

应用 TM 数据估算沿岸海水表层叶绿素 浓度模型研究

陈楚群 施平 毛庆文

(中国科学院南海海洋研究所 广州 510301)

摘要 本研究以大亚湾为实验区,以陆地卫星 TM 数据为信息源,结合表层海水叶绿素浓度实测资料建立模型。在对叶绿素光谱特征及遥感估算叶绿素浓度机理研究基础上,选取了 TM1—TM4 波段的 75 种波段组合为子因素,以叶绿素浓度为母因素,利用灰色系统理论,分析各波段组合与叶绿素浓度之间的关联度。将关联度最大的 5 种波段组合分别建模,得到 5 个估算表层海水叶绿素浓度的反演模型。误差分析表明,各模型的最大相对误差在 19% 以下,平均绝对相对误差在 11.2% 以下,相对标准误差在 6.7% 以下,模型精度较高。

研究表明:(TM3×TM4)是估算沿岸海水表层叶绿素浓度的最佳波段组合,采用(TM3×TM4)与 TM1、TM2 或 $\ln(TM1+TM2)$ 、 $\ln(TM1\times TM2)$ 之比并不能改善估算精度。

关键词 遥感,叶绿素,灰色系统,模型

1 前言

海水中叶绿素(指叶绿素—a;下同)浓度测定对海洋生态系统中初级生产力的研究至关重要,对海洋—大气系统中碳循环研究也具有重要意义。常规的叶绿素浓度测定方法都属于实验室测量法,耗时长,费用高,加之是逐点采样的测量方式,无法实现大面积水域的同步测量。利用卫星遥感方法估算海水叶绿素浓度可以弥补常规方法的上述缺陷。

用遥感方法估算水体叶绿素浓度,国内外许多学者已经做了大量的工作。舒守荣等^[1]用多光谱仪对不同叶绿素浓度的池塘水体进行光谱测量,根据实验测量结果建立了用光谱辐射值估算淡水水体叶绿素浓度的数学模型。Li Jilong^[2]利用 TM 卫星资料对湖泊水体叶绿素浓度进行估算。S. Ekstrand^[3]利用 TM 资料和实测数据建立了估算海水叶绿素浓度的回归模型。S. Tassan 等^[4]和 Smith 等^[5]利用 TM 资料、海岸带水色扫描仪 CZCS 资料,建立了估算海水叶绿素浓度的数学模型。由于叶绿素的光谱信号强度相对较弱,目前用遥感方法估算叶绿素浓度的精度大都不高,平均相对误差一般约 20—30%。

收稿日期:1995年6月26日;收到修改稿日期:1996年3月18日

2 试验区简介

本研究以大亚湾为试验区,大亚湾是广东省沿岸最大的海湾之一,西距深圳市60km,西南邻香港,东接红海湾;湾口宽15km,南北长30km,湾内又包括大鹏澳、哑铃湾、范和港等数个次一级的小海湾,水域面积522km²,其中约有60%水域水深超过10m。湾中央有一系列南北向分布的岛礁,称为中央列岛,它们断断续续地将海湾分隔成东西两部分,东侧入口水面宽约9.6km,水深19—20m,西侧入口宽约5.4km,水深19m。

大亚湾海域地处热带,据徐恭昭等^[6]的分析研究,其多年平均气温22℃,冬季1、2月份最冷,月平均气温约15℃,夏季7月份最热,月平均气温28℃。多年平均表层水温为23℃,冬、春季水温较低,最冷月表层水温约15℃,夏、秋季水温高,最热月表层水温30℃左右。多年平均降雨量为1500—2000mm,雨季(5—9月)的月平均降雨量可达200—400mm,且多暴雨,冬季各月天气干燥,月平均降雨量在50mm以下。大亚湾的潮汐基本上属于不规则半日潮,年平均潮差不足1m,最大潮差为2.0—2.5m。大亚湾的波浪较小,各月平均波高为0.5—0.9m。

