

doi: 10.6046/gtzyyg.2014.03.03

引用格式: 陈书琳, 毕银丽. 遥感技术在微生物复垦中的应用研究[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(3): 16-23. (Chen S L, Bi Y L. Application of remote sensing technology to microbial reclamation[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2014, 26(3): 16-23.)

遥感技术在微生物复垦中的应用研究

陈书琳, 毕银丽

(中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘要: 微生物复垦是矿区生态重建的有效途径。遥感技术特别是高光谱遥感技术可以快速准确地获取微生物复垦后植被的生长状态和土壤性状改良的实时信息, 为评估微生物复垦技术对矿区土地恢复和生态重建的作用提供了技术支撑。概述了遥感技术在矿区植被恢复、矿渣石排土场复垦、采矿沉陷地复垦和复垦区重金属污染监测等方面的应用和研究现状, 以及微生物技术在改良煤矸石环境、治理采矿沉陷地和修复重金属污染场地中的作用和研究现状, 分析了遥感技术应用于监测微生物复垦效果的理论依据, 并讨论了今后遥感技术在微生物复垦中的应用潜力, 以期在未来快速、准确、无损地监测微生物复垦植被的生长状况提供新方法, 并为评价微生物技术在矿区生态重建中的作用提供参考。

关键词: 土地复垦; 遥感监测; 高光谱遥感; 生态修复

中图分类号: TP 79; S 154; O 657.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-070X(2014)03-0016-08

0 引言

采矿活动在为国民经济创造效益的同时, 也给生态环境、经济及社会发展带来了不少负面影响。为了实现矿区的可持续发展, 矿区土地复垦和植被恢复已成为重建矿区生态环境的必要手段。微生物复垦技术是利用微生物的接种优势, 对复垦区土壤进行综合治理与改良的一项生物技术措施, 能够促进养分贫瘠、土壤结构性差以及微生物含量低的矿区土壤基质的改善, 加速矿区土壤复垦和植被生长。评价微生物复垦效果的传统方法是通过生化实验获取植物的各项生物化学和生物物理指标来实现的, 不仅费时、费力、精度不高, 而且会对被测样本植物造成一定程度的损害。如何低耗、高效、实时、无损地获取矿区微生物复垦植被的长势和土壤理化性状信息已成为指导矿区微生物复垦工作、评价微生物复垦技术在矿区生态环境恢复中的作用所面临的一个重要问题。

遥感技术为宏观、有效地监测矿区环境恢复提供了可能。将不同时相的遥感影像进行对比, 可以从空间和时间上分析矿区植被覆盖^[1]、矿渣石排土

场^[2]、采矿塌陷地^[3]以及矿区水污染^[4]等的动态变化特征, 在大尺度上了解矿区生态环境的状态和变化过程。分析植被^[5]和土壤^[6]的光谱效应是高光谱数据在矿区复垦成效评价方面的主要应用, 而对于遥感技术监测微生物复垦效果的研究还鲜有报道。目前, 随着高光谱遥感技术的快速发展及其数据处理与分析方法的不断成熟^[7], 与传统的实验室化学分析技术相比, 基于高光谱遥感数据的植被生化组分和土壤理化性状分析将具有更大的优势。因此, 可利用遥感技术对矿区微生物复垦进行全面监测, 通过高光谱数据快速提取矿区植被和土壤信息, 为评价微生物复垦植被生长状况以及矿区土地复垦效果提供科学依据和高效准确的新方法。

1 遥感技术在矿区土地复垦中的应用

遥感技术是 20 世纪中叶兴起并迅速发展起来的一门综合性探测技术, 它能迅速、动态地获取大量环境信息, 具有信息丰富、周期短、实时性和动态性强等特点。充分应用遥感技术在土地覆盖类型、土壤理化特性以及土地利用变化等方面提供的信息, 可以对矿区开发现状、土地利用、土壤资源、植被覆

收稿日期: 2013-09-01; 修订日期: 2013-11-01

基金项目: “十二五”科技支撑计划——晋陕蒙接壤区煤炭基地生态建设关键技术与示范项目(编号: 2012BAC10B03)和教育部博士点基金项目(编号: 20090023110009)共同资助。

盖、矿山环境等进行动态监测调查与评估,并对土地恢复治理效果进行评价。

高光谱遥感技术具有波段多、光谱分辨率高、数据量大^[7]等特点,能够提供植被、土壤的各项理化信息,从而在监测矿区环境和指导矿区生态恢复方面具有巨大的应用价值和广阔的应用前景。

