

26-34 遥感在水面薄层研究中应用的可行性
分析及其验证

吴永森

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266003)

X834

摘要 本文从遥感测温的基本原理出发, 结合发生在水面热力薄层内热结构变化的物理特征, 分析了遥感技术用于监测水面薄层热结构垂直温度廓线与变化的可行性。据此, 在气-水热力薄层的实验室模拟研究中得到了应用与验证, 经实验证实这种新技术与常规手段结合可为水面热力边界层研究提供可靠的数据来源。由此认为, 这一方法的研究将在微尺度海面过程、全球气候变化和水-气间能量通量研究中有广阔的推广应用价值。

关键词 水面薄层, 遥感监测, 可行性分析, 海洋

近年来, 全球气候变暖问题引起了世界各国政府、科学家和人民的广泛关注。影响这种全球气候变暖问题的焦点, 除集中在二氧化碳增高, 大气臭氧洞变大外, 更多地集中在海洋对大气、气候的调制、影响上。因而, 大气对海洋、海洋对大气的通量研究成了一热门的研究课题。在这一课题的研究中, 首先遇到的第一难题, 便是如何解决、获取、填补浩瀚的海洋上观测资料、数据的不足。解决的方法之一就是组织耗资巨大的全球海洋大气通量计划。当然, 这对解决其通量变化模式是极其有用的, 但倘若想由此解决长期监测这一变化的根本问题, 无疑是杯水车薪。然而人们不仅要问仅靠一、二次大型国际联合计划, 能解决其根本问题吗? 若不然, 政府又那有如此雄厚的资金投入到这广阔无垠的海洋之中! 为此人们就不得不寻找其它的可取而代之的研究方法和途径。卫星遥感技术的发展展现了担此重任的广阔前景, 是弥补资料之不足, 提供长期监测数据用以该课题研究的主要途径之一。为了探索这一方法的可行性和实用性, 我们将以此在水面薄层研究中的应用加以论述和证明。

遥感技术从 60 年代始, 发展到现在已日臻完善。就用于海洋研究的卫星而言, 从第一颗海洋卫星 (Seasat-A) 到目前正在空间运行的 ERS-1 和 SPOT 卫星等所获资料在海洋研究中取得了令人瞩目的成果^[1,4,5,7,9,12]。在这些业务性应用卫星中, 星载各种传感器, 如微波仪器, 包括合成孔径雷达、微波散射计、微波辐射计等, 以及红外传感器, 如红外辐射计等各有所长, 在全天候、全天时的观测中, 它们相互弥补, 发挥着积极的作用。如 ERS-1 卫星上装载由英国研制的红外辐射计, 可以观测宽度为 500km, 间隔为 700km 的地球表面上两个弯曲的条带。将这两条幅带的数据组合起来, 能准确复原卫星测得的辐射结果, 并进行精确的大气校正。法国研制的微波辐射计是两波段、天底观测, 能准确地复原大气中总的水汽含量, 在解译海面温度

时大大提高了大气改正的精度^[10]。所有这些数据为小尺度海洋现象、海洋大气热输送模拟等研究提供了可能。

遥感技术是一种综合探测技术,是一种获取地物(包括海洋在内)信息的有效手段。然而,它给出的又是一种表现特征信息,如红外辐射计获取的是水面皮层约 20 μm 深海水发射的红外辐射量,而微波辐射计测得的是海表水发射的微波辐射。目前所有用于海洋学研究的各种图像及数据资料经各种算法修正后,认为是实际实况数据。确切地讲,它并不是严格的实况数据,因为各种修正算法本身所具有的偏差会导致资料产品仍有一定的偏差存在。影响这种偏差的原因之一是对水面热力边界层各物理过程作用机制缺乏了解所致^[11]。当然,随着研究的深入,修正方法的进一步改进,使这种资料数据越来越趋近于实况数据。