大亚湾海水的水质较清洁,海水含沙量较少,一般为0.5—42.6mg/l,平均约9.8mg/l,表层海水平均含沙量为6.5mg/l。

大亚湾海域的初级生产力及次级生产力均较高,其生境类型多样,水产资源丰富,是发展海洋渔业生产,实现水产养殖农牧化的优良水域。

3 遥感估算表层海水叶绿素浓度原理

叶绿素具有特定的吸收和反射光谱^[7,8],在440nm附近有一吸收峰,在550nm附近有一反射峰,在685nm附近有较明显的荧光峰,这些特征的吸收峰和反射峰与陆地卫星TM1波段(450—520nm)、TM2波段(520—600nm)、TM3波段(630—690nm)一一对应。随着海水中叶绿素浓度的增加,将引起蓝光波段辐射量的减少和绿光波段及红光波段辐射量的增加,520nm附近出现独立于叶绿素浓度的分界点(又称“节点”),即该处的光谱辐射值不随叶绿素的浓度变化而变化。研究表明,随着海水中悬浮颗粒物质浓度的增加,在520nm附近出现的独立于叶绿素浓度的光谱分界点,会往长波方向移动。据国外有关研究报道^[3],当海水中悬浮颗粒物质浓度为0.1mg/l时,分界点将移至570nm,当海水中的悬浮颗粒物质浓度达到0.5mg/l时,分界点可移到690nm。

海水中叶绿素浓度变化将引起TM各波段光谱辐射值的变化,即海水中叶绿素浓度与TM各波段的光谱辐射值之间存在某种对应关系,遥感估算海水叶绿素浓度就是根据这种对应关系,利用TM光谱数据反演海水叶绿素浓度。通常认为采用TM2(包含叶绿素550nm反射峰)或TM3(包含叶绿素685nm荧光峰)与TM1(包含叶绿素440nm吸收峰)之比值估算是提取叶绿素浓度信息的最佳方法。

对于含悬浮颗粒物质较高的沿岸海水,由于独立于叶绿素浓度的光谱分界点往长波

方向漂移,随着海水中叶绿素浓度的增加, TM4(760—900nm)波段的光谱辐射值将增加,因此, TM4 波段将成为提取沿岸海水叶绿素浓度的重要信息源。

4 研究方法

以 1988 年 12 月 19 日的陆地卫星 TM 磁带数据作为遥感信息源,结合与卫星过境准同步的海水表层叶绿素浓度实测资料,根据灰色系统理论^[9],建立遥感估算沿岸海水表层叶绿素浓度的反演模型。

4.1 TM 数据的预处理

由于 TM 光谱信息包括了:(1)海表面以上的空气中悬浮物质的散射光——大气效应;(2)海表面对天空光的反射光——海面反射效应;(3)海水中悬浮物质的散射光——水体效应。上述三部分光中,只有第三部分光包含有表征海水特征的光谱信息。为了抑制其他信息,增强表征海水特征的信息,更有效地提取叶绿素浓度信息,必须对 TM 数据进行预处理。预处理包括:海陆分界、大气校正、空间滤波、噪声去除。

海陆分界 估算海水叶绿素浓度只对海域部分感兴趣,图象处理大都只对海域部分进行处理,因此需要确定海陆边界。TM5 波段图象中海陆反差明显,用于海陆分界较好,对 TM5 波段图象作二值图象处理,便可得到海陆分界图。

大气校正 大气校正是为了去除由空气中悬浮物质的散射光——大气效应产生的图象亮度部分,即消除大气效应对图象的影响,对于大亚湾海域这样的空间尺度来说,大气效应可认为是各处均匀一致的,因此可从全部图象象元灰度值中减去一辐射偏置量。先统计 TM 各波段图象的灰度直方图,当直方图中 4 个连续灰度值的象元频数之和超过图象象元总数的 0.03% 时,将其最小灰度值作为大气校正的辐射偏置量。

空间滤波 海域中相邻象元之间的亮度值应该接近,用 5×5 窗口中 25 个象元灰度平均值作为该窗口中心象元的灰度值的方法对图象的海域部分进行空间滤波,以达到平滑图象、消除噪声的目的。

噪声去除 这里的噪声去除是指大气校正、空间滤波以外的噪声消除方法,其噪声主要是在数据传输过程中产生的,在图象直方图中表现为孤立的灰度值,且数值较大,用其周边象元的平均亮度值替代之进行消除。这一步骤应在空间滤波之前进行。

