

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.349>



## “谱遥感”与地球体检计划

李志忠<sup>1</sup>, 汪大明<sup>2</sup>, 王建华<sup>3</sup>, 孙萍萍<sup>1</sup>, 柳波<sup>4</sup>, 陈江<sup>5</sup>, 汤晓君<sup>6</sup>, 帅琴<sup>7</sup>,  
杨日红<sup>8</sup>, 刘拓<sup>1</sup>, 赵英俊<sup>9</sup>, 戴慧敏<sup>5</sup>, 韩海辉<sup>1</sup>, 段星星<sup>1</sup>, 赵君<sup>5</sup>

1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西西安 710054
2. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170
3. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101
4. 东北石油大学地球科学学院, 黑龙江大庆 163318
5. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁沈阳 110000
6. 西安交通大学电气工程学院, 陕西西安 710049
7. 中国地质大学材料与化学学院, 湖北武汉 430074
8. 北京中海云金矿业咨询有限公司, 北京 100101
9. 核工业北京地质研究院, 北京 100029

**摘要:** 人类活动的不断加剧已逐步影响到地球的健康状况, 急需发展有效的地球健康诊断、评估与识别技术。为获悉地球健康状态, 需要对地球进行全面的体检。谱遥感技术因具有动态、快速、大范围应用等特点, 综合了地物波谱、地学图谱、地表时空演化谱信息, 是监测和分析资源、环境乃至生态状况的最佳手段之一, 是地球健康状况检测的核心技术。本文在遥感地物波谱特征的基础上, 结合遥感揭示地学图谱和地表时空演化谱的优势, 提出了谱遥感的定义、谱遥感地球体检应用的内容及其关键技术, 总结了实现健康地球的谱遥感应用需求, 归纳了天、空、地一体化的谱遥感平台构建方法, 并探讨了提高地球体检效果的技术体系, 最后对利用谱遥感技术开展地球体检提出了思路和展望。

**关键词:** 谱遥感; 健康地球; 地球体检; 天空地一体化; 动态监测; 地球物理。

中图分类号: P66

文章编号: 1000-2383(2021)09-3352-13

收稿日期: 2020-11-04

## Application of Spectral Remote Sensing Technology in Inspection of the Earth

Li Zhizhong<sup>1</sup>, Wang Daming<sup>2</sup>, Wang Jianhua<sup>3</sup>, Sun Pingping<sup>1</sup>, Liu Bo<sup>4</sup>, Chen Jiang<sup>5</sup>, Tang Xiaojun<sup>6</sup>, Shuai Qin<sup>7</sup>,  
Yang Rihong<sup>8</sup>, Liu Tuo<sup>1</sup>, Zhao Yingjun<sup>9</sup>, Dai Huimin<sup>5</sup>, Han Haihui<sup>1</sup>, Duan Xingxing<sup>1</sup>, Zhao Jun<sup>5</sup>

1. Xi'an Center, China Geological Survey, Xi'an 710054, China
2. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China
3. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China
4. School of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China
5. Shenyang Center, China Geological Survey, Shenyang 110000, China
6. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China
7. Faculty of Materials Science and Chemistry, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
8. Beijing Zhonghaiyun Gold Mining Consulting Co., Ltd., Beijing 100101, China
9. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(No. 2012AA12A308); 国际地科联地质对比项目(No. IGCP 665); 国家重大科学仪器设备开发专项项目(No. 2012YQ240127); 国家地质调查项目(Nos. DD20189270, DD20211398, DD2020112); 自然科学基金面上基金项目(No. 41402294)。

**作者简介:** 李志忠(1963-), 男, 研究员, 长期从事遥感地质应用研究, ORCID: 0000-0002-8582-4986. E-mail: lizz2009@vip. 163. com

**引用格式:** 李志忠, 汪大明, 王建华, 等, 2021. “谱遥感”与地球体检计划. 地球科学, 46(9):3352-3364.

**Abstract:** The increasing human activities have gradually brought negative effect to the health of the Earth. In order to grasp comprehensively the health status of the Earth, an integrated inspection of the Earth is needed to be performed. Due to its advantages of dynamic monitoring, rapid inspection and wide range of application, spectral remote sensing technology has been one of the best means of monitoring and analyzing the status of resources, environment, and ecology. In this paper, the definition, research contents and key technologies of spectral remote sensing are presented. The application requirements of spectral remote sensing to realize a healthy Earth are summarized. In addition, the construction method of the integrated spectral remote sensing platform from space, air and ground is introduced. The technical system to improve the effect of the Earth physical examination is discussed. Finally, the principles and prospects for carrying out the Earth physical examination using spectral remote sensing technology are proposed.

**Key words:** spectral remote sensing; health of the Earth; inspection of the Earth; ground-air-space integration; dynamic monitoring; geophysics.

## 0 引言

《全球环境展望》系列报告是联合国对于全球环境状况、趋势和前景评估最具权威的报告,其第六版(GEO-6)对全球环境状况开展了全面评估,对未来全球环境健康趋势进行了缜密分析,最后得出地球健康状况已大不如前的结论.世界自然基金会(WWF)从2012年开始每两年发布一次《地球生命力报告》,持续关注“地球生命力”状况.报告显示,人类活动正在不断地给地球累积压力,地球环境恶化,生物多样性丧失,生态系统健康遭到破坏,地球生命力指数持续下降,且下降趋势正在加剧.如果不大力改善环境,到21世纪中叶,亚洲、中东和非洲的城市和地区每年可能有数百万人过早死亡.在全球所有的过早死亡和疾病病例中,约有25%是人为造成的环境破坏和污染导致的(Birkett, 2019).

目前全球突出的环境问题主要有空气污染、水污染、工业污染、土壤侵蚀、土地退化/沙化、湿地草场及天然森林不断减少等(Marco, 2018).面对众多的环境问题,当前的监测分析主要依据点状分布的常规地面监测站,获取的数据无论从时效上还是区域覆盖度上都不能满足环境保护事业的发展需求(Li, 2020).

随着近年来遥感技术快速发展,前人围绕环境监测与保护开展了诸多探索(季惠颖和赵碧云, 2008;李志忠等, 2009;何诚等, 2012;陆冬华等, 2017;冯雨林等, 2018;杨佳佳等, 2019).美国地质调查局(United States Geological Survey, 简称USGS)发现在煤矿废料处理

过程中,黄铁矿氧化后会在表面产生酸性水,其随排放逐渐被中和,从而使来自煤矿矸石山不同类型的含铁矿物沉淀的位置呈现近似于同心圆分布.由此可根据含铁次生矿物的波谱特征差异,利用USGS波谱库对酸性矿物废料制图,提供地球化学的指示信息.钟燕(2016)利用HSI高光谱遥感数据提取了采样点的土壤光谱信息,通过光谱处理探讨了耕地土壤镉、铅含量与光谱变量的相关性及其特征波段,有效建立了耕地土壤镉、铅含量遥感反演模型.遥感技术应用于环境监测,既可宏观观测空气、土壤、植被和水质动态状况,也可准确、实时、快速跟踪和监测突发环境污染、地质灾害等事件的发生与发展,为及时制定处理措施、减少污染及灾害造成的损失、制定环境保护和减灾决策提供科学依据(Corradini *et al.*, 2003; Bruzzone *et al.*, 2003; Chikhaoui *et al.*, 2005; Duro *et al.*, 2007).近年来,我国海洋卫星在国内及周边海域的突发性溢油污损事件以及水体富营养化导致的赤潮灾害监测中均发挥了重要作用(赵冬至, 1999).