1.1 对矿区植被恢复的监测

矿区植被及其恢复状况是矿区土地复垦质量的重要的指示器,表征土地复垦的程度与质量。植被覆盖度是一种用来描述植被生长状况的生态参数^[8]。归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)是最广泛使用的一种植被指数,是植被生长状态及空间分布密度的最佳指示因子,与植被分布密度呈线性相关。与传统地面样方实测方法相比,遥感数据凭借其宏观、快速、廉价以及良好的时空连续性等特点,在植被生长状况和时空变异研究方面具有明显的优势^[1]。苏伟等^[1]基于1975—2000年共4期遥感影像,构建植被覆盖度指数,考察了辽宁省阜新市海州露天煤矿排土场25a来植被生长状况及时空变化特征,结果表明,研究区植被处于不断生长、逐渐恢复的状态,且存在明显的空间差异。胡振琪^[9]等利用榆林市神府矿区4景同期TM数据,使用ERDAS软件提取NDVI,根据像元二分法计算出矿区的植被覆盖度,并利用非监督分类方法对矿区的植被覆盖度进行分类和赋色,从而得出矿区1986—2006年的植被覆盖度分类图,定量地说明了矿区20a年间的植被覆盖变化情况。Arzu^[10]利用1987—2006年间的TM数据识别和监测土耳其露天煤矿的土地复垦进展状况,计算了包括NDVI在内的多种植被指数,以监测和跟踪植被覆盖度的变化,评价复垦植被健康程度,最后得出“遥感技术无疑为大面积的矿区土地复垦提供了实时、快速、成本低廉而高效的监测方法”的结论。李娜^[5]等采用高光谱遥感数据计算植被指数,进而反演叶绿素含量和物种数量,对云南个旧锡矿尾矿的生态恢复效果进行了评价。

1.2 对矿渣石排土场复垦的监测

前人的研究多以矿区多时相、多源遥感影像为数据源,通过人机交互解译、监督分类等方法,提取土地覆盖信息,获得不同时期研究区的土地利用类型图;在地理信息系统(GIS)的支持下,将不同时期土地利用类型图进行叠加;针对不同的研究对象建立专题数学模型,揭示研究区矿渣石排土场和其他土地利用类型的时空格局和动态变化情况。许多研

究表明,利用多时相遥感数据对采矿区矿渣石山生态环境变化进行动态监测具有较好的效果,其结果对矿山生态环境治理和保护具有指导意义。叶宝莹^[11]等对安太堡煤矿30a间共10期遥感数据进行处理分析,提取了该矿区近30a的土地利用变化情况,尤其是煤矸石排土场复垦的动态变化情况,并进行了验证,进而肯定了遥感手段可以有效监测到矿区的土地复垦情况,准确地获取矿区排土场占用和破坏土地的数据,尤其是对复垦排土场的实时监测,可以获取每年复垦排土场的准确位置和面积,为矿山复垦与环境规划提供指导依据。孟丹^[2]等利用美国GeoEye-1卫星数据,采用人机交互解译方式对富家坞铜矿区固体废弃物分布进行了快速调查,将固体废弃物分布与小流域划分结果进行空间叠加分析后认为,废弃物及裸露采场在地表水溶蚀下将对德兴市及其下游洳水的主要生活用水的水质产生严重影响。荆青青^[12]等以荆门市马河镇煤矸石分布调查为例,利用ASTER多光谱遥感数据波段多、信息量大的特点,先采用主成分分析法将其14个波段进行去相关降维,再运用马氏距离法对图像进行监督分类,研究表明,中等分辨率的ASTER数据是煤矸石提取的理想数据源之一,能成功实现煤矸石分布范围信息的自动提取,为矿区环境治理提供指导。

另外,韩云霞^[13]等尝试高光谱数据与多光谱遥感影像相结合的监测方式,对煤矿排土场的土壤进行定量分析,为植被恢复提供决策依据。他们将排土场土壤的全氮、pH值、有机质和电导率等参数与土壤反射光谱进行相关性分析,并在此基础上利用SPOT5相应波段影像灰度值建立了pH值、有机质及全氮等土壤参数的预测方程,获得了较高的精度。

1.3 对采矿沉陷地复垦的监测

采矿活动引发的地面沉陷在地表上表现为凹陷盆地形态,多为低缓开阔的勺形洼地,其四周略高,中间稍低,边缘与非沉陷区逐渐过渡,其间一般没有明显的界线^[14]。部分地段因采区相连,若干个沉陷坑连为一体,形成大的沉陷区^[14]。对于地下水水位较浅的地区,在凹陷盆地内大多会出现大面积的积水,使沉陷区成为湖泊、湿地。对于采矿沉陷地的动态扩展研究,可以通过对多源、多时相航空遥感数据的叠加分析进行。通过对研究区遥感影像处理、判读,根据沉陷地及其积水区的形态特征,初步圈定沉陷地范围及面积、积水区范围及面积等,再对研究区进行走访调研,结合野外踏勘进行验证,最终圈定出

准确的沉陷地范围。许多学者^[3,14-15]使用多时相、多源遥感数据,通过计算机数字图像处理、遥感资料综合处理以及室内解译与野外验证相结合的方式,准确地获取了采矿沉陷地、积水区范围及面积等信息,可以较直观、准确地确定采矿沉陷区的范围、面积、形态及动态变化等特征,进而为采矿沉陷的预防和治理提供可靠依据。有学者^[16]根据地表温度分布的异常会在热红外遥感图像上出现热或冷的响应原理,利用 ETM⁺ 热红外波段数据,借助遥感分析软件,对遥感图像进行主成分分析、拉伸增强及密度分割等,从而将采煤沉陷区地下水信息从影像中提取出来,为地下水储存空间变化规律的研究提供依据。

由此可见,利用遥感技术可及时、快速、准确地掌握采矿沉陷区的范围、面积、形态、动态变化等特征以及复垦情况,为解读矿区沉陷规律,进行矿区灾害评价及制定生态综合治理方案、评价微生物复垦效果等提供科学依据。

