

# 典型重金属污染水体光谱特征分析——以广东省大宝山尾矿水为例

梁业恒<sup>1</sup>, 邓孺孺<sup>1,2\*</sup>, 黄靖岚<sup>3</sup>, 熊龙海<sup>1</sup>, 秦雁<sup>1</sup>, 刘朱婷<sup>4</sup>

1. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275
2. 广东省水环境遥感监测工程技术研究中心, 广东 广州 510275
3. 中山大学新华学院, 广东 广州 510520
4. 广东省环境监测中心, 广东 广州 510308

**摘要** 目前水体重金属遥感反演相关研究仍比较薄弱。自然界中重金属污染水体的光谱特征研究是重要的基础性工作,是将来实现卫星遥感反演时波段选择的重要理论依据,也是遥感反演模型所必须的基础参数。首先利用 Analytical Spectral Devices(ASD)光谱仪,测量获得以大宝山尾矿水为例的典型重金属污染水体在两种水深和两种光照条件下的离水反射率光谱曲线,发现在 600~700 nm(红波段)均有稳定的反射峰,然后进一步与自然界常见的两类水体(浑浊水体和富营养化水体)的反射峰位置进行对比,发现:以长湖水库石英砂厂附近为例的浑浊水体反射峰在 550~700 nm(绿、红波段),以北江韶关冶炼厂附近为例的富营养化水体反射峰在 550~600 nm(绿波段),3种水体的反射峰位置各异,说明该重金属污染水体反射率光谱与这两类水体具有很好的可分性。然后在测量水体反射率基础上,结合水质遥感模型和进行室内消光系数测量,反演得到大宝山尾矿水体的总散射系数和总吸收系数光谱,并进一步分离水分子吸收作用,最终得到水中成分的综合吸收系数光谱曲线,结果表明:在紫光波段吸收最强,在红光波段吸收最弱;具体表现为:从 400 nm 开始,吸收系数快速递减,在蓝绿光波段递减速度变缓,从黄光波段又开始快速递减,到 676 nm 达到极小值,然后又快速增强至 750 nm,随后变化减缓。最后结合水样的水质化验结果,对该重金属污染水体的光谱成因进行分析,发现现场水色和水中成分的综合吸收系数光谱特征皆与作者前期研究测量获得的硫酸铁溶液颜色及其吸收系数光谱特征吻合,因此认为水中成分的光谱特征是由硫酸铁及其水解产物所引起。以上说明该重金属污染水体的光谱特征明显,反射峰和强吸收波长位置明确,这是将来利用卫星遥感手段反演水中重金属浓度的重要特征波段。该研究获得了以大宝山尾矿水为例的典型重金属污染水体反射率、消光系数、散射系数和吸收系数的光谱结果,为日后推广至其他种类重金属矿的尾矿水体及水中成分光学参数反演提供方法依据,也为将来利用卫星遥感技术对水中重金属浓度进行定量提取打下良好的理论基础。

**关键词** 水体重金属污染;反射率光谱;吸收光谱;光谱特征分析;水体重金属遥感

**中图分类号:** O657.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)10-3237-08

## 引言

随着我国工业化的快速发展,对矿区资源开采力度不断加大,水体重金属污染事件近年来愈发频繁,污染规模不断扩大,对人类生命安全造成严重威胁。卫星遥感在环境监测方面可以发挥其宏观大范围的优势,将来对水体重金属污染监测具有巨大的应用潜力。邓孺孺等<sup>[1-2]</sup>早已建立起水中各

组分浓度与遥感反射率的函数表达式,但目前水体重金属遥感的有效提取尚未得到真正实现,仍停留在模型研究的理论阶段。为了使水体重金属的遥感反演得以应用,亟需解决以下两方面问题:(1)自然界重金属污染水体的地面光谱特征如何?是否存在特征吸收(或反射)波段?这是将来应用到卫星影像反演时进行敏感波段选择的重要理论依据;(2)根据目前的水质遥感模型,仍需要测量得到该模型所需的水中组分光学参数,如各种重金属的吸收系数、散射系数、散射相

收稿日期:2018-08-27,修订日期:2019-01-06

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2017M612792),国家自然科学基金项目(41071230和41701222),广东省省级科技计划项目(2017B020216001),广东省自然科学基金项目(2017A030313238)资助

作者简介:梁业恒,1987年生,中山大学地理科学与规划学院博士后 e-mail: liangyeheng@163.com

\* 通讯联系人 e-mail: eesdr@mail.sysu.edu.cn

函数等。针对第二方面问题,作者在前期研究中已开展了部分常见重金属的光学参数测量工作,获得了水中铜、铁、镉常见化合物的吸收系数(或消光系数)<sup>[3-5]</sup>,但重金属的光学参数库仍需不断扩充和完善。针对上述两方面问题,选择存在典型重金属污染问题的广东省韶关市大宝山尾矿水体作为研究对象,结合野外和室内光谱测量实验获得其反射率和消光系数光谱,然后进一步计算得到水中成分的吸收系数光谱曲线,最后对光谱结果进行特征分析、可分性讨论和成因分析。

