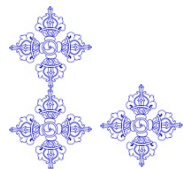


# 第七章 水环境遥感

主讲教师：史晓亮

测绘科学与技术学院遥感科学与技术系



西安科技大学  
XI'AN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



我国水环境问题形式严峻

水资源减少

水体污染

# 第三章 水环境遥感

3.1 水环境概述

3.2 水环境遥感原理

3.3 水资源遥感监测

3.4 水污染遥感监测



西安科技大学  
XI'AN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

# 第三章 水环境遥感

## 3.1 水环境概述

## 3.2 水环境遥感原理

## 3.3 水资源遥感监测

## 3.4 水污染遥感监测





## 3.1.1 水环境概述

**水环境：** 由地球表层水圈所构成的环境，它包括在一定时间内水的数量、空间分布、运动状态、化学组成、生物种群和水体的物理性质

范围大小	特定区域
<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>区域水环境</b>（如流域水环境、城市水环境等）</li><li>• <b>全球水环境</b></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>地表水环境</b>（河流、湖泊、水库、池塘、沼泽等）</li><li>• <b>地下水环境</b>（泉水、浅层地下水和深层地下水等）</li></ul>



## 3.1.1 水环境概述

地球水环境总是处于不断变化中，与大气环境、土壤环境等相比，水环境具有明显的特点

- 水体状态的可变性
- 水体物质组成的差异性
- 水体时空分布的不均一性
- 水的可循环性



## 3.1.1 水环境概述

- **水环境遥感监测**以往多是对地表各种水体进行空间识别、定位、及定量计算面积、体积或模拟水体动态变化
- 随着遥感基础研究的进展，以及对水体光谱特性的深入研究，同时结合水质光谱数据测试，**由水体的遥感监测转换到水体属性特征参数的定量测定**，如水深的探测、悬浮泥沙浓度和叶绿素含量的反演，以及污染状况的监测等



## 3.1.2 水体

- 河流、湖泊、沼泽、水库、地下水、海洋的总称
- 环境学领域把**水体**当作包括水中的悬浮物、溶解物质、底泥和水生生物等完整的生态系统或完整的综合自然体

- 按区域水体指某一具体的被水覆盖的地段，如太湖、洞庭湖等
- 按类型划分为陆地水体和海洋水体





## 3.1.2 水体

### 水体的组分

- 纯水
- 叶绿素：一般称浮游植物
- 悬浮颗粒物（悬浮泥沙）：指悬浮在水中的直径在2mm以下的微小颗粒物，是引起水体浑浊的主要原因
- 有色可溶性有机物CDOM（黄色物质）：以溶解有机碳为主要成分、分子结构非常复杂的一大类物质的统称



## 3.1.2 水体

### □ I类水体和II类水体

- 根据水色遥感的研究对象，可以分为**内陆（Inland）水体**、**近岸（Coastal）水体**、**大洋开阔水体（Open sea）**等

- I类水体**：浮游植物起主要作用的水体，**大洋开阔水体**，光学特性相对简单
- II类水体**：不仅受浮游植物的影响，而且受到其他悬浮颗粒物和黄色物质的影响，主要位于近岸、河口等陆源物质排放影响较为严重的地方，**近岸和内陆水体**，光学性质复杂多变



## 3.1.3 水体污染及类型

- **水体污染：**当污染物进入河流、湖泊、海洋和地下水等水体，其含量超过水体的自净能力，使水质和底质的物理、化学性质或生物群落组成发生变化，从而降低了水体的使用价值和使用功能的现象
- 目前，水体污染的类型划分，除**按水体类型划分为河流污染、湖泊（水库）污染、海洋污染和地下水污染**外，大多采用**按污染物划分污染类型**



## 3.1.3 水体污染及类型

- **感官性状污染：**色泽、浓度、气味等发生变化
- **需氧物质污染：**生活污水、食品加工和造纸工业排放的污染物，含有碳水化合物、蛋白质等，在氧化分解过程中消耗溶解氧，影响水生生物生长，当水中溶解氧不足时，进行厌氧分解，产生 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CH}_4$ 等难闻气体
- **无机污染：**酸、碱、无机盐类的污染，引起水中PH值变化，影响微生物生长和水体自净作用



## 3.1.3 水体污染及类型

- **植物营养物质污染：**富含氮、磷等植物营养物质的废水进入水体，引起水体富营养化，使藻类大量繁殖并消耗水中的溶解氧，导致鱼类窒息死亡
- **有毒化学物质污染：**有机农药、重金属等有毒物质进入水体后，高浓度时直接杀死水生生物，低浓度时，在生物体内累积，通过食物链危害人类健康
- **油污染：**炼油工业废水排放、海洋石油开发、油轮运输等都会引起水体油污染



## 3.1.3 水体污染及类型

- **病原体污染：**生活污水、畜禽饲养场污水、医院污水等，常会有各种病原体，如病毒、细菌、寄生虫等，传播各种疾病
- **放射性污染：**原子能工业、核爆炸试验、核电站事故，以及医疗科研领域的同位素应用，增加了放射性废水的污染
- **热污染：**热电厂等排放的高温废水，使水温升高，加快水中化学反应速度，造成溶解氧减少，影响鱼类生存和繁殖

# 第三章 水环境遥感

3.1 水环境概述

3.2 水环境遥感原理

3.3 水资源遥感监测

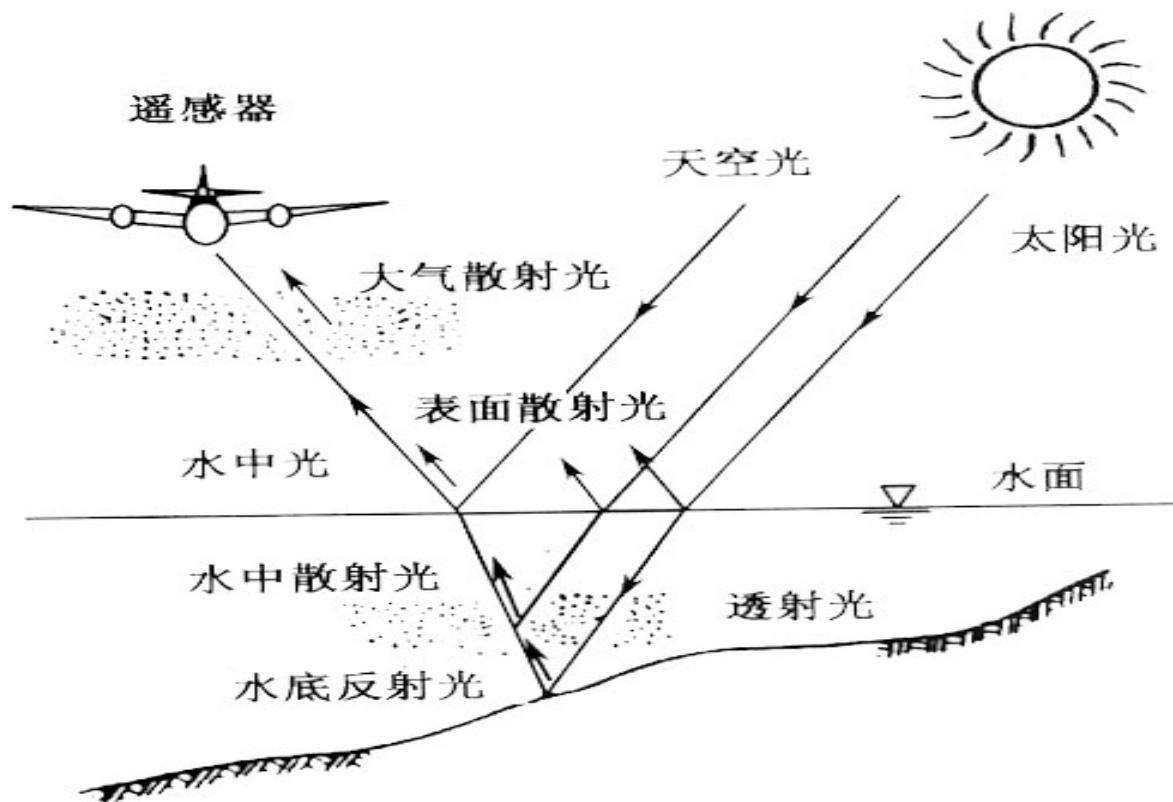
3.4 水污染遥感监测



西安科技大学  
XI'AN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



## 3.2.1 水体辐射传输过程



电磁波与水体相互作用的辐射传输过程





## 3.2.1 水体辐射传输过程

- 入射光的一小部分（约3.5%）被水面反射回空中，构成**水面的反射辐射 $L_s$** ，带有少量水体本身的信息，**其强度和水面的性质有关**：表面粗糙度、水面浮游生物、水面冰层等
- 其余的光经折射、透射进入水中，大部分被水分子吸收和散射。一部分入射光被水体中的悬浮物种和有机生物散射，构成**水中的散射光**，强度与水的浑浊度正相关。其中，返回水面的部分构成**后向散射光**
- 衰减后的散射光到达水体底部再反射，形成水底反射光，强度与水深及水的浑浊度呈负相关
- 水底反射光和后向散射光共同组成**水中光（离水反射辐射）**



## 3.2.1 水体辐射传输过程

传感器接收的信息：水面反射光 $L_s$ ，水中光 $L_w$ 和天空散射光 $L_p$

$$L = L_s + L_w + L_p$$

不同水体的水面性质、水中悬浮物的性质和数量、水深和水底特性的不同，传感器接收的反射光谱特性存在差异，为遥感探测水体提供了基础



## 3.2.1 水体辐射传输过程

程辐射 $L_p$ 无水体信息	太阳入射辐射强度，大气状况，入射角度，观测角度
水面反射 $L_s$ 少量水体信息	太阳入射辐射强度，入射角度，观测角度，水面状况： 水面粗糙度、水面浮游生物、水面冰层等
离水反射 $L_w$ 水体信息的主要部分	太阳入射辐射强度，入射角度，观测角度，水下状况： 浮游生物含量（叶绿素浓度），悬浮泥沙含量（浑浊度），营养盐含量（黄色物质、溶解有机物质），其他污染物，水底地形，水深



