

草原区露天煤矿植被覆盖度时空演变与驱动因素分析

张世文¹, 宁汇荣², 许大亮¹, 叶回春³, 郑 印¹, 张红艳⁴, 黄元仿^{5*}

(1. 安徽理工大学地球与环境学院, 淮南 232001; 2. 安徽农业大学经济管理学院, 合肥 230036;
3. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094; 4. 中国农业大学理学院, 北京 100193;
5. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘 要: 采用多时相 Landsat TM 遥感数据, 借助于植被指数与植被覆盖度, 基于不同时期植被覆盖度格点回归斜率、标准差和基末年等级转换矩阵等, 分析了研究区植被覆盖度空间异质性及其驱动机制, 剖析了采复联动下研究区、开采区和复垦区植被覆盖度变化趋势和波动程度, 进而揭示随着时间变化采复活动与植被覆盖度间的响应。研究结果表明: 不同年份研究区植被覆盖度及其等级空间分布整体上具有一定相似性, 矿山采复活动在一定程度上打破了区域植被覆盖度时空演变格局; 研究区植被覆盖度以中(IV等)、中低(III等)为主, 按多年均值计算, 两者之和占研究区总面积的80%以上; 植被覆盖度呈增加和减少的区域面积比为2:3, 相关系数在-0.9266~0.4805之间, 斜率正值范围内相关性并不显著, 而负值范围的-0.9266~-0.895呈现不同程度显著性相关; 露天采区、排土场及其周边1.5 km范围内的植被覆盖度呈显著下降趋势, 且趋于一致。矿区植被恢复经历了一个“高一低—高”的周期循环, 半干旱草原区复垦管护期限尽量保证在6 a以上。70%以上区域在研究时段内植被覆盖度发生转换, 转换较为频繁, I等植被覆盖度中的90%是由采矿活动转入的。露天煤矿区植被覆盖度的提升有赖于矿区社会压力减少和生态恢复力提高两方面。研究成果将为露天煤矿及其所在区域生态环境科学保护与决策、恢复和治理提供信息支撑。

关键词: 遥感; 煤矿; 复垦; 植被覆盖度; 时空演变; 驱动因素

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.031

中图分类号: F301.24

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-17-0233-09

张世文, 宁汇荣, 许大亮, 叶回春, 郑 印, 张红艳, 黄元仿. 草原区露天煤矿植被覆盖度时空演变与驱动因素分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 233—241. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.031 <http://www.tcsae.org>
Zhang Shiwen, Ning Huirong, Xu Daliang, Ye Huichun, Zheng Yin, Zhang Hongyan, Huang Yuanfang. Analysis of spatio-temporal evolution and driving factors of vegetation fraction for opencast coal mine in grassland area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(17): 233—241. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.031 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

中国露天煤矿每开采万吨煤损毁土地面积0.22 hm², 其中直接挖掘损毁土地面积0.12 hm², 外排土场占用土地面积0.10 hm², 年均损毁土地面积多达1万hm²[1]。露天煤矿开发活动是一种具有大规模高强度性质的生态扰动行为, 开发过程中的采、剥、运、排、覆等环节将占用大量的土地资源, 会产生区域地表侵蚀、植被破坏等生态扰动和环境污染问题[2]。

矿区生态环境与植被生长状况的监测、评价与驱动因素分析是矿业开发过程中需开展的重点工作。目前侧重于基于遥感(RS)技术开展此类研究[3-11]。Katpatal等[7]采用TM、CARTOSAT等数据, 监测了排土场时空变化, 评估了采排活动对流域洪水暴发的影响。Erener[8]利用多

时相TM影像, 监测了矿区生态环境, 并定量分析了矿区生态环境的动态变化。Latifovic等[9]利用不同时相的Landsat影像对矿区植被受损状况进行了分类, 并评定了矿区植被变化与受损状况; Mcgwire等[10]通过计算干旱地区稀疏植被的宽波段和窄波段归一化植被指数值, 监测植被覆盖度的变化。在国内, 学者们基于野外调查取样、长期定位试验和3S技术等, 针对草原区、荒漠区和黄土高原区等不同生态类型的露天煤矿开采、复垦过程中植被变化开展了大量卓有成效的研究[12-17]。姚峰等[12]借助植被指数和植被覆盖度指数, 分析评估了干旱荒漠区露天煤矿开采过程中植被覆盖度随时间的变化特征。王金满等[13]选择黄土高原区的安太堡露天煤矿复垦排土场为研究区, 分析了不同复垦年限土壤环境因子和乔木林地植被生物量的动态演变规律; 黄丹等[16]利用多期RS数据分析了草原区露天煤矿植被修复监测和效果评价。