近年来,关于重金属污染水体方面的研究,学者主要围绕水中重金属的形态分布特征及迁移转化规律<sup>[6-9]</sup>和污染特征分析及其污染评价<sup>[10-13]</sup>等方面进行,而关于此类水体的光学参数获取及其光谱特征分析等方面研究尚未见报道,本研究获得其反射率、消光系数、散射系数和吸收系数的光谱结果,这为将来利用遥感手段反演水中重金属浓度时,选择敏感波段提供重要理论依据,同时水样的散射系数、吸收系数等光学参数皆是今后水体重金属遥感反演模型所需的重要基础参数。

## 1 实验部分

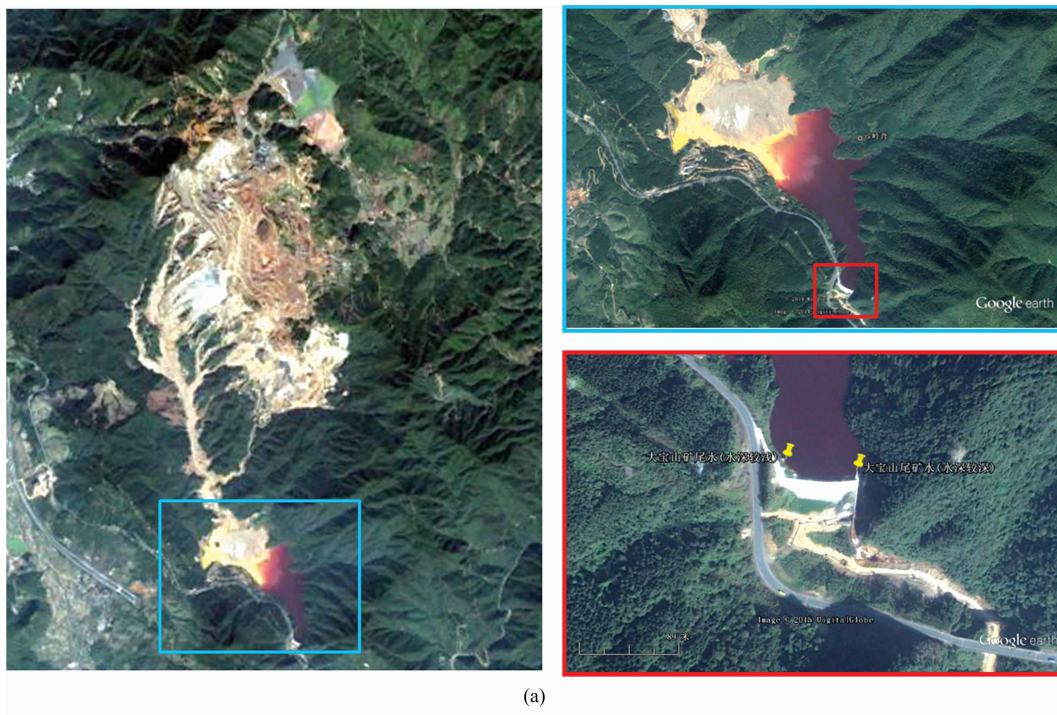
### 1.1 研究区域

选取的研究区域大宝山是一个以铁锌矿为主多种重金属复合的矿山,其尾矿水富含铁、锌、铜、镉、铅等重金属,该区域对研究自然界水体受到重金属污染后的光谱特征非常合适。野外光谱测量实验选择晴朗天气进行,光照条件强且稳定,共选取了 5 个水体样点进行了反射率光谱测量,测量样点具体经纬度如表 1 所列,地理位置如图 1 所示。为了研究不同水深和光照条件对重金属污染水体反射率光谱的影响,在此类水域选取了 3 类样点[图 1(a)]: A 点水深较浅,不超过 0.5 m; B 点水深较深,超过 1 m; C 点为阴影区。同时为了进一步讨论该重金属污染水体与自然界常见的两类水体反射率光谱特征的区别,同时选取了长湖水水库石英砂厂附近的河流作为浑浊水体类型[D 点,图 1(b)]和韶关钢铁厂附近的北江作为富营养化水体类型[E 点,图 1(c)]进行对比。

表 1 光谱测量样点的经纬度

Table 1 The latitude and longitude of sampling points for spectral measurement

点名	地名	经度	纬度	说明
A	大宝山尾矿水	113°43'25.70"E	24°31'00.10"N	水深不超过 0.5 m
B	大宝山尾矿水	113°43'28.66"E	24°30'58.24"N	水深超过 1 m
C	大宝山尾矿水	113°43'28.66"E	24°30'58.24"N	阴影区
D	长湖水水库石英砂厂附近的河流	113°30'10.80"E	24°05'52.80"N	浑浊水体
E	韶关钢铁厂附近的北江	113°33'18.51"E	24°43'12.98"N	富营养化水体



