

利用多光谱扫描数据对从海口排出的 下水道污水浓度进行估算与制图*

保尔·柯兰

(英国舍菲尔德大学地理系)

1986 年 11 月 30 日收稿

摘 要

为了监测污水排放后扩散和稀释的过程,可在污水里注入染料,利用考察船追踪其羽状扩散痕迹(以下简称痕迹)。最近几年的实践证明,遥感影像是船只调查的有效辅助手段。这是因为遥感影像可实时显示大范围的痕迹,而船只调查,由于潮汐、风和水流变化的缘故,是不能做到这点的。

本文所描述的调查,旨在通过机载多光谱扫描影像和模型化、反演及精度评价等一套方法,对三种染色的下水道污水浓度作出估算与制图。

航空多光谱扫描数据,经过辐射、大气和辐射纠正后,所得的标准化辐射指数与染料浓度密切相关($r = 0.85$, 相关在 99%置信度水平上显著)。将这个关系对所有航空多光谱扫描数据进行反演和外推后得到 22 个痕迹图。作 7 组分类时,染料浓度的痕迹图,在 95%的置信度水平上,达到 49—90%的精度;作 2 组分类时,在 95%的置信度水平上,精度提高到 68—100%。

一、序 言

长期以来,遥感数据的用户,充分利用传感器记录的辐射反射或发射强度与海岸水域物质成份之间存在的关系^[1-3]进行水质调查,并因遥感能显示大范围和近于实时的海岸水质,弥补调查船只由于潮汐、风和水流变化的影响无法做到的不足^[4],而被看作是船只调查的良好辅助手段。

实践证明,遥感技术特别适合对下水道污水痕迹进行监测。监测用的主要传感器是黑白全色或彩色航空摄影机和机载多光谱扫描仪。更新型的机载多光谱扫描仪,是一行一行地记录地球表面反射或发射的辐射信息,并在几个波段上产生数字化影像^[1]。

用航空相机或机载多光谱扫描仪来实时观察下水道污水痕迹已进行过大量研究^[5,6]。在多数应用中,需要了解痕迹的浓度与位置。适合于估算痕迹浓度的方法论,涉及到痕迹中物质浓度与传感器接收的辐射之间关系的模型化,这种关系的反演使我们能从遥感数据来估算痕迹浓度,并对估算结果进行正确评价。

在七十与八十年代,这个方法论的前两个阶段是用海岸与近海岸地区的遥感影像来

* 该工作是为英国水研究中心和南部水利管理局完成的,承蒙它们同意发表,作者在此谨表谢意。更为详尽的内容可参阅文献[19]。并借此机会,向水研究中心的 T. Lack 博士, D. Munro 和 V. Cooper 先生;南部水利管理局的 P. Herbertson, H. Headworth, N. Bennett, P. Soulsby, R. Mugridge, P. Hill, H. Stalybrass 等先生和 S. Dinmore 女士;舍菲尔德大学 M. Pedley 和 P. Coles 先生致以特别的感谢。

编者注:本文系本刊特约稿件。

估算染色与未染色污水、悬浮泥沙及叶绿素的浓度。这种既使用航空摄影又使用机载多光谱扫描仪的研究工作,最近又得到了重视^[7-14]。

第一次报道的采用该方法论所有三个阶段的海岸调查,是使用航空摄影,沿着英国的南海岸对染色的下水道污水痕迹进行的监测与制图^[14]。染色浓度五、七组分类的精度在 95% 置信度上达到 62—94%。在这次实验中发现的三个主要问题,是航空摄影的辐射灵敏度低,偏离垂直观测方向时引起的变化和船只调查数据的误差很大。最近在英国海岸周围利用机载多光谱扫描仪对沉淀物浓度的监测研究表明,在给定合适的实验设计方案条件下,有可能使这些问题变得最小^[15,16]。

本实验的目的是研究用机载多光谱扫描影像和建立模型、进行反演及精度评价的方法论对已染色的下水道污水痕迹进行达到已知精度水平的估算与制图。

二、研究区的下水道排出口

本文论述的三个排出口代表了英国下水道排出口类型的适当范围^[17],其位置均在英国海岸(图 1)。排出口 A 是一个较新的中等长度的排出口,它将经部份处理的污水排放到深水中; B 也是一个较新的但长得多的排出口,它将经部份处理和过滤过的污水排放到浅水中; C 是个老而短的排出口,它将经浸泡过滤过的污水排放到浅水中。

排出口 B 已经是用航空摄影来进行调查的目标(参阅讨论部分)^[14]。遗憾的是排出口 C 不符合欧洲共同体关于近海滩的细菌污染标准^[18]。

三、调 查

1985 年 7 月 1 日对排出口 B 和 C 进行了调查,7 月 2 日调查了排出口 A。调查包括四个相关的内容,即染料投放,位置和光谱反射目标安排,航空调查及船只调查^[19]。

1. 染料投放

将注入到地面抽水站中的罗丹明红作为污水标志。选择好投放时间,使被染红的污水在潮水停滞状态下能在海水中显示出来^[14]。

2. 位置和光谱反射目标的安排

为了保证在整个调查过程中能确定染色痕迹的确切位置,将五个 6m × 6m 的定位目标,在每个排出口东面海面上约 1 km 的间距加以抛锚固定。这些定位目标是漆成白色的塑料游泳池盖板,用木板条将其一边固定住。每个定位目标的位置,在布设以及整个调查的不同时间间隔中,用调查船上的导航系统加以记录^[19]。

3. 航空调查

飞机上携带有两个传感器: 具有 2.5 毫弧度视野范围的 11 波段 Daedalus AADS 2368 ATM 多光谱扫描仪^[20]; 152.24 mm 焦距的广角 RC 8 航空相机。该相机携带柯达双 X 2405 航空摄影胶片,加滤色片使之只接收 0.6—0.72 μm 波段的红色光。