4.2 建立估算叶绿素浓度的灰色模型

4.2.1 建模数据获取

叶绿素浓度数据采用与卫星过境准同步的 1988 年 12 月 18—20 日采样测定的表层海水叶绿素—a 浓度数据。

TM 各波段数据将 TM1—TM4 各波段图象作预处理后,以实测叶绿素浓度采样点周围 11×11 象元范围内的 TM 各波段灰度平均值作为与采样点对应的 TM 各波段的灰度值(表 1)。

表 1 叶绿素浓度及 TM1—TM4 波段灰度值数据表

Table 1 The data of chlorophyll and TM1—TM4

样本号	1	2	3	4	5	6	7
叶绿素 (mg / l) *	0.267	0.400	0.467	0.534	0.579	0.668	0.801
TM1	23.9	22.3	26.9	27.2	24.9	24.8	24.7
TM2	13.3	11.6	14.5	14.9	14.1	14.3	14.6
TM3	8.0	7.0	8.3	8.8	8.5	8.7	8.7
TM4	2.5	3.1	2.8	3.0	2.9	3.7	3.6

* 实测数据据南海海洋环境监测中心。

表 2 关联度分析采用的子因素

Table 2 The subfactors for correlative degree analysis

因子	因子	因子
$x_1 = R1$	$x_{26} = R2 + R3$	$x_{51} = (R3 + R4) / \ln(R1)$
$x_2 = R2$	$x_{27} = R2 \times R3$	$x_{52} = (R3 + R4) / \ln(R2)$
$x_3 = R3$	$x_{28} = R3 + R4$	$x_{53} = (R3 \times R4) / \ln(R1)$
$x_4 = R4$	$x_{29} = R3 \times R4$	$x_{54} = (R3 \times R4) / \ln(R2)$
$x_5 = R2 / R1$	$x_{30} = \ln(R1)$	$x_{55} = \ln(R2 + R3)$
$x_6 = R3 / R1$	$x_{31} = \ln(R2)$	$x_{56} = \ln(R2 \times R3)$
$x_7 = R3 / R2$	$x_{32} = \ln(R3)$	$x_{57} = \ln(R3 + R4)$
$x_8 = R3 / (R1 + R2)$	$x_{33} = \ln(R4)$	$x_{58} = \ln(R3 \times R4)$
$x_9 = (R2 + R3) / R1$	$x_{34} = R2 / \ln(R1)$	$x_{59} = \ln(R3 \times R4) / \ln(R1 + R2)$
$x_{10} = (R2 \times R3) / R1$	$x_{35} = R3 / \ln(R1)$	$x_{60} = \ln(R3 \times R4) / \ln(R1 \times R2)$
$x_{11} = R4 / R1$	$x_{36} = R3 / \ln(R2)$	$x_{61} = \ln(R3 \times R4) / \ln(R1)$
$x_{12} = R4 / R2$	$x_{37} = R3 / \ln(R1 + R2)$	$x_{62} = \ln(R3 \times R4) / \ln(R2)$
$x_{13} = R4 / R3$	$x_{38} = (R2 + R3) / \ln(R1)$	$x_{63} = \ln(R3 + R4) / \ln(R1 + R2)$
$x_{14} = R4 / (R1 + R2)$	$x_{39} = (R2 \times R3) / \ln(R1)$	$x_{64} = \ln(R3 + R4) / \ln(R1 \times R2)$
$x_{15} = R4 / (R1 + R3)$	$x_{40} = R4 / \ln(R1)$	$x_{65} = \ln(R3 + R4) / \ln(R1)$
$x_{16} = R4 / (R2 + R3)$	$x_{41} = R4 / \ln(R2)$	$x_{66} = \ln(R3 + R4) / \ln(R2)$
$x_{17} = R4 / (R1 + R2 + R3)$	$x_{42} = R4 / \ln(R3)$	$x_{67} = R4 - R3$
$x_{18} = (R3 + R4) / (R1 + R2)$	$x_{43} = R4 / \ln(R1 + R2)$	$x_{68} = (R4 - R3) / R1$
$x_{19} = (R3 + R4) / (R1 \times R2)$	$x_{44} = R4 / \ln(R1 + R3)$	$x_{69} = (R4 - R3) / R2$
$x_{20} = (R3 \times R4) / (R1 + R2)$	$x_{45} = R4 / \ln(R2 + R3)$	$x_{70} = (R4 - R3) / \ln(R1)$
$x_{21} = (R3 \times R4) / (R1 \times R2)$	$x_{46} = R4 / \ln(R1 + R2 + R3)$	$x_{71} = (R4 - R3) / \ln(R2)$
$x_{22} = (R3 + R4) / R1$	$x_{47} = (R3 + R4) / \ln(R1 + R2)$	$x_{72} = \ln(R4 - R3) / \ln(R1)$
$x_{23} = (R3 + R4) / R2$	$x_{48} = (R3 + R4) / \ln(R1 \times R2)$	$x_{73} = \ln(R3 - R4) / \ln(R2)$
$x_{24} = (R3 \times R4) / R1$	$x_{49} = (R3 \times R4) / \ln(R1 + R2)$	$x_{74} = \ln(R3 - R4) / R1$
$x_{25} = (R3 \times R4) / R2$	$x_{50} = (R3 \times R4) / \ln(R1 \times R2)$	$x_{75} = \ln(R3 - R4) / R2$