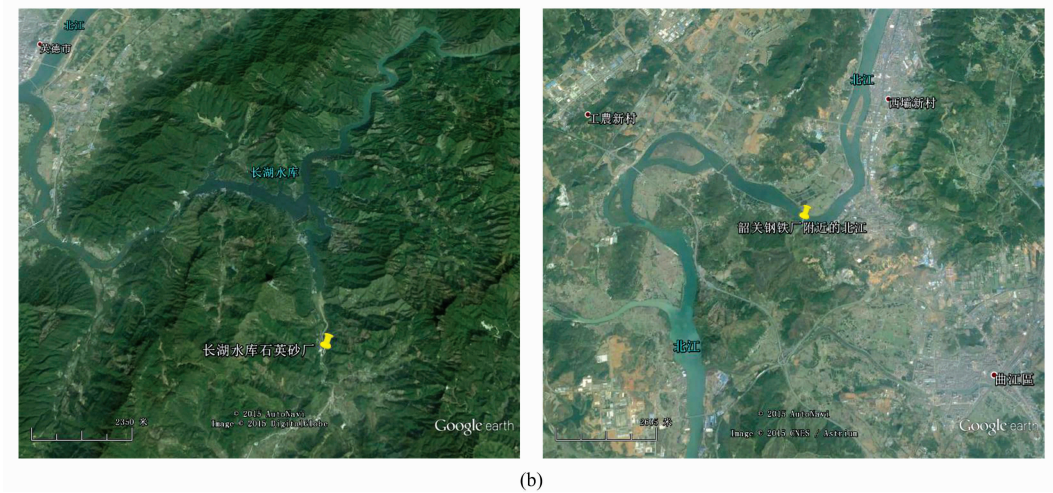


图 1 采样点地理位置

(a): 大宝山尾矿水(A, B, C处); (b): 长湖水库石英砂厂附近的河流(D处); (c): 韶关钢铁厂附近的北江(E处)

Fig. 1 The sampling points location

(a): Mine drainage in Dabaoshan Mountain (Point A, B, C); (b): River near Quartz Factory in Changhu Reservoir (Point D); (c): Beijiang River near the Shaoguan Smelter (Point E)

## 1.2 水体反射率测量方法

水体反射率光谱测量实验采用目前普遍接受的水面测量法<sup>[14]</sup>, 为了消除先后测量标准板和目标水体所引起的入射辐照度的变化, 实验采用双通道 ASD 地物光谱仪, 可使标准板和待测水体在光照条件完全一样的情况下进行测量, 示意图如图 2 所示。测量波长范围为 350~950 nm, 光谱采样间隔为 1 nm。

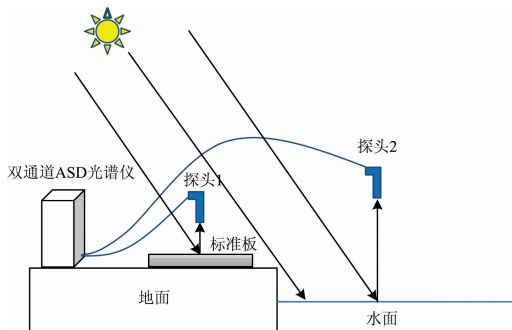


图 2 水体反射率光谱测量示意图

Fig. 2 The schematic diagram of water reflectance spectral measurement

由于水面的波动性, 总会有光线经过镜面反射进入光谱仪探头, 从而令水体反射率在测量过程不断地变化。而水面镜面反射光来自太阳耀光和天空光, 故需分别对二者进行消除。

根据唐军武等<sup>[14]</sup>的研究, 通过光谱仪在极短积分时间内对目标水体测量多组数据(本次实验积分时间为 17 ms, 测量次数为 30 组), 再测量遮挡直射光后的标准板反射辐亮度, 可依次将太阳耀光和天空光的影响消除。最后, 利用式(1)进行待测水体反射率计算

$$R_w = R_0 \frac{L_w}{L_0} \quad (1)$$

其中,  $R_w$  为待测水体反射率;  $R_0$  为标准板反射率, 为已知量;  $L_w$  为消除镜面反射后的离水辐亮度;  $L_0$  为光谱仪测量到的标准板辐亮度。

## 1.3 分离水分子的水中成分吸收系数光谱反演原理

在获得了水样反射率的基础上, 结合水质遥感模型, 进一步计算水样的吸收系数光谱。根据邓孺孺等人提出的水质遥感模型<sup>[1]</sup>, 在水深很大的时候, 离水反射率  $R$  可表达为

$$R = \frac{BP(\Theta)}{4\mu K} \quad (2)$$

其中,  $P(\Theta)$  为散射相函数,  $\mu$  为观测几何参数,  $K$  和  $B$  分别为水样的总消光系数和总散射系数。

总消光系数  $K$  可以通过室内实验测量获得, 因此, 总散射系数  $B$  即可利用式(2)反算得到, 进而计算得到总吸收系数  $A$ , 再分离水分子的吸收, 最终得到水中成分的综合吸收系数。

### 1.3.1 测量水样总消光系数

水样总消光系数  $K$  按照邓孺孺等提出的测量方法获得, 测量原理是: 通过测量不同水层厚度的水样透射辐亮度, 采用比值法计算得到。具体测量方法可参照邓孺孺等相关文献<sup>[15-16]</sup>, 受篇幅限制在此不再赘述。

采集与前面测量反射率同一处的水样 25 L 带回实验室内, 测量水层厚度依序从 1 cm 增加到 15 cm, 每次间隔为 1 cm。水样总消光系数  $K$  计算公式如式(3)

$$K = -\frac{1}{h_1 - h_2} \ln \frac{L_1}{L_2} \quad (3)$$

其中,  $L_1$  为测量厚度  $h_1$  水样的透射辐亮度,  $L_2$  为测量厚度  $h_2$  水样的透射辐亮度。

### 1.3.2 计算水样总吸收系数光谱

假设测量水体为朗伯体, 散射强度各向同性, 故认为散射相函数  $P(\Theta) = 1$ ; 观测几何参数  $\mu$  由当时实地光谱测量环境决定, 具体计算方式为

$$\mu = \sec\theta_z + \sec\theta_v \quad (4)$$

其中,  $\theta_z$  为测量时候太阳天顶角(通过查万年历获得实验时候该处的太阳天顶角为  $37^\circ$ ),  $\theta_v$  为光谱仪测量方向天顶角(由测量者决定, 本次实验为  $45^\circ$ )。

