

## 典型煤的近红外反射光谱特征的方向性研究

杨恩<sup>1</sup>, 王世博<sup>2\*</sup>

1. 江苏建筑职业技术学院智能制造学院, 江苏 徐州 221116

2. 中国矿业大学机电工程学院, 江苏 徐州 221116

**摘要** 高光谱遥感是煤矿区探测的有效方法, 对于煤炭资源调查、矿区环境监测等具有重要意义, 其中煤、矸石、植被、水体等被遥测物各个方向的反射光谱特征是煤矿高光谱遥感的基础, 为此有必要针对典型煤的方向反射光谱特征进行研究。从我国不同矿区收集了无烟煤、烟煤、褐煤三大类煤中的4种典型煤样, 4种煤样按煤阶由高到低顺序包括无烟煤一号、贫煤、气煤、褐煤二号, 在实验室利用方向反射测量球坐标实验装置测定了每种煤样半球空间各反射方向的近红外波段(1 000~2 500 nm)反射光谱曲线。通过对反射光谱曲线波形分析, 发现同一种煤不同反射方向的近红外反射光谱波形基本相似, 但在整体反射率大小和局部波形特征上具有差异性, 光谱曲线整体反射率越大, 吸收谷越明显。随反射角增大, 4种煤在前向反射方向(180°探测方位角)反射光谱曲线均整体上升, 在后向反射方向(0°探测方位角)反射光谱曲线高度变化相对较小。在每种煤半球空间各反射方向的反射光谱曲线中, 选取了1 400, 1 700, 1 900, 2 200和2 300 nm 5个特征波长, 通过分析此5个特征波长处的反射率空间分布极坐标云图, 发现4种煤在5个特征波长点处均具有一定的双向反射特征, 均表现出较明显的前向反射热点特征和相对较弱的后向反射热点特征, 无烟煤一号后向反射热点特征比贫煤、气煤、褐煤二号更明显, 贫煤、气煤、褐煤二号随煤阶降低后向反射热点特征逐渐增强。每种煤前、后向反射方向的反射光谱中, 通过对5个特征波长处反射率与反射角进行相关性分析, 发现前向反射特征波长反射率与反射角近似呈线性函数关系, 后向反射特征波长反射率与反射角近似呈高斯函数关系, 且高斯函数拟合曲线波峰随煤阶降低向较大反射角度移动。该研究为矿区煤炭资源高光谱遥感最优探测几何的选择提供了依据, 也为矿区煤炭资源精准探测提供了参考。

**关键词** 煤矿区; 高光谱遥感; 近红外; 方向反射; 特征波长点

**中图分类号:** TP79 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)03-0847-12

### 引言

煤炭是我国经济和社会发展的主要能源和重要原材料, 利用先进的科技手段高效、绿色、安全地探测和开发煤炭具有重要的意义。高光谱遥感作为一种可见-近红外波段光谱分辨率较高、地物探测更为精确的遥感技术, 近年来已在煤矿区的煤炭资源调查、环境监测等领域得到了一定的研究和应用<sup>[1-3]</sup>。由于地物的反射光谱特征具有方向性, 即地物的反射光谱特征随探测器探测角度的变化而变化, 因此获得地物的方向反射光谱特征是实现地物高光谱遥感精确识别结果的重要基础<sup>[4-7]</sup>。获得煤、矸石、植被、水体等地物的方向反射

光谱特征对于煤矿区高光谱遥感更为精确的探测结果具有重要作用。

目前, 为校准机载和卫星传感器对地物的高光谱遥感数据, 同时为提供地面尺度的地物反射光谱数据, 已有多位学者测定了多种地物的方向反射光谱特征, 并采用了不同的测量装置。Knowles-Middleton等<sup>[4]</sup>最早采用了一个封闭的半圆形盒子, 里面设有链传动轨道, 通过光电倍增管输出电压测定了雪面定向反射特征。Schopfer等<sup>[8]</sup>采用双视角测角支架和两台ASD FieldSpec-3光纤光谱仪测定了人造地物的方向反射光谱特征。Cloutis等<sup>[5]</sup>采用ASD FieldSpec Pro HR光纤光谱仪、准直光源、测角仪等装置测定了碳质球粒陨石的定向反射光谱特征。赵子傑等<sup>[6]</sup>采用ASD FieldSpec-3光

收稿日期: 2021-01-19, 修订日期: 2021-03-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0604503), 国家自然科学基金联合基金项目(U1610251), 江苏建筑职业技术学院博士专项(JYJBZX20-11)资助

作者简介: 杨恩, 1986年生, 江苏建筑职业技术学院智能制造学院讲师 e-mail: yangen635@126.com

\* 通讯作者 e-mail: wangshb@cumt.edu.cn

纤光谱仪、NENULGS 角度测量系统等测定了沙地表面的方向反射光谱特征。路鹏等<sup>[7]</sup>为研究月球表面主要矿物的方向反射特征,采用 ASD FieldSpec-3 Hi-Res 光谱仪测定了斜长石和单斜辉石的方向反射光谱特征。以上文献报道了对于岩石、矿物、植被、水体、人造物等地物的方向反射光谱特征的研究,然而煤作为露天煤矿等煤矿区的主要地物,鲜有文献报道相关煤的方向反射光谱特征。研究典型煤的方向反射光谱特征将为矿区煤炭高光谱遥感最优探测几何的选择、煤炭资源精准探测等提供参考。

选取了我国无烟煤、烟煤、褐煤三大类煤中的无烟煤一号、贫煤、气煤、褐煤二号 4 种典型煤样,利用方向反射测量球坐标实验装置测定了每种煤半球空间各个反射方向的近红外波段(1 000~2 500 nm)反射光谱曲线,获得了每种煤特征波长处反射率的空间分布特征,分析了每种煤前向反射(180°探测方位角)和后向反射(0°探测方位角)特征波长反射

率的变化规律。

## 1 实验部分

### 1.1 煤样处理

从宁夏汝其沟煤矿、山东东风煤矿、山东兴隆庄煤矿、吉林舒兰煤矿分别收集了无烟煤一号、贫煤、气煤、褐煤二号 4 种典型煤样各 1 块。将每种煤样切割成 10 cm×10 cm×5 cm 的方体试样,并对其中一侧 10 cm×10 cm 表面打磨平整,采集此表面反射光谱后,将此表面煤样切割下来碾成粉末,取其中一部分粉末依次进行工业分析、煤灰 X 射线荧光(XRF)分析,其中 XRF 分析所用仪器为德国 Bruker Spectrometer S8 Tiger。按煤阶由高到低顺序排列,4 种煤的空气干燥基固定碳、挥发分、灰分、水分工业分析结果及煤灰 XRF 分析结果如表 1 所示。

表 1 4 种典型煤样的主要成分

Table 1 Main compositions of the four typical coal samples

煤样类型	工业分析/%				煤灰 XRF 分析/%								
	固定碳	挥发分	灰分	水分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
无烟煤一号	91.28	2.62	4.67	1.43	45.83	29.19	17.83	3.29	0.06	0.10	1.00	2.50	0.20
贫煤(烟煤)	73.16	16.59	8.61	1.64	63.78	14.62	13.93	3.90	0.25	0.12	2.10	1.26	0.04
气煤(烟煤)	58.67	29.98	9.38	1.97	57.10	28.00	9.18	2.04	1.58	0.02	0.65	1.32	0.11
褐煤二号	34.69	40.45	21.05	3.81	72.12	12.13	6.23	6.10	1.51	0.05	0.44	1.33	0.09

### 1.2 煤近红外方向反射光谱测定

如图 1 所示,搭建方向反射测量球坐标实验装置,该装置主要由球坐标支架、100 W 卤钨灯光源、准直镜、Y 型石英光纤、650 nm 激光器、PTFE 参照白板、荷兰 Avantes AvaSpec 近红外光纤光谱仪、采集计算机组成,其中近红外

光纤光谱仪波长范围为 1 000~2 500 nm, Y 型光纤合并端连接准直镜,一个分支端连接光谱仪用于光谱数据采集,另一个分支端连接激光器用于指示探测位置,准直镜固定于球坐标支架反射角滑轨用于收集反射光。