目前该领域研究对象主要针对某一矿山或者矿山中某一用地类型范围, 如排土场, 而置于区域尺度下的大型草原露天煤矿区的研究相对较少; 研究内容侧重于生态环境评价, 影响矿区植被因素和机制较为单一和简单(如矿山开采或复垦), 耦合矿区所在区域生态建设、矿区复垦和开采等正向或负向因素的研究少见报道, 无法清楚揭示复

收稿日期: 2016-02-24 修订日期: 2016-07-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41471186、41571217); 国土资源部公益性行业科研专项资助项目(2014111017)。

作者简介: 张世文, 博士, 副教授, 主要从事土壤属性空间异质性、土地利用与信息技术研究, 淮南 安徽理工大学地球与环境学院, 232001。Email: mamin1190@126.com。中国农业工程学会会员: 张世文(E041300013M)

*通信作者: 黄元仿, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤水分、养分模型与水土资源管理研究, 北京 中国农业大学资源与环境学院, 100193。Email: yfhuang@cau.edu.cn

合因素影响的矿区植被覆盖度时空演变规律及其机理。

本文以草原区露天煤矿胜利煤田为对象, 遵循远粗近细, 基于 2000、2006、2009、2011、2013 年的 Landsat TM 遥感影像, 借助植被指数和植被覆盖度, 分析了研究区植被覆盖度空间异质性及其驱动机制; 研究了采复联动下研究区、开采区和复垦植被覆盖度变化趋势和波动程度, 揭示了随着时间变化采复活动与植被覆盖度间的响应。为露天煤矿及其所在区域生态环境科学保护与决策、恢复和治理提供信息支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

研究区属典型草原露天煤矿区, 位于锡林浩特北郊 (43°54'15"–44°13'52"N, 115°24'26"–116°26'30"E) (图 1)。地形为缓波状起伏的山前平原, 属半干旱草原气候, 平均气温 1.7 °C, 年均降水量、蒸发量分别为 294.74、1794.64 mm, 蒸发量远大于降水量。整个矿区总体呈北东-南西条带状展布, 井采与露天复合, 以露天开采为主, 含煤面积 342 km²。根据生产建设时序、生产规模等, 2020 年胜利煤田的生产规模将达到 138.90 Mt/a, 随着开采规模的加大, 受损植被的范围将进一步增加。结合实地调查, 截至 2013 年 8 月, 西一、西二、东二等露天矿已投产开采, 已受损土地面积达到 40 km² 以上, 主要是采区挖损和排土场压占损毁; 已复垦区包括西一内排、东排场和西排场, 面积接近 8 km², 复垦措施主要包括土壤重构 (覆土厚度 30 cm) 与植被重建 (乔灌木结合, 以草本为主, 植被类型包括沙地柏、柠条、沙打旺和小叶锦鸡等) (图 1)。

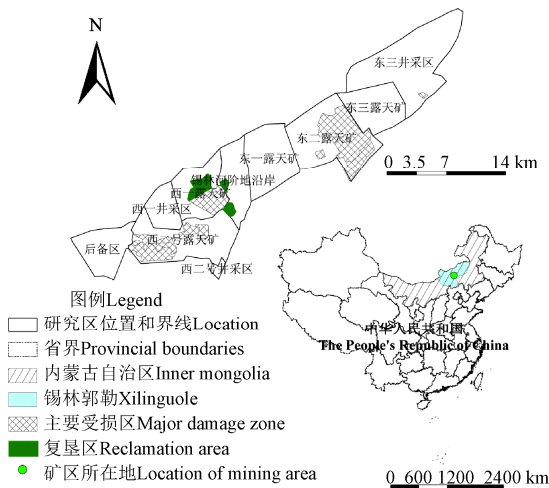


图 1 研究区地理位置图

Fig.1 Location map of study area

1.2 数据来源

中空间分辨率的 Landsat TM 影像适合植被覆盖度区域研究^[18], 这在众多的矿区植被生长或生态环境监测与评价案例研究中都得以证实^[19-22], 因此, 本文获取 2000、2006、2009、2011 和 2013 年 5 期 Landsat TM 卫星影像数据 (同源), 空间分辨率为 30 m, 云雾量为 0, 影像时间为每年的 7–8 月 (同时段), 该时段可很好地解释

植被覆盖生长情况, 具有一定可比性。数据来源于国际科学数据镜像网站。为消除相关噪音, 对原数据进行预处理和大气校正, 大气校正采用 ENVI4.8 中 FLAASH 模块完成, 并用波段处理函数 Bandmath 去除异常值, 确保 NDVI 处于 -1~1 之间。

2 研究方法

2.1 植被指数与植被覆盖度的提取方法

绿色植物在近红外波段具有高反射, 而在红外波段具有强吸收, 因此, 在多光谱图像中提取植被信息时多采用红外与红波段图像反射值比值, 这样可消除部分辐射误差。本文采用归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 模型计算研究区不同年份的植被指数^[23]。