7 月 1 日和 2 日,午前天气晴朗,能见度高,适合航空调查。但 2 日中午在陆地与海洋上空多云。所有飞行高度均在 2000 m 左右,机载多光谱扫描数据名义上为 5 m 的空间

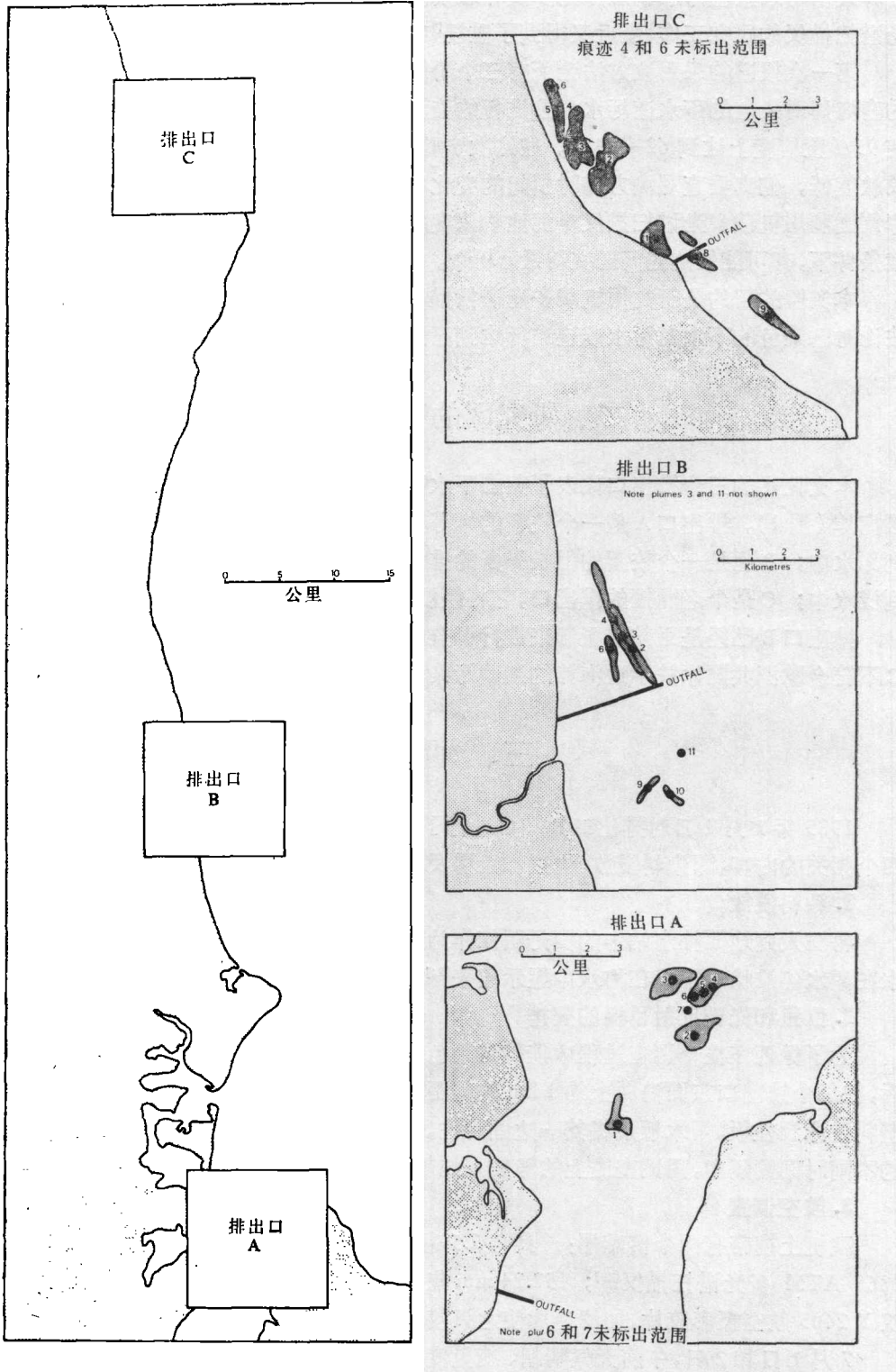


图 1 供研究的下水道排出口的位置。图中数字对应于表 1 至 3 中给出时间的染色痕迹

Fig. 1 Location of the study outfalls in relation to the dye plumes. The numbers refer to plume location at the times given in tables 1, 2, and 3.

分辨率,摄影比例尺约为 1:1.3 万。

为了保证在每幅影像内都有陆地可用于定位,并避免海上的阳光反射,因此,飞行的方向上午靠近东南—西北,下午改变成靠近西南—东北方向。这样每一幅影像都有一个特定的方向(图版 IV)。

7 月 1 日从 06:30 至 17:00,每小时在痕迹 B 与 C 的上空飞行一次,中午因加油中断。7 月 2 日从 07:00 至 11:30 每小时在痕迹 A 上空飞行一次,之后由于过多的云层覆盖终止了飞行。7 月 1 日与 2 日共记录了 28 幅痕迹影像,其中 6 幅因云雾过多未作进一步的处理。其余影像有 7 幅为痕迹 A,7 幅为痕迹 B,8 幅为痕迹 C(表 1—3)。

4. 船只调查

用四艘调查船记录染料浓度。每条船跟踪各自的染色痕迹,并在飞行前、后和飞行中穿过这些痕迹。从海表面 1 米以下抽取的水样中的罗丹明红浓度用连续记录的荧光计进行测量^[4]。测量的浓度在 0—200 ppb 范围内,达到 ± 4 ppb 的精度。在规定的间隔中,船上携带的导航系统对每次穿行的路线进行定位^[9]。

表 1 记录痕迹 A 的机载多光谱扫描数据的特点

Table 1 Characteristics of the airborne multispectral scanner data collected for plume A

序号	时间 (小时)	自开始投放染料算起的时间 (小时)	图像质量	图像处理	用于校正	船只调查资料的适用程度
1	07:22	4.62	好	是	否	尚可
2	08:24	5.65	好	是	是	可
3	09:25	6.67	好	是	否	尚可
4	10:22	7.62	好	是	否	可疑
5	10:32	7.78	好	是	否	尚可
6	11:18	8.55	好	是	否	否
7	11:27	8.68	好	是	否	否