因此, 式(2)中只有总散射系数  $B$  未知, 将式(3)和式(4)代入式(2), 即可计算出水样总散射系数  $B$  为

$$B = \frac{4\mu KR}{P(\Theta)} \quad (5)$$

而水样总消光系数  $K$  是由总散射系数  $B$  和总吸收系数  $A$  组成, 所以, 水样总吸收系数  $A$  可用下式计算

$$A = K - B \quad (6)$$

### 1.3.3 分离水分子的吸收

水中成分的吸收系数才是最终水体重金属遥感模型所需参数, 因此需将水分子的吸收作用分离。此时, 我们认为式(6)中水样的总吸收系数  $A$  包含了水分子的吸收系数  $\alpha_w$  和水中成分的综合吸收系数  $\alpha_{HM}$ , 即

$$A = \alpha_w + \alpha_{HM} \quad (7)$$

水分子的吸收系数  $\alpha_w$  是稳定的物理参数, 已被邓孺孺等测量出来<sup>[16]</sup>, 最终分离水分子后的吸收系数可由式(8)计算

$$\alpha_{HM} = A - \alpha_w \quad (8)$$

以上各光学参数的测量(或计算)结果的单位均为  $\text{cm}^{-1}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 实验结果

根据 1.2 节的原理得到 5 个实验地点的水体反射率光谱如图 3 所示。

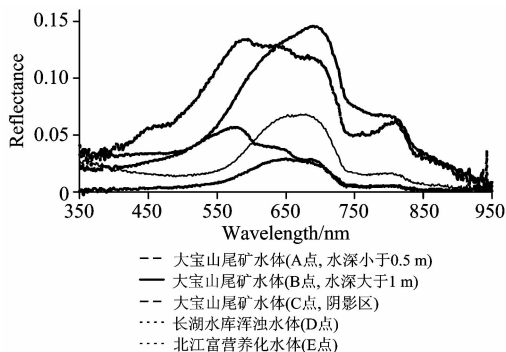


图 3 不同类型水体的离水反射率光谱曲线

Fig. 3 The reflectance spectra of different kinds of water

式(2)适用于水深很大的情况, 同时也是为了避免水底反射的影响, 因此我们挑选光照强烈(非阴影区)水深较大的 B 点为例进行水样光学参数反演。根据 1.3 节的原理, 得到该处总消光系数、总散射系数、总吸收系数光谱如图 4 所示。总散射系数光谱特征与反射率光谱相似, 总吸收系数光谱则与之呈很好的“互补”关系(散射强, 则吸收弱; 吸收强, 则散射弱), 说明该重金属污染水体中的成分, 在  $400 \sim 606$  和  $715 \sim 900 \text{ nm}$  范围以吸收为主, 在  $606 \sim 715 \text{ nm}$  范围以散射为主。

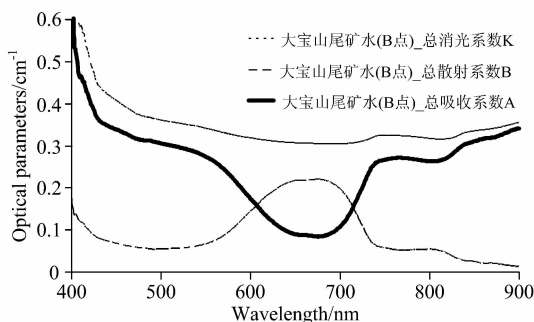


图 4 大宝山尾矿水(B点)总消光系数、总散射系数、总吸收系数光谱(400~900 nm)

Fig. 4 The total extinction coefficient, scattering coefficient and absorption coefficient spectra (400~900 nm) of mine drainage in Dabaoshan Mountain (Point B)

图 5 为分离水分子吸收作用前后, B 点水样和水中成分的吸收光谱对比。由于水分子在近红外波段有强烈吸收, 可见如不分离该吸收作用, 会使水中成分的吸收光谱在近红外波段( $700 \sim 900 \text{ nm}$ )的计算值偏大。

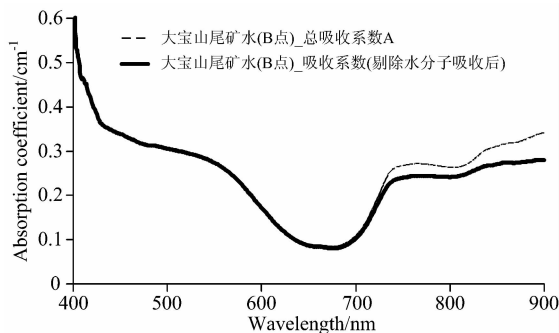


图 5 大宝山尾矿水吸收光谱(B点)在分离水分子吸收的前后对比

Fig. 5 Comparison of absorption spectra before and after separation of water molecule absorption of mine drainage in Dabaoshan Mountain (Point B)