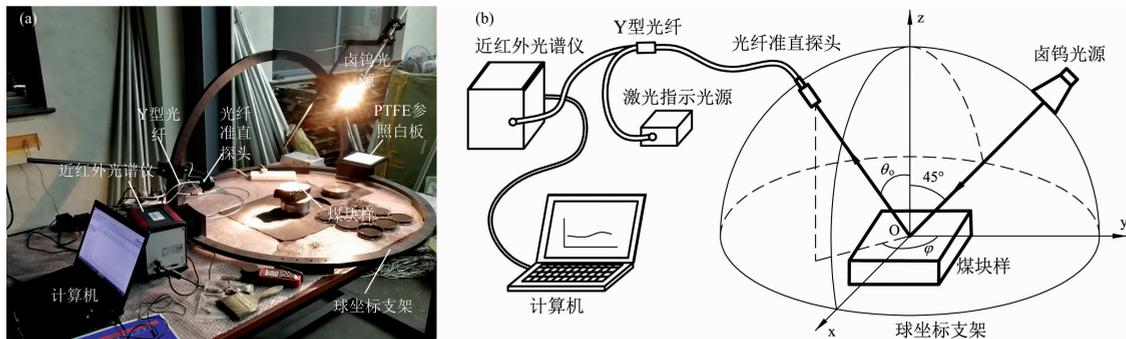


图 1 煤方向反射实验台及光谱采集示意图

(a): 方向反射测量球坐标实验装置; (b): 煤方向反射光谱采集示意图

Fig. 1 Directional reflection platform and spectra acquisition diagram for coal

(a): Spherical coordinate device for directional reflection measurement;

(b): Directional reflectance spectra acquisition diagram for coal

对于每种煤块样,方向反射测量球坐标实验装置采用卤钨聚光灯模拟太阳照射试样被测表面,卤钨灯光束入射方向固定,其方位角为 0°,入射角为 45°,准直镜探头模拟试样反射光谱探测接收器,其接收方位角( $\varphi$ )设定 0°, 45°, 90°, 135°和 180° 5 个位置,每个方位角下设定 0°, 15°, 30°, 45°, 60°和 75° 6 个接收反射角( $\theta_0$ ),光源照射距离和准直镜探测

距离均为 0.5 m,即对于每种试样共采集 30 个探测方位的反射光谱数据。在任一探测方向,测定试样被测表面内不同区域反射光谱数据,取其均值作为试样在该探测方向的反射光谱数据。按对称取试样在 180°~360°方位角相应探测方位的

光谱数据<sup>[6-7]</sup>，以此获得每种煤样近似半球空间各反射方向的近红外波段反射光谱。

## 2 结果与讨论

### 2.1 煤近红外方向反射光谱曲线特征

实验所得无烟煤一号、贫煤、气煤、褐煤二号 4 种典型煤样表面各探测方位角 ( $\varphi$ ) 下各反射角 ( $\theta_0$ ) 方向的近红外波段 (1 000~2 500 nm) 光谱反射率曲线分别如图 2、图 3、图

4、图 5 所示(两端边缘波段 1 000~1 049 和 2 450~2 500 nm 光谱曲线受光谱仪暗电流影响, 噪声较大, 图中已去除)。对于同一种煤, 不同探测方向的近红外光谱曲线表现出了基本相似的波形, 但整体反射率大小和局部波形特征有一定的差异性。受反射能量越多, 接收信噪比越高的影响, 所得反射光谱曲线具有随整体反射率升高, 光谱吸收谷特征更加明显的规律。同时, 4 种煤样按煤阶由高到低顺序, 各探测方向近红外反射光谱波形整体上符合吸收谷特征增多、反射率增大的趋势<sup>[9-10]</sup>。

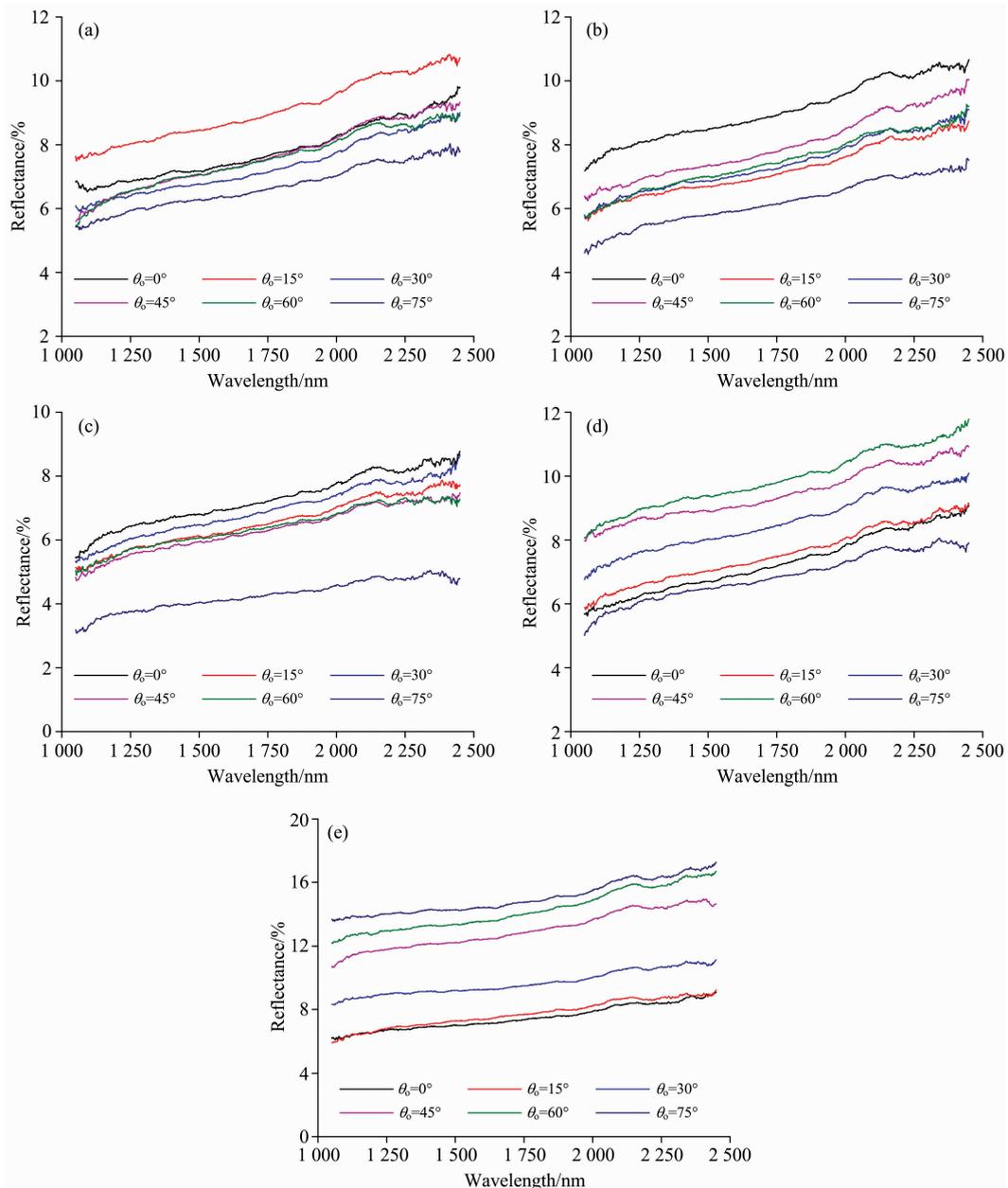


图 2 无烟煤一号各方位角 ( $\varphi$ ) 下的近红外反射光谱曲线

(a):  $\varphi=0^\circ$ ; (b):  $\varphi=45^\circ$ ; (c):  $\varphi=90^\circ$ ; (d):  $\varphi=135^\circ$ ; (e):  $\varphi=180^\circ$

Fig. 2 Near-infrared spectral reflectance curves of No. 1 anthracite under different azimuth angles ( $\varphi$ )

(a):  $\varphi=0^\circ$ ; (b):  $\varphi=45^\circ$ ; (c):  $\varphi=90^\circ$ ; (d):  $\varphi=135^\circ$ ; (e):  $\varphi=180^\circ$