1.4 对复垦区重金属污染的监测

矿山复垦的主要任务之一是使矿山塌陷区覆土具有适种性,从而达到恢复植被的目的。而覆土的营养状况及其受重金属、酸污染的程度是影响复垦区植被适种性的主要因素^[17]。对于矿区重金属污染的监测,可从矿区土壤、水体和植物3方面入手。以研究区复垦土壤、水体和植物为研究对象,利用光谱分析方法探究其中重金属含量和光谱反射率之间的关系,建立利用地物光谱反射率估算重金属含量的预测模型。在对研究对象进行化学成分分析和物理光谱特征分析的基础上,使用实时多源遥感数据,根据研究对象重金属污染的影像特征,结合依据地物光谱数据建立的重金属污染信息遥感模型,对图像进行增强处理,得到重金属污染区的增强图像,利用野外光谱数据和实测数据进行验证,从而对矿区重金属污染状况进行监测,并进一步修正预测模型。实践证明^[6,18-20],土壤、水体和植被的高光谱反射特征和影像特征能够反映研究对象的重金属含量,从而实现研究矿区重金属污染程度的间接测定。

2 微生物复垦技术的研究进展

微生物复垦技术借助向新建植物接种微生物,在改善植物营养条件、促进植物生长发育的同时,利用植物根际微生物的生命活动,使失去微生物活性的复垦区土壤重新建立和恢复土壤微生物体系,增加土壤生物,加速复垦土壤的基质改良以及自然土壤向农业土壤的转化过程,使生土熟化,提高土壤肥

力,从而缩短复垦周期^[21]。

微生物复垦技术是目前国内外矿区复垦技术的主要研究方向,该技术在国内外受到较大关注并有较快发展。近几年,我国在微生物复垦技术方面的研究发展也较快,其应用于矿区土地复垦与生态修复具有成本低、适用性强、无二次污染等特点,发展前景良好。目前,矿区复垦多采用植物-微生物联合复垦技术,在改良土壤基质的同时,提高复垦植被的抗逆性,加快矿区环境的修复进度,促进矿区生态环境的改善,盘活矿区废弃的土地资源,提高采矿活动在生态、经济和社会多方面的效益。

2.1 对煤矸石环境的改良作用

煤矸石是采煤业排放量最大、污染最严重的固体废弃物,是矿区最主要的固体污染源^[22]。裸露的煤矸石山占用大量耕地,其硫分含量高,其中的硫化物成分在空气中进一步氧化,引发自燃,产生 SO₂ 和 H₂S 等有害气体,严重污染空气、土壤和水体,诱发滑坡、泥石流或矸石山爆炸^[23]等次生地质灾害,造成一系列生态环境问题。

煤矸石主要污染源为煤矸石中含有的高硫化合物,若煤矸石被雨水淋洗,将产生酸性废水。酸水渗入地下后会对地下水 and 土壤造成污染,致使植被恢复困难。因此转化并脱出煤矸石中的硫,不仅可以减轻污染,而且还有利于植被的恢复^[24]。综合有关文献,若微生物技术与适当的工艺相结合,对脱除煤炭中的无机硫均有较理想的效果。毕丽银^[24]等利用实验室自主分离筛选出的氧化硫硫杆菌浸泡煤矸石,在 21 d 内使煤矸石的脱硫率达 28.3%;唐云^[25]等亦利用氧化亚铁硫杆菌处理煤矸石,可使煤矸石中硫由原来的 8.47% 降低到 1.62%,降硫率为 80.87%,其中无机硫降低了 83.96%,有机硫降低了 63.85%。

有研究表明,微生物在对煤矸石环境的改良方面起着积极作用。谢英荷等发现,接种菌根菌的三叶草对煤矸石的进一步风化起到明显的促进作用^[26]。Feng^[27]等发现,丛枝菌根及根外菌丝在生长过程中向根际及菌丝际不断分泌酚酸、有机酸等多糖类物质和酸性物质,能直接促进土壤团聚体的形成。可见,微生物能够促进煤矸石风化,改良土壤结构,固定废弃物等,从而使植物有一个较接种前更好的生长环境,成长速度加快,并形成良性循环,对改善煤矸石环境起到了积极作用^[28]。

2.2 对采矿沉陷地的治理作用

采矿活动引发的地面塌陷是矿区生态环境破坏

的主要表现形式之一。地面塌陷造成的地表植被破坏、水土流失以及土地荒漠化等给矿区生态环境以及当地人们的生产生活带来了巨大影响^[29]。开采沉陷使地面出现塌陷坑、塌陷漏斗,导致土壤肥力和水分丧失,影响农作物的生长;使采空区边缘地表附近出现裂缝,增加了土壤侵蚀和表土流失强度。尤其是在干旱半干旱的西部地区,采矿沉陷导致覆岩及地表破坏,含水层水位下降,地面下沉,加剧了土地沙漠化。矿区的开采沉陷对矿区自然环境产生了巨大的影响,绿色植物逐渐减少,野生动物的栖息环境遭到了较大程度的破坏;在低潜水位地区,采矿沉陷虽不至于给土壤和水分带去有害物质,但可使土壤中水分增加,pH 值发生变化,从而影响微生物的生长繁殖^[30]。