### 2.2 大宝山尾矿水反射率光谱特征分析

大宝山尾矿水三处的水体反射率光谱曲线如图 6 所示。

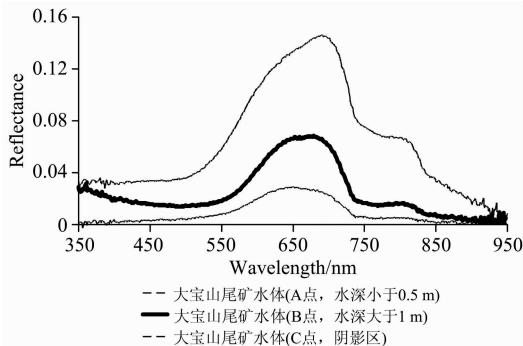


图 6 大宝山尾矿水反射率光谱曲线

Fig. 6 The reflectance spectra of mine drainage in Dabaoshan Mountain

从图 6 可发现：在 350~550 nm，水体反射率在 4% 以下；从 550 nm 开始反射率迅速增大，在 650 nm 附近达到最大值，最高可达 14% 以上，随后迅速减小；在 750~950 nm，水体反射率降为 7% 以内。水体反射率在水深较浅区域(A 点)最高，水深较深区域(B 点)次之，而在阴影区(C 点)最低，这是由于浅水区受到底质反射的影响，反射率会比深水区 and 阴影区高。对比三个样点测量结果对比可知，大宝山矿尾水在不同水深和光照条件下在 600~700 nm(红波段)的反射峰均存在，说明其反射光谱特征稳定。这一反射特征与现场水体颜色呈现砖红色吻合(图 7)，说明反射率光谱测量结果合理。

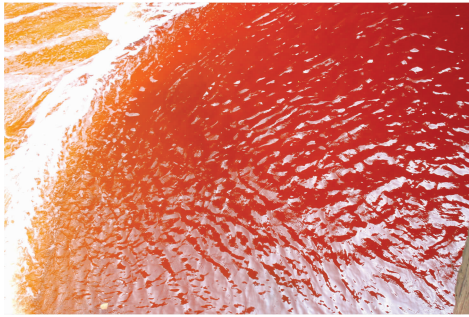


图 7 大宝山尾矿水现场照片

Fig. 7 Photo of mine drainage in Dabaoshan Mountain

2.3 大宝山尾矿水中成分吸收光谱特征分析

为了更好地分析分离水分子吸收后大宝山尾矿水中成分的吸收光谱特征，在波段上用相应颜色标注(近红外波段用深红色表示)，如图 8 所示。

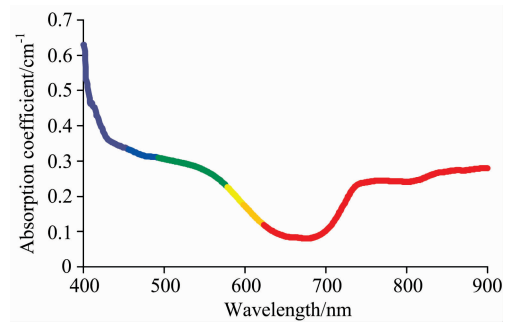


图 8 分离水分子吸收后大宝山尾矿水中成分(B 点)吸收光谱(400~900 nm)

Fig. 8 Absorption spectrum after separation of water molecule absorption of composition of mine drainage in Dabaoshan Mountain (Point B) from 400 to 900 nm

结果显示，该吸收光谱特征为：(1)在紫光波段吸收最强，在红光波段吸收最弱；(2)从 400 nm 开始，吸收系数快速递减，在蓝绿光波段递减速度变缓，从黄光波段开始又快速递减，到 676 nm 达到极小值，然后又快速增强至 750 nm，随后在近红外波段变化减缓，吸收作用与黄绿光波段相当。

2.4 大宝山尾矿水中成分的光谱成因分析和水体反射率光谱可分性讨论

为了讨论大宝山尾矿水中成分的光谱成因，我们采集与光谱测量位置相同的水样进行化验分析，得到的化验分析结果如表 2 所示，从中可知大宝山尾矿水体中重金属以含铁、锌为主，二者共占了参与化验的重金属含量的 99% 以上；而

表 2 采样点的水质化验结果\*

Table 2 The water quality test results of sampling points

化验项目	计量单位	点 A-大宝山尾矿水(水深不超过 0.5 m)	点 B-大宝山尾矿水(水深超过 1 m)	点 D-长湖水库石英砂厂附近的河流	点 E-韶关钢铁厂附近的北江	
常规化验项目	COD <sub>Mn</sub>	mg · L <sup>-1</sup>	37.9	53.3	1.59	2.26
	氨氮	mg · L <sup>-1</sup>	0.61	0.62	0.19	0.35
	总磷(以 P 计)	mg · L <sup>-1</sup>	0.04	0.04	0.05	0.07
	总氮	mg · L <sup>-1</sup>	1.38	1.18	0.58	1.52
	浊度	度	98	70	97	15
叶绿素 a	μg · L <sup>-1</sup>	0.4	0.6	2.5	10.9	
重金属元素	铁	mg · L <sup>-1</sup>	432	484	0.08	0
	锌	mg · L <sup>-1</sup>	125	133	0	0
	铜	mg · L <sup>-1</sup>	2.3	2.5	0.008	0.007
	镉	mg · L <sup>-1</sup>	0.25	0.24	0	0.000 2
	铅	mg · L <sup>-1</sup>	0.086	0.11	0.002	0.002
	汞	mg · L <sup>-1</sup>	0.000 082	0	0	0.000 12
	砷	mg · L <sup>-1</sup>	0.03	0.027	0.002 2	0.009 4
重金属配位体	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg · L <sup>-1</sup>	3 600	3 750	2.91	18
	硫化物	mg · L <sup>-1</sup>	0.007	0.009	0	0
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg · L <sup>-1</sup>	0.45	0.38	1.03	3.35
	Cl <sup>-</sup>	mg · L <sup>-1</sup>	11.4	2.01	1.32	17.3
	氰化物	mg · L <sup>-1</sup>	0	0	0	0

\* 化验项目委托中国广州分析测试中心完成。

\* Performed by China National Analytical Center Guangzhou.