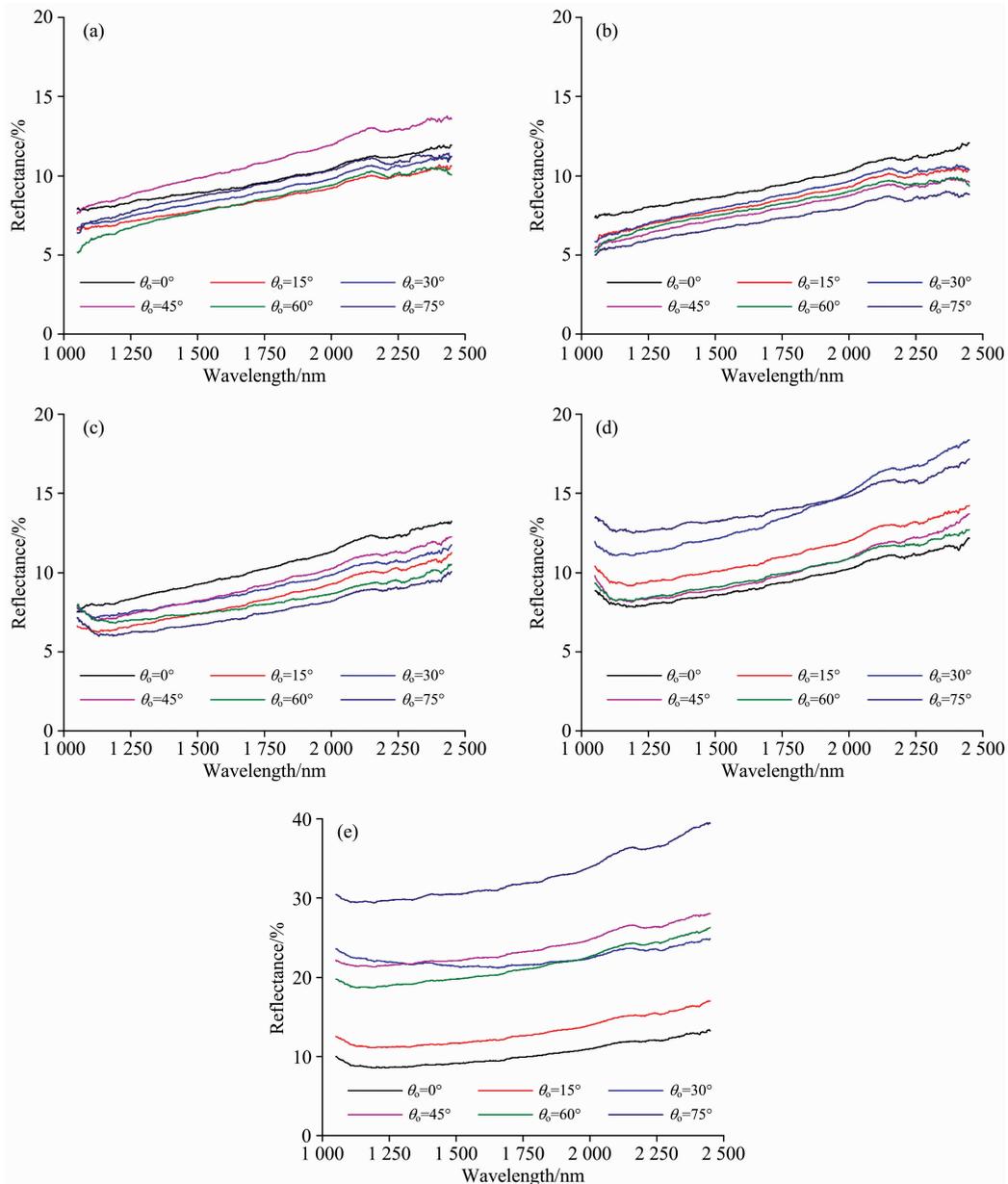


图 3 贫煤各位角 ( $\varphi$ ) 下的近红外反射光谱曲线

(a):  $\varphi=0^\circ$ ; (b):  $\varphi=45^\circ$ ; (c):  $\varphi=90^\circ$ ; (d):  $\varphi=135^\circ$ ; (e):  $\varphi=180^\circ$

Fig. 3 Near-infrared spectral reflectance curves of meager coal under different azimuth angles ( $\varphi$ )

(a):  $\varphi=0^\circ$ ; (b):  $\varphi=45^\circ$ ; (c):  $\varphi=90^\circ$ ; (d):  $\varphi=135^\circ$ ; (e):  $\varphi=180^\circ$

如图 2(e)、图 3(e)、图 4(e)、图 5(e)所示, 在  $180^\circ$  探测方位角, 即前向反射方向时, 4 种煤样均表现出随探测反射角变化, 反射光谱曲线变化较为明显、强度差异较大的特征, 整体规律为随反射角增大, 反射光谱曲线上升。而在  $0^\circ$  探测方位角, 即后向反射方向, 如图 2(a)、图 3(a)、图 4(a)、图 5(a)所示, 4 种煤样均表现出随探测反射角变化, 反射光谱曲线变化相对不明显、强度差异较小的特征, 无烟煤一号后向反射光谱曲线整体最大反射率出现在  $15^\circ$  反射角附近, 贫煤、气煤、褐煤二号后向反射光谱曲线整体最大反射率均出现在  $45^\circ \sim 60^\circ$  反射角附近。

如图 2(b—d)、图 3(b—d)、图 4(b—d)、图 5(b—d)所示,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  3 个方位角下, 4 种煤样反射光谱曲线强度无明显随反射角变化规律。

## 2.2 煤近红外特征波长反射率空间分布特征

煤在近红外波段的反射光谱吸收谷特征主要受其所含的水分、矿物、有机成分的影响。煤中的水分在  $1400$  和  $1900$  nm 波长附近有吸收谷特征<sup>[10-13]</sup>。煤中的主要矿物成分最为常见的有黏土矿物、石英, 黏土矿物中—OH、石英结合  $H_2O$  也对煤  $1400$  和  $1900$  nm 波长附近的吸收谷特征产生影响, 同时黏土矿物中的 Al—OH 对煤  $2200$  nm 波长附近的

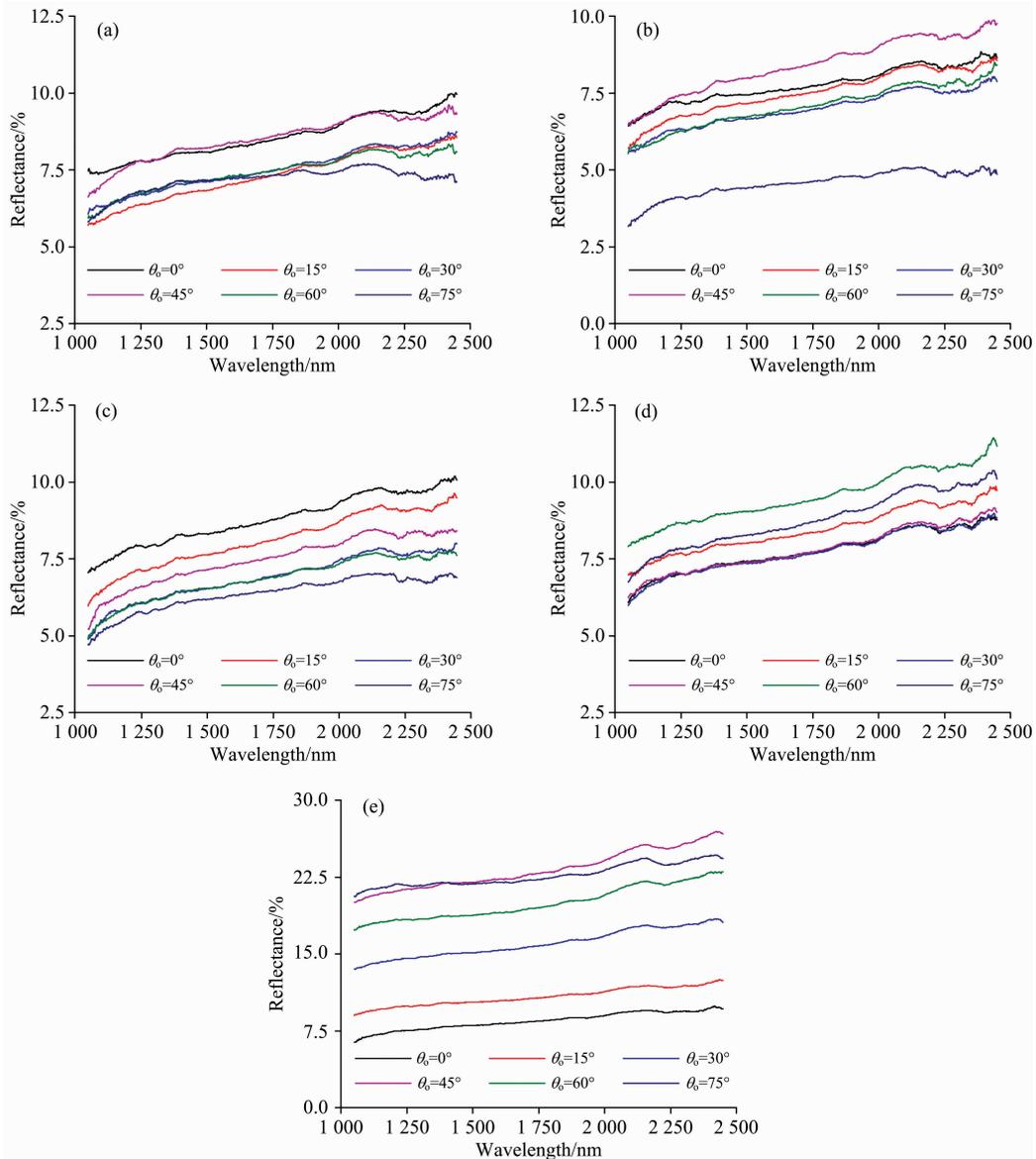


图 4 气煤各方位角 ( $\varphi$ ) 下的近红外反射光谱曲线

(a):  $\varphi=0^\circ$ ; (b):  $\varphi=45^\circ$ ; (c):  $\varphi=90^\circ$ ; (d):  $\varphi=135^\circ$ ; (e):  $\varphi=180^\circ$

