

辽河口沿岸水质污染的光谱监测研究

叶 红¹, 潘 蔚^{2,3}

(1. 北京大学环境学院, 北京 100871; 2. 北京理工大学, 北京 100081;
3. 核工业北京地质研究院, 北京 100029)

摘 要:对辽河口沿岸水质进行了野外光谱测量和水质取样。根据化学分析和光谱测量结果,探讨了利用可见-近红外波段光谱反射率曲线,反演水污染指标的途径和方法。研究结果表明,利用实测水体在可见-近红外波段的反射率,可以有效的反演水体总悬浮颗粒物(TSS)和叶绿素 A 浓度。

关键词:辽河口; 悬浮颗粒物; 叶绿素; 光谱; 反演

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)06-0188-04

Research on Water Pollution Inspection Along the Liao River Outlet by Using Water Spectrum Characteristics

YE Hong¹, PAN Wei^{2,3}

(1. College of Environmental Sciences of Peking University, Beijing 100871, China;
2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
3. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

Abstract: Based on the water quality and water spectrum data, the authors study the method that reflect the water pollution condition by using water reflection index in invisible spectrum and near infrared band spectrum, furthermore, the results show that concentration of the total suspended sand (TSS) as well as chlorophyll A can be deduced by this method.

Key words: Liao River outlet; total suspended sand(TSS); chlorophyll; spectrum; deduction

1 引 言

近年来,我国沿海水体质量受到严重污染,给渔业生产和海洋生态造成严重威胁。但是,目前的水质监测和环境质量评价主要采用布点取样和化学分析方法,很难对海洋等污染的时空分布和变化规律开展有效的研究。利用遥感技术的时空优势,开展水体污染监测和时空变化规律研究是一项极有价值和挑战性的工作。虽然国外研究成果显示,利用航空和航天的高光谱数据可以反演海湾或内陆水体的浊度^[1]、悬浮颗粒物和叶绿素^[2,3]浓度,甚至是水体中溶解有机物的含量^[4],但国内的开展研究的报道不多。本文以辽河口为例,研究区域见图 1,探讨了利用光谱测量反演流动性水体污染特征的技术方法。

2 研究区概况

营口位于辽宁省南部,地处松辽平原南端,大辽河的下流,辽东湾东北部。地理位置东经 121°57' ~ 123°03', 北纬 39°55' ~ 40°56' 之间。营口地区的地质地理特征,东南部中低山主要由花岗岩、片麻岩构成,东部低山区及向西的的丘陵区主要由古老的千枚岩、变粒岩、片岩及泥板岩构成,经过长期的风化作用,地表面有较厚的黄土风化层。区内棕黄色土壤广泛分布。

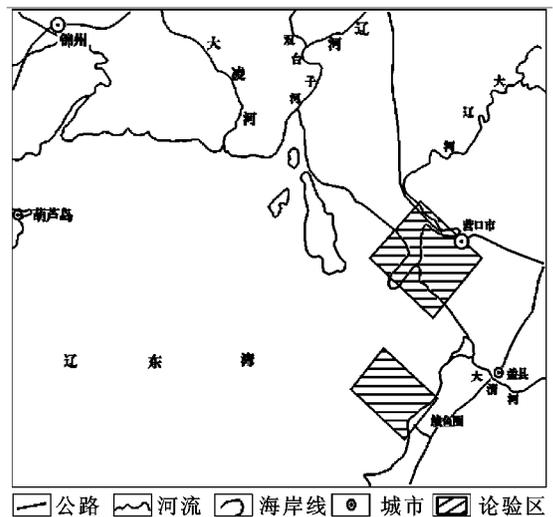


图 1 试验研究区位置示意图

营口地区的主要地表水系有大辽河、大清河、碧河,三条水系带动流域内近百条大小河流。此外,还有沙河、熊岳河与浮渡河三条独立入海的小水系。区内年均降水量为 704 mm。由于地表降水和大部分水系分布区,黄土发育,致使河水的悬浮颗粒物明显偏高。

* 收稿日期: 2006-03-05

基金项目:“863”计划 308 主题,项目编号:863-308-13-5(02)