联合国报告警告称,地球环境已遭到严重破坏,人类健康正受到越来越大的威胁,人们急需对地球进行一次总体环境的评估.侯增谦(2020)通过分析美国、德国、英国等科技发达国家的地球系统科学战略及1980年以来实施的多项全球大科学研究计划,指出人类活动与自然环境的交互作用已逐渐成为地球表层系统演化的主要驱动力,通过建立强大的调查与评价、探测与观测、模拟与预测全流程技术体系,开展圈层相互作用研究,可以更好

地理解宜居地球的时空演变.王焰新(2020)引入“同一健康”概念,探讨了医学地质研究需要为预防、监测和控制全球性传染病提供地学理论、数据和方法支撑,进而研究在人类活动影响下地球物质循环、生态系统韧性变化与疾病出现和传播的成因联系.

针对全球尺度问题,利用天、空、地一体化的遥感综合观测技术是最佳体检手段(王晋年等,2012).这是由于遥感技术具有快速、准确和直观等优势,可在全球范围内开展多圈层、多尺度、多角度、多探测介质的一体化监测与评估,以地球表面要素波谱特征为基础,可以揭示地学图谱和地表时空演化谱,对地球健康状况进行全面体检,对地球现状进行系统科学的认识、分析与评价.近年来,中国航天事业获得快速发展,遥感卫星的数量和种类已满足全球监测的需要,辅之以北斗导航系统的精准定位,无论在数据还是技术方面都可支撑地球体检计划的尝试与探索,且随着技术体系的成熟,有望直接推进遥感地球体检工作的规模化应用.

## 1 谱遥感的定义及特征

### 1.1 谱遥感定义

地物的反射、辐射光谱特征是遥感的物理基础,也是识别地表物质物性并进行空间结构分析的主要依据(Hunt, 1977; Clark *et al.*, 2003).新一代的传感器将成像与光谱相结合,开创了成像光谱学的新纪元(Goetz *et al.*, 1985; Rencz, 1999).谱遥感在定义上与成像光谱学、

高光谱成像和超光谱成像有相似之处,是指将物体反射或辐射的电磁波信息分成若干波段段进行接收,并按照地物谱系记录的遥感技术,综合记录了地物波谱、地学图谱和时空演化谱,其中多光谱和高光谱遥感为主的全波段遥感是谱遥感技术的基础核心(图1).

### 1.2 谱遥感的特征

谱遥感技术自20世纪80年代以来发展迅速,能够获取观测目标成百上千连续波段的光谱图像;通过分析光谱特征曲线,可精细识别目标类别、特征属性乃至物质成分,对于地球体检具有巨大的应用价值(童庆禧,2008).其中高光谱数据集通常由带宽相对较窄(5~10 nm)的约100至200个光谱带组成,而多光谱数据集通常由带宽相对较大(70~400 nm)的约5至10个波段组成(图2).

“谱遥感”定义相比常规高光谱、多光谱等光学遥感中“谱”的界定,既突出了遥感图像直接记录的地物波谱特征(覆盖光学到微波波段),又强调遥感影像图、谱合一揭示的地表演化谱(地学图谱和时间序列遥感数据);通过波谱维、空谱维和时谱维的综合,能够更好地挖掘地表定性和定量的时空信息,结合知识图谱以更好地服务于地球资源环境监测与健康诊断.

谱遥感作为整合遥感数据处理、地面测量、光谱模型应用的强有力系统工具,其显著特点是在特定光谱区域以高光谱分辨率同时获取连续的地物光谱影像,其超多波段信息使得根据混合光谱模型进行混合像元分解,获取

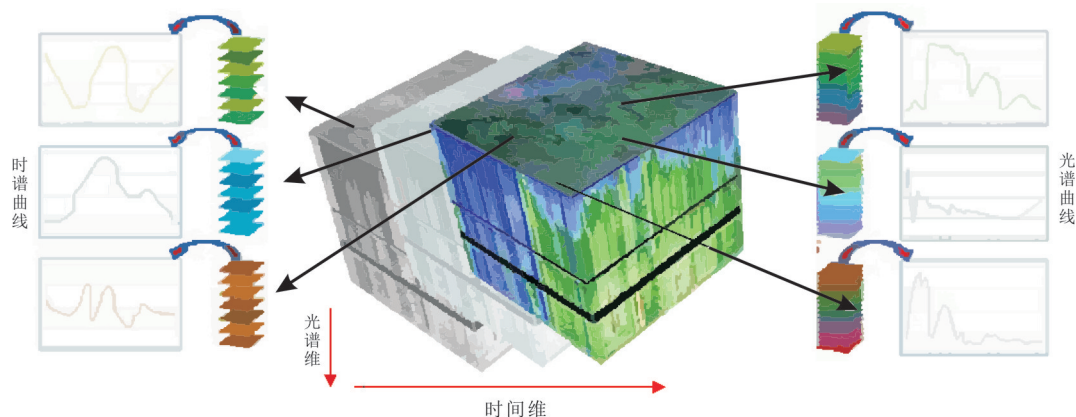


图1 谱遥感地物识别基础

Fig.1 Schematic for the recognition of ground objects based on spectral remote sensing



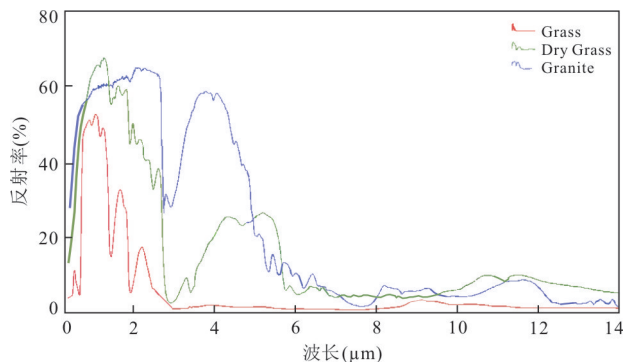


图2 典型地物光谱曲线

Fig.2 Spectral curves for typical ground objects

“子像元”或“最终光谱单元”信息的能力得到提高,使得遥感应既能从光谱维上进行空间信息展开,又可以从地学图谱、时空演化谱的角度进行遥感信息解译、认知和挖掘,从而定量分析地球表层生物、物理、化学过程和参数。谱遥感分析需要研究者具备系统的专业知识来识别光谱特征,并进行分类和特征提取,进而分析空间结构、时空过程,这些知识包括最大噪声分离变换、最小距离法、光谱特征拟合、光谱角度填图法、混合像元分解等(浦瑞良和宫鹏, 2000);还需考虑对材料的实际检测效果,这取决于光谱仪的光谱范围、光谱分辨率和信噪比,材料的丰度以及在所测量的波长区域中该材料的吸收特征强度等各种因素(王晋年等, 1999);同时也需要考虑与地球健康相关的地学图谱、时空演化和知识图谱。