对采矿沉陷地进行复垦时,一方面要利用微生物改善复垦土壤的性状,提高土壤的养分含量,挖掘基质的潜在肥力,使其适宜农作物和其他植物的生长;另一方面要通过微生物的菌根作用,改良植物生长的基质条件,扩大植物根吸收面积,促进植物根生长,增加宿主植物对磷及其他营养的吸收,分泌激素刺激作物的根系发育,提高宿主植物在不利环境条件下的生存能力。

近几年,有学者尝试利用菌根对采矿沉陷地进行环境修复,取得了良好的效果。张合兵^[31]等在焦作煤矿区采煤塌陷地上采取生物复垦措施对复垦土壤进行改良,结果表明,采用生物复垦措施后,复垦地土壤结构明显得到改善,土壤容重明显降低,理化特性得到改善,试种作物的产量比土壤改良前明显增加,基本接近普通农田的水平。杜善周^[32]等在神东煤矿区塌陷地上接种丛枝菌根真菌5个月后,系统地研究了菌根对向日葵植株的生长发育、对土壤性状改良以及根际微生物种群数量的影响,结果表明,接种区植物生长明显好于对照区,地上部叶片数和干重都明显增加,菌根植物的根系发育状况良好,植株干重提高,籽粒产量增加,菌根植物根际土壤磷和钾含量呈有效性增加,微生物数量明显增多,取得了较好的菌根生态效应。毕银丽^[29]等以矿区塌陷地土壤为基质,通过人为接种丛枝菌根真菌来挖掘基质的潜在肥力,研究结果表明,接种丛枝菌根真菌的实验处理对植物的生长具有明显的促进作用,可显著地提高紫穗槐的生物量,对矿区塌陷地土壤具有一定的改良效应。岳辉^[33]等以神东采煤沉陷区种植的紫穗槐接种丛枝菌根真菌为研究对象,分别进行了16,25和28个月的监测,并对接种菌丝密度

与土壤有效磷含量进行相关性分析,结果证明,接种菌根真菌能够在宏观上有效地促进紫穗槐的生长和发育,在微观上改良植物生长的基质条件。

2.3 对重金属污染场地的修复作用

当前,矿山及其周边环境的污染主要来源于重金属的污染,由于超标的重金属离子的存在,造成矿区污染土壤上植被修复难以实施。土壤重金属污染的传统治理方法成本高,难度大,不适于大面积的矿山废弃地的修复^[34]。在自然环境中,微生物的代谢活动能在很大程度上改善和降低土壤重金属污染,因此微生物修复成为研究热点^[34]。微生物修复主要是利用微生物对重金属进行生物溶解^[35]、固定^[36-37]和生物转化^[38]来实现对重金属污染的治理。微生物对重金属的溶解作用是通过微生物的直接作用或代谢所产生的小分子有机酸改变重金属所在环境的pH值,释放处于吸附态和化合态的重金属离子^[39]。微生物细胞膜带有多种阴离子官能团(如羧基、巯基、羟基等),通过细胞的络合、胞外沉淀以及胞内积累吸附重金属阳离子^[40]。同时,微生物还可通过氧化还原作用、甲基化和去甲基化作用将有毒性的重金属转化成无毒或低毒状态^[41]。

国外在该领域起步较早,成果较多^[42-43]。我国金属矿区众多,开采历史悠久,矿区土壤重金属污染严重,不少学者也开展了一定程度的研究。高玉倩^[44]等利用八宝景天和丛枝菌根真菌联合对铅锌尾矿污染进行修复,结果表明,在接种了微生物丛枝菌根真菌后,接种处理的八宝景天对铅锌有较好的吸收效果,从一定程度上降低了尾矿中的重金属含量。李自刚^[45]等通过研究发现,Au和Cd重金属离子的复合污染使土壤微生物群落丰富度降低,而外源耐Au和Cd的土壤ZMZ微生物修复菌剂的添加可提高微生物对单一碳源底物的利用能力和增加利用不同碳底物的微生物数量,从而减轻重金属污染引起的金尾矿区土壤微生物群落功能多样性的下降。针对矿山土壤重金属含量高、极端贫瘠、pH值波动幅度大、保肥持水能力差及易侵蚀等特点,对于土壤重金属污染的生物修复当前多采取植物-微生物联合修复技术。目前研究较多的是菌根修复^[46-48],因为菌根是土壤中的真菌菌丝与高等植物根形成的一种联合体,菌根修复只是植物-微生物的联合修复的方法之一。

3 遥感技术在微生物复垦中的应用潜力

矿区微生物复垦应用的实践表明,微生物复垦

能够提高矿区植被的抗逆性,扩大植物根系的吸收面积,增加植物对磷及其他营养的吸收,改善植物根际环境,改良矿区土壤基质,从而促进矿区植被生长和生态环境修复。根据微生物的作用原理可知,微生物是在植物根系及根际土壤中大显身手的,而其最终复垦效果则是通过复垦植被的生长状况以及微生物复垦土壤理化性状的改良反映出来。高光谱遥感技术的出现,实现了将微生物发挥作用的微观活动通过一种高新技术宏观地表达出来。