作者简介:叶红(1971-),女,博士生,从事第四纪环境与全球变化,遥感与地理信息系统技术等方面的研究。

根据当地环境监测部门的监测,营口地区年排放工业废水 2 273 万 t,主要排放企业有造纸、发电、化纤、印染、卷烟。重要污染因子为化学需氧量(COD)、悬浮颗粒物(SS)、石油类。大辽河口段水质经常处于 V~ 劣 V 类之间。主要污染因子为氨氮,高锰酸钾指数(COD_{Mn})。近岸海域水质主要污染因子为无机氮、石油类、COD_{Mn}和活性磷酸盐。

3 现场光谱测量与水质取样

3.1 光谱测量

为了获取污染水体的地面光谱数据,本文采用 ASD-fieldspec 光谱仪,对辽河口沿岸不同污染类型的水体,如河水、池塘水和海水进行地面光谱测量和水质取样。由于水体的流动性,光谱测量应尽可能避免耀斑和波浪,因此在距离水面 1 m 左右进行。实测水体前,先对灰板进行测量。每个样品获取的光谱曲线为三次测量的平均值。

3.2 水质取样

水质取样选取在光谱测量点的下游,根据水流速度和距

离计算滞后时间同步进行。取样采用普通的塑料容器,在水下 30~ 50 cm 处进行。样品采集后,根据分析指标的不同,分装到 5 L 的塑料桶和 250 ml 的玻璃瓶中,并加入浓硫酸或磷酸作为固定剂,以保证室内水质与采样时相同。水质分析由辽宁省环境监测总站完成。共取水样 66 个,分析的指标包括 TSS、TN、TP、COD_{Cr} (COD_{mn})和叶绿素 A 等。

4 数据分析

4.1 光谱反射率计算

根据公式:

$$\rho_H = 0.99 \times L_{HL} / L_{BL} \text{ 和 } \rho_{WF} = \rho_H \times L_{WF} / L_{HF}$$

求出水体的实际反射率。

式中: ρ_H ——实验室灰板反射率, L_{BL} 和 L_{HL} 分别是实验室测量的白板和灰板辐亮度值。 ρ_{WF} ——实测水体反射率, L_{WF} 和 L_{HF} ——实测水体和灰板的辐亮度值。

利用 ENVI 软件,将反射率数据建立光谱数据,可以非常方便的绘制光谱曲线(图 2)和进行统计分析。

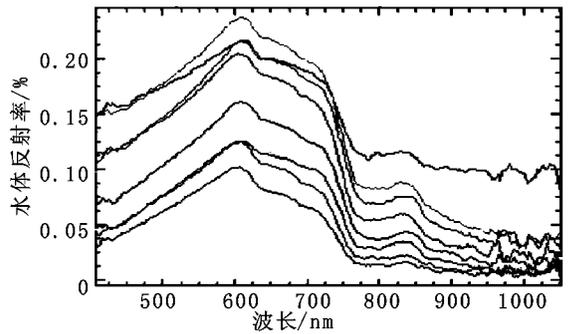
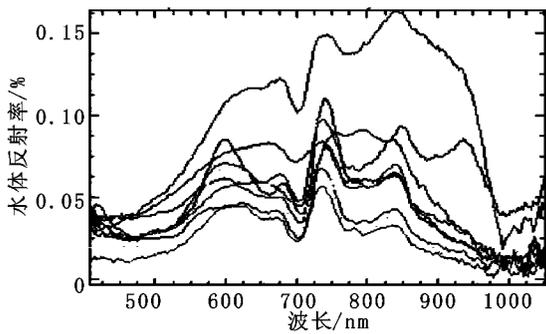


图 2 辽河口沿岸陆源水体(左)和海水(右)的光谱反射率曲线

4.2 水质分析

根据辽宁省环境监测中心的监测结果表明辽河水的主要污染指标是 TSS、COD、TN 和 TP,但不同类型的水体污染指标有明显的差别。流动性大的河水的 TSS、TP 最高, TSS= 106~ 1 480 mg/L,且 80% 以上的样品 TSS ≥ 500 mg/L, TP= 0.23~ 1.16 mg/L 流动性小的河水(流经城市的支

流) TN 最高,其值为 19~ 40.6 mg/L 池塘水则以叶绿素 A 高为特点, CHLA(叶绿素 A)= 22~ 115 μg/L 而海水则各项污染指标均比较低。