## 3.2.1 水体辐射传输过程

由于水体的透光性和水面的反射性，由传感器接收到的水体遥感光谱信号包含了来自大气、水面、水体以及水底不同层次的光谱信号，是一个经过叠加的综合信号

可以通过探测水中光和水面反射光，获得水色、水温、水面形态等信息，或推测有关浮游生物、悬浮物等物质的质量和数量等有关信息



## 3.2.2 水体光谱特性

水体与其他环境因子相比，具有较为明显的辐射特征，其主要表现为：

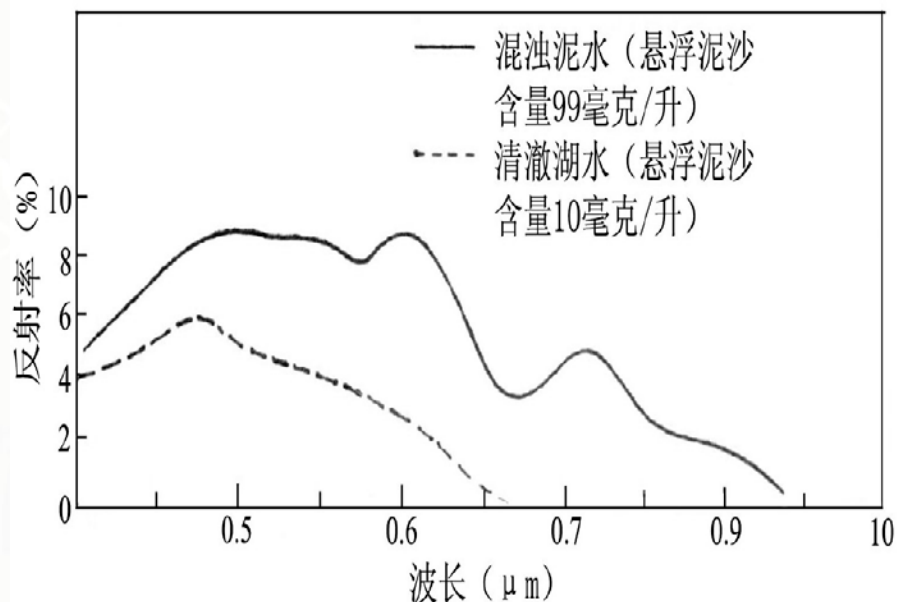
- 天然水体对 $0.4\sim 1.1\mu\text{m}$ 电磁波的反射率明显低于其他地物，在遥感影像上常常表现为暗色调
- 近红外波段的反射比可见光波段更低
- 对于不同的水体，在可见光波段的反射率具有明显的不同，如随泥沙含量的增加而增强



## 3.2.2 水体光谱特性

### 纯水

- 清水的反射主要集中在**蓝绿光波段**，一般为4~5%，不超过10%，并随波长增加逐渐降低，至750nm以后的红外波段几乎全部吸收，因此在近红外影像上表现为黑色
- 选择近红外波段识别水体**







## 3.2.2 水体光谱特性





## 3.2.2 水体光谱特性

### 叶绿素

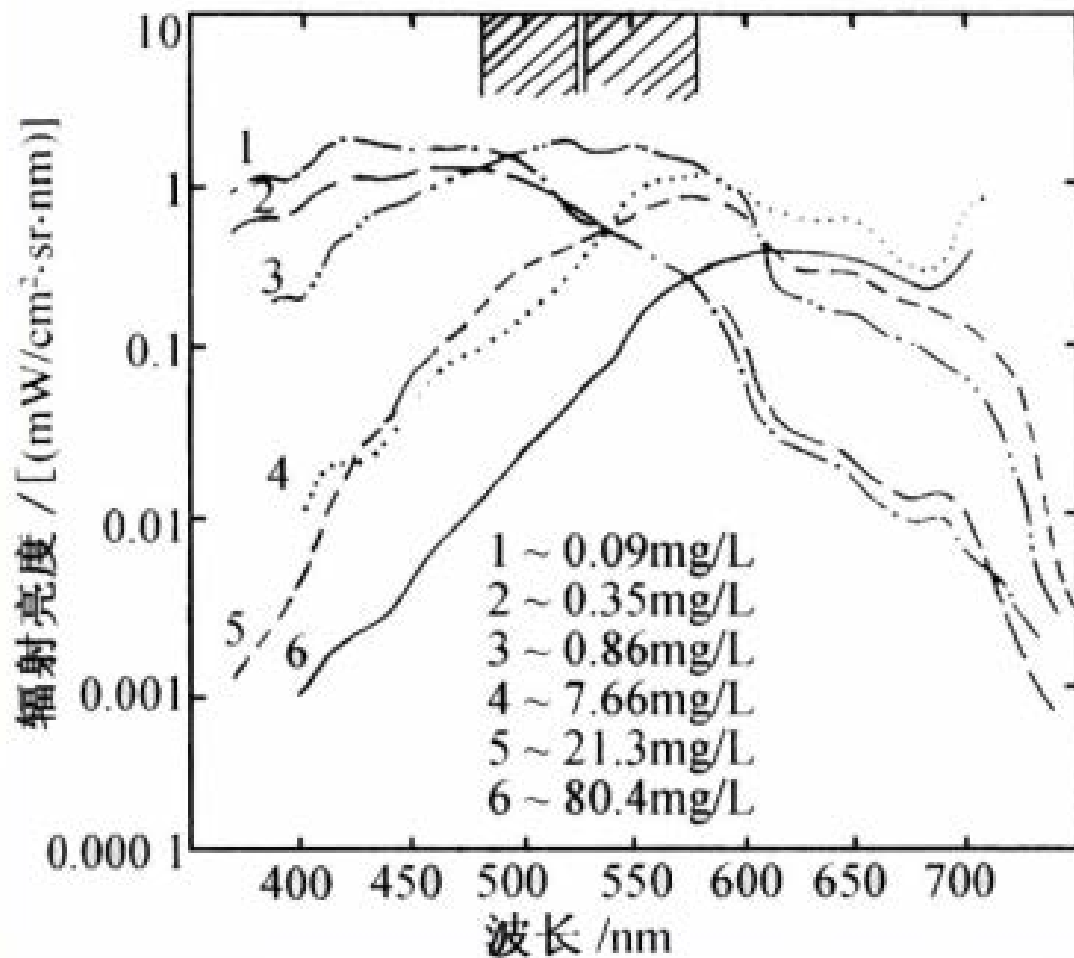
随着叶绿素含量的不同，在 $0.43\sim 0.70\mu\text{m}$ 光谱段会有选择的出现明显的差异

- 在443nm处存在吸收峰，400~490nm（蓝光）反射辐射随叶绿素浓度加大而降低
- 520nm处出现节点，该处的辐射值不随叶绿素a浓度变化而发生显著变化
- 550nm处出现反射辐射峰，并随着叶绿素含量增加，反射辐射上升





## 3.2.2 水体光谱特性



不同浓度的叶绿素的反射辐射曲线



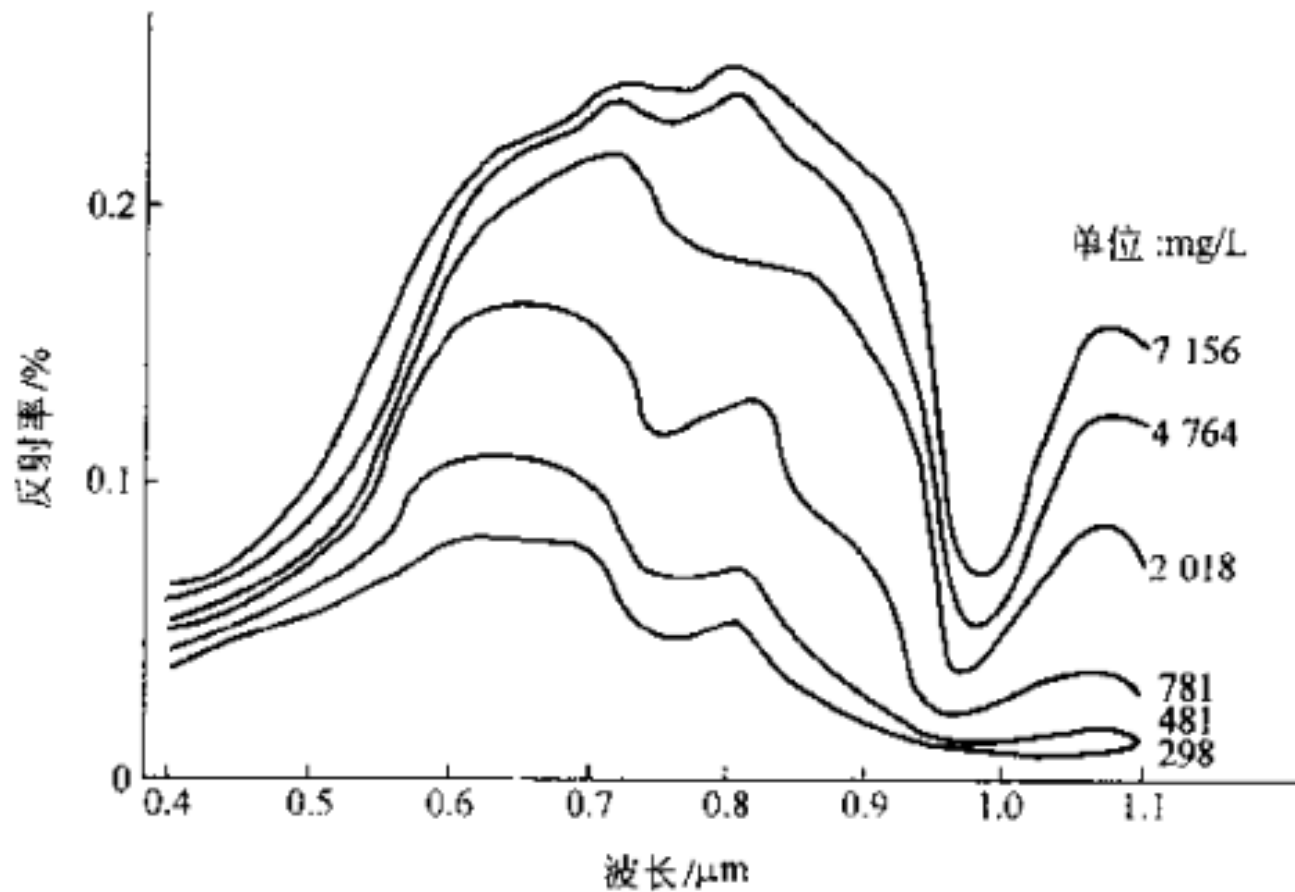
## 3.2.2 水体光谱特性

### 悬浮颗粒物

- 由于水中悬浮颗粒的散射作用，可见光波段反射率增加，峰值出现在黄红波段
- 含有颗粒物的浑浊水体光谱反射呈现双峰特征。随着水体颗粒物含量增加，反射峰向较长的红外波段移动，即“红移”现象，但红移存在一个极限波长
- **光谱反射率随悬浮颗粒浓度增加而增大**



## 3.2.2 水体光谱特性



# 第三章 水环境遥感

3.1 水环境概述

3.2 水环境遥感原理

3.3 水资源遥感监测

3.4 水污染遥感监测





## 3.3 水资源遥感监测

- 在水资源监测中，实测数据必不可少。但仅通过水文观测点得到的有限实测数据不能满足区域水资源分布的研究需求
- 随着多传感器、多光谱遥感的发展和应用，结合地面实测数据，遥感技术在**河流湖泊动态监测、水深探测、冰雪覆盖、土壤水分**等水资源监测方面发挥巨大作用
- 特别是在人类足迹难以到达的荒凉地区，遥感技术成为研究水文循环、水资源有效监测和管理的重要手段



## 3.3 水资源遥感监测

水文要素遥感研究	水域变化监测
<ul style="list-style-type: none"><li>• 水体信息提取</li><li>• 水深探测</li><li>• 水温探测</li><li>• 径流估算</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 河流水系变化</li><li>• 湖泊演变</li><li>• 河口三角洲演变</li><li>• 海岸带演变</li></ul>