表 2 记录痕迹 B 的机载多光谱扫描数据的特点

Table 2 Characteristics of the airborne multispectral scanner data collected for plume B

序号	时间 (小时)	自开始投放染料算起的时间 (小时)	图像质量	图像处理	用于校正	船只调查资料的适用程度
1	06:34	0.78	差	否	否	可
2	07:27	1.67	好	是	是	可
3	08:28	2.68	好	是	是	可疑
4	09:28	3.68	好	是	是	可疑
5	10:30	4.71	尚可/有云	否	否	可
6	10:36	4.82	尚可/有云	是	否	可
7	10:43	4.92	尚可/有云	否	否	可
8	14:37	8.83	尚可/有云	否	否	可
9	14:43	8.93	好/有云	是	是	可
10	15:44	9.95	好	是	是	可
11	16:56	11.15	好/有云	是	是	可

表 3 记录痕迹 C 的机载多光谱扫描数据的特点
 Table 3 Characteristics of the airborne multispectral scanner
 data collected for plume C

序号	时间 (小时)	自开始投放染料算起的时间 (小时)	图像 质量	图像 处理	用于 校正	船只调查资料 的适用程度
1	06:55	2.17	差/雾	是	否	尚可
2	07:57	3.20	好	是	否	否
3	08:59	4.27	好	是	是	可
4	09:59	5.23	尚可/有云	是	否	可
5	10:07	5.37	尚可/有云	是	否	可
6	11:04	6.32	尚可/有云	是	否	可
7	11:09	6.40	尚可/有云	否	否	可
8	15:10	10.42	好	是	是	可
9	16:21	11.60	好	是	是	可
10	17:12	12.45	好/无染料	否	否	否

船只调查数据是评价机载多光谱扫描数据的标准。这似乎是自相矛盾的。以前的误差分析表明,经过比值,机载多光谱扫描数据误差似乎不超过平均值的 0.3%,而船只调查数据的误差要高两个数量级^[21]。船只调查数据的误差包含较次要的但固定的仪器误差,模拟一数字转换误差,及一个主要的但变化较大的取样误差^[22,23]。取样误差无法避免,因为接近飞行时间测量的一些低于表面的海水,通常被用来代表飞行时遥测到的非常靠近表面的海水。这是遥感的一般问题,在说明结果时,特别是痕迹 A 时,应引起注意。

四、分析与结果

机载多光谱扫描仪和船只调查数据的分析,采用序言里提到的用模型化、反演与精度评价的方法进行(图 2)。该方法论的物理基础和取得成功的关键,是染红的痕迹对于红色辐射的反射率强,对蓝/绿色辐射的反射弱。这一现象使得痕迹里的红色染料浓度与机载多光谱扫描仪记录的红色(第四波段, 0.605—0.625 μm)与蓝/绿色(第二波段, 0.45—0.52 μm)谱段之间的辐射强度之差成正相关。

在使用辐射差计算染料浓度之前,需要将数据标准化,并与船只调查数据一起定位。

1. 辐射纠正

对每一个波段,机载多光谱扫描仪探测的辐射,与计算机磁带上的数字灰度值之间存在单值对应关系。因此,可以用传感器操作员提供的方程式,将每一波段上的数字灰度值转换成辐射强度。

2. 大气纠正

大气衰减与散射不是严重的问题,因为已决定不采用阴霾时的影像(表 1—3),并且在影像处理中将减少各种与波段无关的作用。

为了抑制与波段有关的作用,将回归方程式

$$L_2 = B_0 + B_1 L_1 \quad (1)$$

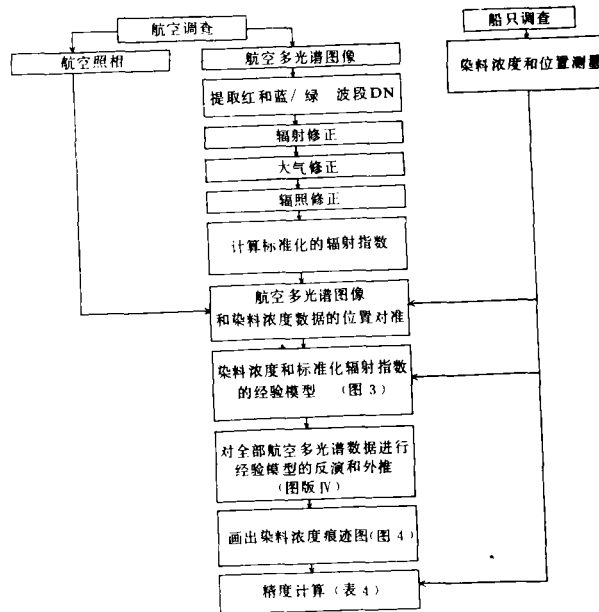


图 2 分析航空多光谱图像的步骤

Fig. 2 Stages in the analysis of the airborne MSS imagery

中的补偿量 B_0 , 标准化成回归方程式

$$L_4 = B_0 + B_1 L_2 \quad (2)$$

中的补偿量 B_0 , 其中 L 是辐射, 下标 2 和 4 分别对应于第二(蓝/绿色)和第四(红色)波段。这是从最阴霾的蓝/绿影像上减去仅仅约 3% 的辐射量的小纠正。

3. 辐照度纠正

在整个调查中, 辐照水平的改变, 使每个影像具有与染料浓度无关的辐射值水平和范围。早晨的影像, 由于辐射水平低和辐射范围小, 因此, 色调阴暗, 对比度小; 中午因辐射水平高, 辐射范围大, 而色调明亮, 对比度高。