配位体则以硫酸根为主,也是占了参与化验分析配位体含量的 99% 以上,故可推断大宝山尾矿水体主要含有硫酸铁、硫酸锌等化合物及其水解产物。水中成分的吸收光谱与之前作者测量得到的硫酸铁溶液吸收光谱的吸收集中在紫蓝波段吻合<sup>[4]</sup>,而且从图 7 可观察到尾矿水体颜色为砖红色,这也与硫酸铁溶液及其水解产物颜色一致,这说明了水样的红光反射峰及水中成分的吸收光谱特征是由硫酸铁及其水解产物所引起。

为了讨论重金属污染水体的反射率光谱与自然界两种常见类型水体的可分性,同时测量了长湖水库石英砂厂附近的浑浊水体和北江韶关冶炼厂附近的富营养化水体的反射率曲线(见图 3),并对这两种水体也进行采样化验分析(见表 2)。从图 3 可见,受到重金属污染的水体反射率光谱均有别于这两类水体,具体表现为:(1)长湖水库石英砂厂水体反射率在 550~700 nm(绿、红波段)有一宽反射峰,而大宝山尾矿水体在 550~600 nm(绿波段)反射率较 600~700 nm(红波段)低。长湖水库水体反射率曲线表明该水体以反射绿、红光为主,同时从化验结果来看,该处水体的 COD<sub>Mn</sub>、氨氮等水质参数含量较低,而浑浊度相对较高,说明水体浑浊,含沙量高,故现场水体呈现泥黄色,与其反射率光谱特征吻合。而大宝山尾矿水体则以反射红光为主显现出的是砖红色,与该浑浊水体有区别。(2)韶关冶炼厂附近的北江水体从化验结果来看,该处水质的总磷、总氮和叶绿素 a 含量达到了水体富营养化标准。其反射率整体不高,在 550~600 nm(绿波段)有一反射峰,故现场水体呈现暗绿色,而大宝山尾矿水体的反射峰则在 600~700 nm(红波段),二者反射峰刚好错开。

## References

- [1] DENG Ru-ru, HE Zhi-jian, CHEN Xiao-xiang, et al(邓孺孺,何执兼,陈晓翔,等). Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni(中山大学学报·自然科学版), 2002, 41(3): 99.
- [2] Deng Ruru, Liu Qinghuo, Ke Ruipeng, et al. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 23(1): 119.
- [3] LIANG Ye-heng, DENG Ru-ru, GAO Yi-kang, et al(梁业恒,邓孺孺,高奕康,等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2016, 20(1): 27.
- [4] DENG Ru-ru, LIANG Ye-heng, GAO Yi-kang, et al(邓孺孺,梁业恒,高奕康,等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2016, 20(1): 35.
- [5] LIANG Ye-heng, DENG Ru-ru, LIU Yong-ming, et al(梁业恒,邓孺孺,刘永明,等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2016, 36(12): 4006.
- [6] OU Jin-ping, ZHENG Liu-gen, CHEN Yong-chun, et al(欧金萍,郑刘根,陈永春,等). Ecology and Environmental Sciences(生态环境学报), 2018, 27(4): 785.
- [7] Chen Meiqin, Lu Guining, Guo Chuling, et al. Chemosphere, 2015, 119: 734.
- [8] Wang Xiaodi, Zang Shuying. Ecotoxicology, 2014, 23(4): 609.
- [9] Zhao Huarong, Xia Beicheng, Qin Jianqiao, et al. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(6): 979.
- [10] WU Lei, LIU Gui-jian, ZHOU Chun-cai, et al(吴蕾,刘桂建,周春财,等). Environmental Science(环境科学), 2018, 39(2): 738.
- [11] Mahato M, Singh G, Singh P, et al. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2017, 99(1): 54.
- [12] WANG Guo-bao, LU Li, WEI Gao-ling, et al(王国保,鲁荔,韦高玲,等). Environmental Science and Technology(环境科学与技术), 2016, 39(S2): 444.
- [13] WEI Huan-peng, DANG Zhi, YI Xiao-yun, et al(魏焕鹏,党志,易筱筠,等). Chinese Journal of Environmental Engineering(环境工

