

# 水面皮层破坏- 复原过程的 实验室模拟研究\*

吴永森 吴隆业

(国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266061)

**提要** 依据水面红外发射和红外遥感测温原理, 采用 HDG- 高灵敏度红外测温仪和常规测量仪器相结合的方法, 在实验室空气稳定条件下, 模拟测得了水面皮层破坏- 复原(重建)的热力过程和气- 水温差对水面皮层复原过程的影响, 获得了大量的测量数据。数据分析表明, 当气- 水温差从 3.0℃ 变为 11.5℃ 时, 水面皮层破坏可导致皮温增量从气- 水温差 3.0℃ 时的 0.15℃ 变到 11.5℃ 时的 0.45℃, 并发现恢复时间与气- 水温差呈负线性关系。

**关键词** 水面皮层, 破坏- 复原过程, 实验室模拟

**中图分类号** P731.11

水面薄层(包括皮层)物理学特征、特性是物理海洋学和海-气相互作用中的热点研究课题之一, 它的内在物理特性的揭示对进一步分析、计算海-气间能量交换、探索诊断全球气候变化具有重要意义, 多年来一直受到了海洋学家、气象学家、卫星遥感专家们的高度重视(Robinson, 1985; Cracknell, 1992; 杜勇等, 1995)。近 10 多年来, 随着遥感卫星的相继发射, 资料数据应用范围的进一步拓展, 仅靠原有卫星发射前在实验室或现场定标场所建立起的反演算法、模式来反演推算所需的海面温度(余丰宁等, 1993), 在精度上难以满足研究和生产部门的需要。因此, 众多数据和算法还必须经过数据应用专家根据不同实际环境条件和变化进行再修正、再计算。水面皮层的研究就是根据自然环境条件下的海面变化过程所呈现出的不同变化状态而要求人们去精确、细致地揭示这种水面皮层物理特性提出来的。它的研究对卫星海洋学、卫星反演算法, 特别是 SST 反演算法和模式修正研究具有重要意义。迄今, 已进行了大量的研究(Ewing *et al.*, 1960; McAlister *et al.*, 1974; Wu *et al.*, 1993; Sunders, 1967; 吴永森等, 1994; 吴永森, 1995)。水面薄层热结构变化的诱发机制研究也取得了进展(吴永森等, 1999)。尽管如此, 有关皮层破坏-复原过程、恢复时间等问题仍未所知。为了从微尺度上进一步分析海面动力和微动力过程对海面热状态的影响, 进而对大、中尺度大气对海洋, 海洋对大气的热输送, 通量变化以及全球尺度的气候变异、变化的影响进行更深入地研究, 复原过程(即从破坏到重建的过程)、恢复时间(即水面皮层从破坏到恢复到原状态所需要的时间)是优先考虑的重要研究内容。

\* 国家自然科学基金委员会重点资助项目, 49336070。吴永森, 男, 出生于 1954 年 2 月, 研究员, E-mail: yswu@qf-public.sd.cninfo.net

自然条件下的水面皮层始终暴露于水体的最上层,并且直接接触于大气的底层,因此它的变化也直接或间接地受制于大气环境变化的影响。这种影响和变化在自然条件下往往是综合环境要素作用的结果,难以确定某单一要素在其中的作用或严格的区分开来。实验室可控条件下进行模拟测量乃是一种解决该问题有效、可行的研究方法。为了弄清水面皮层破坏-复原过程与气-水温差间的量化关系,本研究首次对它进行模拟测量,旨在为人们进一步了解发生在水面薄层内热过程变化所特有的时间和空间特征提供基础依据和研究参考。

## 1 模拟测量

### 1.1 测量方法

HDG-高灵敏度红外测温仪实际上是一种用于遥感测温的红外辐射计。它接收被测目标发射的红外辐射,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快速、连续、非接触、被动地测量各种物体的表面温度。仪器的主要技术参数见表 1。