为了使辐照度变化的影像标准化, 将开阔海面的辐射作为一个常数, 并将每一影像的最小值定为 50, 最大范围定为 50, 则可用如下方程式求得标准值:

$$SRU_\lambda = [(L_\lambda - C_{\min})F/R] + \phi \quad (3)$$

其中, SRU 为标准化的辐射指数, L 为辐射, C 为海面辐射, F 是 $C_{\max} - C_{\min}$ 之间所要求的差异, R 是其观察值, ϕ 是新的补偿量 (在此情况下为 50), 下标 λ , \min 和 \max 分别表示波段、最小值和最大值。

4. 标准化的辐射指数计算

每个影像都计算了标准化的辐射指数 $SRU_4 - SRU_2$, 这样的影像增强了染红的下水道污水痕迹在两个波段之间的差异特征, 抑制了开阔海面上两个波段之间差异相似的特征。这种影像对低浓度染料的增强和对偏离机下点的影像减少大气散射的效果是特别成功的。

5. 机载多光谱扫描仪和船只调查数据的共同定位

机载多光谱扫描影像可以立刻确定染料痕迹的位置。但调查船只一般需 15 分钟左右才能穿行染料痕迹一次。在此期间,潮水将把染料痕迹冲到新的位置,所以需要把穿行每边长度所用的时间限制为 3 分钟,并估算流速在穿行过程中将痕迹位置变换到的理论位置^[44]。利用调查船只记录的导航数据,可在基础地图上画出 6 分钟的穿行航迹。将航空像片与机载多光谱扫描图像分别覆盖到底图上,画出飞行航线和染料痕迹位置。尽管小心地使用位置目标,但要将某些船只的调查数据,特别是痕迹 A 的数据,与机载多光谱扫描影像上看到的细节进行相关,仍然是很困难的。误差的大小与痕迹的大小成负相关,与船只采样和飞行穿行的时间及船只采样和位置目标之间的距离成正相关。

6. 经验模式

利用十张机载多光谱扫描影像(表 1—3)来建立机载多光谱扫描图像和船只调查数据之间的经验模式。在每个影像三个像元宽的条带上随意选取 5—7 个样点和标准化了的辐射指数,与船只调查中测量到的染料浓度进行相关。为使前面讨论到的误差减至最小,仅使用穿行一分钟内记录的染料浓度,其结果是标准化了的辐射指数与染料浓度存在着线性相关,相关系数 $r = 0.85$,这在 99%置信度水平上是显著的(图 3)。

7. 经验模式的反演

对上述经验模式的反演采用修正的最小二乘回归法,它允许船只调查数据中存在一定的估算误差,并确定 x 和 y 及 y 在 x 之上的中线^[21],然后将此反演关系外推到 22 幅机载多光谱影像上。

为了帮助目视判读,对每幅影像的数值范围进行“密度分割”。浅蓝与深蓝表示没有或很低的染料浓度;黄、浅绿与深绿表示染料为中等浓度;红、棕与橙红色表示高浓度(图 3)。反演的结果镶嵌在一起可输出记录到胶片上(图版 IV),并在图像处理机屏幕上直接产生等浓度线图(图 4)。

8. 精度评价

为了计算图版 IV 所示的染料浓度影像和图 4 所示的染料等浓度线的精度,将估算的染料浓度和船只调查得到的染料浓度进行比较。前面所述的采样方案用于采集飞机穿行三分钟时间内的船只调查数据,其目的是要对每一条痕迹随机采集 50 个样品,但是对 10 点 30 分以后记录的较小痕迹不可能做到这一点。另外,有三条痕迹没有船只调查数据。计算精度是采用二项式展开方法^[24]来进行的,其结果见表 4。

表 4 痕迹 C 染料浓度的分类精度
Table 4 The classification accuracy of dye concentration for plume C

序 号	采 样 数	分 类 数 目	正 确 分 类 的 样 点	精 度 (95% 置 信 度 水 平)
1	50	7	36	57—84
2	0	7	无船只调查数据	—
3	50	7	37	60—86
4	50	7	40	66—90
5	50	5	45	78—97
6	50	3	46	81—98
8	40	2	38	83—99
9	30	2	28	80—100