Fig. 4 Near-infrared spectral reflectance curves of gas coal under different azimuth angles ( $\varphi$ )

(a):  $\varphi=0^\circ$ ; (b):  $\varphi=45^\circ$ ; (c):  $\varphi=90^\circ$ ; (d):  $\varphi=135^\circ$ ; (e):  $\varphi=180^\circ$

吸收谷特征产生主要影响<sup>[10-12]</sup>。煤有机成分中脂肪侧链  $\text{CH}_3$ 、 $\text{CH}_2$ 、芳香结构  $\text{C-H}$  等弯曲、伸缩振动的合频、倍频，所产生的近红外波段反射光谱吸收谷特征主要出现在 1 700 和 2 300 nm 波长附近<sup>[11, 14]</sup>。基于以上主要成分对煤近红外波段反射光谱吸收谷特征的影响，选取每种煤样在半球空间各方向近红外反射光谱的 1 400, 1 700, 1 900, 2 200 和 2 300 nm 5 个特征波长处的反射率进行分析，得到无烟煤一号、贫煤、气煤、褐煤二号特征波长处的反射率空间分布极坐标云图，如图 6、图 7、图 8、图 9 所示。

图 6、图 7、图 8、图 9 中各特征波长处反射率空间分布极坐标云图表明 4 种典型煤在近红外波段各特征波长处均表现出了一定的双向反射特征。180°探测方位角前向反射时，

在各特征波长处 4 种典型煤均表现出了较明显的反射热点特征，即在某个方向反射能量较大，在反射率空间分布极坐标云图中，这个方向的颜色相对于周围其他方向的颜色更趋向于暖色(红色)，故此，称其为热点。整体上反射角越大，反射热点特征越明显。而 0°探测方位角后向反射时，在各特征波长处 4 种典型煤均表现出了相对较弱的反射热点特征，整体表现为无烟煤一号后向反射热点相对于贫煤、气煤、褐煤二号更为明显，贫煤、气煤、褐煤二号按煤阶降低的顺序，后向反射热点特征整体上逐渐变明显。

如图 6、图 7、图 8 所示，无烟煤一号、贫煤、气煤 3 种煤中，同一种煤在各特征波长间表现出了相似的反射率分布特征，其中无烟煤一号在后向反射方向 15°反射角附近出现局

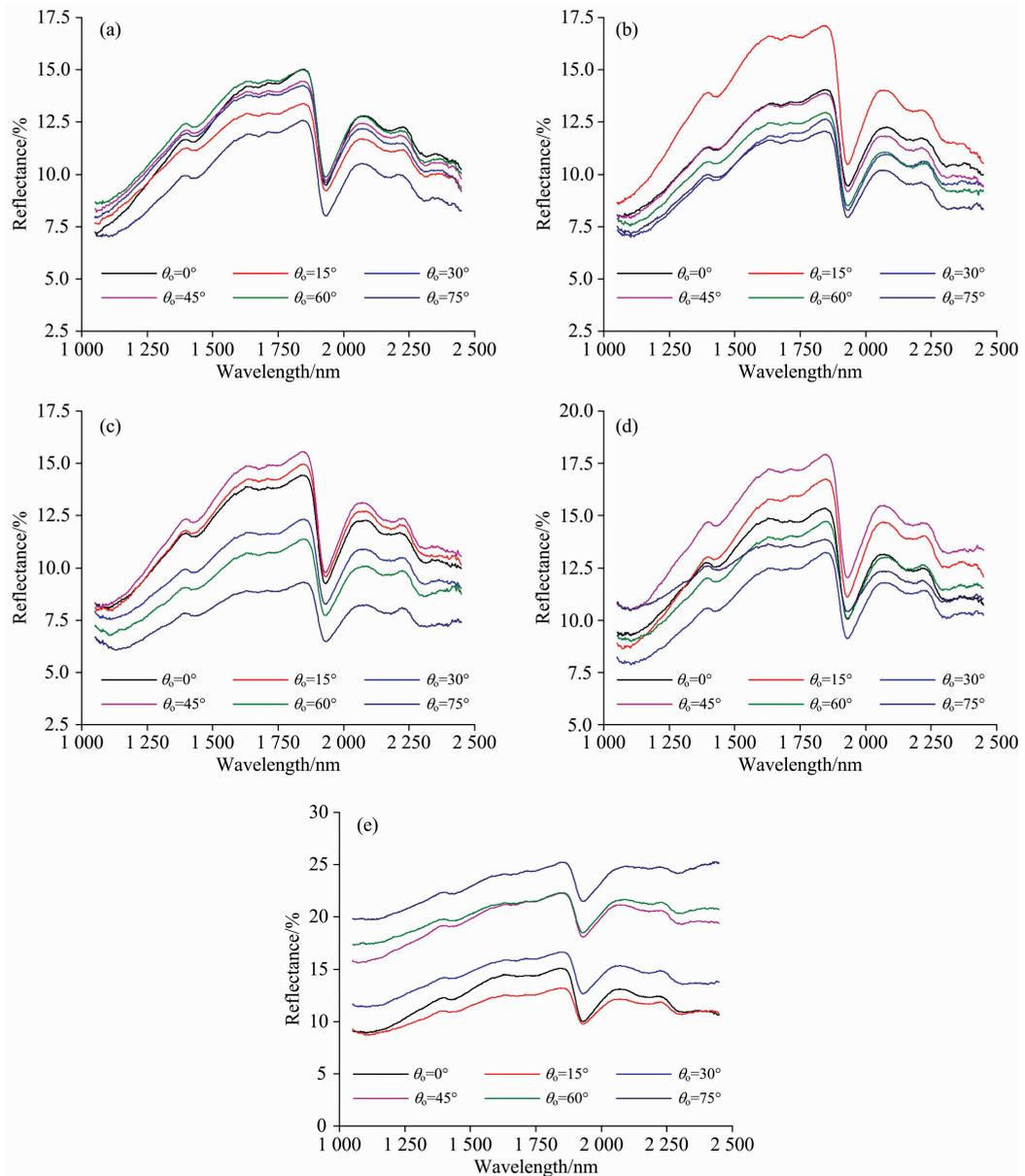


图 5 褐煤二号各方位角( $\varphi$ )下的近红外反射光谱曲线

(a):  $\varphi=0^\circ$ ; (b):  $\varphi=45^\circ$ ; (c):  $\varphi=90^\circ$ ; (d):  $\varphi=135^\circ$ ; (e):  $\varphi=180^\circ$

Fig. 5 Near-infrared spectral reflectance curves of No. 2 lignite under different azimuth angles ( $\varphi$ )

(a):  $\varphi=0^\circ$ ; (b):  $\varphi=45^\circ$ ; (c):  $\varphi=90^\circ$ ; (d):  $\varphi=135^\circ$ ; (e):  $\varphi=180^\circ$

部热点；贫煤在后向反射方向  $45^\circ$  反射角附近出现局部热点，前向反射方向  $40^\circ$  反射角附近出现局部热点；气煤在前向反射方向  $50^\circ$  反射角附近出现局部热点。如图 9 所示，褐煤二号在 1 400, 1 700 和 1 900 nm 3 个特征波长处表现出相对较明显的后向反射特征，后向反射方向  $45^\circ \sim 60^\circ$  反射角附近出现局部热点，2 200 和 2 300 nm 2 个特征波长处的后向反射特征相对不明显。此外，褐煤二号还在 1 400, 1 700 和 1 900 nm 3 个特征波长处， $90^\circ$  和  $270^\circ$  方位角的  $45^\circ$  反射角方向附近出现局部热点。