## 3.3.1 水体信息的自动提取

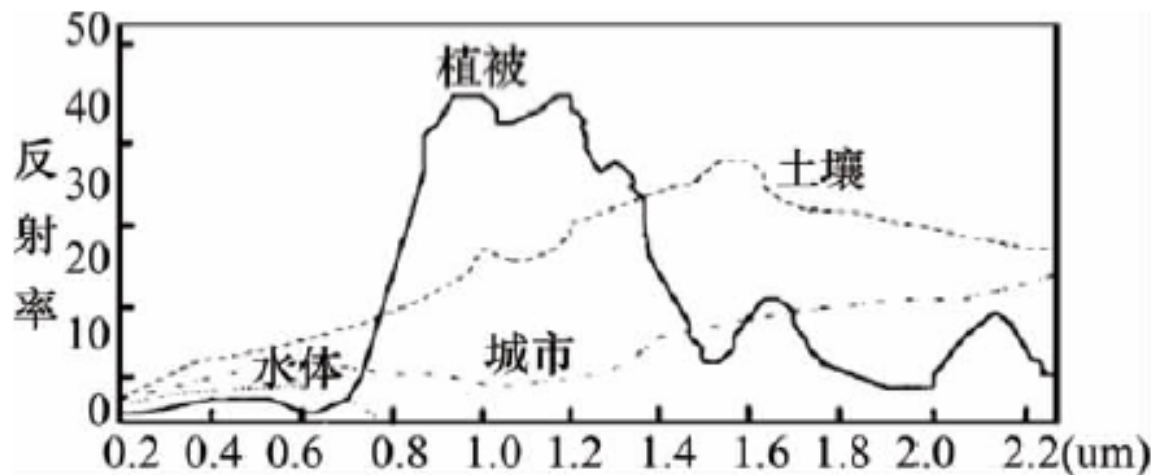


图 1 几种典型地物的光谱特性曲线<sup>[7]</sup>

- 水体的总体反射率较低，主要集中在可见光波段，尤其是蓝绿波段，到 $0.75\mu\text{m}$ 处的近红外波段，水体的反射率显著衰减，从 $0.8\mu\text{m}$ 的近红外波段之后，水体的反射率基本为0
- 植被和土壤以及城市在近红外波段反射率相对都较高。与水体形成了鲜明的对比和反差
- 水体的这一光谱特征是提取水体的重要理论依据



# 3.3.1 水体信息的自动提取

表 2 水体信息提取方法的细类划分

方法	细类划分	工作原理
阈值法	单波段法	利用水体在近或中红外波段强吸收的特点来提取水体信息
	多波段法	基于水体在不同波段的光谱特征曲线，选择合适波段构建模型提取水体信息
	谱间关系法	
	比值法	
	差值法	
分类法	水体指数法	基于选择的算法规则，在高维特征空间中，采用机器学习算法进行最优分类、提取水体信息
	.....	
	支持向量机法	
	决策树法	
	面向对象法	
	.....	通过分割影像，使对象内部保持最大同质性、对象之间保持最大异质性，来提取水体信息





## 3.3.1 水体信息的自动提取

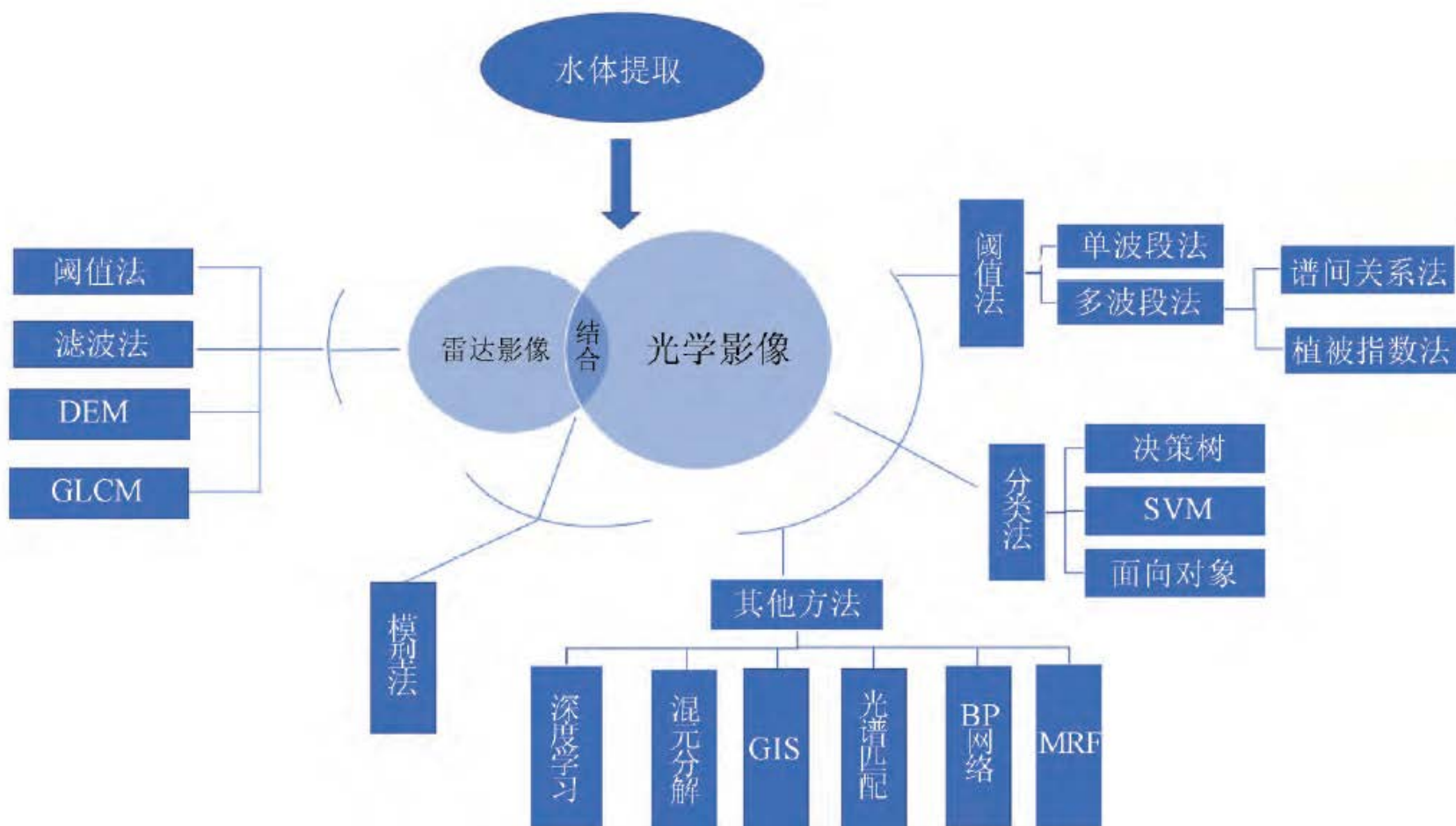


图1 水体提取方法分类



## 3.3.1 水体信息的自动提取

### 单波段法

利用水体和其他地物在近红外或中红外波段上光谱特征的差异来提取水体信息

**例如：** **TM5波段**为短波红外波段，水体在该波段吸收最强，反射率几乎为0，因此在该波段的影像上通过选择一定的阈值T，小于该阈值的为水体，大于该阈值即为其他地物。水体的提取模型如下所示

$$\text{TM5} < T$$



## 3.3.1 水体信息的自动提取

### 单波段法

- **关键：** 阈值选取的准确性直接决定了最终水体提取的准确性
- **缺点：** 只利用了单个波段的数据，且由于水体和阴影在影像各个波段的反射率相差不大，很难找到一个准确的阈值将水体和阴影完全区分开来。而且，水体与非水体之间的过渡区域容易被忽略，无法提取细小水体

单波段阈值法多适用于无地形起伏的平原地区，在地形起伏较大，阴影较多的山地地区并不适用。如今，单波段法已逐渐被多波段法取代



## 3.3.1 水体信息的自动提取

### 多波段谱间关系法

- 谱间关系法**：根据水体与植被、城市和土壤等背景地物的波谱曲线之间的差异和变化规律，用逻辑判别式将不同波段之间的关系表达出来，进而提取水体

水体在TM2和TM3波段的灰度值均大于同波段阴影的灰度值，在TM4和TM5波段的灰度值均小于同波段阴影的灰度值

通过这4个波段之间的有效组合，可以增大水体和阴影灰度值的差异，从而将两者很好地区分开来

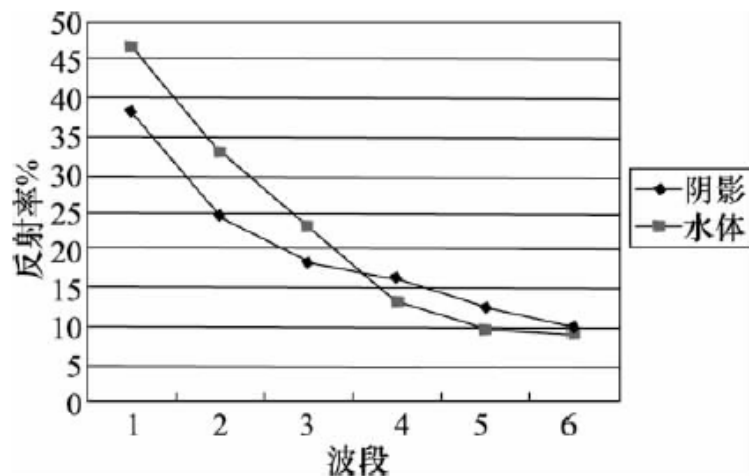


图2 阴影和水体在TM各个波段上的反射率<sup>[2]</sup>



## 3.3.1 水体信息的自动提取

### 多波段谱间关系法

- 周成虎等针对TM数据，建立了用于识别水体的谱间关系模型

$$(TM2+TM3) > (TM4+TM5)$$

- 汪金花等通过对唐山水体试验，认为水体具有TM4与TM2的比值小于0.9的特征，构建了谱间关系和比值模型  $(TM2 + TM3) - (TM4 + TM5) > 0$  且  $TM4/TM2 < 0.9$
- 也有研究认为，单独利用谱间关系法的提取效果不好，可以利用  $(TM2 + TM3) - (TM4 + TM5)$  和阈值结合可以更好地去除山体阴影，但是阈值的确定需要多次试验



## 3.3.1 水体信息的自动提取

### 多波段谱间关系法

- 多波段谱间关系法比较适合地形起伏较小的地区，因为阴影的影响，需要对谱间关系法进行修正和补充才能使其更好地适用于山地区域。
- 在地形复杂区域，特别是高山积雪和冰川活动及河流冲洪积物等较多区域，用谱间关系法提取水体信息时，除阴影外，冰雪和冲洪积物等也对水体信息提取产生明显干扰。



## 3.3.1 水体信息的自动提取

### 水体指数法

- 水体指数法是基于水体光谱特征分析，选取与水体识别密切相关的波段，通过构建水体指数模型来分析水体与光谱值之间的关系，并给定相应的阈值，实现对水体信息的提取。
- 目前，多波段法中水体指数法的应用频次最高
- 归一化水体指数 (normalized difference water index, NDWI)