5 悬浮颗粒物和叶绿素 A 的光谱特征与浓度反演

5.1 总悬浮颗粒物(TSS)的光谱特征与浓度反演

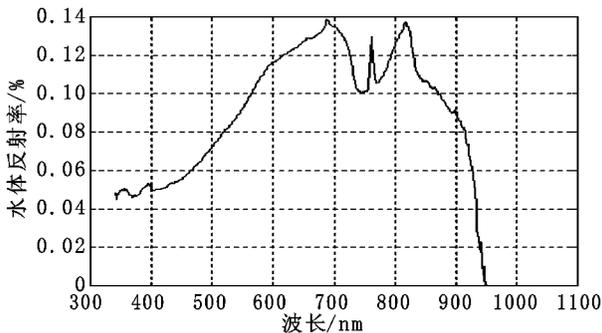


图 3 水体实测光谱曲线, TSS= 106 mg/L

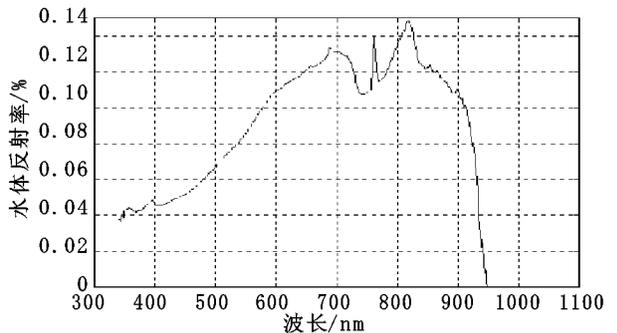


图 4 水体实测光谱曲线, TSS= 228 mg/L

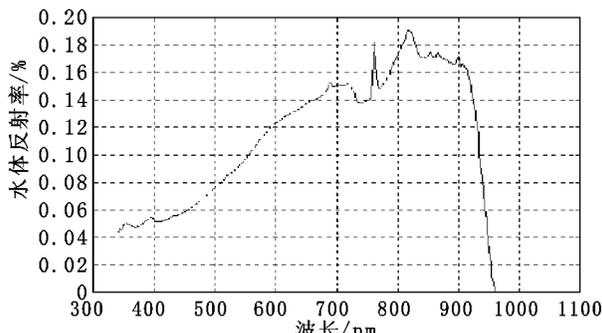


图 5 水体实测样品光谱曲线 TSS= 542 mg/L

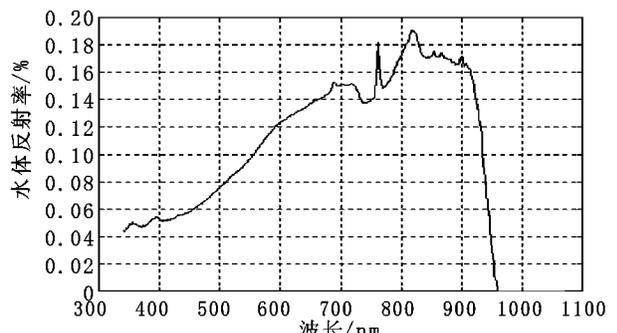


图 6 水体实测光谱曲线, TSS= 973 mg/L

由于悬浮颗粒物的散射作用,水体的反射率会有明显的提高。Han L. (1997) 对洁净和含叶绿素条件下,不同 TSS 含量的水体的反射率进行了实验研究^[5],认为利用反射率回归估算洁净水体中悬浮物含量的最佳波长是 827、830、847 nm,而估算含有叶绿素水体 TSS 的最佳波长为 767、769 和 770 nm。本文对辽河口水体的光谱测量表明,TSS 不仅影响光谱曲线的总体形态而且在近红外波段反映最明显。所测 25 个点的光谱反射率较高,峰值出现在红外波段,一般大