综上所述,大宝山尾矿水体的反射率光谱特征区别于自然界常见的两种类型水体(浑浊水体和富营养化水体),其独特的光谱响应波段由硫酸铁及其水解产物所引起。

## 3 结 论

利用 ASD 光谱仪,首次获得了以大宝山尾矿水为例的典型重金属污染水体的反射率、消光系数、散射系数和吸收系数的光谱曲线。一方面,水体反射率光谱结果显示其在 600~700 nm 存在稳定的反射峰,并与浑浊水体和富营养化水体反射率光谱进行对比分析,认为该反射峰可作为区分该重金属污染水体的特征波段;另一方面,水中成分的吸收光谱特征明显,强吸收(紫蓝光波段)和吸收谷(红光波段)波长位置十分明确,结合化验结果来看,大宝山尾矿水主要含硫酸铁为主,其吸收光谱特征与此相吻合。以上皆是将来利用卫星遥感手段进行提取的重要特征波段:吸收谷使对应遥感波段影像明亮,吸收峰则使对应遥感波段影像暗淡,类似归一化植被指数,如果将这两类波段进行比值运算,可大大突出这类重金属污染水体在遥感影像上的信息。

将来进一步与已有的水质遥感模型相结合,以此为突破口,应用到国家将要发射的搭载着高光谱成像传感器的卫星上(如高分五号),可望实现水体重金属浓度的定量遥感反演这一难题。所采用的水体光学参数反演方法,可推广至其他典型重金属尾矿水体(如铜矿、镉矿等),为完善重金属光学参数库提供方法依据,同时也为将来深入研究成分更为复杂的重金属污染水体的光谱特征及实现其浓度定量遥感反演提供基础参数和打下良好的理论基础。

程学报), 2011, 5(9): 1943.

- [14] TANG Jun-wu, TIAN Guo-liang, WANG Xiao-yong, et al(唐军武, 田国良, 汪小勇, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2004, 8(1): 37.
- [15] DENG Ru-ru, HE Ying-qing, QIN Yan, et al(邓孺孺, 何颖清, 秦雁, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2012, 16(1): 174.
- [16] DENG Ru-ru, HE Ying-qing, QIN Yan, et al(邓孺孺, 何颖清, 秦雁, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2012, 16(1): 192.

## The Spectral Characteristic Analysis of Typical Heavy Metal Polluted Water——a Case Study of Mine Drainage in Dabaoshan Mountain, Guangdong Province, China

LIANG Ye-heng<sup>1</sup>, DENG Ru-ru<sup>1,2\*</sup>, HUANG Jing-lan<sup>3</sup>, XIONG Long-hai<sup>1</sup>, QIN Yan<sup>1</sup>, LIU Zhu-ting<sup>4</sup>

1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

2. Guangdong Engineering Research Center of Water Environment Remote Sensing Monitoring, Guangzhou 510275, China

3. Xinhua College of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510520, China

4. Guangdong Environmental Monitoring Center, Guangzhou 510308, China

**Abstract** At present, the research on remote sensing inversion of heavy metal in water is still relatively weak, therefore the study on the spectral characteristic of heavy metal polluted water in nature is an important basic work, which is an important theoretical basis for the band selection when realizing the remote sensing inversion, and the measuring results are also the important parameters necessary for the remote sensing inversion model in the future. Firstly, using Analytical Spectral Devices (ASD) spectrometer, measuring the water-leaving reflectance spectrum curve of mine drainage of Dabaoshan Mountain as an example of typical heavy metal polluted water under two different water depths and light conditions, we found that there was a stable reflection peak in 600~700 nm (red light). Then further comparing the reflection peak position of mine drainage of Dabaoshan Mountain with two types of water (turbid water and eutrophication of water) which are common in nature, we found that the reflection peak position of Changhu Reservoir near the Quartz Factory as an example of turbid water was in 550~700 nm (green and red band) and that of Beijiang River near the Shaoguan Smelter as an example of eutrophication of water was in 550~600 nm (green band), and the position of the reflection peak of these three kinds of water was different, which means that the reflection spectrum of this heavy metal polluted water has a good separability with these two common types of water. On this basis, through a combination of water quality remote sensing model and the indoor water extinction coefficient measurements, we obtained the scattering coefficient and absorption coefficient spectrum of the mine drainage of Dabaoshan Mountain, and further eliminated water molecules absorb effect, finally got the absorption spectrum curve of compositions in this heavy metal polluted water, with the results showing that: it absorbed the strongest in purple band, while the weakest in red band; Starting from 400nm, the absorption coefficient decreased rapidly, then slowdown in the blue and green light band; arrived at the yellow light band, it decreased rapidly again until 676 nm, which reached the minimum; then it increased rapidly to 750nm, and then the change slowed down. Finally, combined with the water quality test results of water samples, the causes of the spectrum of the heavy metal polluted water were analyzed, and we found that the water color in-situ and its absorption coefficient spectrum characteristics were consistent with the color and absorption coefficient of ferric sulfate solution measured in our previous study, therefore we considered that the spectral characteristic of this water sample was caused by the ferric sulfate and its hydrolysate. The results above showed that the absorption spectrum of the mine drainage of Dabaoshan Mountain had obvious characteristics, and the position of the reflection peak and strongest absorption wavelength was clear, which were the important characteristic bands for future extraction of heavy metal concentration in water using satellite remote sensing technique. In this paper, the reflectance spectrum, extinction coefficient spectrum, scattering coefficient spectrum and absorption coefficient spectrum of the mine drainage of Dabaoshan Mountain as an example of typical heavy metal polluted water were obtained for the first time, which provides a method basis for the optical parameters inversion of drainage in other heavy metal mines and also lays a good theoretical foundation for the quantitative extraction of heavy metal concentration in water using remote sensing technology in the future.