## 3.3.1 水体信息的自动提取

### 水体指数法

考虑到单波段法波段单一、对地物类型丰富影像的信息提取有局限性，而多波段谱间关系法分析过程复杂、对背景信息抑制较差等特点，McFeeters构建了归一化差异水体指数(NDWI)

$$\text{NDWI} = (\text{Green} - \text{NIR}) / (\text{Green} + \text{NIR})$$

Green为绿光波段的反射率，NIR为近红外波段的反射率





## 3.3.1 水体信息的自动提取

### 水体指数法

- 绿光波段水体的反射比较强，近红外波段对植被的反射比较强。因此，选择这两个波段提取水域的面积信息，能更好地突出水体抑制植被和其他地物信息的干扰
- 但如果某一地区存在大面积的城市和裸地，产生的噪音会对水体信息的提取造成干扰，会出现一定误差。为了解决此问题，提出**修正的NDWI，即MNDWI**

$$\text{MNDWI} = (\text{Green} - \text{MIR}) / (\text{Green} + \text{MIR})$$



## 3.3.1 水体信息的自动提取

### 水体指数法

- 改进的归一化水体指数MNDWI，引入中红外波段代替近红外波段，能降低裸地和城市的干扰，水体指数大为增大，而且在MNDWI数据中水体的值也为最大
- 这是和NDWI数据特征相符的，因此选取一定的阈值就能更好的提取水体信息



## 3.3.1 水体信息的自动提取

### 水体指数法

- 水体指数法采用了归一化比值运算，因此能够自动消除地形起伏的影响，一定程度上区分水体和阴影，但在很多情况下，用NDWI提取的水体信息中仍然夹杂着许多非水体信息
- 水体和阴影都具有绿波段的灰度值大于近红外波段灰度值的特征，在进行了归一化运算后，水体和阴影的灰度值仍然很接近。因此**该方法在提取山区的水体方面不太理想，水体和阴影存在混淆，而在平原地区，该方法提取水体效果较好**



## 3.3.1 水体信息的自动提取

表 3 几种常用的水体指数及其模型

指数名称	模型公式	特点
归一化差异植被指数 NDVI	$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$ NIR—近红外；R—红光	能很好地区分水体和植被、土壤等背景；受冰雪和地形影响较小，受薄云影响大；难以区分水体和阴影
归一化差异水体指数 NDWI	$NDWI = (G - NIR) / (G + NIR)$ G—绿光；NIR—近红外	最大程度地抑制植被信息，突出水体特征；建筑物和土壤易与水体混淆；受冰雪、薄云和山体阴影影响较大
归一化差异水体指数 $NDWI_s$	$NDWI_s = (NIR - MIR) / (NIR + MIR)$ NIR—近红外；MIR—中红外	在建筑区域应用较好；受山体阴影影响较大；不适用于无中红外波段的影像
改进的归一化差异水体指数 MNDWI	$MNDWI = (G - MIR) / (G + MIR)$ G—绿光；MIR—中红外	最大程度地抑制居民地和土壤等噪音，突出水体；水体与阴影易混淆；不适用于无中红外波段的影像
自动水体提取指数 $AWEI_{nsh}$ , $AWEI_{sh}$	$AWEI_{nsh} = 4 \times (\rho_{band2} - \rho_{band5}) - (0.25 \times \rho_{band4} + 2.75 \times \rho_{band7})$ $AWEI_{sh} = \rho_{band1} + 2.5 \times \rho_{band2} - 1.5 \times (\rho_{band4} + \rho_{band5}) - 0.25 \times \rho_{band7}$ $\rho$ —反射率；band1—蓝光；band2—绿光；band4—近红外；band5—短波红外；band7—短波红外	抑制地形阴影和暗表面，使水体像元和非水体像元的可分性最大化；受冰雪等高反射表面影响较大
Gauss 归一化差异水体指数 GNDWI	$GNDWI_{i,j} = \frac{NDWI_{i,j} - NDWI}{\sigma}$ GNDWI <sub>i,j</sub> —点(i, j)处的 Gauss 归一化水体指数； NDWI <sub>i,j</sub> —点(i, j)处的归一化差异水体指数； NDWI—影像所有像元的 NDWI 均值； $\sigma$ —影像所有像元的 NDWI 标准差	针对线状河流水体的精确提取，可较好地保留水体的完整性；受云和阴影的影响较大
修订型归一化差异水体指数 RNDWI	$RNDWI = (SIR - R) / (SIR + R)$ R—红光；SIR—短波红外	能削弱混合像元和山体阴影的影响，最大程度地提取水陆边界；不适用于无短波红外波段的影像
增强水体指数 EWI	$EWI = (G - NIR - MIR) / (G + NIR + MIR)$ G—绿光；NIR—近红外；MIR—短波红外	抑制居民地、土壤和植被等噪音，突出半干旱区的水体特征；水体与阴影和河滩易混淆
阴影水体指数 SWI	$SWI = B + G - NIR$ B—蓝光；G—绿光；NIR—近红外	较好地区分水体和阴影，能削弱积雪和山体裸地的影响



## 3.3.1 水体信息的自动提取

- **存在的问题：** 水体与其它地区的取值区别很明显，但水体与非水体之间的过渡区依然存在
- 用于区分水体和非水体的下限阈值的确定，是正确提取水体的关键（最大类间方差法（OTSU，大津法））
- 若所定阈值能提取出所有水体，则必然有一些地物被误提
- 若所定阈值提取的为纯净水体，则会导致大部分水体区域没法有效提取

各种方法都很难通过一个阈值确定水体与非水体过渡区的阈值。采用多个指标相结合的综合提取法



## 3.3.2 水深探测

- 可见光波段的测深原理主要基于光线对水体的透射。可见光在水体中的衰减系数越小，则对水体的穿透性越好。可见光衰减系数决定了光在水体遥感中的可测深度
- 影响水深探测的因素**主要包括波长及水体浑浊度**



## 3.3.2 水深探测

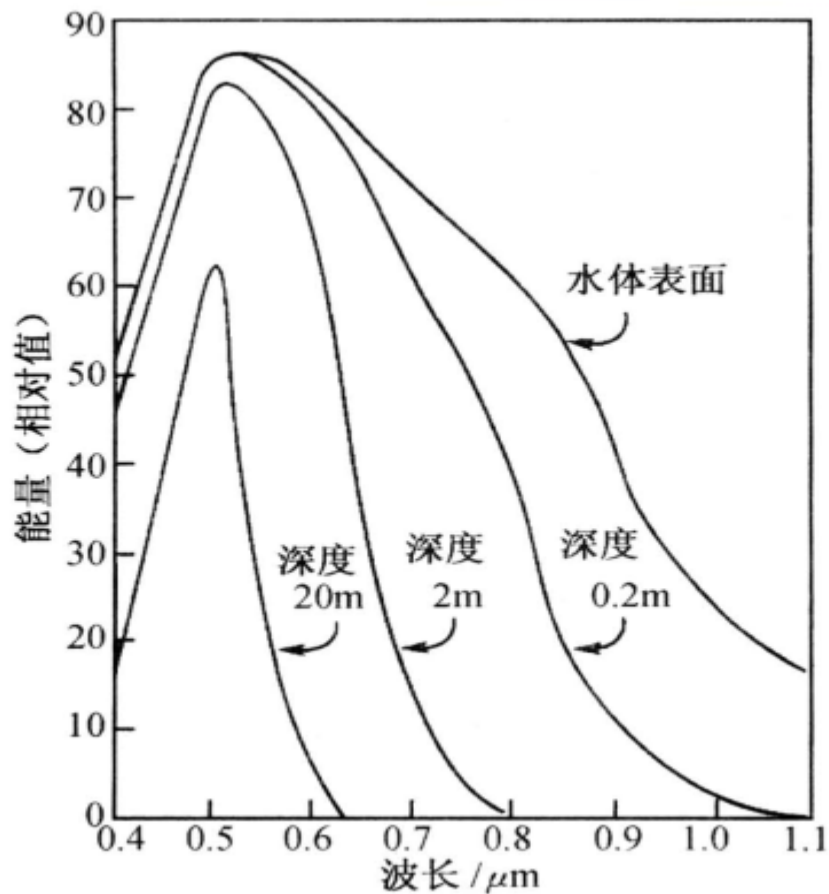
- 对于清水，光的最大透射波长为 $0.45\sim 0.55\mu\text{m}$ ，峰值波长约 $0.48\mu\text{m}$ ，位于蓝绿区，水体在此波段散射最弱，衰减系数最小、穿透能力最强，记录水体底部特征的可能性最大，因此**蓝绿波段对水体的穿透深度最大，是遥感测深的最佳波段**
- 在红光区，由于水的吸收作用较大，透射相对减少，仅能探测水体浅部特征；在近红外区，由于水的强吸收作用，仅能反映水陆差异

**正因为不同波长的光对水体的透射作用和穿透能力不同，所以水体不同波段的光谱信息，实际上反映了不同深度水体的信息特征，包含了“水深”的概念**





## 3.3.2 水深探测



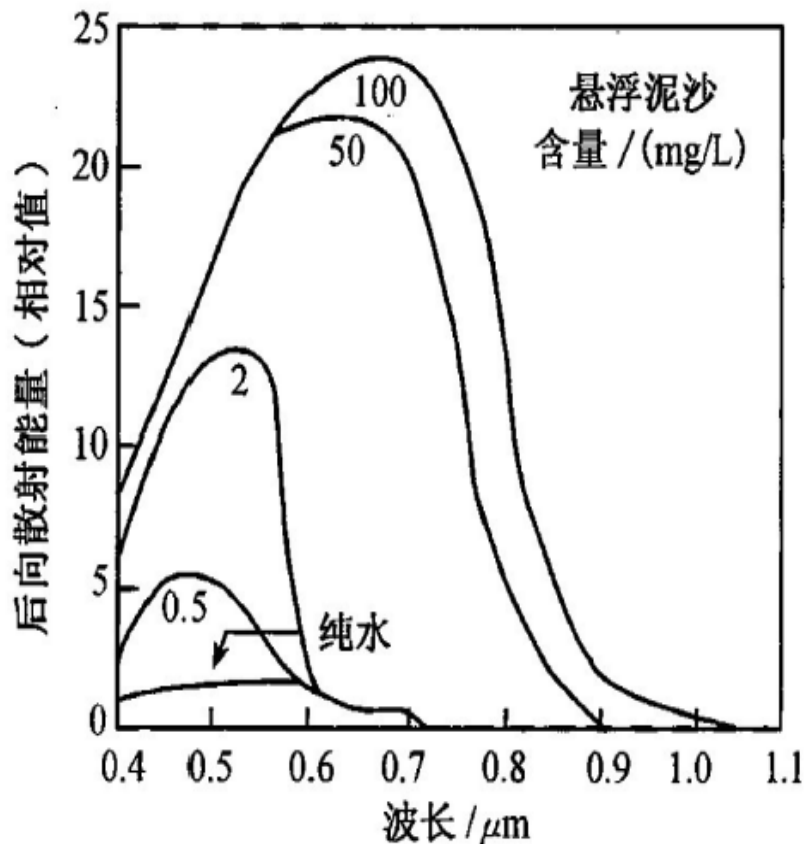
清水不同深度光谱特征

水体的光谱特性与水深相关，近水面的光谱曲线形态近似于太阳辐射，但随着水深的增大，水体对光谱组成的影响增大，在水深20m处，由于水体对红外波段光的有效吸收，近红外波段的能力已几乎不存在，仅保留了蓝、绿波段能力，**所以蓝绿波段对研究水深和水底特征最有效**