与传统方法相比,遥感技术快速、实时、宏观的特点为植被生长和土壤状况的监测提供了新方法;与传统的多光谱遥感或宽波段遥感相比,高光谱遥感^[49]不仅能比较真实全面地反映各类植被、土壤的光谱特征及其差异,还能实现对某些植被生化参数和土壤理化性状的定量测定。因此,可以运用遥感技术,尤其是高光谱遥感技术,结合微生物复垦的特点,对微生物复垦后的植被生长和土壤改良进行监测,从而实现了对矿区微生物复垦效果的监测和评估。

在复垦工作开始前,可以先利用遥感影像圈定研究区矿渣石山、排土场、采矿沉陷地和重金属污染场等目标区域的范围和面积,借助研究区土壤的反射光谱数据和理化性状实测数据,定量分析土壤的理化成分;然后,根据当地气候、地质条件与土壤特性,以遥感技术提供的信息为指导,选择适宜的菌剂和植物种类对待复垦区域进行植物微生物复垦。在微生物复垦过程中,可利用遥感影像获取微生物复垦区域的植被指数和植被覆盖度信息,持续了解复垦情况;同时结合复垦植被的反射光谱数据,实时监测微生物复垦植被的长势,根据需要对复垦植被进行必要的施肥护理和种植方案调整,提高复垦质量;微生物复垦前后,利用遥感影像对比分析研究区植被指数(NDVI),计算植被覆盖度的变化幅度,在大尺度范围内了解复垦进度和成效;最后,利用高光谱数据和遥感影像再次对研究区土壤和植被生化参数进行定量分析,通过植被和土壤理化性质的动态监测,对微生物复垦的效果进行实时监测和快速、高效、科学的评价。

对于矿区的主要污染物质,如酸性废水、煤矸石的高硫化合物和重金属,可利用地物光谱数据和遥感影像间接估测污染物含量,为矿区矿渣石山、重金属污染场等的复垦提供基础信息和科学依据。在矿区植物微生物复垦全过程中,可利用高光谱数据与遥感影像动态监测复垦区域土壤、水体和植物的硫化物、酸性物质或重金属含量在微生物作用下的变

化情况,以及复垦后的植被营养状况和受污染物质胁迫变化形势,从而为矿区污染的监测和治理提供实时、可靠的依据。

4 结 论

1)应用遥感技术可获取复垦区域面积、范围及土壤理化性状等基础信息,为微生物复垦技术的实施提供依据和指导。

2)矿区采取微生物复垦后,可利用遥感技术实时、动态监测复垦情况,以便对复垦方案和措施进行适时调整。

3)根据微生物复垦区土壤、植被和土地利用类型等遥感监测数据,可高效、快速地对微生物复垦效果进行科学评价。

4)日臻成熟的高光谱遥感技术和微生物复垦技术的结合将在矿区土地复垦和生态环境修复中具有巨大的应用潜力。

参考文献 (References):

- [1] 苏 伟,孙中平,吕海军,等.基于多时相 Landsat 遥感影像的海州露天煤矿排土场植被时空特征分析[J].生态学报,2009,29(11):5860-6868.
Su W, Sun Z P, Lyu H J, et al. Monitoring of temporal and spatial change of vegetation in waste dump of Haizhou opencast coalmine area using multitemporal landsat remote sensing images[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 5860-6868.
- [2] 孟 丹,张 志,冯 稳.基于 GeoEye-1 和 DEM 的富家坞铜矿区固体废弃物危险性分析[J].国土资源遥感,2011,23(2):130-134.
Meng D, Zhang Z, Feng W. The risk analysis of solid waste of the Fujawu copper ore district based on GeoEye-1 and DEM[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2011, 23(2): 130-134.
- [3] 刘 广,郭华东, Hanssen R, 等. InSAR 技术在矿区沉降监测中的应用研究[J].国土资源遥感,2008,20(2):51-55.
Liu G, Guo H D, Hanssen R, et al. The application of InSAR technology to mining area subsidence monitoring[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2008, 20(2): 51-55.
- [4] 卢 霞,刘少峰,胡振琪,等.矿区水污染遥感识别研究[J].矿业研究与开发,2006,26(4):89-92.
Lu X, Liu S F, Hu Z F, et al. Study on remote sensing identification of water pollution in a mining area[J]. Mining Research and Development, 2006, 26(4): 89-92.
- [5] 李 娜,杨锋杰,吕建升.植物光谱效应在尾矿生态恢复评价中的应用[J].国土资源遥感,2007,19(2):75-77.
Li N, Yang F J, Lyu J S. The application of plant spectral effects to the estimation of mining tailing ecological restoration[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2007, 19(2): 75-77.
- [6] 董霁红,于 敏,赵银娣,等.矿区复垦土壤重金属含量分布与光谱特征研究——以徐州市柳新矿区为例[J].中国矿业大学