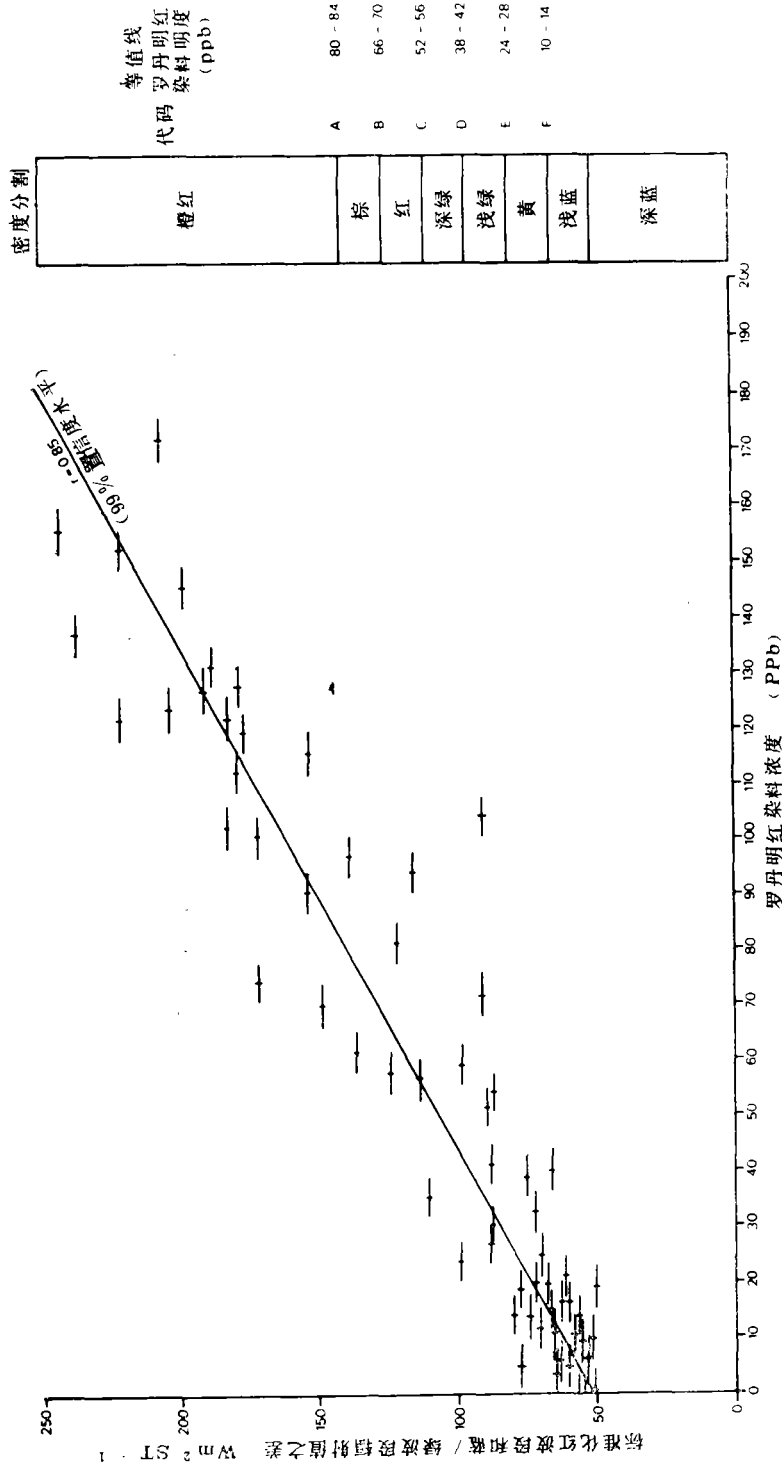


图 3 染料浓度和标准化辐射指数之间的线性相关

注: (i) 标准化辐射指数是标准化红波段辐射值和标准化蓝/绿波段辐射值之间的差; (ii) 图右的密度分割已用于图版 IV; (iii) 分类中的重叠是由于船只调查数据中的误差引起的。

Fig. 3 The linear correlation between dye concentration and the standardised radiance index. Note: (i) the standardised radiance index is the difference between standardised red radiance and standardised blue/green radiance, (ii) the density slice to the right of the graph is used in Plate IV and (iii) class overlap is due to error in the boat survey data.

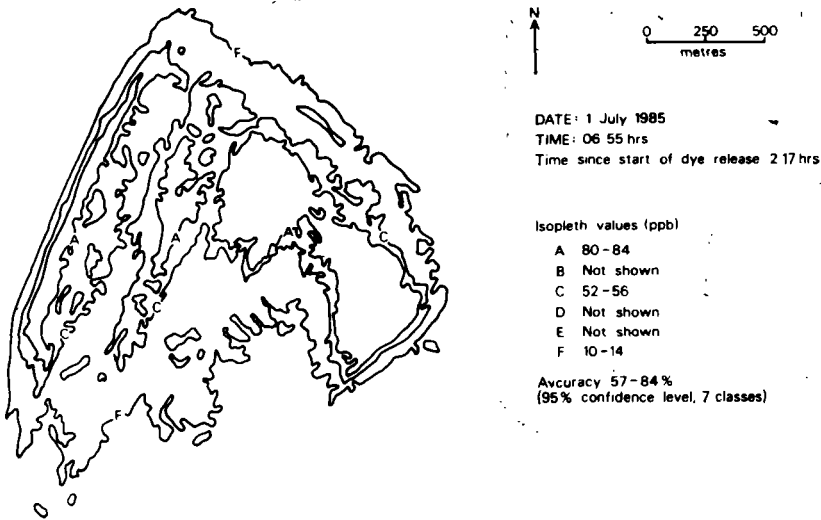


图 4a 开始投放染料后 2.17 小时的痕迹 C 的染料浓度图 (1985 年 7 月 1 日 6 点 55 分)
等值线值 (ppb): A 80—84, B 未标, C 52—56, D、E 未标, F 10—14。
精度: 57—84% (95%置信度, 分 7 组)

Fig. 4a Dye concentration plot for plume C at 06:55 hrs on 1.7.85.

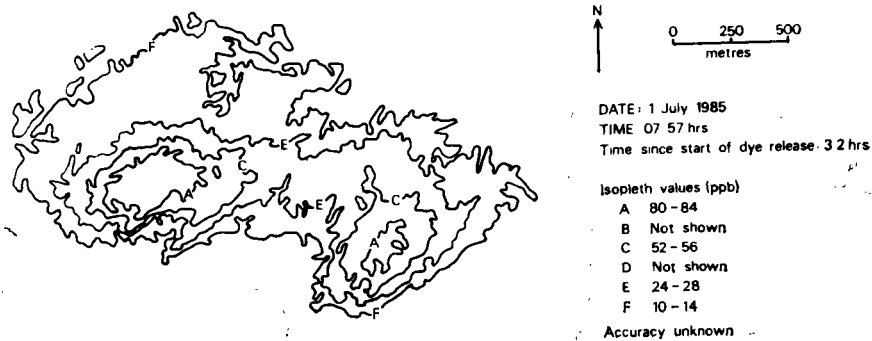


图 4b 开始投放染料后 3.2 小时的痕迹 C 的染料浓度图 (1985 年 7 月 1 日 7 点 57 分)
等值线值 (ppb): A 80—84, B 未标, C 52—56, D 未标, E 24—28, F 10—14。
精度: 未知

Fig. 4b Dye concentration plot for plume C at 07:57 hrs on 1.7.85.