## 3.3.2 水深探测



浊水不同深度光谱特征

光对水的穿透能力，除了受波长的影响，还受水体浑浊度的影响

随着水中悬浮物含量的增加，反射率明显增强，透射率下降，衰减系数增大，光对水的穿透能力减弱。含沙量越大，可见光在水中穿透性受到影响越大，所能探测的深度越小



## 3.3.2 水深探测

当前，国内外学者应用多光谱遥感影像数据进行水深遥感反演主要采用**波浪法**和**密度法**

波浪法	密度法
<ul style="list-style-type: none"><li>根据波浪模式（波速、波浪周期和波浪折射等）与水深及海底地形等的关系、重力波在浅水区产生的折射、潮流线在经过浅水区所引起的水面粗糙度的变化以及内波在图像上形成的图谱，经分析得出水深</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>根据水体的物理光学理论分析浅水区水体中光的辐射传输过程，由此建立水体光谱反射率与水深的解析关系式</li><li>可分为<b>解析法</b>、<b>统计法</b></li></ul>



## 3.3.2 水深探测

- **解析法：** 根据光在水体中的辐射传输过程中的物理光学特征而建立的光辐射传输方程，**具有明确的物理意义**。但该模型**需要一系列水体辐射参数**，这些参数与水体物理、水化学性质密切相关，**较难获得**
- **统计法：** 利用实测点回归得到辐射亮度与水深之间的关系，进而推求未知水深点的水深，该方法是目前应用最广泛的水深反演方法，其**优点在于模型简单、可操作性强**

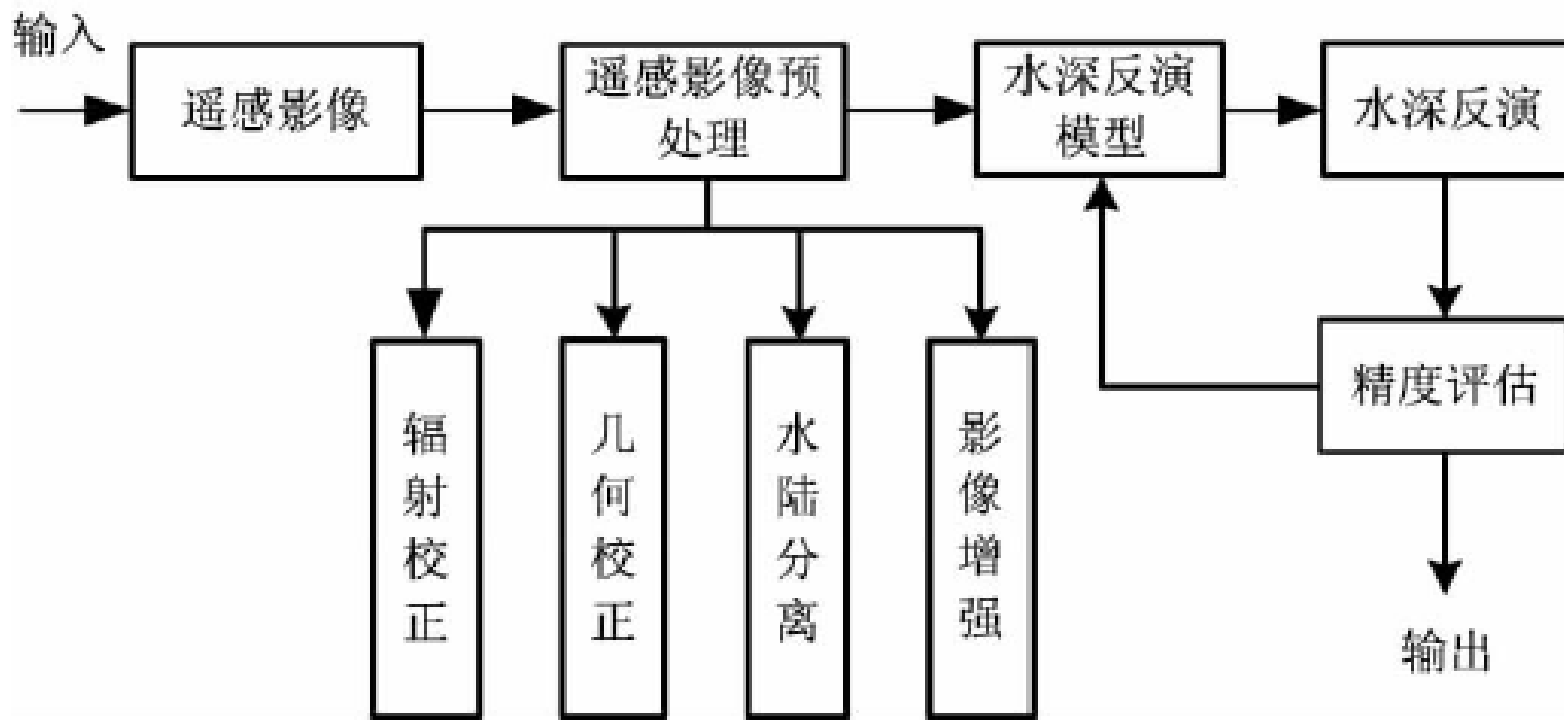


## 3.3.2 水深探测

- 目前对于大范围浅水区实用的遥感水深模型主要是密度法中的统计法模型
- 单波段模型:  $Z=a_0+a_1\ln(R_e)$
- 双波段比值模型:  $Z=a_0+a_1\ln(R_{e1}/R_{e2})$
- 多波段模型:  $Z=a_0+a_1\ln(R_{e1}) + a_2\ln(R_{e2}) + \dots + a_n\ln(R_{en})$



## 3.3.2 水深探测



多光谱遥感水深反演流程图

1958



## 3.3.2 水深探测

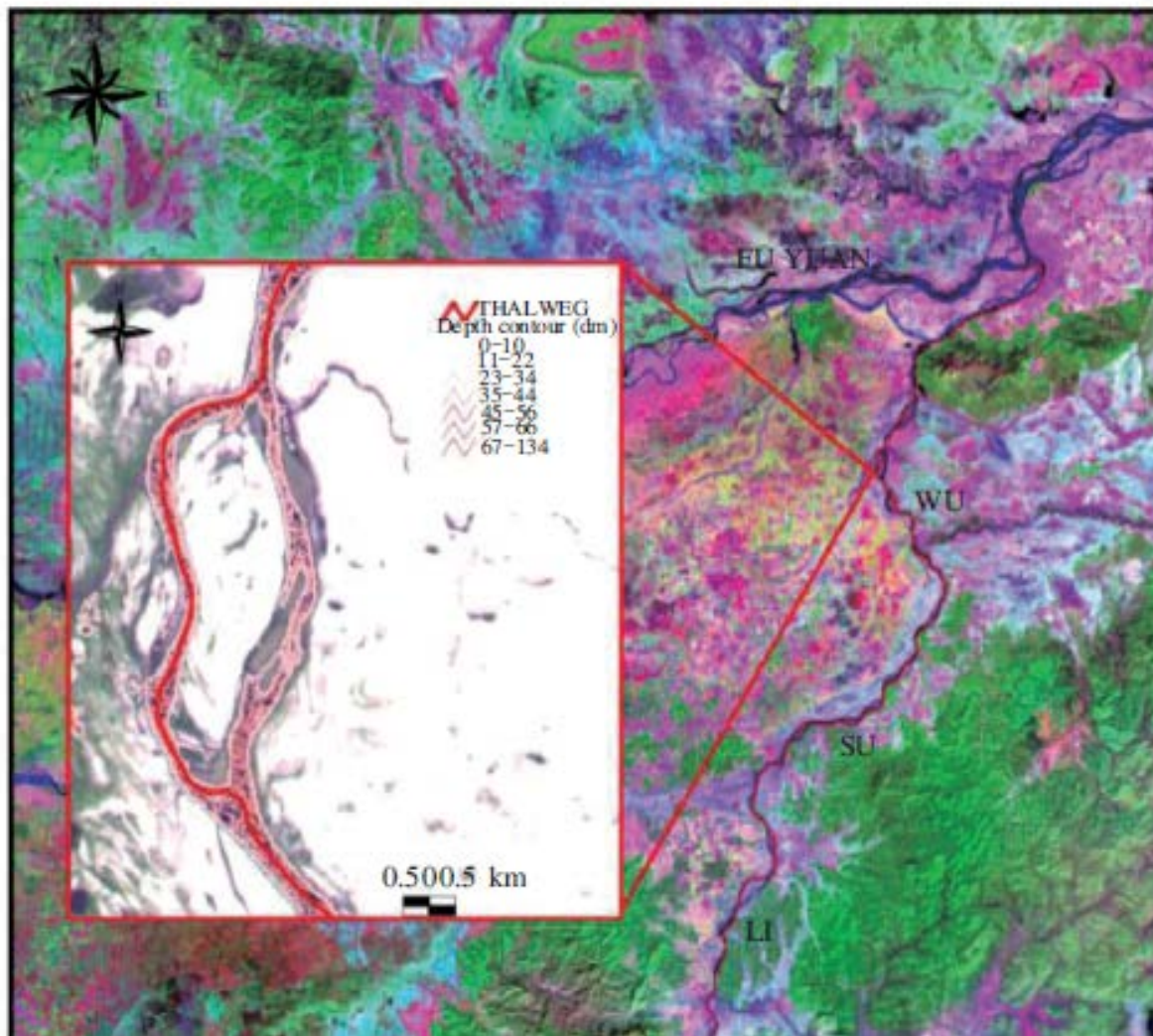
□ 庞治国, 李琳, 潘世兵. 乌苏里江水深遥感反演[J]. 中国科学: 信息科学

- **研究区:** 乌苏里江
- **数据源:** 2010年10月27日HJ-1A CCD数据
- **实际水深点测量**
- **建立模型:**  $Z = -6.7812 \ln(R_3) + 20.952$





## 3.3.2 水深探测





## 3.3.2 水深探测

- 孙涛, 庞治国, 潘世兵, 等. 基于ETM遥感影像的二滩库区水深反演研究[J]. 地理与地理信息科学
- **研究区:** 二滩库区上游, 水体清澈, 适合线性波段及其组合方法的应用
  - **数据源:** 2004年12月ETM遥感影像
  - **6个剖面水深测量, 有效测点452个**
  - **3个剖面实测数据建立模型:**  $Z = -33.17 \ln(R_2/R_1) - 10.19$
  - 上式代入另外3个剖面中进行验证, 误差小于1.0m的点达70%以上, 误差介于0.0 ~ 2.0 m的点达85%, 精度满足需求





### 3.3.3 水域变化监测



内蒙古湖泊30年缩小30%



### 3.3.3 水域变化监测



左为2000年的咸海俯拍照，图右为2014年的咸海俯拍照



### 3.3.3 水域变化监测

随着遥感和地理信息系统技术的发展，卫星遥感影像相对于常规的水域调查方法，其全面、快速、数据量大和更新快的优势，被广泛地应用于河流水系、湖泊、河口三角洲和海岸带等动态演变研究