## 2 谱遥感地球体检的主要内容

谱遥感地球体检包括两个主要方面的内容,一是明确谱遥感地球体检的要素或项目,要根据地球组成、地球关键带以及谱遥感能获取到的地球健康信息明确谱遥感地球体检项目;二是确定谱遥感地球体检各项目的参考值,即健康地球的光谱谱系。

### 2.1 谱遥感地球体检项目

以地球圈层结构为依据,地球由大气圈、水圈、生物圈等外部圈层以及地壳、地幔和地核等内部圈层组成,这些组成部分也是地球体检需要关注的内容和检查项目。

谱遥感地球体检需要以地球关键带理论为指导,地球关键带是陆地生态系统中土壤圈

及其与大气圈、生物圈、水圈和岩石圈物质迁移和能量交换的交汇区域,也是维系地球生态系统功能和人类生存的关键区,被认为是21世纪基础科学研究的重点区域,在地球系统科学研究中扮演着重要的角色。因此,土壤、大气、生物、水体及岩石将是地球体检的重点,可根据谱遥感所能达到的范围及获取到的信息种类,构建具体的谱遥感地球体检项目。

利用谱遥感获取数据具有覆盖广、速度快、光谱连续且蕴藏信息丰富的优势,可以开展与陆地表层相关的土地覆盖调查、土地利用精细识别、农田作物品种分类与病虫害监测、林地草地健康诊断;与水体相关的河道水体富营养化监测、湖泊水质污染等研究;与生物相关的矿山生态恢复、森林采伐监测、草地退化监测;与大气相关的大城市温室气体排放和PM2.5监测;以及地球表面人类活动影响下的城市土地利用变化检测、集镇聚落信息提取、城市夜光分布与人为热排放等各种“体检”项目。

### 2.2 健康的地球要素谱系

地物之间存在明显的反射波谱差异,因此,了解地物在多种条件下的光谱特征,并构建标准谱库是谱遥感技术识别地物的基本原理,是地球健康检查的基础(张东辉等, 2018a)。同类地物的反射光谱大同小异,但也随着该地物的内在差异而有所不同。这种不同是由于多种因素造成的,如物质成分、内部结构、表面光滑程度、颗粒大小、几何形状、风化程度、表面含水量以及色泽等(曹春香等, 2017)。

岩石反射的光谱特征与岩石本身的矿物成分和颜色密切相关(秦凯等, 2015;车永飞等, 2017;张翠芬等, 2020)。以石英等浅色矿物为主的岩石具有较高的光谱反射率,在可见光遥感影像上表现为浅色调;以铁镁质等深色矿物为主的岩石总体反射率较低,在影像上表现为深色调。此外,岩石光谱反射率还受组成岩石的矿物颗粒大小和表面粗糙度的影响。颗粒较细、表面较平滑的矿物反射率较高,反之则反射率较低。岩石的反射率同时也受湿度、风化程度等的影响。自然状态下土壤表面的反射率没有明显的峰值和谷值。土壤的反射光谱特征主要受到土壤中的原生矿物和次生矿物、土壤水分含量、土壤有机质、铁含量、土壤质地等

因素的影响(张东辉等, 2018b)。

植被对电磁波的响应是由其化学特征和形态学特征决定, 这种特征与植被的发育、健康状况以及生长条件密切相关(吴长山等, 2000; 林辉, 2011; 吴见和彭道黎, 2011)。健康的绿色植被, 其光谱反射曲线几乎总是呈现“峰和谷”的图形, 可见光谱内的谷是由植物叶子内的色素引起的, 叶绿素强烈吸收波段中心约  $0.45\ \mu\text{m}$  (蓝区) 和  $0.67\ \mu\text{m}$  (红区) 的能量, 因此肉眼觉得健康的植被呈绿色(疏小舟等, 2000)。在可见光波段与近红外波段之间, 即大约  $0.76\ \mu\text{m}$  附近, 反射率急剧上升, 形成“红边”现象, 这是植物曲线最为明显的特征, 是研究植物健康与否的重点光谱区。许多植物在可见光波段差异小, 但近红外波段的反射率差异明显。当植物受某种形式的抑制而中断生长发育时, 会减少甚至停止叶绿素的产生, 从而导致叶绿素的蓝区和红区吸收带减弱, 红波段反射率增强、近红外波段反射率下降, 发生红边蓝移、植物变黄等现象(绿色和红色合成)。

水体的光谱反射特性来自水体表面的反射、水体底部物质的反射和水中悬浮物质的反射 3 方面的贡献(李素菊和王学军, 2002)。光谱吸收和透射特性不仅与水体本身的性质有关, 还明显地受到水中各类物质, 如有机物和无机物的影响。在光谱的可见光波段内, 水中的能量-物质相互作用较为复杂。地表较纯净的自然水体对  $0.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$  波段的电磁波吸收明显高于其他地物。在光谱的近红外和中红外波段, 水几乎吸收了其全部的能量, 纯净自然水体在近红外波段更近似于一个“黑体”。因此, 在  $1.1\sim 2.5\ \mu\text{m}$  波段, 纯净自然水体的反射率很低, 几乎趋近于零。污染水体的光谱则由于其含有的生物、污染物等种类与含量的不同而呈现出不同的特征, 例如含沙水的反射光谱一般明显高于纯净水, 且随着悬浮物浓度增加, 差别增大。

为了能更好地重建健康地物光谱, 提高健康地物光谱重建精度并对其真实性进行评价, 需要建设具有国际先进水平、长期稳定可靠、开放的国家级光谱遥感几何和辐射定标及综合试验场。通过真实性检验场网等基础设施, 采集全球典型地区及典型地物的特征光谱作为“真值”, 并建立相应的特征光谱库

和样本库, 形成健康地球的光谱图库。

### 3 面向地球体检的谱遥感平台构建

谱遥感地球体检是综合运用卫星遥感监测、航空遥感监测和地面站点监测等手段, 基于数据挖掘、数据融合、数据协同、数据同化等关键技术, 形成一整套天、空、地一体化的光谱探测装备和数据处理系统, 实现对中国乃至全球重点区域的监测。

#### 3.1 谱遥感成像光谱仪

成像光谱仪以多路、连续的方式获取图像信息, 且具有高光谱分辨率的特点, 是地球健康谱遥感检测的关键设备之一。通过将传统的空间成像技术与地物光谱技术有机结合, 可以实现对同一地区同时获取几十个到几百个波段的地物反射光谱图像。谱遥感成像光谱仪按平台可以分为地面成像光谱仪、航空成像光谱仪与卫星成像光谱仪。

美国自 20 世纪 80 年代初研制成功第一台成像光谱仪后, 又陆续推出 SIS、AIS、GER、AVIRIS 等型号。我国先后研制成功了多光谱扫描仪、红外细分光谱扫描仪(FIMS)、热红外多光谱扫描仪(TIMSS)、19 波段多光谱扫描仪(AMSS)以及 71 波段多光谱机载成像光谱仪(MAIS)等(郑兰芬和王晋年, 1992)。国际上常用的航空成像光谱仪还有澳大利亚的 HyMAP、加拿大的 CASI、SA-SI、MASI、TASI 等。我国研制的地面成像光谱仪 FISS 可以获得毫米级像元尺度的连续光谱曲线, 实现高空间高光谱分辨率数据的同步获取。作为国际上陆续发射的多颗高光谱卫星之一, 我国于 2018 年 5 月成功发射的 GF-5 卫星, 搭载了第一台宽幅高光谱仪, 具有宽幅、宽谱、高灵敏度、高稳定性和高精度的特点, 是遥感仪器实用化的重要标志(表 1)。目前成像光谱仪的数据主要应用于油气信息探测和矿物制图等, 数据的分析技术也取得了长足的进步(李志忠等, 2015)。