五、讨 论

机载多光谱扫描影像和模型化、反演与精度评价的方法论已成功地应用于染过色的下水道污水痕迹浓度的计算与制图。痕迹以很相近的速率扩散,它们间的主要差别是运动类型(图 1)。注入染料后约 4 小时左右,密集的三角形的痕迹 A 以 3 km/hr 的速度向东南方向移动。由于船只经过痕迹中心,使染料的扩散速度增快。潮水改变方向后,痕迹向西北移动,并向海岸扩展。细长的痕迹 B 开始以 0.6 km/hr 的速度向东扩展(图 1)。注

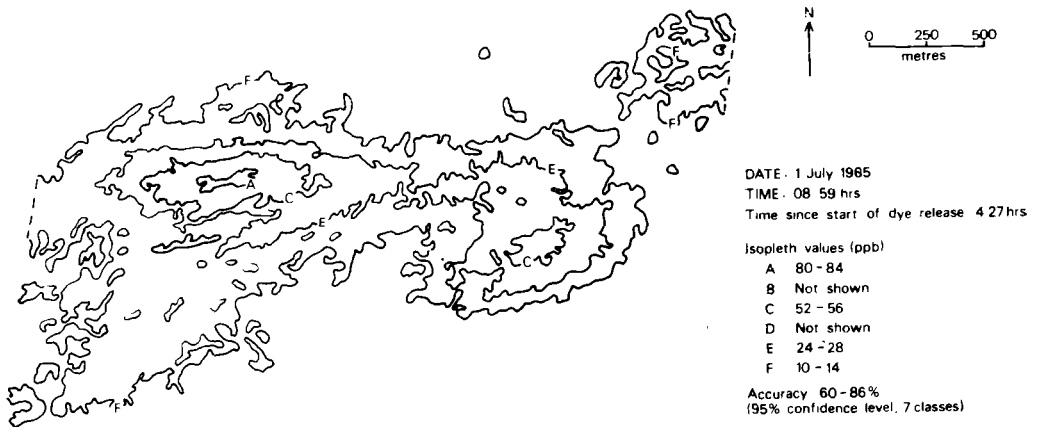


图 4c 开始投 4 放染料后, 27 小时的痕迹 C 的染料浓度图 (1985 年 7 月 1 日 8 点 59 分)
 等值线值 (ppb): A 80—84, B 未标, C 52—56, D 未标, E 24—28, F 10—14。
 精度: 60—86% (95% 置信度, 分 7 组)

Fig. 4c Dye concentration plot for plume C at 08:59 hrs on 1.7.85.

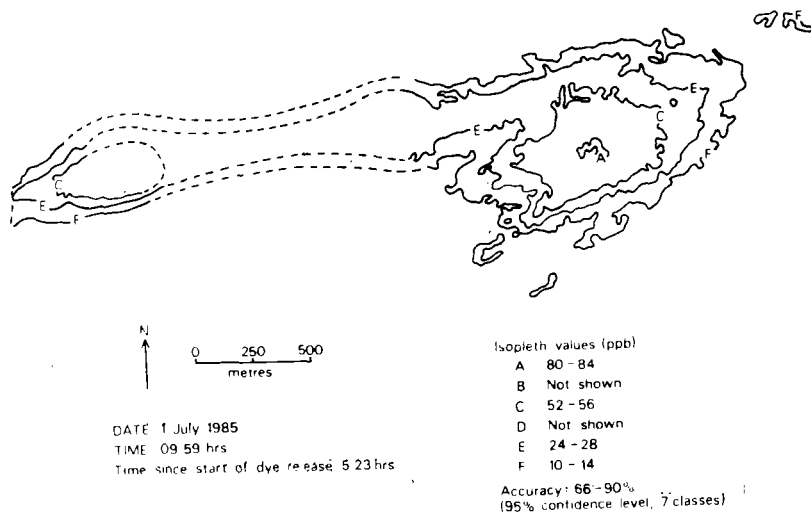


图 4d 开始投放染料后 5.23 小时的痕迹 C 的染料浓度图 (1985 年 7 月 1 日 9 点 59 分)
 等值线值 (ppb): A 80—84, B 未标, C 52—56, D 未标, E 24—28, F 10—14
 精度: 66—90% (95% 置信度, 分 7 组)

Fig. 4d Dye concentration plot for plume C at 09:59 hrs on 1.7.85.

人染料后 4—4.5 小时, 染料从排出口排放出来, 在这段时间里, 浓密的痕迹在染色污水的一端有一个旋涡, 另一端流到海滩附近 1 km 的范围内。染料注入后约 5 个小时, 潮水的改变使痕迹将浅滩线显示得很清楚。痕迹进入浅水后, 流速加倍, 染料浓度减弱并向西流动, 扩散到离海岸约 3 km (图 1)。带有两个中心的痕迹 C, 在排放后很快沉淀在海滩上(图版 IV-1), 然后以 3 km/hr 的速度快速向东北移动, 并保持离海岸约 500 m 的范

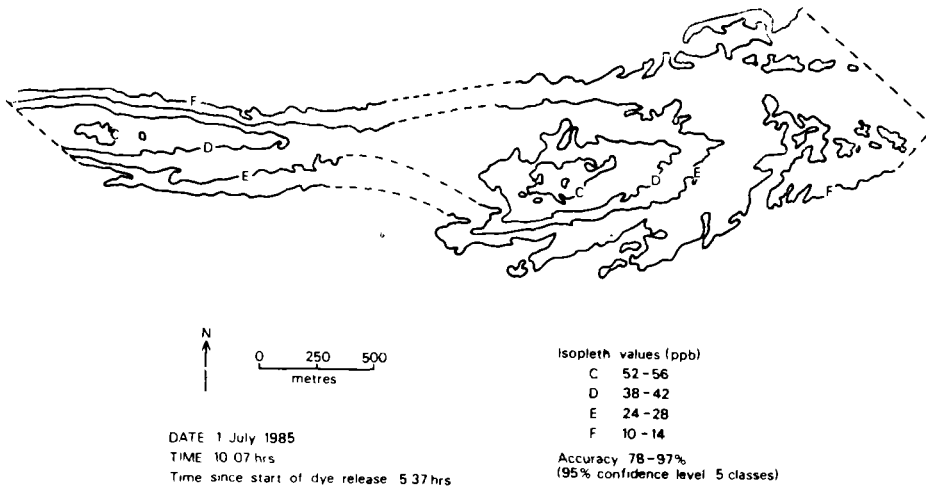


图 4e 开始投放染料后 5.37 小时的痕迹 C 的染料浓度图 (1985 年 7 月 1 日 10 点 7 分)
等值线值 (ppb): C 52—56, D 38—42, E 24—28, F 10—14
精度: 78—97% (95%置信度, 分 5 组)

Fig. 4e Dye concentration plot for plume C at 10:07 hrs on 1.7.85.