### 3.3.3 水域变化监测

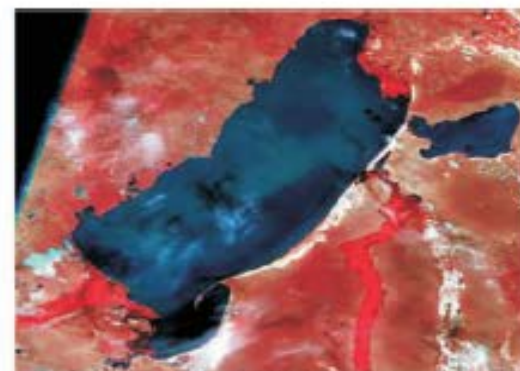
- 王冰, 吕昌伟, 何江, 等. 基于遥感的呼伦湖水体动态监测研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(9): 94-98



(a)1975年Landsat2 MSS影像(R7, G6, B5)



(b)1987年Landsat5 TM影像(R4, G3, B2)



(c)1999年Landsat5 TM影像(R4, G3, B2)



(d)2003年Landsat5 TM影像(R4, G3, B2)



(e)2006年Landsat5 TM影像(R4, G3, B2)



(f)2009年Landsat5 TM影像(R4, G3, B2)

图3 呼伦湖不同时期遥感影像对比图



### 3.3.3 水域变化监测

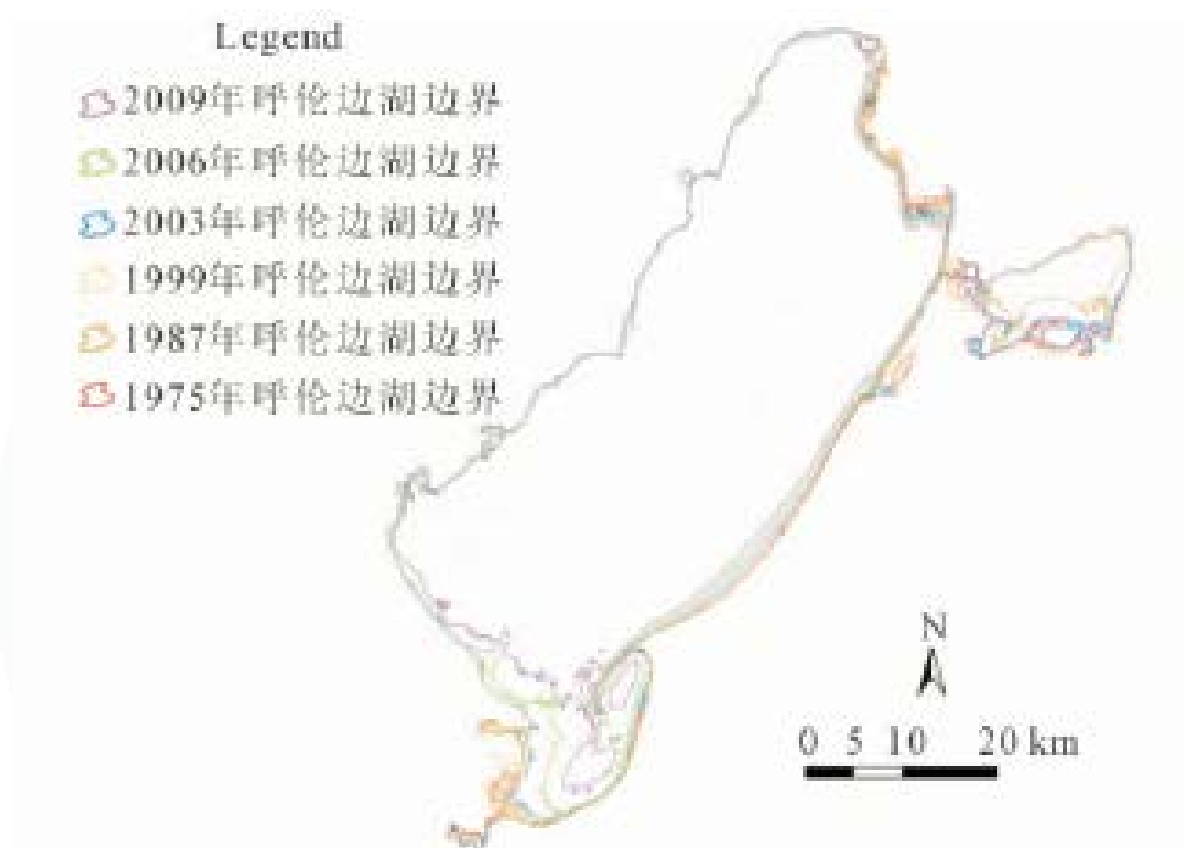


图4 呼伦湖不同时期水域边界叠加效果图  
Fig.4 Overlaps of water body extents in different periods



### 3.3.3 水域变化监测

□ 李磊, 李艳红, 陈成贺日, 等. 1972~2011年期间艾比湖面积变化研究[J]. 湿地科学, 2014, 12(2): 263-267

表1 归一化水体指数模型和修正的归一化水体指数模型提取结果和精度评价

Table 1 The results and precision evaluations of normalized difference water index and modified normalized difference water index

时 期	水域面积(km <sup>2</sup> )		分类精度 (%)	Kappa 系数
	NDWI模型	MNDWI模型		
1972年9月	583.14	594.26	88.23	0.87
1977年9月	567.63	574.21	86.46	0.85
1986年9月	518.59	525.43	85.49	0.83
1990年10月	504.77	512.65	85.64	0.83
1996年10月	513.83	527.16	86.58	0.85
2001年9月	533.28	547.80	85.93	0.84
2006年8月	512.63	521.25	86.49	0.85
2011年9月	468.11	478.47	85.31	0.83

# 第三章 水环境遥感

3.1 水环境概述

3.2 水环境遥感原理

3.3 水资源遥感监测

3.4 水污染遥感监测



西安科技大学  
XI'AN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



## 3.4.1 水污染遥感概述

利用遥感技术能迅速、同步地监测大范围水环境质量状况及其动态变化，弥补了常规监测手段的不足

就精度而言，遥感方法通常低于常规监测方法，但遥感技术正是通过这种精度上的损失，换取了水环境研究的区域性、动态性和同步性，这正是把遥感技术应用于水环境研究的意义所在





## 3.4.1 水污染遥感概述

### □ 水污染遥感监测适用范畴

从原理上说，遥感传感器记录的是地表物体的电磁波辐射特性（强弱变化及空间变化），因此**只有在较大程度上直接或间接影响水体的电磁波辐射性质的水环境化学物质才有可能通过遥感技术加以探测**，并非所有水环境化学研究的内容都可以辅以遥感手段



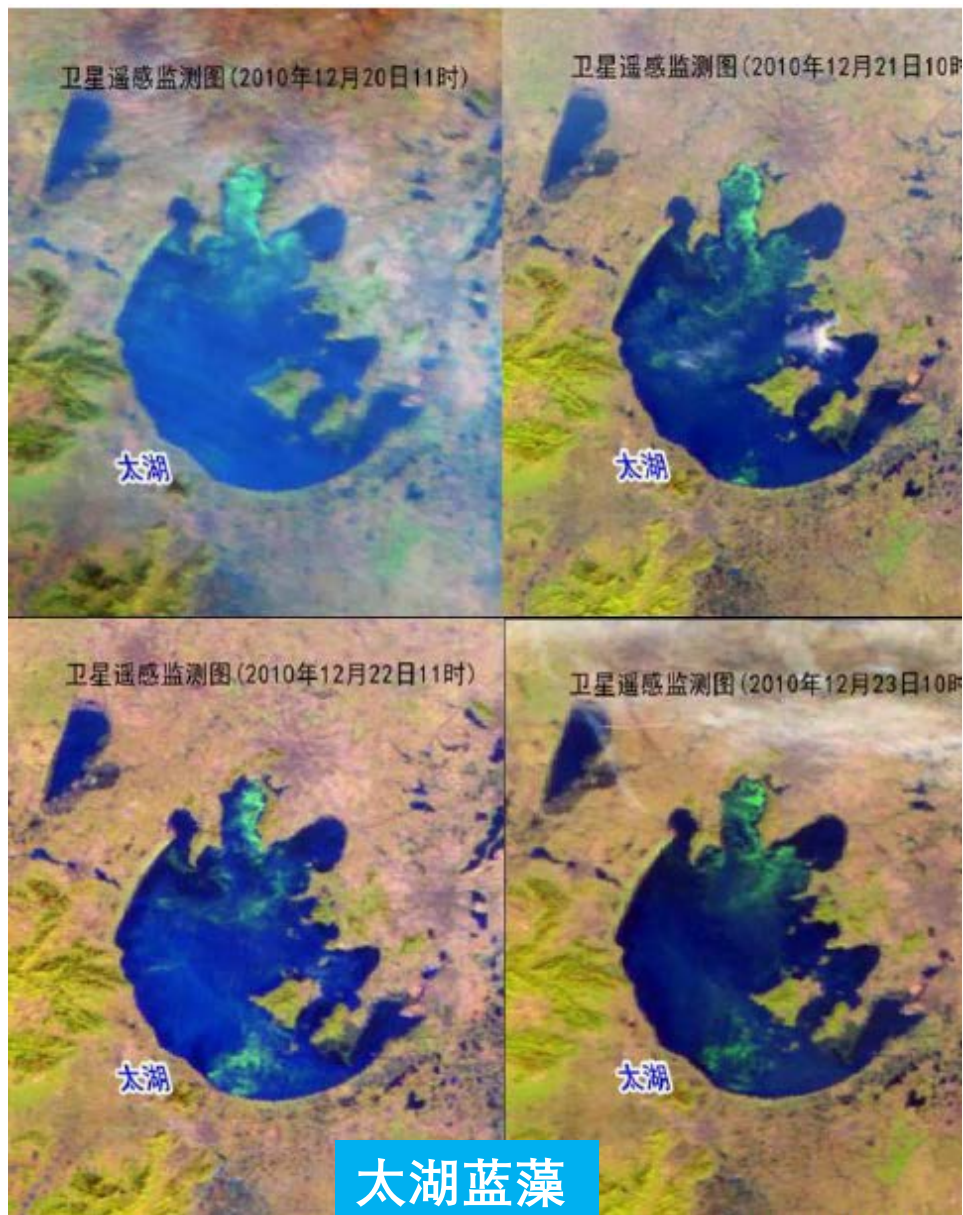
## 3.4.1 水污染遥感概述

### □ 水污染遥感监测方法

定性遥感方法	定量遥感方法
通过分析遥感图像的色调（或颜色）特征或异常对水环境化学现象进行分析评价，需要了解水环境化学现象与遥感图像的色调（或颜色）之间的关系，建立图像解译标志	建立在定性方法的基础之上，为了消除随机因素的影响，通常需要获得与遥感成像同步（或准同步）的实测数据，以标定定量数学模型