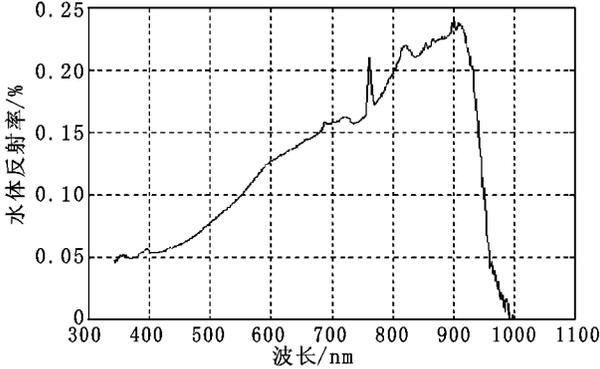


图 7 利用光谱曲线反演水体 TSS 含量示意图

$$Y = 1404.35591X + 152.073196$$

式中: Y ——TSS 含量, X ——反射率, 两者的相关系数 $r = 0.748967$ 。回归情况如图 9。

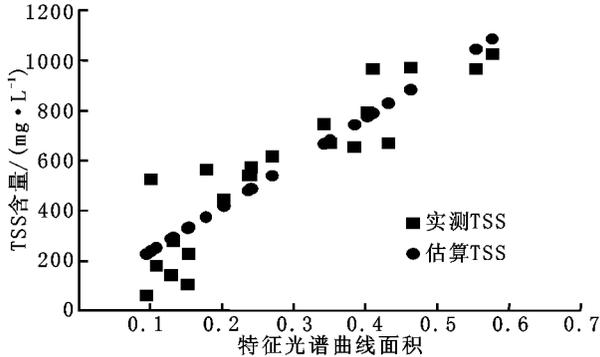


图 9 全部样品 TSS 含量与特征光谱曲线面积线性回归关系

利用 ≥ 850 nm 的光谱总反射率反演效果比 767 nm、769 nm 和 770 nm 处单点反射率好的主要原因是实际水体具有流动性,其包含的悬浮颗粒比实验水体大、分布范围比实验水体宽,使水体对红外光的反射显著加强。

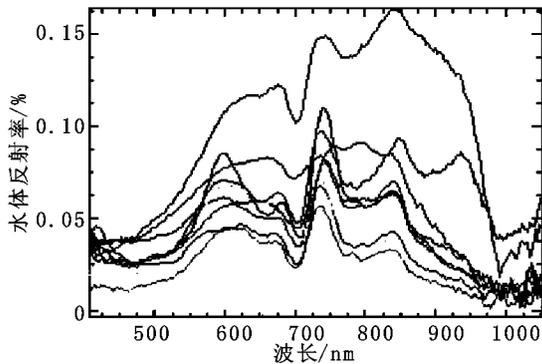


图 10 水体叶绿素($> 20 \mu\text{g/L}$)吸收光谱曲线

海水中的叶绿素含量一般都都很低,绝大多数样品的叶绿素含量在 $1 \mu\text{g/L}$ 以下。第二次试验共采集海水样品 10 个,其中 8 个样品的叶绿素含量在 $1 \mu\text{g/L}$ 以下。在这种情况下,可见光-近红外曲线上几乎没有显示(图 12)。

从光谱曲线分析,叶绿素含量与反射峰和吸收谷的形态

于 0.1,最高可达 0.25,但在 850 nm 有一特征吸收谷随 TSS 加大,峰值出现的波长位置具有后移的趋势(图 3, 4, 5, 6)。

考虑到实际水体成分复杂,我们应用应用 767 nm、769 nm 和 770 nm 处反射率进行回归分析,来反演水体的总悬浮颗粒物含量,得到的结果不理想。但通过对实测的 25 个样品光谱曲线的近红外波段(≥ 850 nm)反射峰包围面积(图 7)与样品 TSS 含量的回归分析相关分析,却能得到较好的效果,回归方程为:

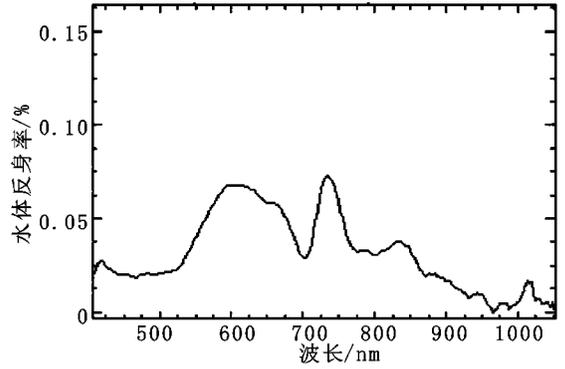


图 8 光谱反射率曲线吸收谷面积计算示意图

5.2 叶绿素 A 的光谱特征与浓度反演

叶绿素浓度可以反应水中 N、P 等营养元素的水平,是水污染的良好中介体。由于叶绿素对可见光的选择性吸收,一般形成绿色反射峰(530~600 nm)和红色吸收谷(600~750 nm)。对此, D. C. Rundquist (1997) 进行了比较细致的实验研究^[6],认为当水体叶绿素浓度 $> 300 \mu\text{g/L}$ 时,用 690 nm 处反射率的一阶导数估算叶绿素浓度十分有效,当浓度 $< 300 \mu\text{g/L}$ 时,可以利用近红外/红外比值进行估算。

但也有研究认为叶绿素的近红外和红外波段的反射率受悬浮物含量影响^[7],且特征吸收和反射光谱出现的位置会随浓度发生变化^[8]。

本次监测的水体,不仅叶绿素 A (以下简称叶绿素)浓度较低,其值 = $0.33 \sim 110.7 \mu\text{g/L}$,且浓度与水体类型和悬浮物含量相关。非流动或缓慢流动的水体 TSS 较低、叶绿素含量一般大于 $20 \mu\text{g/L}$,而流动性水体 TSS 比较高、叶绿素含量一般低于 $5 \mu\text{g/L}$ 。在反射光谱曲线上,当叶绿素浓度大于 $20 \mu\text{g/L}$ 时,不管其他污染组份如何,叶绿素在 530~750 nm 波段有较明显的吸收(图 10)而当叶绿素浓度较低时,只有 TSS 低的水体,才有所反映(图 11)。

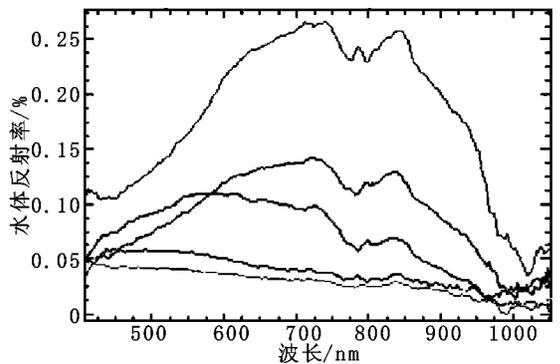


图 11 叶绿素含量($< 5 \mu\text{g/L}$)陆源水体的光谱曲线

有关。叶绿素含量越高时,整条曲线在绿色光波段的反射峰一测偏高,同时红色波段吸收谷尖锐且深度大对称性强反之则整条曲线在绿色光波段反射率偏低,同是红色波段的吸收谷宽缓且对称性降低。图 13 是对一处水体的实际测量结果。当水藻密布在水面,几乎不见水体时吸收谷最尖最深水

藻分布与水体分布面积相当时, 吸收谷明显降低而当水面上仅有极少数水藻零星分布时, 吸收谷最底。这一方面反映了水藻对红波段光线的强烈吸收, 同时也反映了对其余波段可见光的反射。由于水藻的叶绿素含量明显高于水体, 从而可以认为水面上水藻密度不同代表了叶绿素含量的不同。