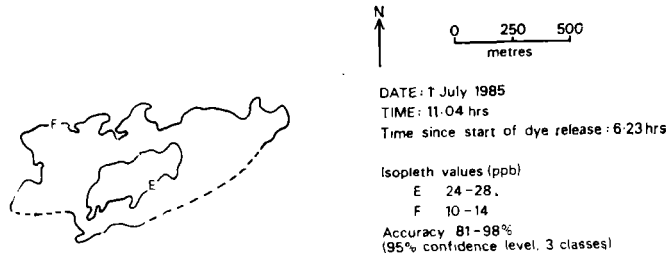


图 4f 开始投放染料后 6.23 小时的痕迹 C 的染料浓度图 (1985 年 7 月 1 日 11 点 4 分)
等值线值 (ppb): E 24—28, F 10—14,
精度: 81—98% (95%置信度, 分 3 组)

Fig. 4f Dye concentration plot for plume C at 11:04 hrs on 1.7.85.

围内(图 1)。当潮水开始转向时,痕迹保持浓密,但其速度降到了 1 km/hr 以下。潮水过后,痕迹向西南方向流动,流速加倍,浓度很快减弱(图 1)。

表 4 列出的痕迹影像精度与使用航空摄影产生的痕迹影像精度^[14]相似。拿它直接与早期的调查进行比较是不可能的,因为早期调查是用少量的染料对扩大的痕迹进行染色,在近两个小时内,以 22 ppb 为单位进行记录。这次调查,则使用了大量的染料对三个缩小的痕迹染色,在近十个小时内以 18 ppb 为单位进行记录。

遥感数据没有出现严重问题,痕迹图之间的主要精度差别,可能是由于检验遥感估算精度的船只调查数据所造成的。

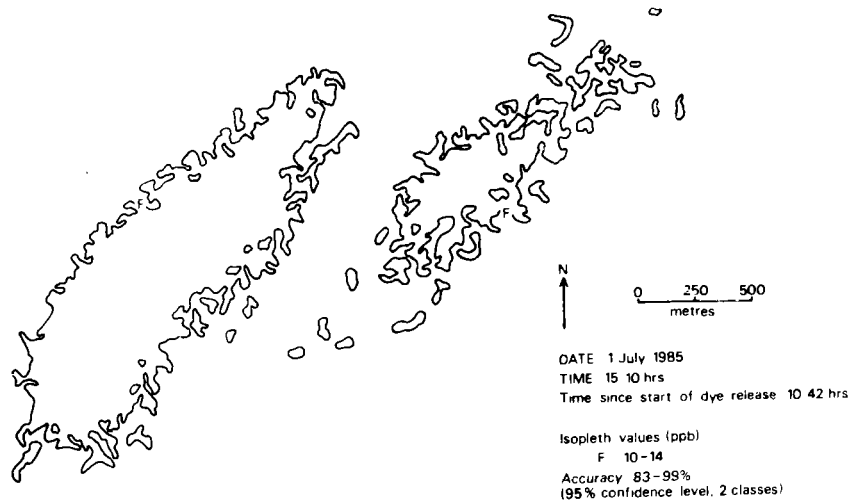


图 4g 开始投放染料后 10.42 小时的痕迹 C 的染料浓度图 (1985 年 7 月 1 日 15 点 10 分)
等值线值 (ppb): F 10—14
精度: 83—99% (95%置信度, 分 2 组)

Fig. 4g Dye concentration plot for plume C at 15:10 hrs on 1.7.85.

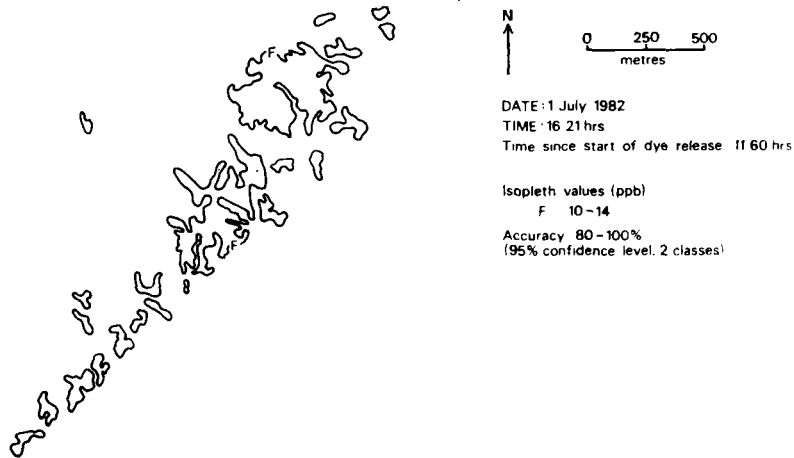


图 4h 开始投放染料后 11.6 小时的痕迹 C 的染料浓度图 (1985 年 7 月 1 日 16 点 21 分)
等值线值 (ppb): F 10—14
精度: 80—100% (95%置信度, 分 2 组)

Fig. 4h Dye concentration plot for plume C at 16:21 hrs on 1.7.85.