根据前述 4 种典型煤样近红外反射光谱曲线随整体反射率升高，光谱吸收谷特征更加明显的规律，优先选择煤特征

波长反射率空间分布极坐标云图局部热点所处的探测方向作为高光谱遥感传感器对矿区煤炭的最佳探测方向。

### 2.3 煤近红外特征波长反射率-反射角相关性

由煤近红外特征波长反射率空间分布特征可知，在  $180^\circ$  探测方位角前向反射方向和  $0^\circ$  探测方位角后向反射方向，随反射角变化煤有较复杂的反射强度分布，然而这两个探测方向同时又是地物反射光谱探测中主要使用的探测方向<sup>[5-7]</sup>。据此，进一步研究 4 种典型煤前、后向反射光谱探测中特征波长处反射率与反射角的关系。在前向反射方向和后向反射方向，对每种煤在 1 400, 1 700, 1 900, 2 200 和 2 300 nm 5 个特征波长处进行反射率与反射角的相关性分析，如图 10、

图 11、图 12、图 13 所示。

从图 10、图 11、图 12、图 13 中 4 种煤特征波长反射率-反射角分布点可知，在前向反射时，4 种煤均呈现随反射角增大，特征波长反射率整体上增大的趋势；在后向反射时，4 种煤均呈现随反射角增大，特征波长反射率整体上先增大后减小的趋势。在前向反射时，如图 10(a)、图 11(a)、图 12(a)、图 13(a)所示，采用线性函数拟合每种煤特征波长反射率与反射角关系；在后向反射时，如图 10(b)、图 11(b)、图

12(b)、图 13(b)所示，采用高斯函数拟合每种煤特征波长反射率与反射角关系。4 种煤前向反射和后向反射所用两种拟合方法的拟合方程决定系数均大于 0.75。

此外，4 种煤后向反射高斯函数拟合曲线波峰所对应反射角与特征波长反射率空间分布云图中后向反射热点所在反射角范围基本一致，并且高斯函数曲线波峰呈现出随煤阶降低向较大角度移动的规律。

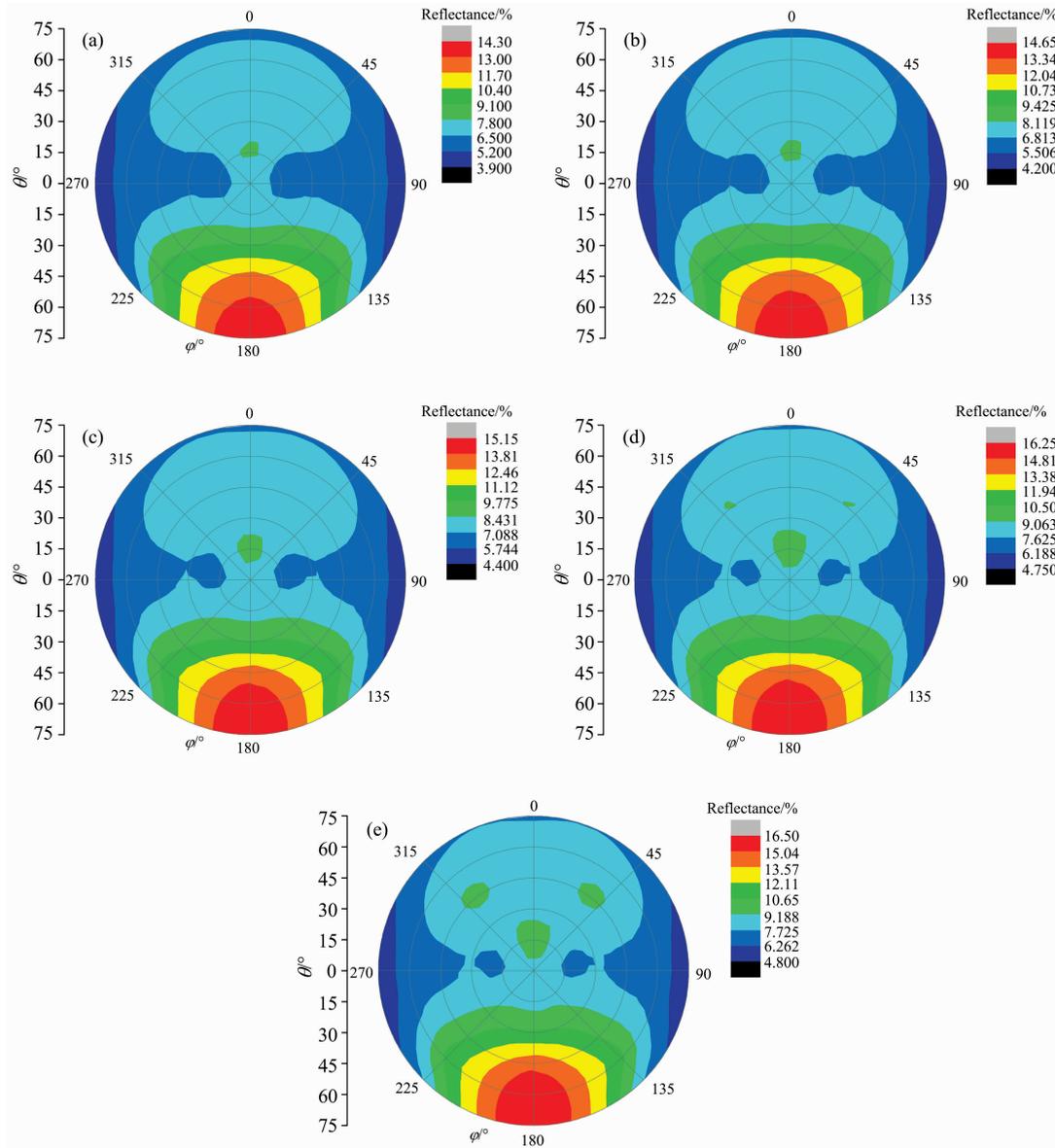


图 6 无烟煤一号特征波长( $\lambda$ )反射率极坐标云图

(a) :  $\lambda=1\ 400\ \text{nm}$ ; (b) :  $\lambda=1\ 700\ \text{nm}$ ; (c) :  $\lambda=1\ 900\ \text{nm}$ ; (d) :  $\lambda=2\ 200\ \text{nm}$ ; (e) :  $\lambda=2\ 300\ \text{nm}$

Fig. 6 Polar nephograms of reflectance at characteristic wavelengths ( $\lambda$ ) of No. 1 anthracite

(a) :  $\lambda=1\ 400\ \text{nm}$ ; (b) :  $\lambda=1\ 700\ \text{nm}$ ; (c) :  $\lambda=1\ 900\ \text{nm}$ ; (d) :  $\lambda=2\ 200\ \text{nm}$ ; (e) :  $\lambda=2\ 300\ \text{nm}$