表 1 HDG-高灵敏度红外测温仪技术参数

Tab. 1 The technical parameters of the HDG-highly sensitive IR thermometer

参 数	指 标	参 数	指 标
响应光谱范围	8-14 $\mu$ m	测温精度	1 $^{\circ}$ C $\pm$ 1%
视场角	4.7	模拟输出	10mV/ $^{\circ}$ C
噪声等效温差, NETD	$\leq$ 0.01 $^{\circ}$ C	发射率 $\epsilon$ 修正	0.01-1.00 连续可调
响应时间	0.25s(达终值的 90%)	环境辐射温度 $T_a$ 修正	-50-80 $^{\circ}$ C 连续可调

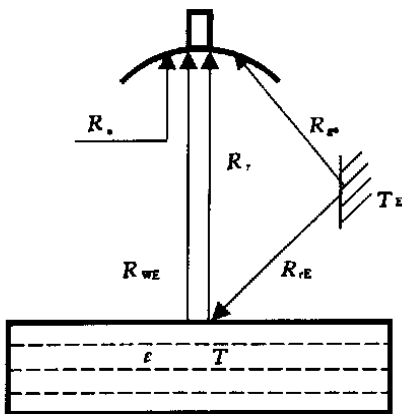


图 1 发射辐射测量原理示意图

Fig. 1 The principle scheme of measuring the emitted radiation

分析知(图 1),红外测温仪探头接收到的总的辐射( $R_r$ )可用下式表示

$$R_r = R_{we} + R_r + R_{ge} + R_a \quad (1)$$

式中, $R_{we}$ 为目标水体发射的辐射; $R_r$ 为目标反射的环境辐射; $R_{ge}$ 进入探头的环境辐射; $R_a$ 为进入探头的空气辐射。

设目标水体实际温度为  $T$ 、发射率为  $\epsilon$ 、反射率为  $r$ ,环境实际温度为  $T_E$ 、发射率为  $\epsilon_E$ ,环境多次反射来自目标辐射的温度为  $T_{rE}$ ,空气温度为  $T_a$ 、发射率为  $\epsilon_a$ ,

$$R_{we} = \epsilon T \quad (2)$$

$$R_r = r \epsilon T E \quad (3)$$

$$R_{ge} = \epsilon_E (T_E + T_{rE}) \quad (4)$$

$$R_a = \epsilon_a T_a \quad (5)$$

将式(2)-(5)式代入式(1)得:

$$R_r = \epsilon T + (r + 1) \epsilon_E T_E + \epsilon_E T_{rE} + \epsilon_a T_a \quad (6)$$

将(6)式取对时间( $t$ )的偏微分得

$$\frac{\partial R_{ir}}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial T}{\partial t} + (r+1) \varepsilon_E \frac{\partial T_E}{\partial t} + \varepsilon_E \frac{\partial T_{rE}}{\partial t} + \varepsilon_a \frac{\partial T_a}{\partial t} \quad (7)$$

(7)式给出了全部影响要素在所接收辐射中的作用。

在本次模拟测量过程中,  $T_E$ 、 $T_{rE}$ 和 $T_a$ 保持恒定(即在保持周围环境不变的条件下,来自周围环境的辐射和经目标反射进入探头的环境辐射及空气温度为定值),不随时间而变化,所以(7)式中 $\frac{\partial T_E}{\partial t} = 0$ ,  $\frac{\partial T_{rE}}{\partial t} = 0$ ,  $\frac{\partial T_a}{\partial t} = 0$ 。将式(7)简化为:

$$\frac{\partial R_{ir}}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8)$$

(8)式表明,在本次模拟实验中,由HDG-高灵敏度红外测温仪测得目标水体发射的红外辐射的时间变化就是目标水体皮层真温的变化。

## 1.2 模拟系统

模拟系统包括水槽和测量仪器。水槽为双层套装装置,中间加充阻热系数较大的泡沫发泡材料,以最大限度地减少因底部与地面、侧面与空气接触引起的二次加热或冷却。水槽内空间几何尺寸为 $1000\text{mm} \times 1000\text{mm} \times 350\text{mm}$ ,充水深度为 $300\text{mm}$ 。