#### 3.2 遥感平台网及地面监测眼

要实现对地球健康长期稳定、全面可靠、精准实时的有效监测, 需要联合国内外相关优势技术力量, 构建地球健康光谱监测网络, 尤以航天遥感为主, 结合航空和地面遥感手段, 形成长期稳定运行的天、空、地监测体系(表 2, 表 3)。航

表1 国际上部分已发射与即将发射的高光谱卫星及其载荷指标

Table 1 Load indexes for the international hyperspectral satellite to be launched and launched

载荷/卫星	国别/地区	发射年份	谱段范围 (nm)	谱段数	光谱分辨率 (nm)	空间分辨 率(m)	成像幅宽 (km)
AHSI/GF5	中国	2018	400~2 500	330	VNIR:5 SWIR:10	30	60
ZH1-OHS	中国	2018	400~1 000	256个谱段中任选32	2.5	10	150
AHSI/ZY1-02D	中国	2019	400~2 500	166	VNIR:10 SWIR:20	30	60
PRISMA	意大利	2019	400~2 500	238	<12	5/30	30
EnMAP	德国	待发射	420~2 450	>240	6.5~10.0	30	30
GISAT	印度	待发射	900~2 500	150	<10	500	/
ALOS-3	日本	待发射	450~2 500	189	10.0~12.5	5/30	90
MTG-S1	欧盟	待发射	300~775	590	0.5/0.12	/	8
HyspIRI	美国	待发射	400~2 500 400~12 000	220 8	10	60	150
SHALOM	美国	待发射	400~2 500	275	10	10	30
AHSI/GF5-02	中国	待发射	400~2 500	330	VNIR:5 SWIR:10	30	60
AHSI/ZY1-02E	中国	待发射	400~2 500	166	VNIR:10 SWIR:20	30	60

表2 典型机载成像仪的技术参数

Table 2 Parameters of typical airborne imaging instruments

传感器	产地	启用年份	谱段范围 (nm)	光谱分辨率 (nm)	空间分辨率 (m)	通道数	幅宽 (m)
AIS-1	美国	1983	1.2~2.4	9.3	3.8	128	125
AIS-2	美国	1986	0.8~2.4	10.6	4.1	128	260
CASI/SASI	加拿大	1988	0.38~2.45	VNIR:5 SWIR:6.25	1	133	150
AVIRIS	美国	1989	0.4~2.5	10	20	224	11 000
TRWIS-3	美国	1990	0.4~2.5	VNIR:5 SWIR:6.25	1.8	384	460
ROSIS	德国	1991	0.43~0.85	4	2.5	256	1 000
IMS	法国	1991	0.115~3.000	VNIR:12.5 SWIR:25.0	-	64	-
OMIS	中国	1991	0.46~12.50	VNIR:10 SWIR:40	6	128	3 000
ASAS	美国	1992	0.40~1.06	11.5	-	62	-
PHI	中国	1996	0.40~0.85	5	2	244	1 000
HYMAP	澳大利亚	1997	0.45~2.50	VNIR:15 SWIR:15	4.5	128	3 460
GER DAIS	美国	1998	0.4~2.5	12	10	211	4 000
WPHI	中国	2000	0.4~2.5	VNIR:5 SWIR:6.25	4	-	4 000
SIVNIR/SWIR	挪威	2003	0.4~2.5	5	1	160	400
AHI	美国	2004	7.0~11.5	18	-	256	-

表 3 常用地面光谱传感器参数

Table 3 Parameters of main ground spectral sensors

传感器	国别	波长范围(nm)	波段数	光谱分辨率(nm)
ASD FieldSpec 3	美国	350~1 050,1 000~2 500	2 150	1.4,2
ASD pro FR	美国	350~1 050,1 000~2 500	2 150	1.4,2
FTIR	德国	2500~25 000	9 000	2.5
Headwall HS-VNIR	美国	400~1 000	753	0.8
Perkin Elmer Lambda 900	美国	320~2 480	1 081	2
VIS-NIR	美国	920~1 718	128	6.3
Spectralevolution Unispec-SC	英国	310~1 130	82	10
MATRIX-1	德国	781~2 779	800	2.5
SVC-GER 1500	美国	300~1 100	250	3.2
Cary 5000	美国	350~2 500	2 150	1
Fiber Optic Center FTS 175	美国	500~2 500	400	5
Nicolet 380	美国	500~2 500	400	5
SVC HR-768	美国	350~2 500	1 024	variable

空机载成像光谱仪在国内外已得到广泛应用,但为进一步实现大面积光谱信息获取及实用,需逐渐由航空遥感向卫星遥感转变.目前,5 m 光学业务卫星等搭载相同体制谱遥感载荷的卫星已逐渐形成业务化观测能力.据不完全统计,未来几年搭载宽幅高光谱载荷的卫星将达到 5 颗,通过卫星组网观测等手段,将进一步发挥卫星系统覆盖范围大,可多层次、全谱段获得目标多源信息的特点,向用户提供具有精确时间和空间参考的多要素融合处理的高可信度信息.

航天、航空高光谱遥感,具有大面积同步观测,时效性强,获取信息受条件限制少等优点(叶发旺等, 2011),但数据获取成本较高、数据精细程度不足是其不可忽视的缺点.轻小型无人机具有遥感起飞环境要求低、实时性好、低空成像、可获取高分辨率高光谱数据等优点,是航天、有人机、地面高光谱遥感的有效补充.遥控传感器、水下自主车辆(autonomous underwater vehicle,简称 AUV)、水下滑翔机等自动化和自主设备也将发挥重要作用.

## 4 遥感进行地球体检的关键技术

### 4.1 面向地球健康状况的特征光谱重建与评价

利用高光谱遥感数据,进行地物特征光谱重建与评价,将传感器记录的灰度值(DN 值)转化

为地物的本征光谱.除了需要进行常规的波段匹配与校正、数据修复、几何与辐射校正、噪声去除、传感器定标等处理外,还需要进行图像光谱真实性评价,即利用健康地球的光谱图库对处理后形成的图像光谱进行比对,评价其失真度并进行修正或异常识别.

### 4.2 地球生态健康信息提取与分析

土壤和生态环境对全球环境具有重大影响,利用构建的地球健康指标光谱分析系统,结合地球健康检查指标体系,可对全球典型地区的土壤养分、物化特性、生产力质量和水环境、大气环境、矿山环境等进行分析与评价(图 3).

联合地球表层系统科学、公共卫生、生态环境等领域的权威专家,建立地球健康检查指标体系,结合对光谱影像的高效处理和人工智能解译结果对每项指标进行专家评分,并根据每项指标的权重形成对地球健康的总体评价,从而形成地球体检报告.