## 3.4.1 水污染遥感概述



西安科技大学

XI'AN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



## 3.4.2 水体富营养化监测

当大量的营养盐进入水体后，在一定条件下引起藻类的大量繁殖，而后在藻类死亡分解过程中消耗大量溶解氧，从而导致鱼类和贝类的死亡。这一过程称为**水体的富营养化**

水体出现富营养化现象时，浮游藻类大量繁殖，形成**水华**。因占优势的浮游藻类的颜色不同，水面往往呈现蓝色、红色、棕色、乳白色等。这种现象在海洋中则叫做**赤潮或红潮**





## 3.4.2 水体富营养化监测





## 3.4.2 水体富营养化监测

- 水中叶绿素浓度, 尤其是叶绿素 $a$  (chl $a$ ) 是浮游生物分布的指标, 是衡量水体初级生产力 (水生植物的生物量) 和富营养化作用的最基本的指标
- 这种指示作用的有效性还与浮游植物光合作用的环境因素 (如营养盐、温度、透明度等) 以及叶绿素含量变化的制约条件有关



## 3.4.2 水体富营养化监测

### 叶绿素遥感的波谱基础

叶绿素遥感是基于不同浓度浮游植物具有不同的辐射光谱特性。不同浓度浮游植物的光谱曲线在  $0.44\mu\text{m}$  处有明显的吸收峰， $0.4\sim 0.48\mu\text{m}$ （蓝光）反射辐射随叶绿素浓度加大而降低，在  $0.52\mu\text{m}$  处出现节点，在节点处反射率随叶绿素浓度变化不大。在  $0.55\mu\text{m}$  处出现辐射峰值，并随着叶绿素含量增加，反射辐射上升。 $0.685\mu\text{m}$  附近有明显荧光峰



## 3.4.2 水体富营养化监测

### □ 水体富营养化遥感监测的可行性

- 由于浮游植物中的叶绿素对近红外光具有明显的“陡坡效应”，因而这种水体兼有水体和植物的光谱特征——在红光区特别是在近红外区具有高的反射率
- 因此，在赤潮发生时，水体在标准假彩色图像上呈现红色斑块，在彩色红外图像上，富营养化水体呈红褐色或紫红色；当藻类大量死亡后，水中含有丰富的消光性有机分解物，在上述两种图像上水体会呈现近于蓝黑的暗色调





## 3.4.2 水体富营养化监测

### □ 水体光谱特征与水中叶绿素含量的关系

利用叶绿素浓度与光谱响应间的明显特征，采用**不同波段比值法**或**比值回归法**等，以扩大叶绿素吸收（ $0.44\mu\text{m}$ 附近蓝光波段）与叶绿素反射峰（ $0.55\mu\text{m}$ 附近的绿光波段）或荧光峰（ $0.685\mu\text{m}$ 附近的红光波段）间的差异，提取叶绿素浓度信息

**常用的叶绿素定量估算遥感指标： $R(n1)$ 、 $R(n2)$ 、 $R(n3)$ 、 $R(n4)$ ，或其对数运算、算术运算**



## 3.4.2 水体富营养化监测

### □ 用于进行叶绿素反演的统计模型形式

#### 1. 根据两个波段的比值，建立一阶线性回归方程：

$$C_{chl}=a_1+a_2*(R(n_1)/R(n_2))$$

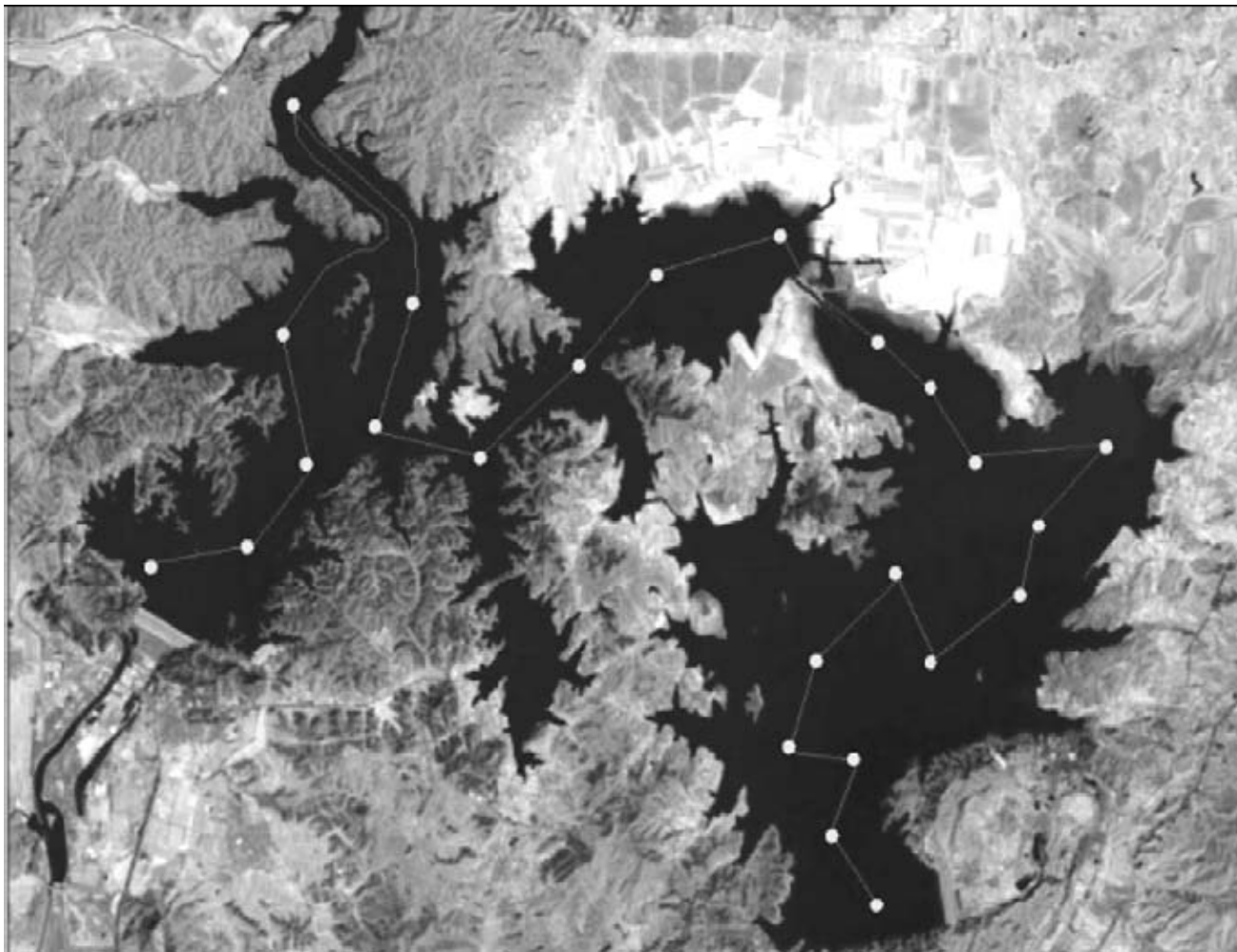
式中， $C_{chl}$ 为叶绿素含量或浓度（ $mg/m^3$ ）， $a_1$ 、 $a_2$ 为回归系数； $R(n_1)$ 、 $R(n_2)$ 分别为传感器的两个不同波段（ $n_1$ 、 $n_2$ 表示中心波长）

#### 2. 针对不同波段建立多元线性回归方程：

$$C_{chl}=a_1*R(n_1)+a_2*R(n_2)+a_3*R(n_3)+a_4*R(n_4)$$



## 3.4.2 水体富营养化监测





## 3.4.2 水体富营养化监测

### □ 用于进行叶绿素反演的统计模型形式

#### 3. 建立反射峰与叶绿素含量对数值的线性回归方程：

$$\text{Log}_{10}(C_{\text{chl}})=a_1+a_2\times\lambda_{\text{maxn}}$$

式中， $\lambda_{\text{maxn}}$ 为第n波段附近反射峰的位置（nm）。该模型只适用于高光谱数据

#### 4. 对不同波段进行处理（加减乘除等）后建立回归方程：

$$C_{\text{chl}}=a_1\times x+a_2$$

式中，x为对波段进行处理后的值，如 $\text{TM3}\times\text{TM4}$



## 3.4.2 水体富营养化监测

### □ 用于进行叶绿素反演的统计模型形式

#### 5. 指数回归模型

$$C_{chl}=a \times Z^b,$$

如：  $Z=R_{active}/R_{reference}$

#### 6. 利用植被指数建立回归模型

$$C_{chl}=a_1 \times v+a_2$$

式中，  $v$  为植被指数



## 3.4.2 水体富营养化监测

### □ 富营养化程度的遥感评价

- 水体富营养化评价是对水体富营养化发展过程中某一阶段营养状态的定量描述
- 水体富营养化评价的目的是通过对具有水体富营养化代表性指标的调查，判断该水体的营养状态，了解其富营养化进程及预测其发展趋势，为水体水质管理及富营养化防治提供科学依据



## 3.4.2 水体富营养化监测

### □ 富营养化程度的遥感评价

- **卡尔森指数法 (TSI)** 是美国科学家卡尔森在1977年提出来的，是把透明度作为基准，分为0 ~ 100的连续数值，作为评价湖泊营养状态的分级标准

$$TSI(SD) = 10 \left( 6 - \frac{\ln SD}{\ln 2} \right)$$

$$TSI(chl) = 10 \left( 6 - \frac{2.04 - 0.68 \ln chl a}{\ln 2} \right)$$

式中，TSI为卡尔森营养状态指数；SD为湖水透明度值(m)；chl a为湖水中叶绿素含量(mg/m<sup>3</sup>)。当TSI指数为零时，湖泊的营养状态最低，此时透明度最大





## 3.4.2 水体富营养化监测

### □ 富营养化程度的遥感评价

- 卡尔森提出的以透明度为基础的卡尔森营养状态指数，忽略了浮游植物以外的其它因子对透明度的影响。
- 为了弥补卡尔森营养状态指数的不足，日本的相崎守弘等人提出了**修正的营养状态指数（TSIM）**，即将以透明度为基础的卡尔森营养状态指数，改为以叶绿素浓度为基准的营养状态指数



## 3.4.2 水体富营养化监测

### □ 富营养化程度的遥感评价

- 修正卡尔森指数采用0 ~ 100的连续值描述水体的营养状况，计算公式为：

$$\text{TSIM}(\text{Chla}) = 10 * (2.46 + \ln(\text{Chla}) / \ln(2.5))$$

根据中国环境监测提供的营养状态分级标准进行评价，采用0 ~ 100的一系列连续数字对湖泊（水库）营养状态进行分级：**TSI < 30 贫营养；**  
**30 ≤ TSI ≤ 50 中营养； TSI > 50 富营养；**其中：**50 < TSI ≤ 60 轻度富营养； 60 < TSI ≤ 70 中度富营养； TSI > 70 重度富营养。**在同一营养状态下，指数值越高，营养程度越重