4.2.2 关联度分析

为了了解叶绿素浓度与 TM 各波段灰度值之间的关系,我们把叶绿素浓度作为母因素, TM1—TM4 波段的灰度值及其组合作为子因素,进行因素分析,考察各子因素与母因素之间的关联程度。因素分析可以采用统计分析方法,但统计分析要求数据(样本)量大,且数据的分布是典型的,数据少或其分布不典型,则难以找到统计规律。为了避免统计分析的不足,我们采用灰色系统理论中关联度分析方法,关联度分析是对事态变化趋势的量化分析,其实质是对曲线间几何形状趋近程度的分析比较。

由于子因素之间及其与母因素之间的量纲不同,会给因素分析带来干扰,为了排除因素间量纲不同引起的干扰,在进行关联度分析时,须对各因素作无量纲化处理。这里采用均值化处理,即将数据序列中各项除以该序列的平均值。无量纲化后对各序列数据作一次累加生成,再分析各子因素序列与母因素序列间的关联度。

为了全面考察 TM1—TM4 波段与叶绿素浓度之间的关系,根据叶绿素的光谱特征及浓度变化所引起光谱特征的变化,共选取 TM1—TM4 波段的 75 种组合作为子因素,所选的各种波段组合列于表 2,表中 R1、R2、R3、R4 分别代表 TM1、TM2、TM3、TM4 的灰度值。将海水叶绿素浓度的实测数据作为母因素,经关联度分析,得到各种波段组合与叶绿素浓度之间的关联度(表 3)。

表 3 关联度分析结果表

Table 3 The results of correlative degree analysis

因子	关联度	因子	关联度	因子	关联度	因子	关联度
x_1	0.5896	x_{20}	0.7086	x_{39}	0.6618	x_{58}	0.6509
x_2	0.6297	x_{21}	0.6400	x_{40}	0.6875	x_{59}	0.6408
x_3	0.6435	x_{22}	0.6512	x_{41}	0.6710	x_{60}	0.6364
x_4	0.6919	x_{23}	0.6203	x_{42}	0.6570	x_{61}	0.6424
x_5	0.6410	x_{24}	0.7053	x_{43}	0.6838	x_{62}	0.6291
x_6	0.6514	x_{25}	0.7017	x_{44}	0.6832	x_{63}	0.6283
x_7	0.6228	x_{26}	0.6346	x_{45}	0.6715	x_{64}	0.6238
x_8	0.6407	x_{27}	0.6396	x_{46}	0.6820	x_{65}	0.6296
x_9	0.6445	x_{28}	0.6583	x_{47}	0.6637	x_{66}	0.6167
x_{10}	0.6932	x_{29}	0.7668	x_{48}	0.6631	x_{67}	0.6371
x_{11}	0.6430	x_{30}	0.6079	x_{49}	0.7619	x_{68}	0.6490
x_{12}	0.6268	x_{31}	0.6201	x_{50}	0.7580	x_{69}	0.6078
x_{13}	0.6248	x_{32}	0.6280	x_{51}	0.6697	x_{70}	0.6372
x_{14}	0.6365	x_{33}	0.6783	x_{52}	0.6554	x_{71}	0.6202
x_{15}	0.6401	x_{34}	0.6357	x_{53}	0.7621	x_{72}	0.6280
x_{16}	0.6310	x_{35}	0.6513	x_{54}	0.7535	x_{73}	0.6141
x_{17}	0.6360	x_{36}	0.6367	x_{55}	0.6215	x_{74}	0.6354
x_{18}	0.6396	x_{37}	0.6458	x_{56}	0.6235	x_{75}	0.6096
x_{19}	0.5948	x_{38}	0.6412	x_{57}	0.6331		