自然界存在的大、中尺度的海—气相互作用过程,都是先通过微尺度作用过程,逐步发展、演化而成。在气—水间通量计算中,研究海洋对大气的通量输送,最有意义的则是研究过水面薄层(水下 0~10cm)内热通量的变化变异。因为这一薄层内热通量的增减变化直接决定了对大气的输送,其总效应进而影响大气和气候变化。分析表明,与常规的海洋监测相比,这种水面薄层(有时亦称水面热力边界层)的空间尺度是微尺度的。当然,其变化特征在空间和时间上也往往是一种微尺度变化过程。在空间尺度上,一般在毫米到厘米层内,其温差范围约在十分之几度或更大一些^[6];而在时间上,这种变化往往是秒的量级,最长也可能达分的量级^[2]。正因如此,由于常规测试仪器的响应时间、分辨力,以及空间固定、控制等往往远大于或超出水面热力薄层本身所具有的空间和时间尺度,这就造成常规测量方法、手段的不可行性。近年来,随着遥感技术的不断发展,更多的实用仪器不管在响应时间、分辨力等方面均在不同程度地接近或满足这种研究的需要。因此,作者认为唯一行之有效的方法就是遥感与常规测量相结合,即利用各自的优势和互补性,对这种微尺度水面薄层的垂直分层热结构进行测量,以揭示不同环境条件下发生变化的机制,建立各种物理或数学模型,从而用实测的数据对所建立的模式进行验证。同时对目前各种实用算法所产生的偏差或误差进行修正。

下面将从遥感的物理基础入手,分析用遥感监测技术对水面薄层热结构实施测量的可能性和可行性,以及由此进行的实验验证。

1 遥感测量原理

1.1 水面微层的微波发射测量

水面微层水分子在微波波段的热发射服从普朗克辐射定律。对微波辐射测量而言,其光谱出射度(或亮温度) B 可表示为:

$$B_f(\theta, \phi) = \frac{2hf^3}{C^2} \frac{\varepsilon(\theta, \phi)}{\exp(hf/kT) - 1} \quad (1)$$

其中 $f=c/\lambda\text{Hz}$ 。

在微波频率上, $hf/kT \ll 1$, 且

$$\exp \frac{hf}{kT} \approx \frac{hf}{kT}$$

因此,可用瑞利—金斯式表示:

$$B_f(\theta, \phi) = \frac{2kT\varepsilon(\theta, \phi)}{\lambda^5} \quad (2)$$

即亮温度与发射体的物理温度(T)成正比。

从微波天线接收的辐射来看,若天线的有效面积为 A_e ,由于有方向性响应,其增益为 $A_e G(\theta, \phi)$ 。对波长为 λ 的辐射,该面积为:

$$A_e = \frac{\lambda^2}{\int_{4\pi} G(\theta, \phi) d\Omega} \quad (3)$$

天线也接收仅处于一种极化状态的能量,即截取仅占半数可能的能量通量。因此,在 f 和 $f + \Delta f$ 间的带宽内,非极化辐射的亮温度 $B_f(\theta, \phi)$ 照射的天线所接收的总功率为:

$$P = \frac{1}{2} A_e \int_f^{f+\Delta f} \int_{4\pi} B_f(\theta, \phi) G(\theta, \phi) d\Omega df \quad (4)$$

如果相对于天线方向(θ, ϕ)的发射体具有 $T(\theta, \phi)$ 温度,则可根据瑞利—金斯式(2)将式(4)写为:

$$P = \frac{k A_e \Delta f}{\lambda^2} \int_{4\pi} T(\theta, \phi) \varepsilon(\theta, \phi) G(\theta, \phi) d\Omega \quad (5)$$

式(5)中,已假设带宽 Δf 相对于 λ 很窄,带宽上的 T, ε 和 G 呈线性变化,那么式(5)取平均值,发射体的亮度温度为:

$$T_B(\theta, \phi) = \varepsilon(\theta, \phi) T(\theta, \phi) \quad (6)$$

如果 T_B 不随方向变化,则天线接收的功率为:

$$k T_B \Delta f A_e \lambda^{-2} \int_{4\pi} G(\theta, \phi) d\Omega = k T_B \Delta f \quad (7)$$

然而,由于大气和被观测海面温度的多变性, $T_B(\theta, \phi)$ 通常是随方向而变化的。所以,我们按下式表示天线接收的功率:

$$P = k T_A \Delta f \quad (8)$$

式中 T_A ——天线温度。

如果全方向的环境辐射与亮度温度(T_B)是均匀的,则 $T_A = T_B$, 否则, T_A 与 T_B 有如下关系:

$$T_A = \frac{\int_{4\pi} T_B(\theta, \phi) G(\theta, \phi) d\Omega}{\int_{4\pi} G(\theta, \phi) d\Omega} \quad (9)$$

