响应系数是作

用时间和水深的函数, 随水深的增加而显著降低, 到水下 20cm 处, 这种影响为零。实验测得了它的极值变化, 即当气温从 $-16^{\circ}\text{C} \rightarrow +5.5^{\circ}\text{C}$ 时, 水面皮温 (T_{st}) 从原 $23.11^{\circ}\text{C} \rightarrow 24.68^{\circ}\text{C}$; 而当气温从 $16.12^{\circ}\text{C} \rightarrow -1.86^{\circ}\text{C}$ 时, T_{st} 则从原 $11.04^{\circ}\text{C} \rightarrow 9.34^{\circ}\text{C}$ (图 2, 3)。

3 结论

综上实验室模拟测量结果分析可得如下结论。

3.1 空气暖平流过境水面时, 气温增加 21.5°C , 水面皮温相应升高 1.57°C , 升高约为气温增幅的 7.3%。

3.2 空气冷平流过程, 气温降低 18°C , 水面皮温相应降低 1.70°C , 降低约为气温降幅的 9.4%。

3.3 空气暖平流过境水面时, 水面对气温的平均温度响应系数为 0.046, 水面为吸热过程。

3.4 空气冷平流过程, 水面对气温的平均温度响应系数为 -0.022 , 水面为失热过程。

3.5 水面稳定条件下, 在空气升、降温过程中, 水对气温的响应系数是作用时间和水深的函数, 随水深而降低、变小。

致谢 本工作得到中国极地研究所所长董兆乾研究员、钱嵩林副主任及实验室工作人员在人力、设备方面的大力支持, 袁业立院士对本稿提出了不少建议, 谨致谢忱。

参 考 文 献

- 吴永森, 郑全安, 1994. 水面薄层热结构变性的实验室模拟研究. 海洋学报, 16(4): 55—62
- 张才根, 1989. 红外测温仪仅作比辐射率校正时的误差分析与实验研究. 红外研究, 8(6): 435—440
- 康伦华, 1985. 红外测温仪的设计原理. 红外研究, 4(2): 145
- Andreyev. E, 1969. On the vertical temperature profile near the air-sea interface. Oceanology, 9(2): 287—290
- Sauders P M, 1967. The temperature at the ocean-air interface. J Atmos Sci, 24: 269—273
- Yokoyama R 1993. Air-sea interacting effects to the sea surface temperature observation by NOAA / AVHRR. Int J Remote Sensing, 14(4): 2 513—2 528

**SIMULATING STUDY ON THE INDUCING MECHANISM OF
THE HEAT STRUCTURE VARIATION OF THE WATER
SURFACE THIN LAYER
—EFFECT OF AIR COOL / WARM ADVECTION**

WU Yong-sen, WU Long-ye, JI Yu-qiang, MA Xiao-bing, ZHANG Shi-kui
(*First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao, 266003*)

Abstract The purpose of exploring the inducing mechanism of heat structure variation of the water surface thin layer and studying the effect of environmental factors on the spacial variation of the heat structure, and on the quantitative relationship between them is to provide reference concerned and proof of quantitatively correcting for the retrieval algorithm of satellite sea surface temperature (*SST*).

This paper presents the water surface thin layer structure characteristics measured simultaneously from different layers when the artificial air cool / warm advection passed through the water surface by using the HDG-highly sensitive IR thermometer and routine measuring instruments in the water-tank of the low temperature lab in the Polar Research Institute of China and some other analytical results as well. The analytical data show that the water skin temperature increases by 1.57°C simultaneously during the process of air warm advection through the water surface when air temperature rose sharply by 21.5°C. The increment of the water skin temperature rose by 7.3% above air temperature increments. However, the air temperature dropped by 18°C, and the water skin temperature by 1.70°C in the process of passing cool air advection. The range of the water skin temperature decrements was 9.4% of the air temperature's. From calculation of the data, the mean value of the coefficient of temperature respond gained was 0.046 in the process of warm air advection, while -0.022 in cool advection. The result was that the response ration of increment / decrement of water temperature to air temperature was found to be a function of the interacting time and the depth of water. And the ration would be zero at certain depth and time.

Key words The water surface thin layer Heat structure Inducing mechanism Simulating study Effect of advection

Subject classification number P733.4