测量仪器包括:HDG-高灵敏度红外测温仪、气温表、气压计、湿度计、记录装置(微机取样,记录)。其中,HDG-高灵敏度红外测温仪技术指标已由表1给出,而高精度水温表、气温表、气压计和湿度计为水文、气象常用测量仪器,符合海洋观测规范要求和国家标准。

## 1.3 过程模拟测量

自然条件下的水面皮层热状态破坏可由众多外界因素引起,如波浪破碎、气泡爆炸、外动力撞击等等。尽管导致水面皮层破坏的外因不同,但其后置物理过程则是相同的。也就是说,原水面皮层热状态被破坏后,新的水面皮层在当时的气-水热力环境下必然经过破坏-恢复(重建)-再平衡的过程,新的水面皮层形成。为了确切地了解这一物理过程,对此进行了模拟测量。实验中,在可控制条件下,对不同水温条件下(如水温高于气温、水温低于气温和水温等于气温3种不同情况)的水面皮层热状态破坏-重建过程进行了模拟重复测量。

## 2 测量结果

根据上述测量方法和模拟过程设计,测得了不同水温条件下水面皮层从破坏到重建(复原)的皮温演变过程(图2),其中横坐标为时间(min),纵坐标为由HDG-高灵敏度红外测温仪测得的水面皮温, $T_{ir}$ ,( $^{\circ}\text{C}$ ),单位间隔为 $0.05^{\circ}\text{C}$ ;由图2可以看出,a、b、c、d4个模拟过程中不同的气-水温差对水面皮层中的温度恢复过程有其直接的影响。这主要表现在恢复时间上。也就是说,温差越小,其水面皮层被破坏过程欲恢复到破坏前的温度水平所需要的时间就越长。

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 皮层破坏-复原过程的皮温演变

水面薄层通常指在水面 $0-10\text{cm}$ 间。而水面皮层,则位于水面薄层之顶层,在量级上

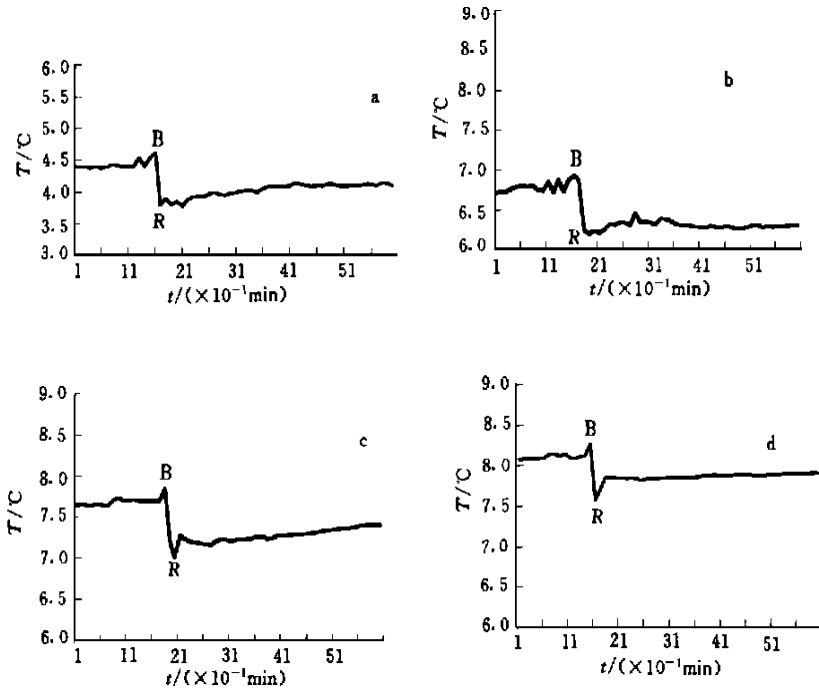


图2 不同初始条件下的水面皮层破坏-复原过程的温度演变

Fig.2 Curve of water skin temperature evolution from breaking to recovering under the different initial conditions

a、b、c、d 分别表示不同过程。B 示水面皮层破坏; R 水面皮层恢复

(记录仪走向由左向右, 走纸速度为 10mm/min)