由于天线接收的亮度温度 $T_B(\theta, \phi)$ 包含了被观测目标以外辐射源的贡献,因此,必须进行大气、太阳辐射等修正方可提取目标真实的物理温度。

1.2 水面微层的红外发射测量

温度为 $T(k)$ 的物体,其热发射的光谱特性同样可用普朗克辐射定律来描述:

$$M_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} \quad (10)$$

式中 M_{λ} ——光谱出射度($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$)

λ ——波长(m)

$C_1 = 3.74 \times 10^{-6} (\text{W} \cdot \text{m}^2)$

$C_2 = 1.44 \times 10^{-2} (\text{W} \cdot \text{K})$

根据水面薄层的热结构和物理状态分析认为,是分子热传导过程导致薄层内大部分温差处于顶层毫米层内。这种热输送能维持其传导系数很小,而梯度很大的温度^[8]。接近海面表层的水分子受来自下层和上层交汇叠加的综合热效应影响,所发射的红外热辐射真实地反映了层深分子的热状态,这种热状态所表征的辐射特征也就决定了观测到的亮度温度的大小、强弱。

对红外发射来讲,海面可视作各向均匀发射的朗伯面,所以可表示为:

$$L_{\lambda} = M_{\lambda} / \pi \quad (11)$$

因此,波长 L_{λ} 一定时,利用式(11)和式(10)便可确定 T 。

又因式(10)应用于一个完全的发射体,所以,在这种条件下, T 为该波长上的表观温度,如果 ϵ 为已知,则:

$$M_{\lambda(\text{完全的})} = \frac{\pi L_{\lambda(\text{观测的})}}{\epsilon(\lambda)} \quad (12)$$

因此,将式(12)和式(10)一并使用,即可提取真实温度。当然,在实际应用中还必须进行发射率(ϵ)和观测角等修正。

实验室条件下,无需考虑大气效应的影响。只要适当地改造实验的环境条件,屏蔽或滤掉环境辐射所引起的未知辐射效应,就可以利用上述方法提取所测目标的真实温度^[14]。

2 遥感测量的可行性分析

2.1 全天候、全天时监测

海—气相互作用、能量、热量通量计算、全球气候变化研究,需要稳定、长期、大面积实况监测数据,而卫星传感器是满足这一需要的唯一可靠资料来源和保证。从各星载传感器的特点分析可知,微波传感器具有独特的全天候观测能力。由于它的工作波长在 1.5~300mm 间(即频率为 1~200GHz),可垂直观测表层海水在微波波段所发射的海面热辐射,大气发射的微波辐射,海面反射的大气向下辐射,以及太阳辐射和深空的背景辐射。在相当长的波长上,不存在大气、气溶胶、雾、尘埃或云层中微小水滴引起的散射。正由于它具有良好的穿透云雾的能力,这对大部时间海洋上空被云雾遮盖,可见光、红外传感器无力提供现场观测数据时,它是提供固定的资料数据源的唯一保证。因此,这种全天候特性已在空间测量中得到了广泛的应用。不过,红外传感器是被动地接收来自目标发射波长 3~4 μm 谱段上的红外辐射,与可见光传感器相比,它亦具有很强的全天时能力,并不受太阳高度角的影响,且空间分辨力较高,经各种算法修正后,其精度可达 0.5 $^{\circ}\text{C}$,有时甚至更高,但无穿透云雾的能力,易被云雾“污染”。在晴空的昼夜和海洋上空,可提供稳定可靠的资料数据。

2.2 多谱段分层性

海—气相互作用中通量的计算强烈地希望得到现场实况的垂直分层数据的支持。多种传感器的相互补充测量为这一研究目的提供了最基本的数据保障。

从海面发射的皮层深度分析认为,就微波频率而言,在导电介质中,高频电信号穿透物质的深度是很有限的。穿透深度与介质的辐射波长有关,也与电导率有关。因此,微波辐射对海洋的穿透深度取决于辐射频率以及海水的温度和盐度。有人曾定义皮层深度(δ_e)为电磁辐射功率穿透到介质中而减少 $\exp(-2)$ 的距离。认为皮层深度是发射辐射有贡献水深的极好指标^[11]。然而,这种发射辐射的强度是由温度所控制的。

实验表明,电磁波穿透皮层深度随工作频率而变化。当频率为 20GHz 时, δ_e 大于 1mm;当频率低于 2GHz 时, δ_e 接近 1cm(图 1)。随盐度的变化分析指出,当盐度降低时, δ_e 进一步增加,当频率为 1.43GHz 时,淡水中的 δ_e 约为 10cm(图 2)^[12]。