**Keywords** Heavy metal polluted water; Reflectance spectrum; Absorption spectrum; Spectral characteristic analysis; Remote sensing of heavy metal in water

\* Corresponding author

(Received Aug. 27, 2018; accepted Jan. 6, 2019)

## 《光谱学与光谱分析》投稿简则

《光谱学与光谱分析》是由中国科协主管,中国光学学会主办,钢铁研究总院、中国科学院物理研究所、北京大学、清华大学共同承办的专业学术期刊。国内外公开发行人,从 2004 年起为月刊,大 16 开本,2019 年仍为月刊,每期 332 页。《光谱学与光谱分析》主要报道我国光谱学与光谱分析领域内具有创新性科研成果,及时反映国内外光谱学与光谱分析的进展和动态;发现并培育人才;推动和促进光谱学与光谱分析的发展。为科教兴国服务。读者对象为从事光谱学与光谱分析的科研人员、教学人员、分析测试人员和科研管理干部。

### 栏目设置和要求

1. 研究报告 要求具有创新性的研究成果,一般文章以 8000 字(包括图表、参考文献、作者姓名、单位和中文、英文摘要,下同)为宜。

2. 研究简报 要求在前人研究的基础上有重大改进或阶段性研究成果,一般不超过 5000 字。

3. 评述与进展 要求评述国内外本专业的发展前沿和进展动态,一般不超过 10000 字。

4. 新仪器装置 要求介绍新型光谱仪器的研制、开发、使用性能和应用,一般不超过 5000 字。

5. 来稿摘登 要求测试手段及方法有改进并有应用交流价值,一般以 3000~4000 字为宜。

### 稿件要求

1. 投稿者请经本刊编委(或历届编委)一人或本专业知名专家推荐,并附单位保密审查意见及作者署名顺序,主要作者介绍。文章有重大经济效益或有创新者,请说明,同时注明受国家级基金或国家自然科学基金资助情况。

2. 来稿要观点明确、数据真实可靠、层次分明、言简意明、重点突出。来稿必须是网上在线投稿(含各种符号和外文字母大写、小写、正体、斜体;希腊字母、拉丁字母;上角、下角标位置应标清楚)。中文摘要以 800 字为宜,英文摘要(建议经专业英语翻译机构润色)与中文摘要要对照;另附关键词。要求来稿应达到“齐、清、定”,中文、英文文字通顺,方可接受送审。

3. 为了进一步统一和完善投稿方式、缩短论文发表周期,本刊只接收网上在线投稿,不接收以邮寄方式或 e-mail 方式的投稿,严禁“一稿多投”,对侵权、抄袭、剽窃等学术不端行为,一经发现,取消三年投稿资格。

4. 文中插图要求完整,图中坐标、线条、单位、符号、图注等应标注准确、完整。如作者特殊要求需出彩色插图者,必须在投稿时事先加以说明,并承担另加的彩印费用。图幅大小:单栏图 7.5cm(宽)×6cm(高);双栏图:14cm(宽)×6cm(高);图中数字、图题、表题全部用中文、英文对照,图中数字、中文、英文全用 6 号字。电子文档中除实物图外,曲线图要用 Matlab, Excel, Visio 或 Origin 等软件制作,稿件中图片的原图并转成相应(可编辑)的文件格式(.fig, .xls, .vsd, .opj),非“.jpg”格式的文档,随电子版修改稿一同发送到本刊的修改稿专用邮箱。

5. 文中出现的单位必须按“中华人民共和国计量标准”及有关 GB 标准规定缮写。物理量符号一律用斜体,单位符号和词头用正体字母。

6. 名词术语,请参照全国科学技术名词规定缮写。

7. 参考文献,采用顺序编码制,只列主要文献;以 15~20 条为宜。内部资料、私人通讯、未经公开发表的一律不能引用。日文、俄文等非英文文献,请用英文表述;中文文献和中文图书采用中、英文对照表述,文献缮写格式请参照本刊。

8. 请在投稿第一页左下角写明投稿联系人的电话和两个 e-mail,以便及时联系。

### 稿件处理

1. 自收到稿件之日起,一个月内作者会收到编辑部的稿件处理意见。请根据录用通知中所提出的要求认真修改,希望修改稿在 30 天内寄回编辑部,并作为作者最终定稿(当作者接到校样时,以此修改稿为准进行校对,请勿再做大的改动),若二个月内编辑部没收到修改稿,将视为自行撤稿处理。

2. 有重大创新并有基金资助者可优先发表;不录用的稿件,编辑部将尽快通知作者,底稿一律不退,请自留底稿。

3. 来稿一经发表将酌致稿酬并送样刊 2 册。

4. 遵照《中华人民共和国著作权法》,投稿作者须明确表示,该文版权(含各种媒体的版权)授权给《光谱学与光谱分析》期刊社。国内外各大文献检索系统摘录本刊刊出的论文;凡不同意被检索刊物无稿酬摘引者,请在投稿时事先声明,否则,本刊一律认为已获作者授权认可。

5. 修改稿请寄:100081 北京市海淀区学院南路 76 号(南院西北门),《光谱学与光谱分析》期刊社(收)

电话:010-62182998 或 62181070 传真:010-62181070

e-mail: chngpxygpfx@vip.sina.com; 修改稿专用邮箱: gp2008@vip.sina.com 网址: http://www.gpxygpfx.com