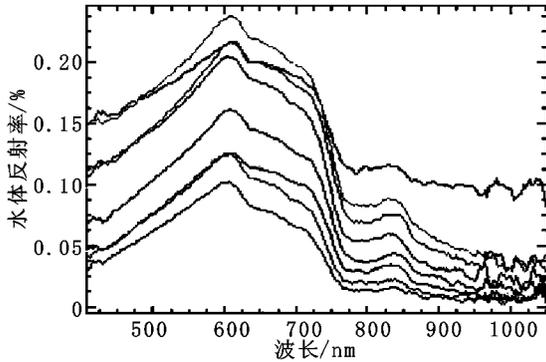


图 12 海水的叶绿素含量($< 5 \mu\text{g/L}$) 光谱曲线

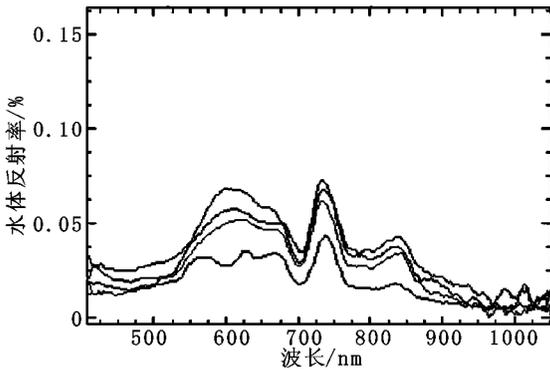


图 14 不同叶绿素含量水体的光谱曲线

由于本次实测水体的叶绿素浓度偏低、悬浮物浓度比较高, 本文没有采用 700 nm 反射峰一阶导数和近红外/红外比值的方法推算叶绿素浓度, 而采用绿峰(530~600 nm)光谱曲线包含的总面积 S_1 与净面积 S_2 和红谷(600~750)包含的净面积 S_3 (图 8)估算叶绿素 A 浓度。

通过回归分析, 发现叶绿素浓度与 S_3 具有较好的相关关系。其关系为:

$$Y = 4.419714x + 0.887280, R = 0.850272$$

式中: Y ——叶绿素浓度, X —— S_3 包含的面积, R ——相关系数。见图 15:

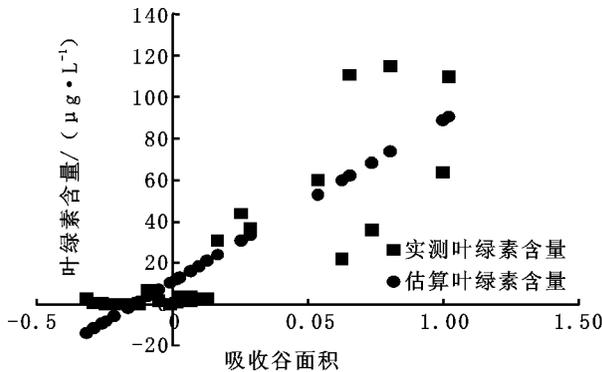


图 15 叶绿素含量与吸收谷面积线性回归关系

参考文献:

[1] Dana L Woodruff, et al. Remote Estimation of Water Clarity in Optically Complex Estuarine Waters[J]. Remote Sens. Environ, 1999, 68: 41- 52. (下转第 194 页)

实际上不同叶绿素含量的水体, 光谱曲线也具有同样的特征(图 14)。图 14 是叶绿素含量分别为 $115 \mu\text{g/L}$ 、 $72 \mu\text{g/L}$ 、 $4472 \mu\text{g/L}$ 和 $22 \mu\text{g/L}$ 水体的光谱曲线, 其反射峰和吸收谷存在明显的差别。根据这一特征可以, 可以利用光谱反射率曲线进行叶绿素含量的反演计算。

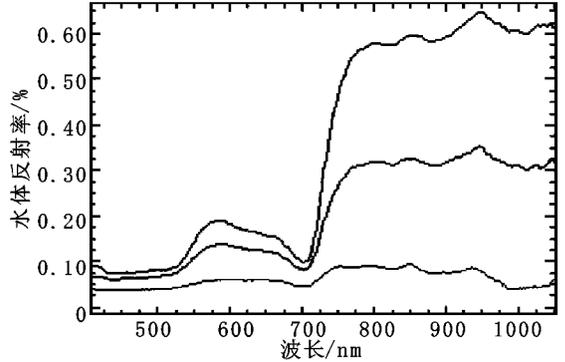


图 13 水体中不同叶绿素含量的光谱曲线

当 $Y \geq 10 \mu\text{g/L}$ 时, 反演结果与实际测量结果误差在 30% 以内, 即反演的精度 $\geq 70\%$ 而 $Y \leq 10 \mu\text{g/L}$ 时, 反演的误差 $\geq 50\%$ 。为此, 利用叶绿素浓度的对数值与 S_3 进行了回归分析, 结果表明两者间也有较好相关关系:

$$Y = 4.419714X + 0.887280, R = 0.871479$$

式中: Y ——叶绿素浓度的对数值, X —— S_3 包含的面积, R ——是相关系数。见图 16:

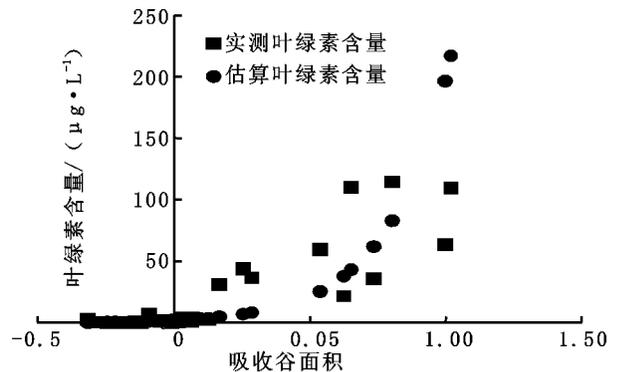


图 16 叶绿素含量对数值与特征吸收谷面积的线性关系

当 $Y \geq 10 \mu\text{g/L}$ 时, 反演结果与实际测量结果误差 $\geq 50\%$ 而 $Y \leq 10 \mu\text{g/L}$ 的样品, 反演结果与实际测量结果的误差在 40% 以内, 即反演的精度 $\geq 60\%$ 。

6 结 论

本文以辽河口为例, 探讨了利用现场光谱测量结果反演流动性水体 TSS 和叶绿素浓度的方法。研究结果表明, 现场光谱测量红外 ($\geq 850 \text{ nm}$) 波段的光谱率与 TSS 密接相关, 可以简单有效的反演 TSS 含量叶绿素特征吸收谷(600~750 nm)包含的面积 S_3 与叶绿素浓度具有良好的相关性, 当水体叶绿素浓度 $\geq 10 \mu\text{g/L}$, 利用 S_3 可直接反演叶绿素浓度当水体叶绿素浓度 $\leq 10 \mu\text{g/L}$, 可以用 S_3 反演叶绿素浓度的对数值。但是, 两项指标反演的精度还不够理想, 反演的模型和方法有待完善, 同时河口水体与海湾或内陆水体、特别是实验条件下的水体的水动力条件明显不同, 如何进行现场光谱测量和水质取样, 也是一个值得研究和探讨的技术问题。

关于坡度临界值问题,因本试验小区坡度级布设不够细,无法指出具体坡度临界值。

3.4 草本植物覆盖度与土壤侵蚀量的关系

植被是控制土壤侵蚀的主要因素之一,它通过林草截持降雨、消减雨滴动能、减缓和过滤地表径流、增加土壤入渗、固持和改良土壤等几方面作用来控制土壤侵蚀,减少水土流失危害的。

三试验站均没有布设覆盖度对比试验小区,故从以植被覆盖度差异为主要影响因子的降雨资料中随机抽取一些场次降雨来分析,如表 6 所示(表中小区植被东胜和和林站为谷子,宁城站为黄豆)。以宁城站 15° 横垄耕作小区为例,1992-06-29 日和 1992-08-07 日两场降雨中,因植被覆盖度的差异,导致土壤侵蚀量每平方公里相差 300 t,可见植被覆盖度与土壤侵蚀量之间呈负相关关系。

表 6 草本植物覆盖度与土壤侵蚀量关系表

地点	降雨时间	小区序号	次雨量/mm	覆盖度/%	侵蚀模数/(t·km ⁻²)
东胜	1993-07-22	10° 顺	14.2	30	19.36
东胜	1993-09-25	10° 顺	23.1	50	7.27
宁城	1992-06-29	15° 横	10.3	28	431
宁城	1992-08-07	15° 横	11.7	50	131.6
和林	1992-08-02	5° 顺	11	40	7.99
和林	1992-08-29	5° 顺	24.6	55	1.97

参考文献:

[1] 刘兴昌,张友顺. 水土保持原理与规划[M]. 西安:西北大学出版社, 1989.
 [2] 张阳生. 水土保持径流实验[M]. 西安:西北大学出版社, 1988.
 [3] 赵羽,金争平,等. 内蒙古土壤侵蚀研究[M]. 北京:科学出版社, 1989.
 [4] 金争平,等. 黄河皇甫川流域土壤侵蚀系统模型和治理模式[M]. 北京:海洋出版社, 1992.
 [5] 景可,陈永宗,等. 黄河泥沙与环境[M]. 北京:科学出版社, 1993.
 [6] 景可,卢金发,等. 黄河中游侵蚀环境特征和变化趋势[M]. 郑州:黄河水利出版社, 1997.
 [7] 左大康,等. 黄河流域环境演变与水沙运行规律研究文集[C]. 北京:地质出版社, 1992.
 [8] 陈永宗,等. 黄河粗泥沙来源及侵蚀产沙机理研究文集[C]. 北京:气象出版社, 1989.
 [9] 中国-加拿大合作. 晋西黄土高原土壤侵蚀规律实验研究文集[C]. 北京:水利电力出版社: 1990.
 [10] 蒋定生,等. 黄土高原水土流失与治理模式[M]. 北京:水利水电出版社, 1997.
 [11] 刘东生,等. 黄土与环境[M]. 北京:科学出版社, 1985.
 [12] 张宗祜,等. 中国黄土[M]. 北京:地质出版社, 1989.
 [13] 陈永宗,等. 黄土高原现代侵蚀与治理[M]. 北京:科学出版社, 1988.

(上接第 191 页)

[2] H J Hoogenboom, A G Dekker, IJ A Althuis. Simulat ion of AVIRIS Sensitivity for Detecting Chlorophyll over Coastal and Inland Water[J]. Remote Sens. Environ. 1998 ,65: 333- 340.
 [3] K Yokouchi, et al. OCTS- Derived Chlorophyll- a Concentration and Oceanic Structure in the Kuroshio Frontal Region off Joban/Kashima Coast of Japan. Remote Sens[J]. Environ, 2000, 73: 188- 197.
 [4] Charles Bostater, Manuel Gimond. Using Aircraft Based High Resolution Reflectance Signature and Specific Absorption Coefficients to remotely Estimate Coastal Water Quality[Z]. The 2nd International Airborne Remote Sensing and Exhibition 1996. 598- 605.
 [5] Han L. Spectral Reflectance with Varying Suspended Sediment concentration in Clear and Algae- Laden Water[J]. PE& RS, 1997, 63(6): 701- 705.
 [6] Han L, et al. The Spectral Response of Algae Chlorophyll in Water with Varying Levels of Suspended Sediments, Int [J]. J. Remote Sens. 1994, 15: 3707- 3718.
 [7] D. C. Runquist et al. Remote Measurement of Algae Chlorophyll in surface Water: the case for the first derivative of Reflectance Near 690nm[J]. PE& RS, 1996, 62(2): 195- 200.
 [8] Gitelson A, et al. The Peak Near 700nm on radiance spectra of algae and water: Relationships of its Magnitude and position with Concentration. Int[J]. J. Remote Sens. 1992, 13: 3 367- 3 372.

4 结 论

(1)暴雨条件下,次降雨雨强、雨前土壤含水量、坡面坡度及植被覆盖度与土壤侵蚀量之间关系明确,除植被覆盖度与土壤侵蚀量之间呈负相关关系外,其余三因子都与之呈正相关。

(2)小区资料表明,三试验站降雨产流均为超渗产流,说明影响我区黄土丘陵区水土流失的主要因素是降雨量和雨强,而雨水充足又有利于植被建设,增大地表植被覆盖度,从而起到一定的保水保土作用。所以开展水土保持工作应趋利避害,充分发挥雨水较多的优势,减少其负作用。

(3)从小区资料又可看出,坡面坡度> 10° 其土壤侵蚀量呈明显上升趋势,从水土保持角度而言,我区黄土丘陵区在> 10° 坡面上开荒,一般的水土保持耕作措施没有任何意义,应退耕还林还草。

(4)工作实际证明,植被建设可以十分有效的防治水土流失,但林草建设中要注意水量平衡问题。根据以往土壤含水量资料表明,研究区降水量一般年份完全可以满足草本植物需要,秋后土壤水分得到恢复,和裸地差别较小。而林业小区土壤含水量在试验期却逐年降低,水分无法平衡。因此在研究区造林要十分注意造林密度,防止林木因水分不足生长停滞或枯死。