### 4.3 地球健康光谱监测网络建设

为了有力支持地球体检工作,基于我国真实性检验场网和生态考察站网,如农/牧/林/草业科技站网、国家或行业野外监测站网、水文/验潮站等,结合全球相关站点,共同构建地球健康光谱监测网络,搭建物联网平台,采用北斗、移动通讯、ZigBee 无线组网技术进行通讯和数据传输,形成协同观测、技术交流、资料交换、数据



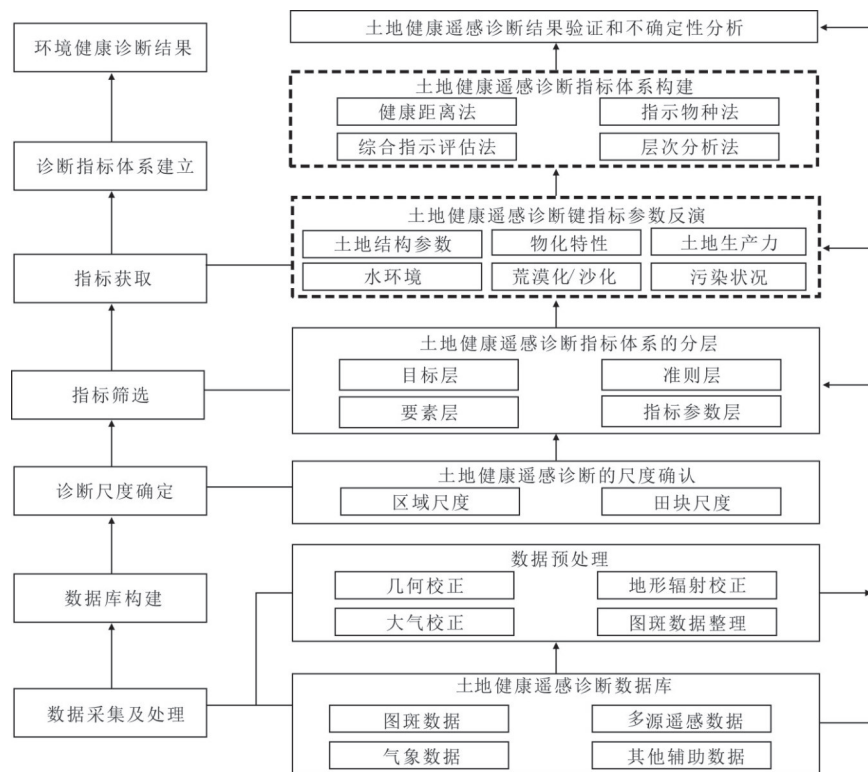


图 3 土地健康遥感诊断指标体系构建技术路线

Fig.3 Technology roadmap for the establishment of healthy land indexes based on spectral sensing  
据曹春香等修改(2017)

共享、设施联网、开发利用等合作机制，推进我国高光谱遥感卫星研制、发射，并与其他国家和地区的高光谱遥感卫星协同运行，积极推动便携式高光谱遥感终端发展，形成消费电子级、轻小型、高性价比的手持高光谱仪，尤其是智能手机的高光谱仪器化，并通过云服务和计算资源保障等，实现对地球健康实时监测。

#### 4.4 地球健康体检指导生态修复示范

未来将选择陕南秦岭地区和黄河“几字弯”的陕西、甘肃、宁夏、内蒙、山西段为示范区，开展“谱遥感地球体检计划”，示范区以大秦岭地区为主向东西辐射，与“美丽中国中脊带”中段重叠，面积近 60 万平方千米。在示范区范围内重点围绕土壤、水系、植被和山体关键带的综合监测需求，充分利用航天、航空、地面高光谱遥感及地球化学调查等技术，以“水资源 + 生态环境”为核心，开展面向地球健康状况的高光谱数据重建与评价，完成地球健康评价指标体系构建、基于光谱的地球健康评价指标信息提取及分析、地球健康光谱监测网络建设工作。在此基础上，结合黄河水土流失动态

监测成果及黄土高原局部地区治理经验，遵循山水林田湖草生命共同体理念，做到“地上与地下”统筹考虑，数量、质量、生态“三位一体”，以地球系统科学为指导，应用生态地质剖面调查、多目标地球化学分析测试、地质大数据分析等新技术新方法，开展地球关键带岩石圈、土壤圈、水圈、大气圈和生物圈等多圈层交互作用调查与研究。

## 5 应用谱遥感进行地球体检的展望

谱遥感技术用于地球体检的发展前景广阔，在学科交叉融合、智能化、与大数据结合等多个方面都具有广泛的发展前景。

### 5.1 谱遥感技术与多学科融合进行地球体检

长期以来，以高光谱为代表的定量遥感应用一直面临将地质学、遥感学、生态学、土壤学、气象学等学科与技术研究有效融合的困境。传统意义上的跨学科研究，并不能从根本上实现这种融合。实际工作中研究经费的各自获取，学术视野、专业知识、研究范式等的差



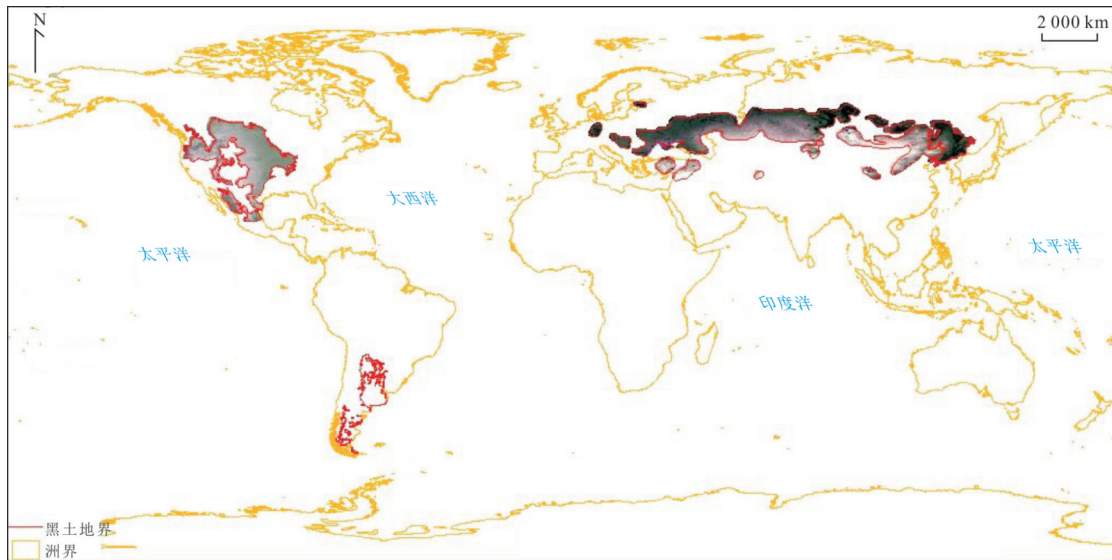


图 4 北纬 46 度带黑土区遥感影像

Fig.4 Remote sensing image for the black soil area at the zone of 46 degree north latitude

异,使得不同学科之间缺乏有效的学科标准与统一话语体系.未来谱遥感技术地球体检,不仅要充分利用天、空、地一体化技术,分层次部署开展长时间序列、大面积动态监测,以及重点区生物、岩石、森林、土壤和水资源等专项模型构建与监测,还需把不同学科背景的学者组织起来形成团队,围绕同一科学目标,在工作层面实现真正的协同和融合.多学科融合的显著成效已在很多领域有所体现,例如,日本、智利、美国等国因地震而死亡人数的大幅度减少,与地质学家、建筑师、社会科学家和政府官员的密切合作分不开,这种合作不但改进了地震风险评估图的质量,还改进了预估强震、提高了建筑抗震性能和与此有关的建筑标准.