- 学报,2012,41(5):827-832.
- Dong J H, Yu M, Zhao Y D, et al. Research on the distribution and spectral characteristics of heavy metal content in reclaimed soil of mining areas: A case study of Liuxin mining district in Xuzhou city [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2012, 41(5): 827-832.
- [7] 施魁元. 高光谱分辨率遥感技术及其在植被监测中的应用[J]. 黑龙江生态工程职业学院学报, 2008, 21(5): 68-70.
- Shi K Y. Hyperspectral resolution technology and its application in monitoring plants[J]. *Journal of Heilongjiang Vocational Institute of Ecological Engineering*, 2008, 21(5): 68-70.
- [8] Purevdorj T, Tateishi R, Ishiyama T, et al. Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(18): 3519-3535.
- [9] 胡振琪, 陈涛. 基于ERDAS的矿区植被覆盖度遥感信息提取研究: 以陕西省榆林市神府煤矿区为例[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(2): 164-167.
- Hu Z Q, Chen T. ERDAS aided extraction of vegetation fraction from remote sensing information in coalmine area based: A case study of Shenfu coalmine[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2008, 23(2): 164-167.
- [10] Arzu erener. Remote sensing of vegetation health for reclaimed areas of Seyitömer open cast coal mine [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2011, 86(1): 20-26.
- [11] 叶莹莹, 白中科, 孔登魁, 等. 安太堡露天煤矿土地破坏与土地复垦动态变化的遥感调查[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(9): 972-976.
- Ye B Y, Bai Z K, Kong D K, et al. Dynamic change of land destroy and reclamation on ATB opencast coal mine[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2008, 30(9): 972-976.
- [12] 荆青青, 张志, 王旭. 基于ASTER遥感影像的煤矸石分布信息提取方法[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(5): 93-96.
- Jing Q Q, Zhang Z, Wang X. Collecting method of coal refuse distribution information based on ASTER remote sensing images[J]. *Coal Science and Technology*, 2008, 36(5): 93-96.
- [13] 韩云霞, 李民赞, 李道亮. 基于光谱学与遥感技术的矿区废弃地土壤特性参数分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2009, 39(1): 254-258.
- Han Y X, Li M Z, Li D L. Estimation of soil properties in mine wasteland based on spectroscopy and remote sensing[J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2009, 39(1): 254-258.
- [14] 郝启勇, 韦欣, 隋建红, 等. 基于遥感技术的齐济滕矿区采煤沉陷区现状及动态变化特征[J]. 山东国土资源, 2012, 28(5): 41-43.
- Hao Q Y, Wei X, Sui J H, et al. Present condition and dynamic change characteristics of coal mining subsidence areas in Yanjiteng mining areas based on remote sensing technology[J]. *Land and Resources in Shandong Province*, 2012, 28(5): 41-43.
- [15] 许长辉, 高井祥, 王坚, 等. 多源多时相遥感数据融合在煤矿塌陷地中应用研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 92-95.
- Xu C H, Gao J X, Wang J, et al. Application of RS data fusion of multi-source and multi-temporal in coal mine subsidence[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15(1): 92-95.
- [16] 姚光华, 徐升, 涂昌鹏. 浅谈遥感技术在采煤沉陷区含水层动态分析中的应用[J]. 中国矿业, 2012, 21(5): 118-121.
- Yao G H, Xu S, Tu C P. Research thinking of the remote sensing technology in the dynamic analysis of water-bearing zone [J]. *China Mining Magazine*, 2012, 21(5): 118-121.
- [17] 于君宝, 刘景双, 王金达, 等. 矿山复垦土壤重金属元素时空变化研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 30-33.
- Yu J B, Liu J S, Wang J D, et al. Space time variation of heavy metal elements content in covering soil of coal mine reclamation area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(4): 30-33.
- [18] 谭德军, 谢巨天, 简季, 等. 万盛采矿区粉尘污染农作物光谱特性分析[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(2): 121-130.
- Tan D J, Xie J T, Jian J, et al. Analysis on spectral characteristics of dust polluted crops in Wansheng coal mining district [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2013, 25(2): 121-130.
- [19] 陈绍杰, 陈颖, 杜培军, 等. 基于HJ-1遥感数据的矿区水体污染监测与分析——以龙岩紫金山金铜矿为例[J]. 测绘, 2011, 34(6): 252-255.
- Chen S J, Chen Y, Du P J, et al. Monitoring and analyzing of water quality based on HJ-1 satellite remote sensing data[J]. *Surveying and Mapping*, 2011, 34(6): 252-255.
- [20] 胡玉玲. 基于HJ-1高光谱数据的矿区植被污染监测[D]. 泰安: 山东科技大学, 2011.
- Hu Y L. Vegetation stress level monitoring mining area based on HJ-1 hyperspectral data[D]. Taian: Shandong University of Science and Technology, 2011.
- [21] 马彦卿. 微生物复垦技术在矿区生态重建中的应用[J]. 采矿技术, 2001, 1(2): 66-68.
- Ma Y Q. Application of microbial reclamation technology to ecological restoration in coal mining area[J]. *Mining Technology*, 2001, 1(2): 66-68.
- [22] 毕银丽, 胡瑜, 苏高华, 等. 微生物对煤矿固体废弃物的脱硫效应[J]. 环境工程学报, 2008, 2(1): 92-96.
- Bi Y L, Hu Y, Su G H, et al. Desulphurization effects of microorganisms on gangue in coal mine areas[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2008, 2(1): 92-96.
- [23] 毕银丽, 吴王燕, 刘银平. 丛枝菌根在煤矸石山土地复垦中的应用[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3738-3743.
- Bi Y L, Wu W Y, Liu Y P. Application of arbuscular mycorrhizas in land reclamation of coal spoil heaps[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9): 3738-3743.
- [24] 毕银丽, 柳博会. 煤矸石微生物脱硫试验研究[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(3): 161-164.
- Bi Y L, Liu B H. Study on microbial desulphurization of coal waste [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2007, 29(3): 161-164.
- [25] 唐云, 杨强, 张覃. 氧化亚铁硫杆菌浸出高硫煤矸石中硫的试验研究[J]. 选煤技术, 2010, 219(2): 4-7, 78.
- Tang Y, Yang Q, Zhang Q. Experimental study on using thiobacillus ferrooxidans leaching sulfur from high-sulfur coal gangue[J]. *Coal Preparation Technology*, 2010, 219(2): 4-7, 78.
- [26] 谢英荷, 洪坚平, 李青萍, 等. 在煤矸石风化物 and 生黄土上种植三叶草接种根瘤菌的效应[J]. 土壤肥料, 1995(1): 41-43.
- Xie Y H, Hong J P, Li Q P, et al. Effect of clover inoculated with