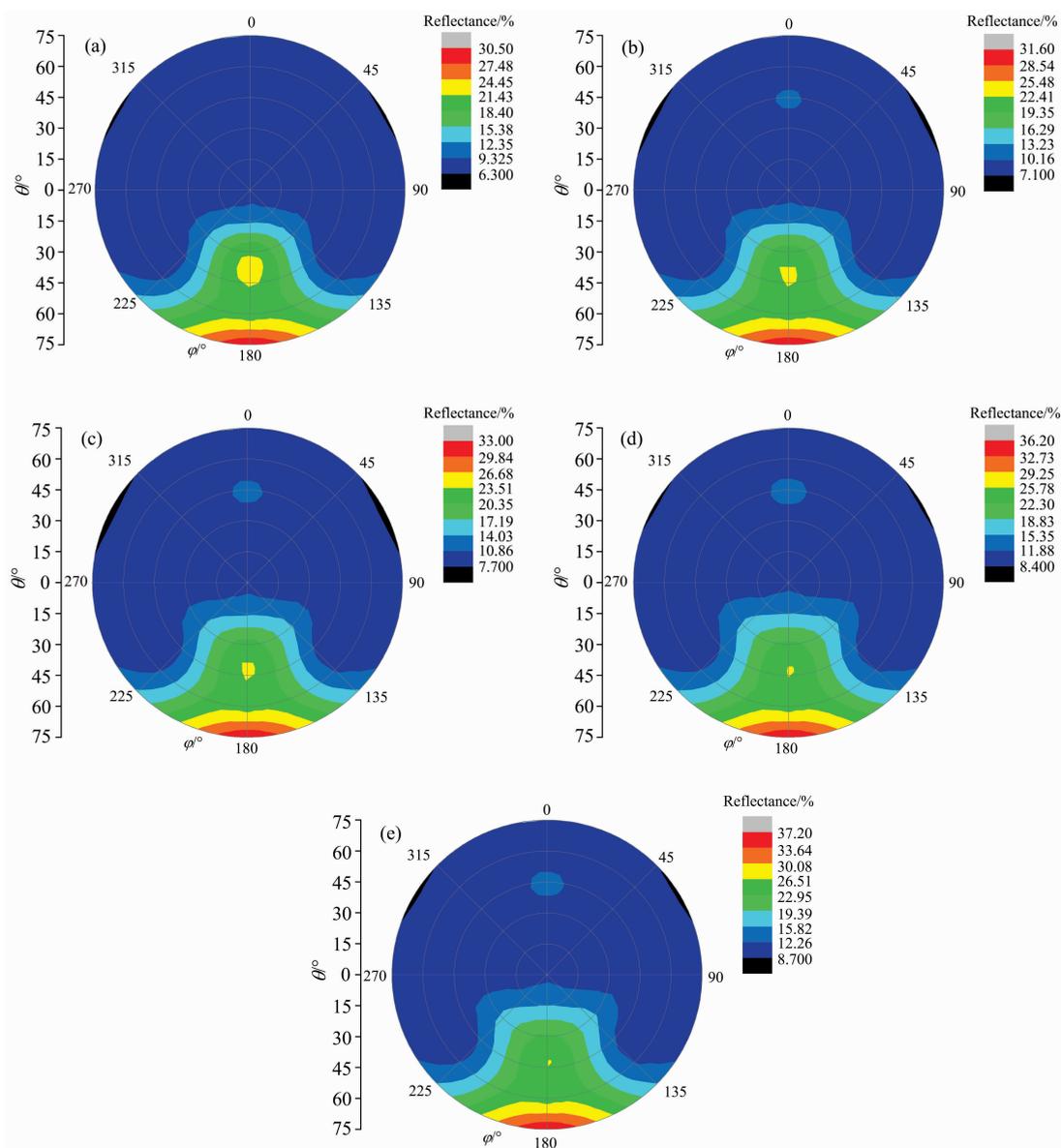
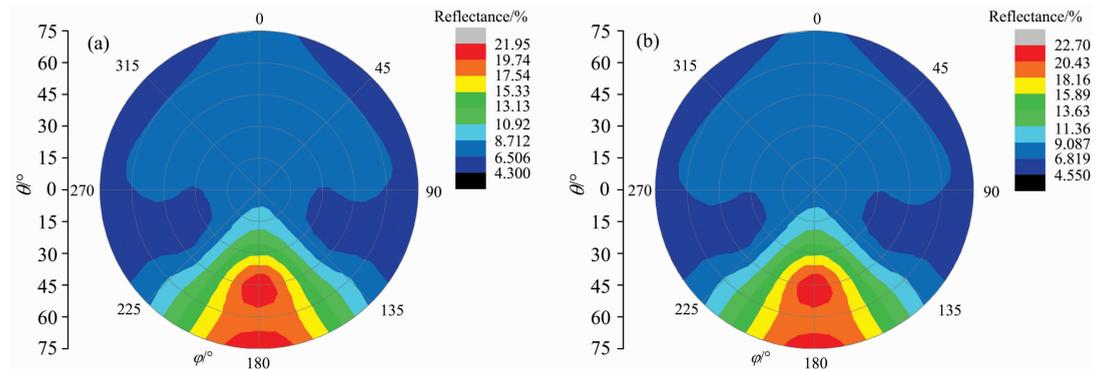


图 7 贫煤特征波长( $\lambda$ )反射率极坐标云图

(a) :  $\lambda=1400$  nm; (b) :  $\lambda=1700$  nm; (c) :  $\lambda=1900$  nm; (d) :  $\lambda=2200$  nm; (e) :  $\lambda=2300$  nm

**Fig. 7** Polar nephograms of reflectance at characteristic wavelengths ( $\lambda$ ) of meager coal

(a) :  $\lambda=1400$  nm; (b) :  $\lambda=1700$  nm; (c) :  $\lambda=1900$  nm; (d) :  $\lambda=2200$  nm; (e) :  $\lambda=2300$  nm



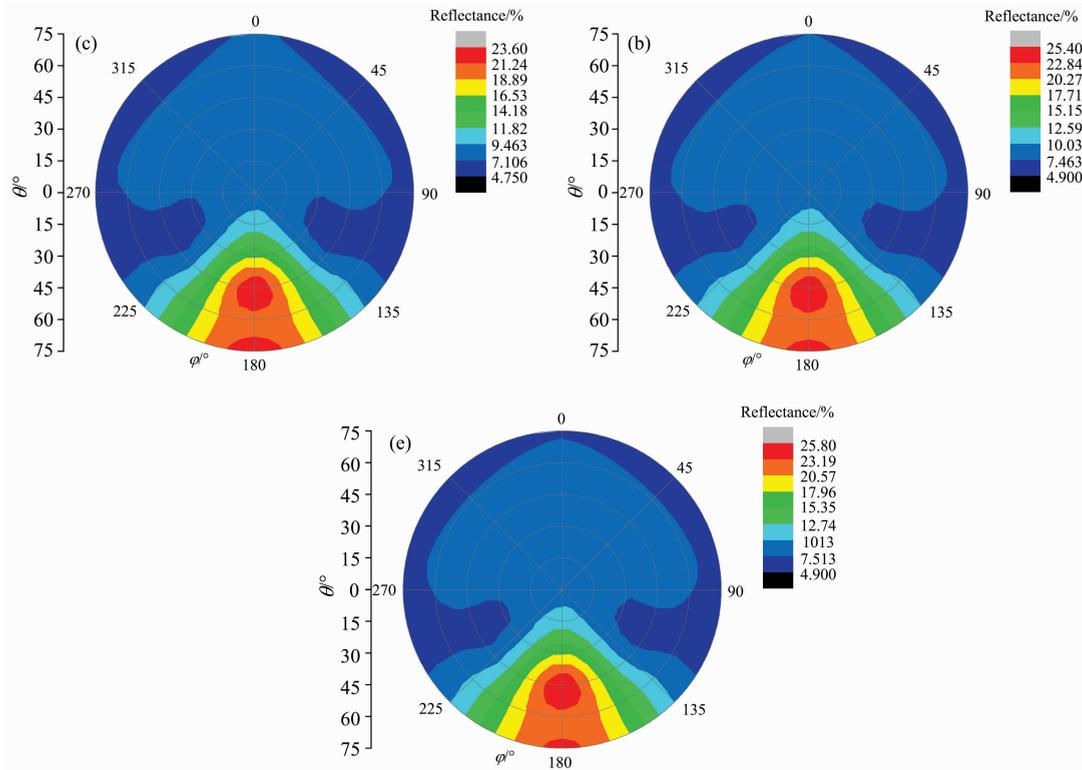
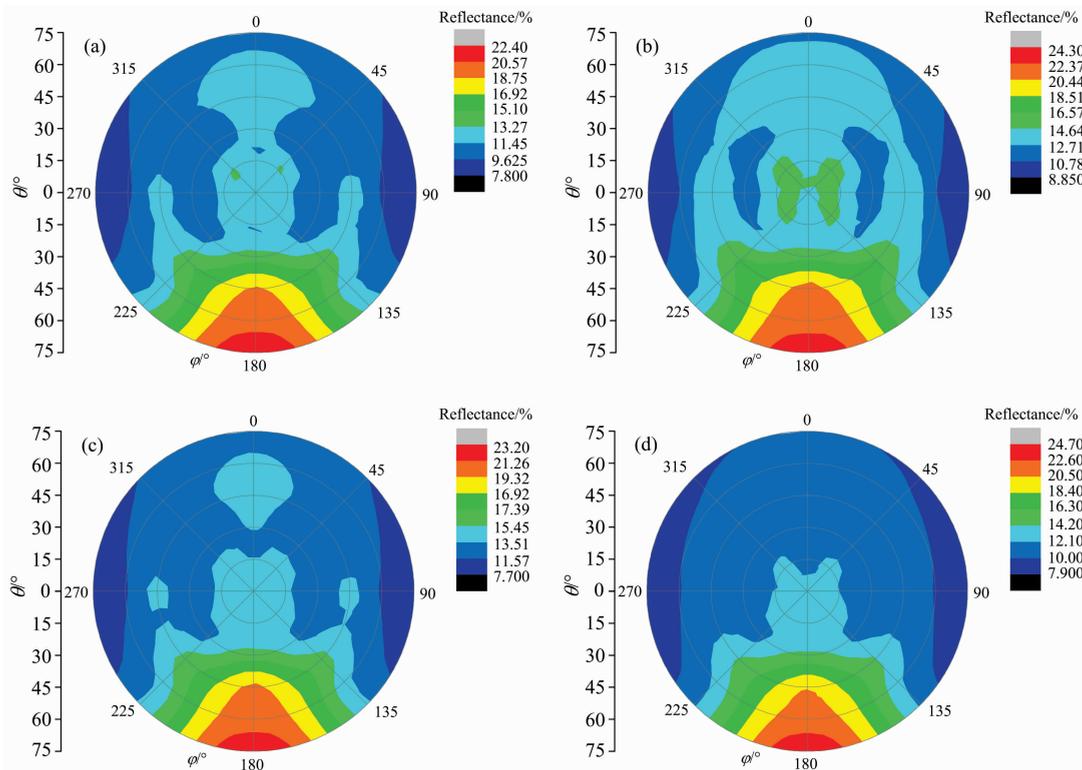