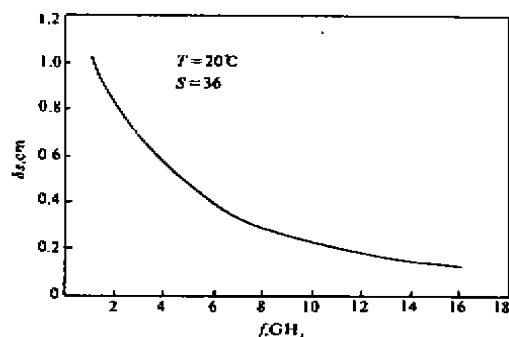


图 1 海面温度为 20℃, 盐度为 36 时,
电磁波穿透深度随微波频率的变化

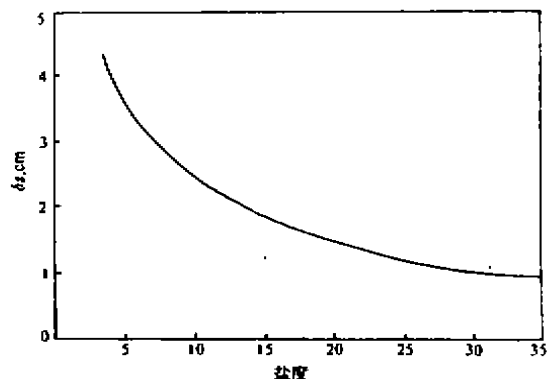


图 2 微波频率为 1.4GHz 时,
电磁波穿透深度随海水盐度的变化

正由于微波波段内,微波仪器使用的工作频率不同,穿透的深度也不同。因而,我们可以根据这一特点,以不同频率仪器获取不同深度的回波辐射进行分层测量,进而提取水面热力边界层内特定分层深度上的温度值。

而红外辐射计是被动地测得目标发射的红外热辐射,使用的波段为 $8\sim 14\mu\text{m}$ 。上节已对它的测量原理及反馈方法进行了讨论,在此不再赘述。从海水水分子的发射辐射进行实验测量业已证明,红外辐射计所测得的红外热辐射正是水皮 $20\mu\text{m}$ 层水分子发射的出射辐射,经转换和反演可给出所测得的实际皮层 $20\mu\text{m}$ 的水温值。因此,红外辐射计所给出的实测温度可直接引入研究之用。

分析不同波段的微波和红外探测器所对应的测量深度(穿透深度)(表 1),海水皮层水分子在微波和红外谱段的辐射发射特性,以及微波、红外传感器的监测特性,可以认为利用微波、红外遥感器探测能力的互补性,用多谱段遥感仪器配加一定的常规测试仪器,对水面热力边界层进行分层测量是可行的。

2.3 同步性

海—气相互作用,通量计算要求同步性很强的实况分层观测数据。水面热力边界层实验室模拟测量研究表明,水面薄层热结构从破坏到重新恢复约需 10~15s 的时间^[3]。因此,为满足研究的需要,必须进行同步或准同步测量。遥感仪器恰恰可满足此种要求。分析表 2 可见,现有的微波辐射计和红外测温仪具有较短的响应时间,因而所提供的数据,在分析中具有较好的可比性。加之,两种仪器与微机联机取样,可以给出较详细的连续取样记录。这进一步说明,采用不同频率或波长的探测仪器对水面热力边界层进行分层测量,在理论和技术上都是可行的。

表 1 测量仪器的可测深度

仪器名称	波段(μm)	可测深度(mm)
机载辐射计(主动)	3.4~4.1	0.075
	4.4~5.1	0.025
红外测温仪(被动)	8~14	0.020
普通水温表(接触式)		>50

表 2 各传感器波长、频率及响应时间

传感器	波长(μm)	频率(GHz)	响应时间
Nimbus 星载 多通道微波辐射计 (SMMS)		6.6GHz	126ms
	10.7		62
	18.0		62
	21.0		62
	37.0		30
HDG 高灵敏度红外测温仪	8~14		0.25s
微波辐射计	3cm	10.5GHz	1s
	1.35cm	22.2GHz	0.3s
	8mm	35.7GHz	8s

3 在气—水热力边界层研究中的应用验证

综上所述业已表明,利用多谱段微波或红外辐射计,配加常规测试仪器对水面热力边界层(一般认为其厚度在水面到 10cm 层内)作垂直热结构的分层测量,在理论和技术上是可行的。在实际测量中,有 3 种组合方案可供采用:①红外+常规;②微波+常规;③微波+红外+常规。方案中,微波指微波谱段的传感器,红外指红外谱段的传感器,而常规则指海洋学常规使用的测试仪器。