- Rhizobium planted on coal wastes weathering and loess [J]. Soils and Fertilizers, 1995(1):41-43.
- [27] Feng G, Zhang Y F, Li X L. Effect of external byohae of arbuscular mycorrhizal plant on water - stable aggregates in sandy soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(4):99-102.
- [28] 廖芳芳, 郑嵩, 葛皓. 煤矸石山生态修复方法综述 [J]. 环保科技, 2012, 18(1):21-25.
- Liao F F, Zheng S, Ge H. Methods of ecological restoration of coal gangue hill [J]. Environmental Protection and Technology, 2012, 18(1):21-25.
- [29] 毕银丽, 陈铸, 曹楠, 等. 丛枝菌根对矿区塌陷地环境修复的生态效应 [J]. 中国科技论文在线, 2010, 5(11):850-854.
- Bi Y L, Chen Z, Cao N, et al. Ecological effects of arbuscular mycorrhizal fungi on environmental phytoremediation in mining subsided land [J]. Sciencepaper Online, 2010, 5(11):850-854.
- [30] 宋晓. 采煤沉陷地土地影响及复垦模式初探 [J]. 科技传播, 2012(20):135-137, 143.
- Song X. Research on land effect and reclamation pattern of coal mining subsidence [J]. Public Communication of Science & Technology, 2012(20):135-137, 143.
- [31] 张合兵, 桑振平, 李晨. 焦作煤矿区开采沉陷地生物复垦技术与试验研究 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36(29):12891-12893.
- Zhang H B, Sang Z P, Li C. Study on organism reclamation technique of the mining subsidence land in Jiaozuo coal mining area [J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2008, 36(29):12891-12893.
- [32] 杜善周, 毕银丽, 王义, 等. 丛枝菌根对神东煤矿区塌陷地的修复作用与生态效应 [J]. 科技导报, 2010, 28(7):41-44.
- Du S Z, Bi Y L, Wang Y, et al. The reclamation and ecological effects of arbuscular mycorrhiza on subsided land in Shendong coal mine areas [J]. Science & Technology Review, 2010, 28(7):41-44.
- [33] 岳辉, 毕银丽, Zhakypbek Y, 等. 接种菌根对神东矿区采煤沉陷地的生态修复效应 [J]. 科技导报, 2012, 30(36):56-60.
- Yue H, Bi Y L, Zhakypbek Y, et al. Ecological reclamation effect of arbuscular mycorrhizal inoculum on subsided land in the area of Shendong coal mine [J]. Science & Technology Review, 2012, 30(36):56-60.
- [34] 杨琳琳, 季秀玲, 吴潇, 等. 微生物在成矿及矿区环境修复中的应用研究现状 [J]. 生命科学, 2011, 23(3):306-310.
- Yang L L, Ji X L, Wu X, et al. Research status of microbial technology on biomineralization and microbial bioremediation [J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2011, 23(3):306-310.
- [35] Loser C, Zehndorf A, Hoffmann P, et al. Remediation of heavy metal polluted sediment by suspension and solid bed leaching; Estimate of metal removal efficiency [J]. Chemosphere, 2007, 66(9):1699-1705.
- [36] Yuan H P, Zhang J H, Lu Z M, et al. Studies on biosorption equilibrium and kinetics of Cd^{2+} by *Streptomyces* sp. K33 and HL-12 [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 164(2/3):423-431.
- [37] Papassiopi N, Kontoyianni A, Vaxevanidou K. Assessment of chromium biostabilization in contaminated soils using standard leaching and sequential extraction techniques [J]. Science of Total Environment, 2009, 407(2):925-936.
- [38] Charm I S, Kim B H. Effect of sulfate reduction activity on biological treatment of hexavalent chromium [Cr(VI)] contaminated electroplating waste water under sulfate-rich condition [J]. Chemosphere, 2007, 68(2):218-226.
- [39] 孙嘉龙, 肖唐付, 周连碧, 等. 微生物与重金属的相互作用机理研究进展 [J]. 地球与环境, 2007, 35(4):367-374.
- Sun J L, Xiao T F, Zhou L B, et al. Studies on the mechanisms of interaction between microbes and heavy metals [J]. Earth and Environment, 2007, 35(4):367-374.
- [40] Sari A, Tuzen M. Kinetic and equilibrium studies of biosorption of Pb(II) and Cd(II) from aqueous solution by macrofungus (*Amanita rubescens*) biomass [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 164(2/3):1004-1011.
- [41] Sari A, Tuzen M. Biosorption of As(III) and As(V) from aqueous solution by macrofungus (*Inonotus hispidus*) biomass: Equilibrium and kinetic studies [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 164(2/3):1372-1378.
- [42] Vazquez S, Agha R, Granado A, et al. Use of white Lupin plant for phytostabilization of Cd and As polluted acid soil [J]. Water Air and Soil Pollution, 2006, 177:349-365.
- [43] Conesa M H, Faz A, Arnaldos R. Initial studies for the phytostabilization of a mine tailing from the Cartagena-La Union Mining District (SE Spain) [J]. Chemosphere, 2006, 66(1):38-44.
- [44] 高玉倩, 张俊英, 李富平, 等. 生物修复矿区铅锌污染研究 [J]. 现代矿业, 2012(4):65-67.
- Gao Y Q, Zhang J Y, Li F P, et al. Research on pollution of lead and zinc in coal mining reclaimed with microbes [J]. Modern Mining, 2012(4):65-67.
- [45] 李自刚, 彭爱娟, 屈凌波. 微生物修复菌剂对复垦金尾矿土壤微生物群落的影响 [J]. 湖南农业科学, 2009(5):46-49.
- Li Z G, Peng A J, Qu L B. Effects of microbial remediation inocula on microbial community in gold-tailings soil with secondary tillage [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2009(5):46-49.
- [46] 郭友红. 微生物对煤矿区适生植物污染修复的作用 [J]. 北方园艺, 2012(17):65-67.
- Guo Y H. Effect of microorganisms on pollution restoration of suitable plants in coal mine [J]. Northern Horticulture, 2012(17):65-67.
- [47] 刘晓娜, 赵中秋. 螯合剂、菌根联合植物修复重金属污染土壤研究进展 [J]. 环境科学与技术, 2011, 34(12):127-133.
- Liu X N, Zhao Z Q. Chelate, Mycorrhiza and plants joint remediation of heavy metal contaminated soil [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(12):127-133.
- [48] 董明, 王冬梅, 王晓英. 菌根菌在植物修复重金属污染土壤中的作用 [J]. 华北农学报, 2010, 25(s1):250-253.
- Dong M, Wang D M, Wang X Y. The role of mycorrhizal fungi of plant repair heavy metal contaminated soil [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2010, 25(s1):250-253.
- [49] 任红艳, 潘剑君, 张佳宝. 高光谱遥感技术的铅污染监测应用研究 [J]. 遥感信息, 2005(3):34-38.
- Ren H Y, Pan J J, Zhang J B. Hyper-spectral application to monitoring plumbum pollution of vegetation [J]. Remote Sensing Information, 2005(3):34-38.