从表3可知: (1) TM1、TM2、TM3、TM4 与叶绿素浓度之间的关联度依次变大, 说明它们在估算叶绿素浓度时的重要性依次增加, TM4 是估算叶绿素浓度的最重要波段。(2) 在 75 种波段组合中, x_{29} : (TM3×TM4)、 x_{49} : (TM3×TM4) / ln(TM1+TM2)、 x_{50} : (TM3×TM4) / ln(TM1×TM2)、 x_{53} : (TM3×TM4) / ln(TM1)、 x_{54} : (TM3×TM4) / ln(TM2) 等 5 种波段组合与叶绿素浓度之间的关联度最大, 超过 0.75; 另外 x_{20} : (TM3×TM4) / (TM1+TM2)、 x_{24} : (TM3×TM4) / TM1、 x_{25} : (TM3×TM4) / TM2 3 种波段组合与叶绿素浓度的关联度亦较大, 达 0.7。这些关联度大的波段组合都包含有 (TM3×TM4), 说明 (TM3×TM4) 与沿岸海水叶绿素浓度之间具有最密切关系。

出现上述关联度分析结果, 是由于沿岸海水中含有较多的悬浮颗粒物, 导致独立于叶绿素浓度的光谱分界点往长波方向移动, 而在 TM 图象象元对应的水域范围(30m×30m)内, 水体中的悬浮颗粒物质的分布不可能是均匀的, 导致独立于叶绿素浓度的光谱分界点的移动幅度各处不一, 从而引起 TM 各波段辐射值的增减程度各处不同。随着叶绿素浓度的增加, TM4 波段因位于“节点”之后, 其辐射值将增加; TM3 波段因与“节点”的关系较复杂, 其辐射值可能增加也可能减少, 对于大亚湾这种水质相对较为清洁的海湾来说, TM2 波段或包含“节点”或位于“节点”之前, 其辐射值通常减少, 减少幅度, 取决于“节点”的位置; TM1 波段则总位于“节点”之前, 其辐射值将减少, 但 TM1 波段因其入水深度相对较大, 悬浮颗粒物产生的散射将补偿其因叶绿素增加引起的辐射值的减少。另外在太阳紫外和紫色光的激发下, 叶绿素将产生红色荧光, TM3 波段因包括叶绿素的荧光峰, 随着叶绿素浓度的增加其辐射值会有所增加。至此, 不难理解出现上述因子分析结果(TM1—TM4 各波段灰度值与叶绿素浓度之间的关联度依次增大, TM3 和 TM4 波段之联合(TM3×TM4) 与叶绿素浓度的关联度最大)的原因和其合理性。

4.2.3 灰色模型的建立

关联度分析得到关联度最大的 5 个子因素, 它们具有相近的物理意义, 并不是彼此相互独立的子因素, 因此不能将它们作为 5 个独立的子因素建立统一的数学模型, 只能将它们分别建立数学模型, 这里采用灰色系统中 GM(0,2) 模型的建模方法, 建立了下列 5 个模型。

$$(1) Y_c = 0.035013 x_{29} - 0.366984.$$

$$(2) Y_c = 0.130428 x_{49} - 0.382138.$$

$$(3) Y_c = 0.213500 x_{50} - 0.405492.$$

$$(4) Y_c = 0.114975 x_{53} - 0.387297.$$

$$(5) Y_c = 0.099423 x_{54} - 0.437805.$$

式中 Y_c 为叶绿素浓度估算值, x_{29} , x_{49} , x_{50} , x_{53} , x_{54} 含义同表 2。

4.2.4 模型精度检验

将表 1 中 TM1—TM4 各波段灰度值代入上述 5 个模型, 得到各模型的叶绿素浓度估算值, 将估算值与实测值比较(表 4)可以看出, 各模型的估算值与实测值比较接近, 其浓度最大差值只有 0.1008(mg/l)。