图 8 气煤特征波长( $\lambda$ )反射率极坐标云图

(a):  $\lambda=1\ 400\ \text{nm}$ ; (b):  $\lambda=1\ 700\ \text{nm}$ ; (c):  $\lambda=1\ 900\ \text{nm}$ ; (d):  $\lambda=2\ 200\ \text{nm}$ ; (e):  $\lambda=2\ 300\ \text{nm}$

Fig. 8 Polar nephograms of reflectance at characteristic wavelengths ( $\lambda$ ) of gas coal

(a):  $\lambda=1\ 400\ \text{nm}$ ; (b):  $\lambda=1\ 700\ \text{nm}$ ; (c):  $\lambda=1\ 900\ \text{nm}$ ; (d):  $\lambda=2\ 200\ \text{nm}$ ; (e):  $\lambda=2\ 300\ \text{nm}$



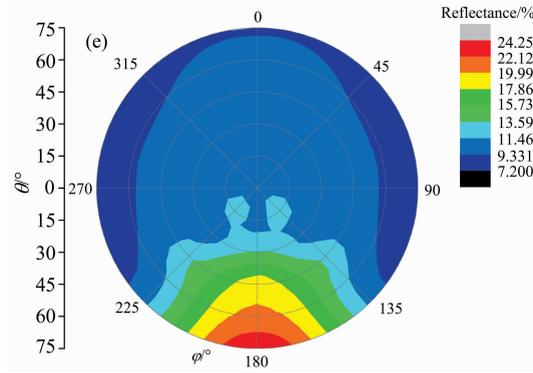


图 9 褐煤二号特征波长(λ)反射率极坐标云图

(a): λ=1 400 nm; (b): λ=1 700 nm; (c): λ=1 900 nm; (d): λ=2 200 nm; (e): λ=2 300 nm

Fig. 9 Polar nephograms of reflectance at characteristic wavelengths (λ) of No. 2 lignite

(a): λ=1 400 nm; (b): λ=1 700 nm; (c): λ=1 900 nm; (d): λ=2 200 nm; (e): λ=2 300 nm

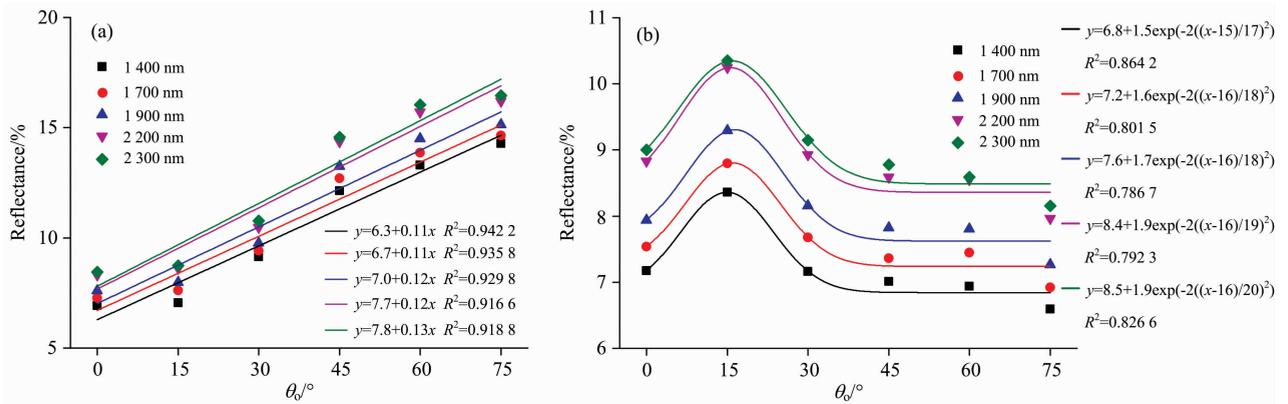


图 10 无烟煤一号特征波长反射率-反射角(θ<sub>r</sub>)回归曲线

(a): 前向反射; (b): 后向反射

Fig. 10 Regression curves of reflectance-reflection angle at characteristic wavelengths of No. 1 anthracite

(a): Forward direction; (b): Backward direction

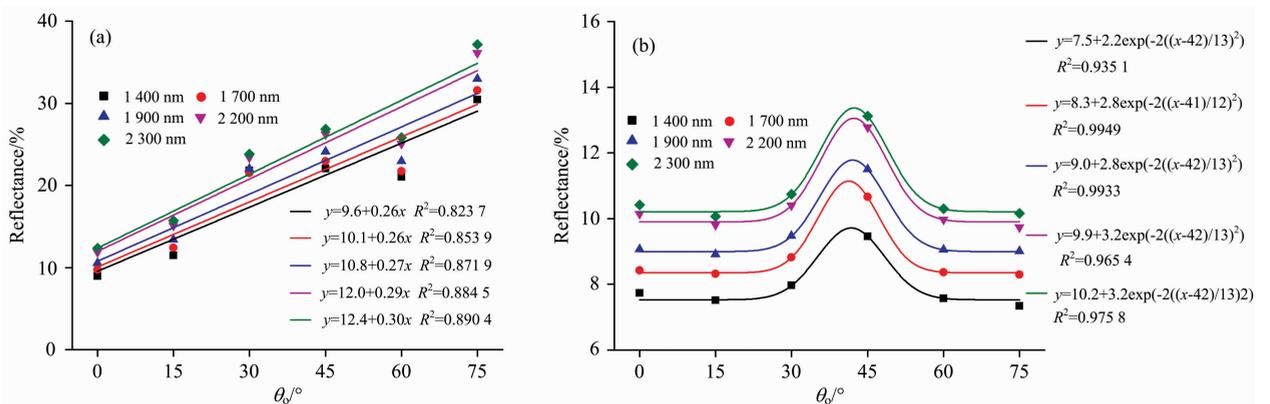


图 11 贫煤特征波长反射率-反射角(θ<sub>r</sub>)回归曲线

(a): 前向反射; (b): 后向反射

Fig. 11 Regression curves of reflectance-reflection angle at characteristic wavelengths of meager coal

(a): Forward direction; (b): Backward direction

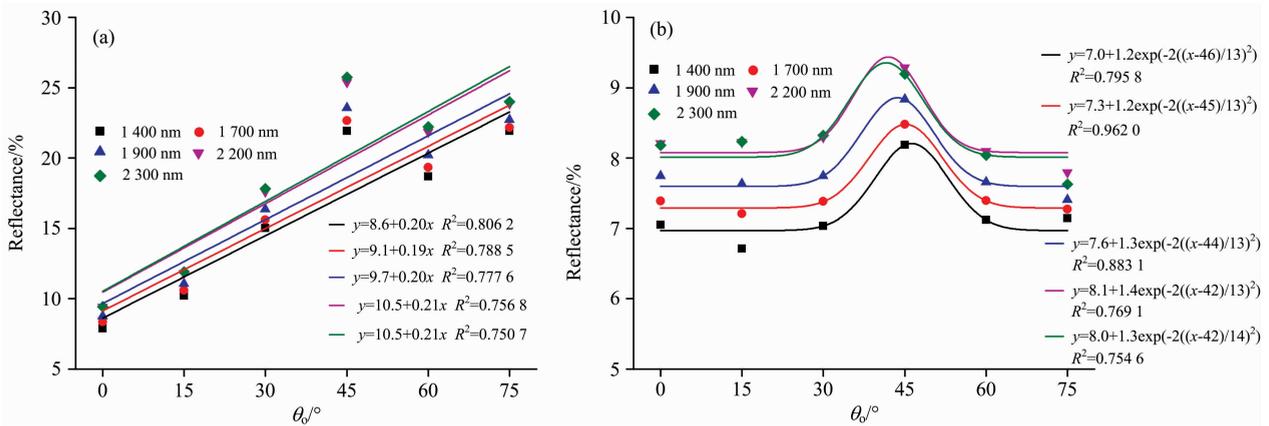


图 12 气煤特征波长反射率-反射角(θ<sub>r</sub>)回归曲线

(a): 前向反射; (b): 后向反射

Fig. 12 Regression curves of reflectance-reflection angle at characteristic wavelengths of gas coal