上述 3 方案可根据实验条件、环境条件、实验目的的不同而任选其组合方案进行实施。

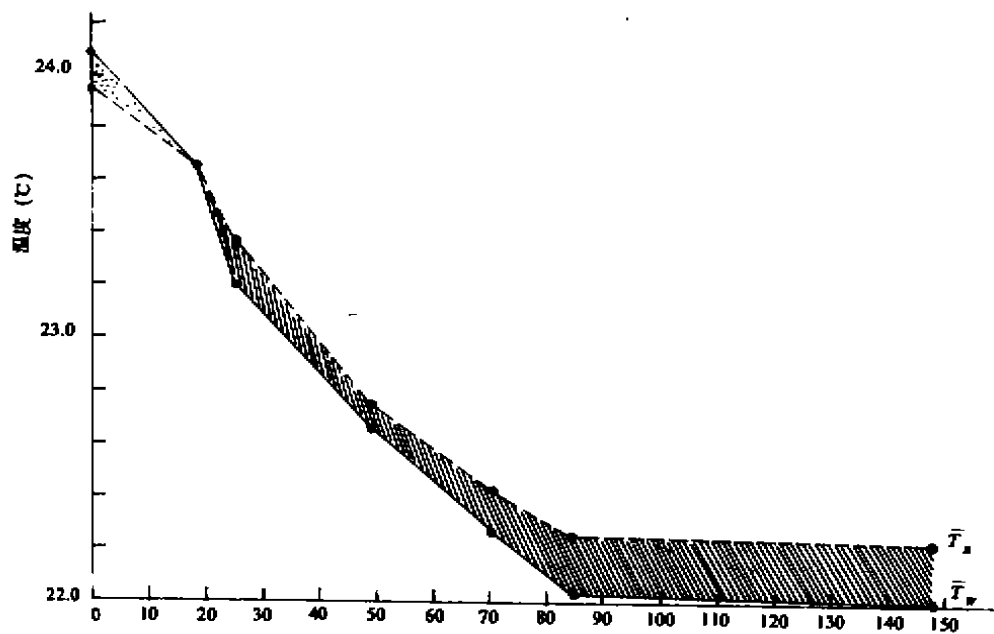


图3 薄层温度随 U -实测变化值
 T_R ——红外测温值(°C) T_w ——5cm 水深处水温均值(°C)