## 5.2 谱遥感技术的智能化方向

20 世纪的遥感应应用比较侧重于自然、无机环境等资源环境的静态观察与识别;而 21 世纪的卫星遥感应应用必将更多地关注人类活动及其与生态环境的相互作用,并做动态监测与评估.在调查方法上,也将从单项的侦察、识别,逐步走向量化的综合集成.由单纯的遥感仪器观测逐步走向多种数据源的融合.谱遥感技术的大范围应用迫切需要智能化手段提供高效的数据分析工具与精准的评估模型,对不同谱遥感数据进行自动化处理,以实现地物波谱、地学图谱和时空演化谱的智能综合和自动分析,并提出智能化的解决方案.智能化处理可减轻谱遥感海量数据

的处理需求,能大大提高地球体检工作的效率.

## 5.3 与时空大数据结合,实现谱遥感技术的网络化

大数据作为当今世界新兴的数据处理和存储技术,改变了全球、国家和地方各级环境评估的格局.传统的处理技术无法实现大数据量、实时、多样性和全量数据的准确、完善处理.急需采用全新的算法来获取准确的信息,并得出基于完整数据证据链的结论.如果大规模的环境评估数据能够得到有效的查询和利用,那么在促进环境知识更新等方面将有着巨大的潜力(Birkett, 2019).从复杂的数据集中创建数据分析模型,并通过使用算法、建模、查找相关性,如化学污染和航空照片中的位置、谱遥感的表现形式等,得出基于数据化证据的结论并获得支撑决策的有用信息.

## 5.4 国际网络与大科学平台

开展谱遥感地球体检技术,可满足生态保护和高质量发展的需求,有效支撑人类健康发展计划,对践行《积极牵头组织国际大科学计划和大科学工程方案》、增强科技创新实力具有积极深远的意义.通过示范区的前期基础工作,可发起全球性健康地球重大国际计划,争取国际科技合作专项、国家重点研发计划、国家自然科学基金等方面的支持.

2018 年开展的国际合作全球黑土地资源调查系列成果表明,全球黑土地集中分布于南北半球的温带地区(图 4),其中,欧亚大陆黑土区

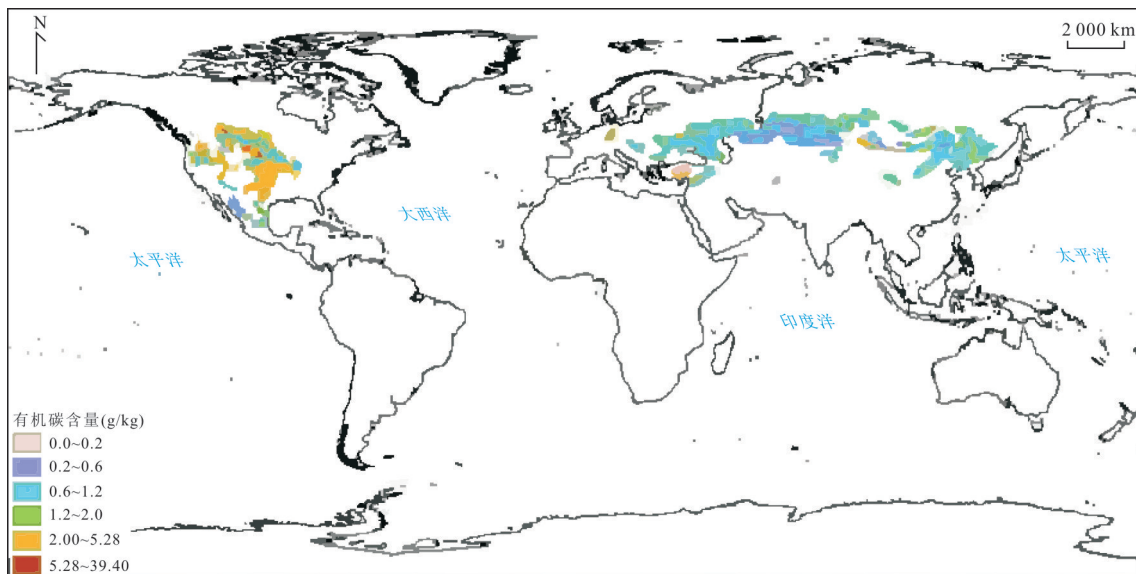


图 5 北纬 46 度带黑土区有机碳分布

Fig.5 Distribution for the organic carbon of the black soil at the zone of 46 degree north latitude

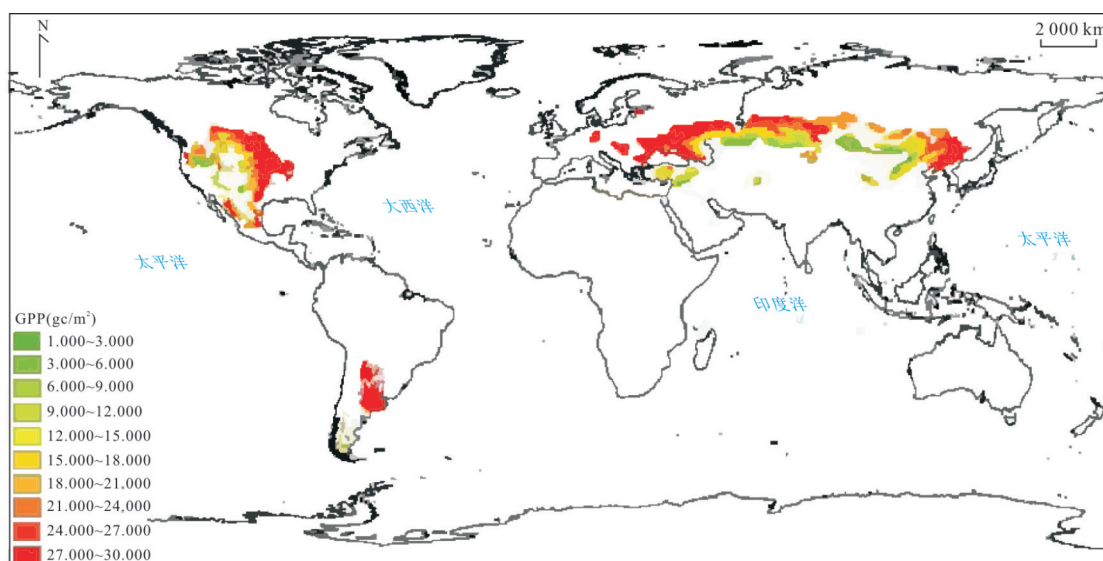


图 6 北纬 46 度带黑土区总初级生产力分布

Fig.6 Distribution for the gross primary productivity (GPP) of the black soil area at the zone of 46 degree north latitude