(a): Forward direction; (b): Backward direction

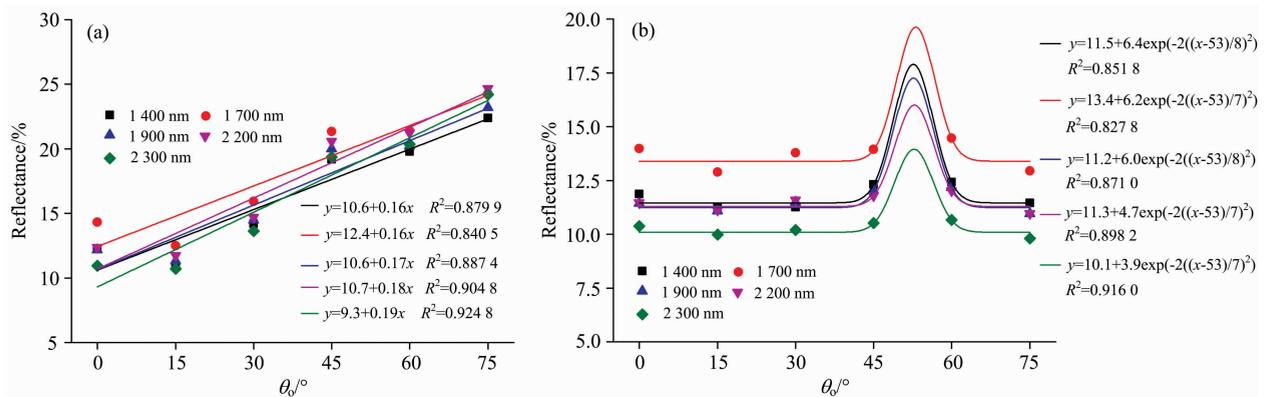


图 13 褐煤二号特征波长反射率-反射角(θ<sub>r</sub>)回归曲线

(a): 前向反射; (b): 后向反射

Fig. 13 Regression curves of reflectance-reflection angle at characteristic wavelengths of No. 2 lignite

(a): Forward direction; (b): Backward direction

### 3 结 论

针对露天煤矿、堆煤场等煤矿区地表的高光谱遥感精准煤炭资源调查、环境监测等问题, 获得了典型煤的近红外方向反射光谱特征, 所得结论如下:

(1) 无烟煤一号、贫煤、气煤、褐煤二号 4 种典型煤, 每种煤各方向近红外波段反射光谱曲线波形相似, 但整体反射率大小和局部波形特征具有差异性, 表现为反射率越大, 吸收谷越明显。随反射角增大, 4 种煤在前向反射方向各波段反射率均增大, 在后向反射方向各波段反射率变化较小。

(2) 在近红外波段 1 400, 1 700, 1 900, 2 200 和 2 300 nm 5 个特征波长处反射率空间分布中, 无烟煤一号、贫煤、气煤、褐煤二号均具有双向反射特征, 在前向反射方向, 均表现出明显的反射热点; 在后向反射方向, 反射热点均较弱, 其中无烟煤一号相对最明显, 贫煤、气煤、褐煤二号按煤阶降低顺序, 逐渐变明显。

(3) 无烟煤一号、贫煤、气煤、褐煤二号在近红外波段 1 400, 1 700, 1 900, 2 200 和 2 300 nm 5 个特征波长处的方向反射率, 前向反射时, 均随反射角增大而增大, 近似为反射角的线性函数; 后向反射时, 均随反射角增大而先增大后减小, 近似为反射角的高斯函数。

### References

[ 1 ] Mao Yachun, Ma Baodong, Liu Shanjun, et al. Canadian Journal of Remote Sensing, 2014, 40(5): 327.  
 [ 2 ] Ba Tuan Le, Xiao Dong, Desmond Okello, et al. Spectroscopy Letters, 2017, 50(8): 440.  
 [ 3 ] Tan Kelong, Qiao Junwei. International Journal of Coal Science and Technology, 2020, 7(2): 311.

- [ 4 ] Milton E J, Schaepman M E, Anderson K, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113: S92.
- [ 5 ] Cloutis E A, Pietrasz V B, Kiddell C, et al. *Icarus*, 2018, 305: 203.
- [ 6 ] ZHAO Zi-jie, ZHAO Yun-sheng(赵子傑, 赵云升). *Acta Physica Sinica(物理学报)*, 2014, 63(18): 435.
- [ 7 ] LU Peng, CHEN Sheng-bo, CUI Teng-fei, et al(路 鹏, 陈圣波, 崔腾飞, 等). *Acta Petrologica Sinica(岩石学报)*, 2016, 32(1): 107.
- [ 8 ] Schopfer J, Dangel S, Kneubühler M, et al. *Sensors*, 2008, 8: 5120.
- [ 9 ] Cloutis E A. *Fuel*, 2003, 82(18): 2239.
- [10] YANG En, WANG Shi-bo, GE Shi-rong(杨 恩, 王世博, 葛世荣). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2019, 39(6): 1717.
- [11] Song Zeyang, Kuenzer C. *International Journal of Coal Geology*, 2017, 171: 142.
- [12] Yang En, Ge Shirong, Wang Shibo. *Journal of Spectroscopy*, 2018, 2018: 1.
- [13] Feng Li, Yuan Chuanzhou, Mao Lianzhen, et al. *Fuel*, 2018, 219: 288.
- [14] LU Yan, YANG Kai, XIU Lian-cun(卢 燕, 杨 凯, 修连存). *Geological Bulletin of China(地质通报)*, 2017, 36(10): 1884.

## Study on Directional Near-Infrared Reflectance Spectra of Typical Types of Coal

YANG En<sup>1</sup>, WANG Shi-bo<sup>2\*</sup>

1. School of Intelligent Manufacturing, Jiangsu Vocational Institute of Architectural Technology, Xuzhou 221116, China

2. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

**Abstract** Hyperspectral remote sensing is an effective method for coal mining area detection, and it is of great significance for coal resource surveys and environmental monitoring in the mining area. At the same time, reflectance spectrum characteristics of remotely measured objects such as coal, gangue, vegetation and water body in all directions are the basis of hyperspectral remote sensing in the coal mine. In this paper, the directional reflectance spectra of typical types of coal were studied. Four typical types of coal in the three major coal types anthracite, bituminous and lignite were collected from different mining areas in China. According to the increasing rank, these coals included No. 1 anthracite, meager coal, gas coal and No. 2 lignite. Spectral reflectance curves of each type of coal in all directions in hemispheric space were measured in the near-infrared band (1 000~2 500 nm) using the spherical coordinate device for directional reflection measurement in the laboratory. By waveforms of spectral reflectance curves acquired, it was found that near-infrared reflectance spectrum curves of the same coal in different reflection directions show similar waveforms. However, there are some differences in overall reflectance and local waveforms, and the rule is that the absorption valleys become more obvious with increasing overall reflectance. With increasing reflection angle, reflectance spectrum curves of all these four types of coal rise on the whole in the forward direction (180° azimuth), but the change is relatively small in the backward direction (0° azimuth). In each directional reflectance spectrum curve in the hemispheric space of each coal, five characteristic wavelength points, including 1 400, 1 700, 1 900, 2 200 and 2 300 nm were selected. By polar nephograms of the spatial distribution of reflectance at the five wavelength points, it was found that all these four types of coal show bidirectional reflection and prominent hot spots in the forward direction and relatively weaker hot spots in the backward direction. The hot spots in the backward direction of No. 1 anthracite appear relatively more obvious than those of meager coal, gas coal and No. 2 lignite. With decreasing coal rank, meager coal, gas coal, and No. 2 lignite show the rule of relatively enhanced hot spots in the backward direction. The correlation between reflectance and reflection angle of backward and forward direction at the five wavelength points of each type of coal were analyzed. It was found that the correlations between reflectance and reflection angle are approximately linear and Gaussian functions in forwarding and backward direction respectively. Moreover, with decreasing coal rank, the peak of the Gaussian fitting curve moves to a larger reflection angle. This study provides the basis for the selection of the optimal detection geometry and reference for precise detection of coal resources in hyperspectral remote sensing of mining areas.

**Keywords** Coal mining area; Hyperspectral remote sensing; Near infrared; Directional reflection; Characteristic wavelength point

\* Corresponding author

(Received Jan. 19, 2021; accepted Mar. 1, 2021)