对各模型的估算误差进行分析(表 5)表明, 各模型的最大相对误差在 19% 以下, 平

表 4 估算的叶绿素浓度和实测的叶绿素浓度对照表

Table 4 Comparison between chlorophyll concentration and it's estimated value

样本号	1	2	3	4	5	6	7
实测值	0.2670	0.4000	0.4670	0.5340	0.5790	0.6680	0.8010
模型 1	0.3333	0.3928	0.4453	0.5574	0.4978	0.7604	0.7289
模型 2	0.3352	0.4265	0.4265	0.5439	0.4917	0.7656	0.7265
模型 3	0.3418	0.4272	0.4272	0.5339	0.4912	0.7688	0.7260
模型 4	0.3370	0.4175	0.4290	0.5325	0.4980	0.7624	0.7394
模型 5	0.3278	0.4471	0.4272	0.5265	0.4868	0.7652	0.7254

表 5 5 个模型估算叶绿素浓度相对误差(%)分析表

Table 5 Analysis of relative error (%) for estimated results

样本号	1	2	3	4	5	6	7	A	G
模型 1	12.48	-1.36	-4.08	4.40	-15.29	17.41	-13.58	9.80	6.07
模型 2	12.85	5.00	-7.63	1.87	-16.44	18.39	-14.03	10.89	6.52
模型 3	14.08	5.12	-7.51	-0.02	-16.54	18.98	-14.12	10.91	6.70
模型 4	13.20	3.30	-7.15	-0.28	-15.26	17.79	-11.59	9.80	6.09
模型 5	11.44	8.87	-7.50	0.48	-17.36	18.31	-14.23	11.17	6.67

A 代表平均绝对相对误差, G 代表标准差

均绝对相对误差在 9.8—11.2% 之间, 标准误差在 6.7% 以下, 模型精度较高。

5 讨论与结论

本研究以 TM 遥感数据为信息源, 结合与卫星过境准同步的叶绿素浓度实测资料, 在对叶绿素光谱特征及遥感估算叶绿素浓度机理研究基础上, 利用灰色系统理论, 进行因子分析, 选取与叶绿素浓度关联度最大的波段组合作为建模因子, 建立的估算沿岸海水表层叶绿素浓度的灰色模型, 形式简明, 精度较高, 平均绝对相对误差在 9.8—11.2% 之间。建立的 5 个模型具有明确的物理意义, 估算精度彼此较为接近, 采用 (TM3×TM4) 与 ln(TM1)、ln(TM2)、ln(TM1+TM2) 或 ln(TM1×TM2) 之比值等波段组合, 所建立的模型, 并未改善其估算精度, 在应用中采用以 (TM3×TM4) 之波段组合建立的模型 1 较好。

与通常认为 TM2、TM3 或 (TM2×TM3) 与 TM1 之比值是估算海水表层叶绿素浓度的最佳波段组合不同, 本研究在对 TM1—TM4 的 75 种波段组合进行因子分析基础上, 得出 TM3 与 TM4 之乘积 (TM3×TM4) 是估算沿岸海水表层叶绿素浓度的最佳波段组合, 这主要是由于沿岸海水中含有较多的悬浮颗粒物, 导致独立于叶绿素浓度的光谱分界点往长波方向移动, TM4 及 TM3 的灰度值随叶绿素浓度的增加而增加, 与叶绿素浓度的关联性好; TM1 和 TM2 的入水深度较大, 包含有海底底质和水体悬浮物质