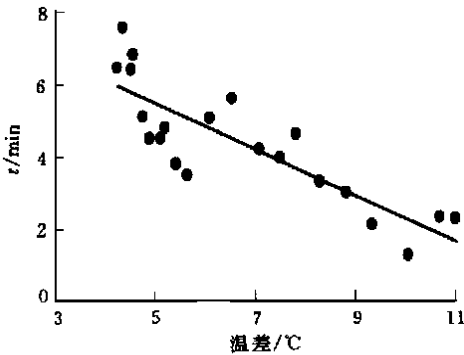


图3 恢复时间(t)随温差(ΔT<sub>a-ir</sub>)的变化

Fig.3 Variation of recovering time (t)

with air-water temperature difference (ΔT<sub>a-ir</sub>)

ΔT<sub>a-ir</sub> = T<sub>a</sub> - T<sub>ir</sub>, 温差; T<sub>a</sub> 示气温 (°C);

T<sub>ir</sub> 示水面皮温 (°C)

• 实测数据; — 回归线

为微米量级。这一层无论在何等条件下始终弹性存在或覆盖于自然水体(包括海水、湖水和河水等)顶部。它的物理变化主要受大气和水体较深层或较上一层(指空气上一层)热结构影响。其变化基本上反映和决定了气-水间热交换状况,所以只要能有效地监测到它的时间变异,就可以准确地对气-水间热通量进行计算。

分析认为,用来揭示皮层热状态破坏-复原过程的主要物理参数有:(1)温差(由皮层正常状态到破坏状态所呈现出的温度时间变量);(2)恢复时间(从破坏到复原所经历的时间)。分析测量结果由图2知,皮层热状态破坏-复原过程虽受制于多种环境要素,但主要取决于气-水温差(ΔT)

理论分析认为:

$$\Delta T_r = T_r(t_B) - T_r(t_0) < 0, \text{ 当 } T_a < T_w \quad (9)$$

$$\Delta T_{ir} = T_{ir}(t_B) - T_{ir}(t_0) > 0, \text{当 } T_a > T_w \quad (10)$$

其中,  $T_a$  为气温;  $T_w$  为水温(5cm 以下);  $T_{ir}(t_B)$  为由红外测温仪测得的皮层被破坏时刻的皮温;  $T_{ir}(t_0)$  为由红外测温仪测得的皮层被破坏前(初始)时刻的皮温。式(9)的结果已由本实验所证实, 而式(10)结果有待证实。

其次, 皮层破坏所造成温差的大小, 取决于气- 水温差  $\Delta T$  值变幅的大小。由实验数据证实, 当  $\Delta T$  从  $3.0^\circ\text{C}$  变到  $11.5^\circ\text{C}$  时, 皮层温差从气- 水温差  $3.0^\circ\text{C}$  时的  $0.15^\circ\text{C}$  变到  $11.5^\circ\text{C}$  时的  $0.45^\circ\text{C}$ 。

### 3.2 恢复时间( $t$ )随温差( $\Delta T$ )的变化

$$\text{物理分析认为:} \quad t = t(\Delta T, F; \tau, \kappa, \nu, g) \quad (11)$$

式中,  $t$  为恢复时间;  $\Delta T$  为气- 水温差( $T_a - T_w$ );  $F$  为外界对水面冲击力;  $\tau$  为水表面张力;  $\kappa$  为动力表面张力;  $\nu$  为流体运动粘性;  $g$  为重力加速度。