六、结 论

(1) 研究表明, 机载多光谱扫描影像是估算与绘制随潮流扩散并稀释的染色污水痕迹浓度的极为有效与精确的手段。

(2) 本文是第一篇用文字材料来说明模型化、反演与精度评价的方法论可成功地用于该类数据及其应用的例子。

(3) 染料浓度与标准化的红和蓝/绿辐射差别之间的相关系数为

$$r = 0.85 \text{ (99\% 的置信度)}$$

(4) 染色浓度影像的精度在 7 组分类时,在 95% 的置信度上达到 49—90%, 在 2 组分类时增加到在 95% 的置信度上达到 68—100%。

(5) 极少的几个精度较低的数字(明显地为排出口 A 的染色浓度影像)可能是由于检测遥感数据精度的海上数据的偏差所造成的。

吉雅 译

参 考 文 献

- [1] Curran, P. J. *Principles of Remote Sensing*. Longman, London, 1985.
- [2] Hom, L. W. Remote sensing of water pollution. *Journal Water Pollution Control Federation*, 40, 1728—1738, 1968.
- [3] Van Lopik, J. J. Pollution surveillance by noncontact infrared techniques. *Journal Water Pollution Control Federation*, 40, 425—431, 1968.
- [4] Alfoldi, T. T. Remote sensing for water quality monitoring. In Johannsen, C. J. and Sanders, J. L., (eds.) *Remote Sensing for Resource Management*. Soil Conservation Society of America, Iowa, 317—328, 1982.
- [5] Curran, P. J. Preliminary investigation into the application of oblique multispectra photography for the monitoring of sewage outfalls. *Journal of Environmental Management*, 9, 41—48, 1979.
- [6] Davies, P. A., Charlton, J. A., Bethune, G. H. M. and McDonald, L. M. The application of remote sensing techniques to the monitoring of a sea outfall system. *International Journal of Remote Sensing*, 6, 697—702, 1985.
- [7] James, W. and Burgess, F. J. Ocean outfall dispersion. *Photogrammetric Engineering*, 36, 1241—1250, 1970.
- [8] Burgess, F. J. and James, W. P. *Airphoto Analysis of ocean Outfall Dispersion*. Water Pollution Control Research Series, 16070ENS06/71, US Environmental Protection Agency, Washington DC 20460, 1971.
- [9] Valerio, C. and Llebaria, A. A. A quantitative multispectral analysis system for aerial photographs applied to coastal planning. *International Journal of Remote Sensing*, 3, 181—197, 1982.
- [10] Khorram, S. Remote sensing analysis of water quality in the San Francisco Bay delta. *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, University of Michigan, Ann Arbor, 1591—1601, 1979.
- [11] Johnson, R. W. Quantitative suspended sediment mapping using aircraft remotely sensed multispectral data. *Proceedings of the NASA Earth Resources Survey Symposium*, Houston, Texas, 2087—2098, 1975.
- [12] Johnson, R. W., Glasgow, R. M., Duedall, I. W. and Proni, J. R. Monitoring the temporal dispersion of a sewage sludge plume. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 45, 763—768, 1979.
- [13] Catts, G. P., Khorram, S., Cloern, J. E., Knight, A. W. and De Gloria, S. D. Remote sensing tidal chlorophyll -a variations in estuaries. *International Journal of Remote Sensing*, 6, 1685—1706, 1985.
- [14] Wilkinson, W. B. and Curran, P. J. The use of aerial photography and image processing to measure dye dispersion from a long sea outfall. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 2*, 79, 327—348, 1985.
- [15] Collins, M. and Pattiaratchi, C. Identification of suspended sediment in coastal waters using airborne thematic mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, 5, 635—657, 1984.
- [16] Curran, P. J., Hansom, J. D., Plummer, S. E. and pedley, M. I. Multispectral remote sensing of nearshore suspended sediments: a pilot study. *International Journal of Remote Sensing*, 8, 1987 (forthcoming).
- [17] Stemman, R. Action for the environment. *Europe*, 7, 4—10, 1984.
- [18] Coastal Anti-Pollution League, Ltd. *The Golden List of Clean Beaches in England and Wales*. The Coastal Anti-Pollution League Ltd. Bath, 1983.
- [19] Curran, P. J. Airborne multispectral scanner data to estimate dye dispersion from sea outfalls. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 2*, 81, 1987 (forthcoming).

- [20] Williams, D. F. Overview of the NERC airborne thematic mapper campaign of September 1982. *International Journal of Remote Sensing*, 5, 631—634, 1984.
- [21] Curran, P. J. and Hay, A. M. The importance of measurement error for certain procedures in remote sensing at optical wavelengths. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52: 229—241, 1986.
- [22] Curran, P. J. and Williamson, H. D. The accuracy of ground data used in remote sensing investigations. *International Journal of Remote Sensing*, 6, 1637—1651, 1985.
- [23] Curran, P. J. and Williamson, H. D. Sample size for ground and remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 20, 31—41, 1986.
- [24] Hay, A. M. Sampling design to test land use map accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 45, 529—533, 1979.

Multispectral Scanner Data to Estimate and Map the Concentration of Sewage Released from Sea Outfalls

Paul J. Curran

(Department of Geography University of Sheffield)

Abstract

To monitor the dispersion and dilution performance of a sewage outfall a dye can be injected into the sewage and the resultant plume tracked by boat. In recent years remotely sensed imagery has proved to be a useful adjunct to boat survey as it provides a synoptic view of a plume at an instant which, as a result of tide, wind and current changes, a boat survey is unable to do.

The aim of this survey was to use airborne multispectral scanner (MSS) imagery and a methodology of modeling, inversion and accuracy assessment to estimate and map the concentration of three dyed plumes of sewage. After the radiometric, atmospheric and irradiance correction of the airborne MSS data, a standardised radiance index was highly correlated with dye concentration ($r=0.85$, significant at the 99% confidence level). Following inversion and extrapolation of this relationship to all of the airborne MSS data, twenty two plume plots were produced. For a seven-class classification of dye concentration these plume plots had an accuracy of 49—90% at the 95% confidence level increasing to 68—100% at the 95% confidence level for a two-class classification.

保尔·柯兰：利用多光谱扫描数据对海口排出的下水道污水浓度进行估算 与制图 图版 I
 Paul J. Curran : Multispectral Scanner Data to Estimate , and Map the Concentration of Sewage Released from Sea Outfalls Plate I