等非叶绿素浓度信息, 因此 TM1 和 TM2 与表层叶绿素浓度的关联性差。

TM 各波段的光谱分辨率较低, TM1—TM4 光谱数据中包含大量的非叶绿素浓度信息, 给叶绿素浓度估算带来困难, 另外由于海水中叶绿素浓度随时间的变化率较大, 现行的叶绿素浓度实测方法很难实现与卫星过境同步测量, 各实测点的实测资料也是不同步的, 这些都是引起模型估算误差的主要原因, 因此要提高遥感模型估算沿岸海水表层叶绿素浓度的精度, 须要提高遥感资料的光谱分辨率和改善现行的叶绿素浓度实测方法。

尽管已有更高光谱分辨率的水色扫描仪资料用于海水叶绿素浓度估算, 但因其空间分辨率低, 用于沿岸港湾的叶绿素浓度测量, 显得粗略, 因此用高空间分辨率的 TM 遥感资料估算沿岸港湾的叶绿素浓度仍有其现实意义。将高空间分辨率的 TM 资料与高光谱分辨率的其他卫星遥感资料相结合, 探测沿岸海水叶绿素浓度的方法值得重视。

参 考 文 献

- [1] 舒守荣等. 遥感反射光谱测试与应用研究. 北京: 科学出版社, 1988.
- [2] Li Jilong. The Studies of Use Landsat TM Data Quantifying Daihai Chlorophyll and Water Weed. proceeding of Seminar on Remote Sensing Applications for Oceanography and Fishery Environment Analysis, Beijing, 1990.
- [3] S. Ekstrand. Landsat TM based Quantification of Chlorophyll-a during Algae Blooms in Coastal Waters. *Int. J. of Remote Sensing*, 1992, 13(10): 1913—1926.
- [4] S. Tassan. An Improved In-water Algorithm for the Determination of Chlorophyll and Suspended Sediment Concentration from Thematic Mapper Data in Coastal Water. *Int. J. of Remote Sensing*, 1993, 14(6): 1221—1229.
- [5] R. C. Smith and K. S. Baker. Oceanic Chlorophyll Concentration as Determined by Satellite (Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner). *Marine Biology*, 1982, 66(2): 269—279.
- [6] 徐恭昭等. 大亚湾环境与资源. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1989.
- [7] 李铁芳等. 卫星海洋遥感信息提取和应用. 北京: 海洋出版社, 1990.
- [8] 费尊乐. 遥感技术应用于海水叶绿素浓度测定的初步探讨. 海洋遥感文集. 北京: 海洋出版社, 1980.
- [9] 邓聚龙. 灰色控制系统. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987.

作 者 简 介

陈楚群, 男, 1960年生, 1982年1月毕业于成都理工大学, 1989年9月中国科学院遥感应用研究所研究生毕业, 现在中国科学院南海海洋研究所从事海洋遥感应用研究工作, 已发表遥感应用研究论文10余篇。

Study on Modeling Chlorophyll Concentration of Surface Coastal Water Using TM Data

Chen Chuqun Shi Ping Mao Qingwen

(*South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences*)

Abstract Some models for estimating chlorophyll concentration are developed in this study by taking Daya Bay as an experimental site and Landsat-5 TM (Thematic Mapper) data as information resources, and combining the survey data of chlorophyll concentration in the surface coastal water. On the base of studying the spectral characteristics of chlorophyll and the mechanism of surveying chlorophyll concentration using remote sensing data, taking 75 band compositions of TM1—TM4 bands as the subfactors and the chlorophyll concentration as the mother factor, factor analysis was carried out by using the Grey System Theory. According to the results of the factor analysis, 5 band compositions, which have greater correlative degree to the mother factor, are selected for modeling. The error analysis shows that these models have high accuracy with the mean absolute relative error less than 11.2% and relative standard error less than 6.7%.

Unlike the general way taking the ratio of TM2 or TM3 to TM1 as the best band compositions, this study shows that $(TM3 \times TM4)$ is the best band composition for estimating chlorophyll concentration of the surface layer of coastal water, and the estimated accuracy can not be advanced by using the ratio of $(TM3 \times TM4)$ to TM1 or TM2 or $\ln(TM1 + TM2)$ or $\ln(TM1 \times TM2)$.

Key words Chlorophyll, Remote sensing, Grey system, Model