实验中因选用的实验液体一定, 故  $\tau, \kappa, \nu, g$  一定, 又因在测量中维持  $F$  不变, 所以  $t$  仅是  $\Delta T$  的函数。

由实验数据进行统计回归得以下经验模式

$$t = 8.6589 - 0.6394 \Delta T \quad (12)$$

计算得出 PEARSON 乘积矩相关系数的平方为  $R^2 = 0.7197$ 。

### 3.3 讨论

控制和影响水面皮层热状态破坏- 复原物理过程和复原时间的因素很多, 在实验室模拟研究中, 不可能一次将所有的影响要素全部考虑进去。分析表明气- 水温差则是影响该过程的主控要素。为此, 本研究仅考虑气- 水间温差产生的影响。在实验中, 实验液体选用的是自来水, 并在模拟重复实验中,  $\tau, \kappa, \nu, g$  均为常数, 而  $F$  是在同等条件下进行, 且保持恒定。因此, 调整和控制水温、气温变化, 测得了不同气- 水温差条件下, 水面皮层破坏- 复原过程的时间变量。

自然界中, 这种皮层热状态破坏- 恢复过程随处可见, 如在大洋区, 海面的风浪无休止地生、消运移过程迫使与大气相接触的水面皮层也在不断地伴随上述过程处在破坏- 重建的反复交替之中。在这种自然条件下, 这种破坏- 重建过程很大程度上依赖于外力, 如波浪破碎的冲击和局地的气- 水温差。在这种水面皮层热状态破坏- 复原过程中, 大气底层冷、暖程度对水面皮层的重建过程的效应是本研究模拟证实的重点。测量结果(图2)清楚地表明, 皮层的破坏、恢复的量值幅度上的变化受制于气- 水温差的变幅。分析同步环境监测数据可知, 当大气底层温度高于水温时, 大量的高热空气分子不断地进入水面皮层, 外力的作用又加速了这一过程的进程。在这一过程中, 进入水面皮层的高热空气分子, 使水面皮层迅速地获得热量, 温度升高; 相反, 失去热量, 温度降低。气- 水温差的存在加快了因皮层破坏所致温度结构破坏的恢复。随着温差的不断加大, 水面皮层温度结构破坏- 复原过程进一步加快, 恢复时间进一步缩短。反之, 则复原过程变缓, 加长。这种缓变和速变的过程已由本实验得到了证实, 并给出了定量关系。

水面皮层的温度结构被破坏之后, 其恢复过程的确受到气- 水温差的影响, 恢复的快慢取决于气- 水温差的大小。由图3可见, 当气- 水温差为  $\Delta T = 3.5^\circ\text{C}$  时, 所需恢复时间  $t = 5.5\text{min}$ , 而当  $\Delta T = 11.5^\circ\text{C}$  时, 则有  $t = 1.0\text{min}$  左右。恢复时间的变化很明显是与高热

气体分子进入水表层有关。

#### 4 结论

实验室水面皮层热状态破坏-复原过程的模拟测量获得了不同环境条件下多种过程的数据,这些数据对进一步认识过程变化机制和进一步分析海-气相互作用,探索、预测全球变暖的数值化模拟具有一定的参考价值。数据分析可得如下几点结论。

4.1 当气-水温差从  $3.0^{\circ}\text{C}$  变到  $11.5^{\circ}\text{C}$  时,由皮层破坏可导致温差变化从  $3.0^{\circ}\text{C}$  时的  $0.15^{\circ}\text{C}$  变到  $11.5^{\circ}\text{C}$  时  $0.45^{\circ}\text{C}$ 。