Application of remote sensing technology to microbial reclamation

CHEN Shulin, BI Yinli

(College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Microbial reclamation is an effective means for ecological restoration in coal mining. Remote sensing, especially hyperspectral remote sensing, can rapidly and precisely determine the growth status of plants in the field and the improvement of soil properties, thus providing important technical support for implementation of microbial technology to land restoration and ecological environment rehabilitation in coal mining. This paper summarized in detail the application of remote sensing to monitoring the plants recovery, reclamation of waste dump of tail slag and subsidence and pollution of heavy metals in reclaimed areas, and the application of microbial technology to improving the environment of coal wastes, managing mining subsidence land and restoring land polluted by heavy metals. Some ideas of remote sensing technology applied in microbial reclamation for future research were discussed in this paper, which could provide an important reference and guideline for quick, accurate and undamaged monitoring of growth of plants reclaimed with microorganism and estimation of microbial technology implemented in ecological restoration in coal mining in the future.

Key words: land reclamation; remote sensing monitoring; hyperspectral remote sensing; ecological restoration

第一作者简介: 陈书琳(1978 -),女,博士研究生,主要从事微生物复垦的高光谱遥感监测研究。Email: chen_sl@163.com。

(责任编辑: 刁淑娟)

=====

解译全景世界,工程化遥感解译又出新利器

随着我国国产遥感卫星创新发展,综合运用空天地一体化的数据采集和处理手段也不断创新,新一代的工程化遥感解译系统——解译工厂(analyze factory)日前推出。

2014年5月29日,在北京召开的“全景天地2014用户大会暨第五届eCognition(易康)中国用户大会”上,北京全景天地科技有限公司进行了解译工厂的发布。该一体化软硬件集群系统可实现各种遥感“大数据”的快速解译分析,从而实现了从影像到信息的工程化、智能化生产。据介绍,该系统采用了“多源影像解译知识库”专利与“工程化影像解译技术”2项核心技术,并综合了北京大学、武汉大学与德国eCognition等技术团队的研究成果,经过6年磨砺,3次重大突破精心打造。

近10年来,北京全景天地科技有限公司在信息提取、变化检测、目标识别等应用领域一直积极推动遥感影像的智能分析和解译,经过不断研究创新,突破了大量技术难关,已在环境监测、国情普查、农情监测、土地执法、灾害评估等重点领域中实现了海量影像的工程化生产,推动了我国遥感应用的技术发展和应用创新。

(全景天地科技有限公司)