始于欧洲中南部的亚湿润草原,向东断续延伸到俄罗斯和中国东北地区,面积约 4.5 亿公顷。全球黑土区有机碳含量及总初级生产力(GPP)空间差异较为明显,中国东北黑土区有机碳高值呈条带状由北向南展布,GPP 值相对较高;北美黑土区 GPP 东西差异十分明显(图 5)。将相关成果与区域气候、经济、人文等因素相结合,将为不同部门及科研人员了解全球黑土地资源演化及合理制定政策提供重要参考(图 6)。

## 6 结论

由于人类活动和自然演变,地球宜居性处在动态变化之中,所以必须对地球宜居状况进行科学检测,即地球体检,以便及时发现地球病灶,确定地球健康状态,探寻地球宜居带,实现宜居地球的目标。本文开展了面向地球体检的谱遥感相关技术探讨,得出如下主要结论:

(1) 谱遥感是指将物体反射或辐射的电磁波信息分成若干波谱段进行接收,并按照地物谱系记录的遥感技术,是地物波谱、地学图谱和

时空演化谱的综合.多光谱、高光谱和雷达遥感为主的全谱段遥感是其基础和核心,时空谱信息挖掘与地球健康知识图谱构建则是其关键.

(2) 谱遥感地球体检的主要内容包括地表生态参数反演、资源探测、水质检测、大气污染检测、生态环境分析、植被监测等多个方面.其关键是基于健康地物光谱,进行地物信息的提取分析、异常检测和健康评估,并逐步建设光谱监测网络,开展地球体检的监测示范.

(3) 谱遥感地球健康体检是落实国家生态文明建设和绿色发展的重要支撑技术,是天空地一体化探测地球观测与健康评估的关键技术环节.

(4) 谱遥感技术用于地球体检的发展前景广阔,多学科融合、智能化、与大数据的结合以及共建大科学平台是未来推广和应用该体系的有效保障.

致谢:论文酝酿构思和组织编写过程中,得到张国伟院士、童庆禧院士、彭苏萍院士、郭华东院士、成秋明院士、王焰新院士、王瑞江教授、柴育成教授等专家学者指导帮助,在此表示真诚感谢!

## References

- Birkett, S., 2019. Sixth Global Environment Outlook GEO-6. United Nations Environment Programme, Cambridge.
- Bruzzone, L., Casadio, S., Cossu, R., et al., 2003. A System for Monitoring NO<sub>2</sub> Emissions from Biomass Burning by Using GOME and ATSR-2 Data. *International Journal of Remote Sensing*, 24(8): 1709–1721. <https://doi.org/10.1080/01431160210144714>
- Cao, C. X., Chen, W., Huang, X. Y., et al., 2017. Index System for Diagnosis of Environmental Health by Remote Sensing. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Che, Y.F., Zhao, Y.J., Ye, F.W., 2017. Extraction and Analysis of Hyperspectral Remote Sensing Alteration Mineral Based on Spectral Characteristic Parameters. *Geological Review*, 63(S1): 197–198 (in Chinese with English abstract).
- Chikhaoui, M., Bonn, F., Bokoye, A. I., et al., 2005. A Spectral Index for Land Degradation Mapping Using ASTER Data: Application to a Semi-Arid Mediterranean Catchment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 7(2): 140–153. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2005.01.002>
- Clark, R. N., Swayze, G. A., Livo, K. E., et al., 2003. Imaging Spectroscopy: Earth and Planetary Remote Sensing with the USGS Tetracorder and Expert Systems. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 108(E12): 5131. <https://doi.org/10.1029/2002je001847>
- Corradini, S., Pugnaghi, S., Teggi, S., et al., 2003. Will ASTER See the Etna SO<sub>2</sub> Plume?. *International Journal of Remote Sensing*, 24(6): 1207–1218. <https://doi.org/10.1080/01431160210153084>
- Duro, D. C., Coops, N. C., Wulder, M. A., et al., 2007. Development of a Large Area Biodiversity Monitoring System Driven by Remote Sensing. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 31(3): 235–260. <https://doi.org/10.1177/0309133307079054>
- Feng, Y. L., Yang, J. J., Wang, X. G., 2018. Research Progress of Quantitative Evaluation on Water and Soil Loss by Remote Sensing Based on Gis. *Geology and Resources*, 27(3): 279–283 (in Chinese with English abstract).
- Goetz, A. F. H., Vane, G., Solomon, J. E., et al., 1985. Imaging Spectrometry for Earth Remote Sensing. *Science*, 228(4704): 1147–1153. <https://doi.org/10.1126/science.228.4704.1147>
- He, C., Feng, Z. K., Yuan, J. J., et al., 2012. Advances in the Research on Hyperspectral Remote Sensing in Biodiversity and Conservation. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 32(6): 1628–1632 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Q., 2020. Promote Basic Research with Strategic Thinking. China Natural Resources News, Beijing (in Chinese).
- Hunt, G. R., 1977. Spectral Signatures of Particulate Minerals in the Visible and near Infrared. *Geophysics*, 42(3): 501–513. <https://doi.org/10.1190/1.1440721>
- Ji, H. Y., Zhao, B. Y., 2008. Summarization of Remote Sensing Technology on Environmental Monitoring. *Environmental Science Survey*, 27(2): 21–24 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. J., Wang, X. J., 2002. The Spectral Features Analysis and Quantitative Remote Sensing Advances of Inland Water Quality Parameters. *Geography and Territorial Research*, 18(2): 26–30 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. Z., 2020. Selenium-Enriched Soil Mapping Using Airborne SASI Images. *Geoderma*, 363: 114133. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114133>
- Li, Z. Z., Wang, D. M., Liu, D. C., et al., 2015. Hyperspectral Remote Sensing Technology and Its Progress in Resources Exploration. *Earth Science*, 40(8): 1287–1294 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. Z., Yang, R. H., Dang, F. X., et al., 2009. The Hyperspectral Remote Sensing Technology and Its Application. *Geological Bulletin of China*, 28(Z1): 270–277 (in