4.2 恢复时间与气-水温差呈负的线性关系,且满足  $t = 8.6589 - 0.6394 \Delta T$

#### 参 考 文 献

- 吴永森,吴隆业,纪育强等,1999. 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. 海洋与湖沼, 30 (6): 687—694
- 吴永森,郑全安,纪育强等,1994. 水面薄层热结构变性的实验室模拟研究. 海洋学报, 6(2): 55—62
- 吴永森,1995. 海洋遥感观测中的海洋皮层效应. 中国科协第二届青年学术年会文集. 北京: 科学技术出版社, 175—179
- 杜 勇, Robinson I S, 1995. 英国北海区域卫星遥感与船测海面温度场的比较. 海洋与湖沼, 26(5): 474—479
- 余丰宁,蔡启铭,徐勇积,1993. 太湖水温模型和气象参数对水温的影响. 海洋与湖沼, 24(4): 393—399
- Robinson I S, 1985. Satellite Oceanography. London: Ellis Horwood Limited, 121—150
- Cracknell A P, 1992. Space Oceanography. London: World Scientific, 76—101
- Ewing G, McAlister E D, 1960. On the thermal boundary layer of the ocean. Science, 131: 1374—1376
- McAlister E D, Meleish W, 1974. A radiometric system for airborne measurements of the total flows from the sea. Applied Optics, 9 (12): 2699—2705
- Wu Yongsen, Zheng QuanAn, Ji Yuqiang *et al*, 1993. Laboratory measurements of wind-induced temperature drop in the water surface microlayer. Proceedings of the 93<sup>rd</sup> PACON China Symposium, Australia. Queensland; James Cook University of North Queensland, 550—559
- Sunders P M, 1967. The temperature at the ocean-air interface. J Atmos Sci, 24: 269—273

## LABORATORY SIMULATION OF THE BREAKING-RECOVERING PROCESS OF THE WATER SURFACE SKIN LAYER

WU Yong-Sen, WU Long-Ye

(*First Institute of Oceanography, State Ocean Administration, Qingdao, 266003*)

**Abstract** Based on the air-water temperature difference between air temperature and water temperature under the water surface skin layer, affecting temperature variations of the Water Surface Skin Layer(WSSL) from breaking to recovering, the thermodynamic process of WSSL from breaking to recovering and effect of the air-water temperature difference on its recovering process under the air stable condition were simulated and measured in the laboratory by the HDG-highly sensitive(IR) thermometer and other routine instruments. The measured data showed that breaking of WSSL could increase water skin temperature from 0.15 °C when the air-water temperature difference was at 3.0 °C(air temperature is higher than water temperature) to 0.45 °C at 11.5 °C(air temperature is also higher than water temperature). At the same time, the negatively linear relationship between the recovering time of the water skin temperature and the air-water temperature difference is identified.

**Key words** Water surface skin layer, Breaking-recovering process, Laboratory simulation

### 欢迎订阅 2002 年《水利渔业》

《水利渔业》是由水利部中国科学院水库渔业研究所主办的水产技术刊物, 主要栏目包括: 研究与探索、名特优新、增殖养殖、营养与饲料、病害防治、捕捞加工、资源与环境、水产综述、渔业经验、水产信息等。本刊以实用技术为主, 技术与经济并重, 兼顾信息交流, 对水产科研、渔业开发、技术推广、知识更新、渔业致富有实用价值, 适合广大科研、推广、教学、生产和管理的水产工作者阅读。

本刊系中国水产核心期刊, 湖北省一级优秀期刊, 水利部优秀期刊, 全国水产系统优秀期刊, 中国自然科学核心期刊, 《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》全文收录, 《中国学术期刊综合评价数据库》来源期刊全文收录。本刊连续三次被评为湖北省优秀期刊。本刊为双月刊, 大 16 开本, 每期 56 页, 国内外发行, 国际标准刊号 ISSN1003-1278, 国内统一刊号 CN42-1247/S, 欢迎广大新老朋友到邮局订阅。邮发代号: 38-76。每期定价 5 元, 全年 6 期 30 元。

欢迎订阅, 欢迎各企事业单位刊登广告。

本刊欢迎读者汇款到编辑部邮购。汇款地址: 武汉市武昌雄楚大街 578 号《水利渔业》编辑部, 邮政编码: 430079。联系电话: 027-87803555