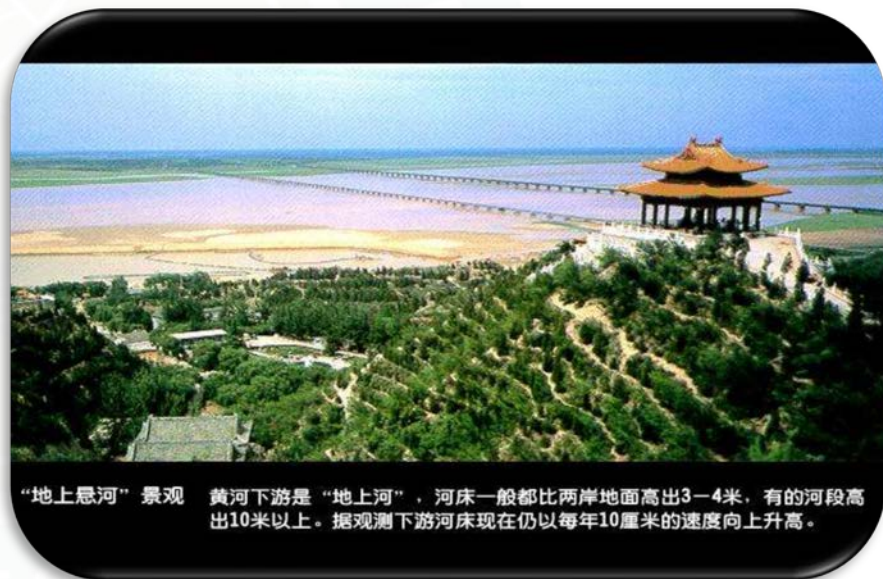
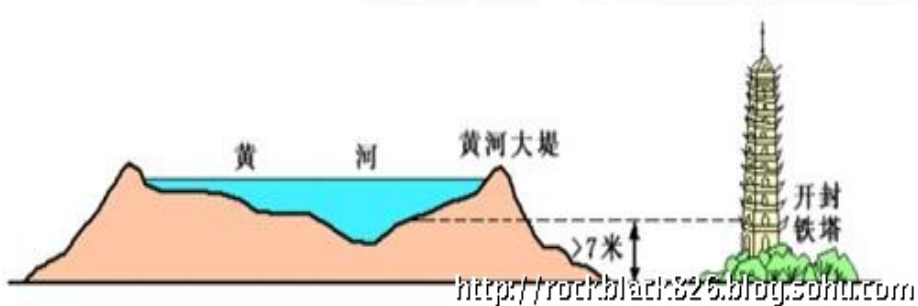


### 3.4.3 悬浮固体遥感监测

- **悬浮固体的运移特征**是沿海河口形状和演变规律的核心问题。了解 and 掌握河口悬浮固体的来源、含量、分布、运移、沉积，可分析河口演变的动力特征。其作用在于它将直接影响到河口区资源的开发利用、环境变化、经济发展，是河口区发展决策的重要依据之一
- **遥感技术已成为悬浮固体监测的重要方法**



### 3.4.3 悬浮固体遥感监测



西安科技大学

XI'AN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



### 3.4.3 悬浮固体遥感监测

#### □ 水体光谱特征与悬浮固体含量的关系

由于自然因素和人类活动造成水土流失、河流侵蚀等，河流带走大量泥沙入湖、入海，是水中悬浮固体物质的主要来源

这些泥沙物质进入水体，引起水体光谱特性的变化。**水体反射率与水体混浊度之间存在着密切的相关关系。随着水中悬浮固体浓度的增加，即水的混浊度的增加，水体在整个可见光谱段的反射亮度增加，水体由暗变得越来越亮，同时反射峰值波长向长波方向移动。**



## 3.4.3 悬浮固体遥感监测

### □ 水体光谱特征与悬浮固体含量的关系

自然环境下的清水和浊水的反射光谱有着明显的差异，浊水的反射率比清水高的多，且浊水的反射峰值都出现在更长的波段

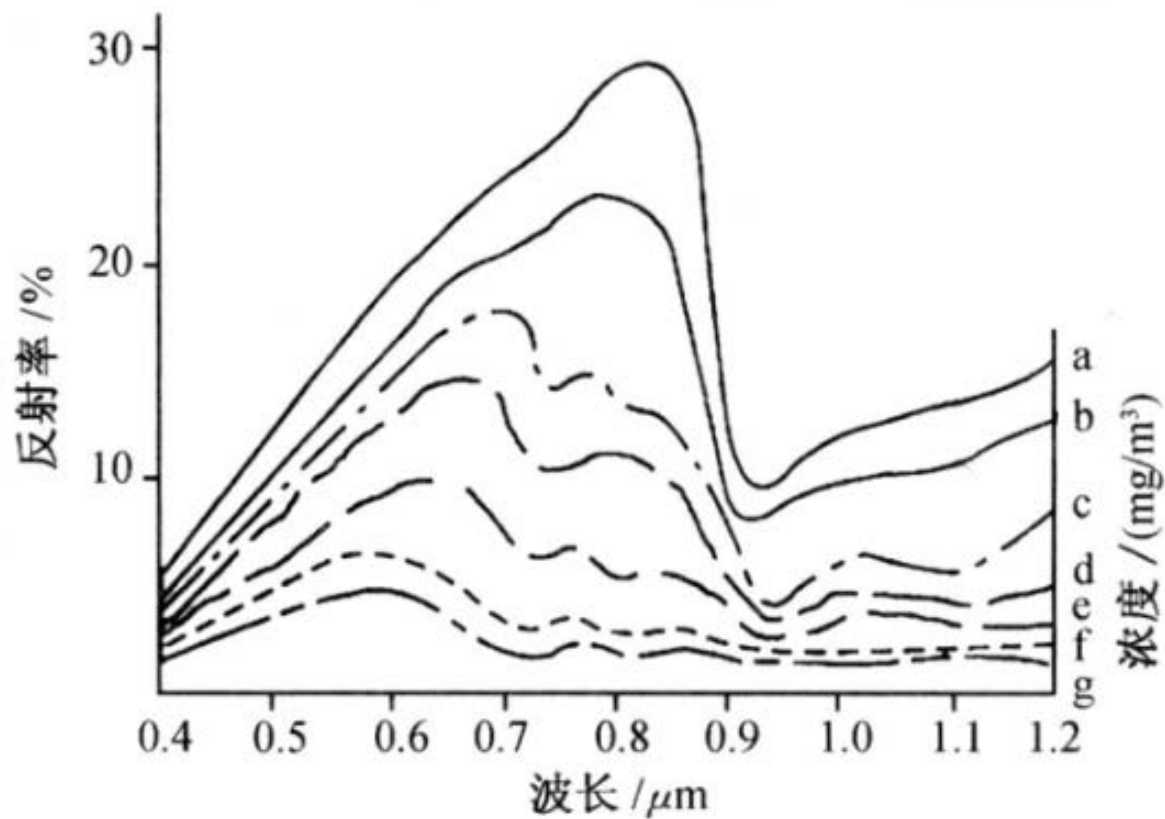
正因为水色与泥沙含量关系密切，水色成为泥沙含量的较精确的一种指标

水色随混浊度的增加，由蓝色—绿色—黄色，当水中泥沙含量近于饱和时，水色也接近于泥沙本身的光谱





### 3.4.3 悬浮固体遥感监测



不同悬浮固体浓度水体的反射率





## 3.4.3 悬浮固体遥感监测

### □ 最佳波段选择

随着水中悬浮固体浓度的增加及悬浮固体颗粒增加，水体反射率增加，反射峰值向长波方向移动，称为**红移**。但是由于水体在 $0.93\sim 1.13\mu\text{m}$ 附近对红外辐射吸收强烈，反射峰值移动到 $0.8\mu\text{m}$ 附近终止移动

**$0.58\text{-}0.68\mu\text{m}$ 对不同泥沙浓度出现辐射峰值，即对水中泥沙反映最敏感，是遥感监测水体混浊度的最佳波段**



### 3.4.3 悬浮固体遥感监测

#### □ 最佳波段选择

对许多泥沙光学特性的研究表明, 对泥沙浓度最为敏感的波长为550和670nm, 当泥沙达到一定浓度后, 550nm波段会出现饱和, 而670nm 更适合于高泥沙浓度的探测

由于水体反射率还受大气和水体环境变化的影响, 进行水中悬浮固体含量反演须经过大气校正



## 3.4.3 悬浮固体遥感监测

### □ 悬浮固体信息提取方法

#### 经验模式

在实际工作中选择与悬浮固体浓度相关性好的波段，与实地调查悬浮固体结果进行分析，建立特定波段辐射值与悬浮固体浓度的对应关系模型，然后对该波段辐射值进行反演，可以得到悬浮固体浓度



## 3.4.3 悬浮固体遥感监测

### □ 悬浮固体信息提取方法

#### 分析方法

以由辐射传输理论提出的上行辐射与水体中光学活性物质特征吸收和后向散射特性之间的关系为基础，利用遥感测量得到的水体反射率反演水体中各组分的特征吸收系数和后向散射系数，并通过水体中各组分浓度与其特征吸收系数、后向散射系数相关联，反演水体中各组分的浓度



## 3.4.3 悬浮固体遥感监测

### □ 悬浮固体信息提取方法

#### 半分析方法

半分析模式介于二者之间，通过水体中各组分浓度与其特征吸收系数、后向散射系数相关联，反演水体中各组分的浓度，而建立模式所需要的吸收系数和散射系数等数据通过一些经验公式进行确定



## 3.4.3 悬浮固体遥感监测

### □ 悬浮固体信息提取方法

**分析方法：**建立在严格的辐射传输理论基础之上，是一种应用前景比较好的方法，然而目前水体中各种组份的吸收系数、后向散射系数等固有光学量还不够精确的测定，限制了其应用范围

**经验模式和半分析模式**所需要数据源较易满足，这两种模式得到了比较广泛应用。但由经验模式所得到的参数往往具有季节性和区域性的特点，所得到的悬浮泥沙的反演模式适用性不高



### 3.4.3 悬浮固体遥感监测

#### □ 常用半分析算法模型

- **Gordon关系式：**  $R=C+S/(A+BS)$  ， 该式适用区间包括低含沙量区和高含沙量区
- **负指数关系式：**  $R=A+B(1-e^{-DS})$
- **统一关系式：**  $R=A+B[S/(G+S)]+C[S/(G+S)]e^{-D}$

以上三式中，R为水体反射率，S为水面悬浮泥沙浓度，A、B、C、D、G为回归系数

适用于低浓度和高浓度的悬浮泥沙水体





## 3.4.3 悬浮固体遥感监测

### □ 常用经验算法模型

- **线性关系式：**  $R=A+B\times S$ ，此式为有限线性区间内的近似表达式，即R随着S增加而增加，因其关系简单，误差较大
- **对数关系式：**  $R=A+B\times \ln S$ ，亦在悬浮固体浓度不高时，精度较高；而对高浓度水域误差较大

以上两式中，R为水体反射率，S为水面悬浮泥沙浓度，A、B为回归系数

只适用于低浓度的悬浮泥沙水体



### 3.4.3 悬浮固体遥感监测

目前常用的多数为区域特性的经验统计模式或半经验模式，而建立此类模式往往需要大量同步实测资料，耗费人力物力，且针对不同水域得到的经验模式不能实现时空尺度上的外推

如何解决悬浮颗粒物定量反演中对实测资料的过度依赖问题，建立真正意义上的统一模式，仍需要进一步的深入研究