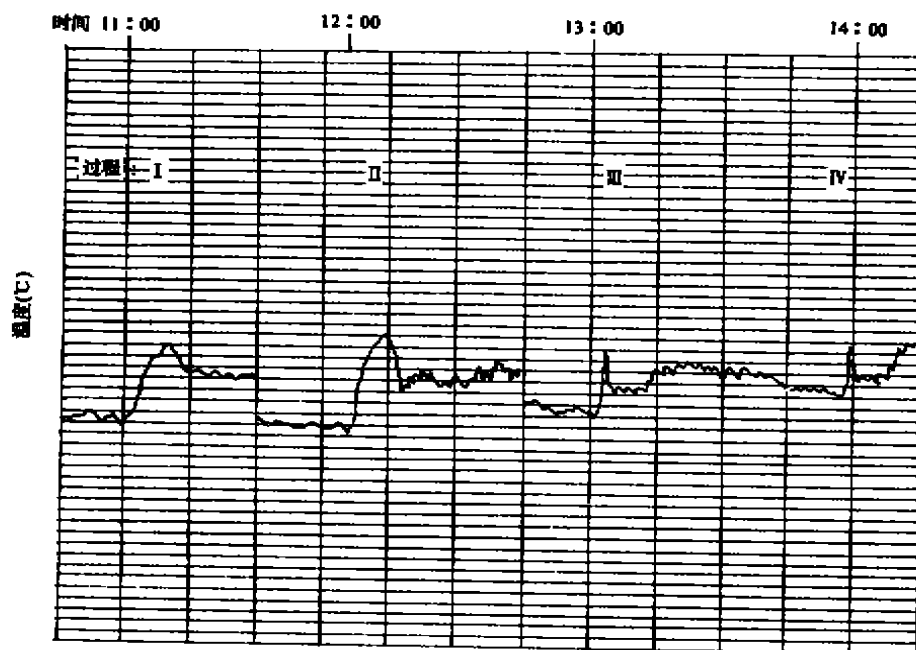


图4 水面皮温破坏 恢复过程的时间演变曲线

在对风作用下水面热力边界层(或称水面热力薄层)内热结构响应、变性的研究中,我们采用了实验室模拟的研究方法。根据实验条件、环境条件和实验目的,我们采用了上述第3种组合方案,即用 HDG 高灵敏度红外测温仪(实际上也是一种红外辐射计)测得水面 $20\mu\text{m}$ 深的水温作为上表皮温度;用水温表测得水下 5cm 深处的块体温度。这样同步取样测得水面薄层内的温度垂直分布,经一系列处理,分析后,取得了如下结果(见图 3 和图 4)。其各现象形成的物理机制详见文献[14]。初步结果分析表明,采用遥感与常规测量相结合的技术手段,对揭示水面薄层热结构,为水—气间能量通量计算提供有效数据是完全可行的。

4 结 语

遥感技术的全天候、全天时、多谱段、响应快、同步性强等特点,使大范围地快速地提供大洋现场实时数据,以便进行深入研究成为可能。文中从基本原理出发,结合水面薄层的海洋学特性,分析了对这种薄层实施监测的可能性和可行性,给出了可供采用的 3 种组合实施方案。在分析的基础上,给出了实施方案 3 实验验证。数据分析证明,这种组合方案是合理、可行的。这一有益的尝试为今后进一步研究海面微尺度过程、海面薄层能量、通量计算等提供了一种新的研究途径。可以预见,这种新的思路和技术路线在今后研究中有着广阔的推广和应用前景。

参 考 文 献

- 1 Bernstein R I, et al. Seasat altimeter determination of ocean current variability. J. G. R. 87C, 1982, 3261~3268
- 2 Guymet T H. A review of Seasat Scatterometer data. Phil. Trans. Roy. Soc., London, A309, 1983, 399~414
- 3 Ewing G & E D Mcalister. On the thermal boundary layer of the ocean. Science, 1960, 131, 1374~1376
- 4 Hill J, et al. Comparative analysis of Landsat-5 TM & SPOT HRV-1 data for use in multiple sensor approaches. Remote Sens. Environ., 1990, 34, 55~70
- 5 Jones W L, et al. The Seasat-A satellite scatterometer; the geophysical evaluation of remotely sensed wind vectors over the ocean. J. G. R. 87C, 1982, 3297~3317
- 6 Katsaros K B. The aqueous thermal boundary layer. Boundary-Layer Meteorology, 1980, 18, 107~127
- 7 Kirman A D, et al. Seasat special issue I; Scientific results. J. G. R. 88C, 1983, 1529~1952
- 8 Paulson C A, et al. Cooling of a water surface by evaporation, radiation and heat transfer. J. G. R. 1972, 77(3), 491~495
- 9 Populus J, et al. The use of SPOT data for wave analysis. Remote Sens. Environ., 1991, 36, 55~66
- 10 Preiffer B R. The earth observation activities of the European Space Agency (ESA). Inter. Symp. on Earth Science (ISESS 88), 1988, 133~149
- 11 Robinson I S. Satellite oceanography. Ellis Horwood Limited, 1985, 226
- 12 Schmugge T J, et al. Spectral emissivity variations observed in airborne surface temperature measurements. Remote Sens. Environ., 1991, 35, 99~104
- 13 Swift C T. Passive microwave remote sensing. Boundary-Layer Meteorology, 1980, 18, 25~54
- 14 吴永森等. 水面薄层热结构变性的实验室模拟研究. 海洋学报, 1994, 16(4)

FEASIBILITY ANALYSIS AND TEST OF APPLYING REMOTE SENSING IN RESEARCH OF WATER SURFACE THIN LAYER

Wu Yongsen

First Inst. of Oceanog., SOA, Qingdao 266003

Abstract Based on the principle of temperature remote sensing and the physical characteristics of variation of heat structure occurring in the water surface thin layer, the feasibility of monitoring vertical profile and variation of temperature within surface thin layer by means of remote sensing was analysed. A workable method has been applied and testified in the research of laboratory simulation of the airwater thermal boundary layer. It is proved that combination of remote sensing technology with routine methods is a reliable source of data for the study of the water surface thermal boundary layer. The new technology has a prosperous future in popularization and application in the research in micro—scale process of sea surface, global climatic variation and energy flux between air and water.

Key Words water surface thin layer; remote sensing; feasibility analysis; experimental simulation