- Chinese with English abstract).
- Lin, H., 2011. Research on Forest Tree Species with the Hyperspectral Remote Sensing Technology. China Forestry Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Lu, D. H., Zhao, Y. J., Zhang, D. H., et al., 2017. Analysis of the Role of Multi-Source Remote Sensing Data in Geological Environment Stability Assessment. *Geological Review*, 63(S1): 399—400 (in Chinese with English abstract).
- Marco, L., 2018. Living Planet Report. World Wildlife Fund, Washington, D.C..
- Pu, R. L., Gong, P., 2000. Hyperspectral Remote Sensing and Its Application. Higher Education Press, Beijing (in Chinese).
- Qin, K., Chen, J. P., Zhao, Y. J., et al., 2015. Study on Lithological Identification Method Based on Airborne Hyper-Spectral Data. *Mineral Exploration*, 6(5): 594—600 (in Chinese with English abstract).
- Rencz, A. N., 1999. Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing (3rd Edition). John Wiley and Sons, Toronto.
- Shu, X. Z., Yin, Q., Kuang, D. B., 2000. Relationship between Algal Chlorophyll Concentration and Spectral Reflectance of Inland Water. *Journal of Remote Sensing*, 4(1): 41—45 (in Chinese with English abstract).
- Tong, Q. X., 2008. Development of Hyperspectral Remote Sensing in China. China Survey and Mapping News, Beijing (in Chinese)
- Wang, J. N., Li, Z. Z., Zhang, L. F., et al., 2012. “Spectral Crust” Project: Research on New Mineral Exploration Technology. *Journal of Geo-Information Science*, 14(3): 344—351 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. N., Zhang, B., Liu, J. G., et al., 1999. Hyperspectral Data Mining: Toward Target Recognition and Classification. *Journal of Image and Graphics*, 4(11): 957—964 (in Chinese with English abstract)
- Wang, Y. X., 2020. Innovative Development of Medical Geology: A One Health Perspective. *Earth Science*, 45(4): 1093—1102 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. S., Xiang, Y. Q., Zheng, L. F., et al., 2000. Estimating Chlorophyll Density of Crop Canopies by Using Hyperspectral Data. *Journal of Remote Sensing*, 4(3): 228—232 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J., Peng, D. L., 2011. Advances in Researches on Hyperspectral Remote Sensing Forestry Information-Extracting Technology. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 31(9): 2305—2312 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. J., Bai, L., Wu, S., 2019. Study on the Erosion in Typical Black Soil Areas of Heilongjiang Province by Remote Sensing Monitoring Technology. *Geology and Resources*, 28(2): 193—199 (in Chinese with English abstract).
- Ye, F. W., Liu, D. C., Zhao, Y. J., 2011. Airborne Hyperspectral Survey System CASI/SASI and Its Preliminary Application in Uranium Exploration. *World Nuclear Geoscience*, 28(4): 231—236 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C. F., Hao, L. N., Wang, S. J., et al., 2020. Geological Units Classification with Texture-Spectral Synergy of Multi-Sourced Remote Sensing Images. *Earth Science*, 45(5): 1844—1854 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D. H., Zhao, Y. J., Qin, K., 2018a. Design and Construction of the Typical Ground Target Spectral Information System. *Remote Sensing for Land & Resources*, 30(4): 206—211 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D. H., Zhao, Y. J., Qin, K., et al., 2018b. A Review of Hyperspectral Multivariate Information Extraction Models for Soils. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, (2): 22—28 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, D. Z., 1999. Research on Monitoring System of Marine Environmental Pollution Based on Satellite Remote Sensing Technique. *Remote Sensing Information*, 14(2): 22—25 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, L. F., Wang, J. N., 1992. A Study on Imaging Spectrometry and Its Extraction of Image Spectral Information. *Remote Sensing of Environmental China*, 7(1):49—58 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, Y., 2016. Remote Sensing Estimation of Heavy Metal Cd and Pb in Cultivated Soil Based on HSI Hyperspectral Data (Dissertation). Sichuan Agriculture University, Ya’an (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 曹春香, 陈伟, 黄晓勇, 等, 2017. 环境健康遥感诊断指标体系. 北京: 科学出版社.
- 车永飞, 赵英俊, 叶发旺, 2017. 基于光谱特征参量的高光谱遥感蚀变矿物提取与分析. 地质论评, 63(S1): 197—198.
- 冯雨林, 杨佳佳, 王晓光, 2018. 基于GIS技术的水土流失遥感定量评价研究进展. 地质与资源, 27(3): 279—283.
- 何诚, 冯仲科, 袁进军, 等, 2012. 高光谱遥感技术在生物多样性保护中的应用研究进展. 光谱学与光谱分析, 32(6): 1628—1632.
- 侯增谦, 2020. 用战略思维推动基础研究. 北京: 中国自然资源报.
- 季惠颖, 赵碧云, 2008. 遥感技术在环境监测中的应用综述. 环境科学导刊, 27(2): 21—24
- 李素菊, 王学军, 2002. 内陆水体水质参数光谱特征与定量



- 遥感. 地理学与国土研究, 18(2): 26—30.
- 李志忠, 汪大明, 刘德长, 等, 2015. 高光谱遥感技术及资源勘查应用进展. 地球科学, 40(8): 1287—1294.
- 李志忠, 杨日红, 党福星, 等, 2009. 高光谱遥感卫星技术及其地质应用. 地质通报, 28(Z1): 270—277.
- 林辉, 2011. 森林树种高光谱遥感研究. 北京: 中国林业出版社.
- 陆冬华, 赵英俊, 张东辉, 等, 2017. 多元遥感数据在地质环境稳定性评价的作用分析. 地质论评, 63(S1): 399—400.
- 浦瑞良, 宫鹏, 2000. 高光谱遥感及其应用. 北京: 高等教育出版社.
- 秦凯, 陈建平, 赵英俊, 等, 2015. 基于航空高光谱遥感岩性识别技术研究. 矿产勘查, 6(5): 594—600.
- 疏小舟, 尹球, 匡定波, 2000. 内陆水体藻类叶绿素浓度与反射光谱特征的关系. 遥感学报, 4(1): 41—45.
- 童庆禧, 2008. 我国高光谱遥感的发展. 北京: 中国测绘报.
- 王晋年, 李志忠, 张立福, 等, 2012. “光谱地壳”计划: 探索新一代矿产勘查技术. 地球信息科学学报, 14(3): 344—351.
- 王晋年, 张兵, 刘建贵, 等, 1999. 以地物识别和分类为目标的高光谱数据挖掘. 中国图象图形学报, 4(11): 957—964.
- 王焰新, 2020. “同一健康”视角下医学地质学的创新发展. 地球科学, 45(4): 1093—1102.
- 吴长山, 项月琴, 郑兰芬, 等, 2000. 利用高光谱数据对作物群体叶绿素密度估算的研究. 遥感学报, 4(3): 228—232.
- 吴见, 彭道黎, 2011. 高光谱遥感林业信息提取技术研究进展. 光谱学与光谱分析, 31(9): 2305—2312.
- 杨佳佳, 白磊, 吴嵩, 2019. 黑龙江典型黑土区土壤侵蚀遥感监测技术研究. 地质与资源, 28(2): 193—199.
- 叶发旺, 刘德长, 赵英俊, 2011. CASI/SASI航空高光谱遥感测量系统及其在铀矿勘查中的初步应用. 世界核地质科学, 28(4): 231—236.
- 张翠芬, 郝利娜, 王少军, 等, 2020. 多源遥感数据图谱协同岩石单元分类方法. 地球科学, 45(5): 1844—1854.
- 张东辉, 赵英俊, 秦凯, 2018a. 典型目标地面光谱信息系统设计与实现. 国土资源遥感, 30(4): 206—211.
- 张东辉, 赵英俊, 秦凯, 等, 2018b. 高光谱土壤多元信息提取模型综述. 中国土壤与肥料, (2): 22—28.
- 赵冬至, 1999. 海洋环境污染与灾害卫星遥感业务化监测系统研究. 遥感信息, 14(2): 22—25.
- 郑兰芬, 王晋年, 1992. 成像光谱遥感技术及其图像光谱信息提取的分析研究. 环境遥感, 7(1): 49—58.
- 钟燕, 2016. 基于HSI高光谱数据的耕地土壤重金属镉、铅含量遥感反演(硕士学位论文). 雅安: 四川农业大学.