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

式中 NIR、R 分别为近红外、红色波段反射值。

植被覆盖度 (vegetation fraction, VFC) 是指植被在地面的垂直投影面积占统计面积的百分比^[24]。目前较为实用是利用植被指数 (如 NDVI), 采用像元二分模型估算植被覆盖度指数^[25-27], 其公式如下

$$VFC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}}$$

其中:

$$NDVI_{soil} = \frac{VFC_{max} \cdot NDVI_{min} - VFC_{min} \cdot NDVI_{max}}{VFC_{max} - VFC_{min}}$$

$$NDVI_{veg} = \frac{(1 - VFC_{min}) \cdot NDVI_{max} - (1 - VFC_{max}) \cdot NDVI_{min}}{VFC_{max} - VFC_{min}} \quad (2)$$

式中 $NDVI_{soil}$ 、 $NDVI_{veg}$ 分别为完全是裸地或无植被覆盖和完全被植被所覆盖区域的 NDVI 值^[28]。 $NDVI_{max}$ 和 $NDVI_{min}$ 分别为区域内最大和最小的 NDVI 值。

由于采用的 7–8 月遥感数据, 这时段内植被生长比较旺盛, 参照相关文献^[29], 可近似取 $VFC_{max}=1$, $VFC_{min}=0$, 则公式 (1) 可变为

$$VFC = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (3)$$

由于不可避免存在噪声, $NDVI_{max}$ 和 $NDVI_{min}$ 一般取一定置信度范围内的最大值与最小值。参考相关文献^[29], 结合研究区不同时相的 NDVI 灰度分布, 取累计概率 5% 和 95% 的 NDVI 作为区域最小和最大 NDVI 值。通过将 2013 年已受损的露天开采境界 (图 1) 与计算的植被覆盖度 (图 2) 套合对比可知, 以上处理方法能够满足精度的要求。

2.2 植被覆盖度时空演变研究方法

2.2.1 变化趋势和幅度衡量方法

以格网中包含像素植被覆盖度的平均值作为格点植被覆盖度值, 在不同时相的每个格点上进行线性回归, 得到拟合回归直线斜率 θ_{slope} 。斜率负值时, 表明植被覆

盖度减少，反之则增加^[30]。变化趋势是否显著采用拟合相关系数 r 来判定， r 的正负分别表示植被覆盖度随时间线性增加和减少趋势。用 t 分布检验 2 个变量是否真正相关及其相关性的显著水平^[31]。

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i t_i - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i) (\sum_{i=1}^n t_i)}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n t_i)^2},$$
$$r = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n t_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2}} \theta_{\text{slope}} \quad (4)$$

式中 θ_{slope} 为线性回归拟合斜率， x_i 是第 i 年植被覆盖度， t_i 为年份， r 为相关系数， n 为总年数，本研究取 $n=5$ 。

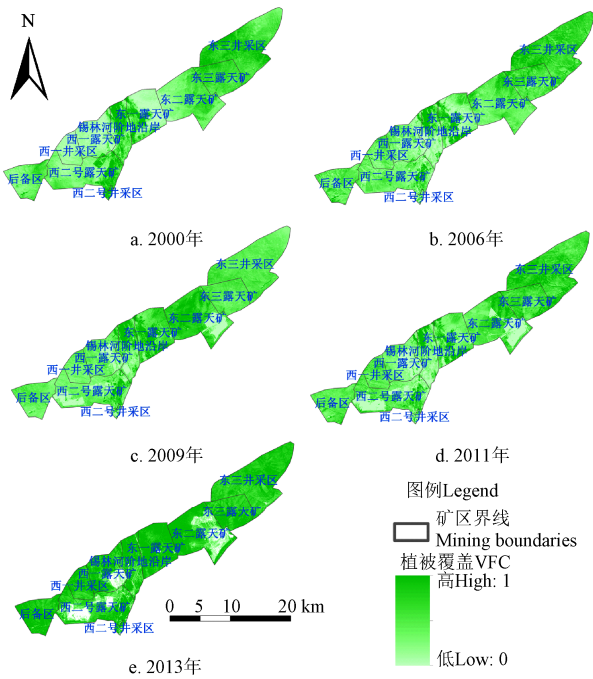


图 2 不同年份植被覆盖度图
Fig.2 Map of vegetation fraction in different years

2.2.2 年际波动程度表达方法

年际间植被覆盖度波动情况是植被受到干扰后生长状况的重要表现。波动值大越大表明越不稳定，受外界的干扰就越大。参考相关文献^[32-34]，采用年际间植被覆盖度标准差（standard deviation, SD）来反映不同格点上 5 期的植被覆盖度的波动程度。

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}} \quad (5)$$

3 结果与分析

3.1 植被覆盖度空间异质性及其驱动机制

基于提取的植被覆盖度，参照《土壤侵蚀分类分级标准》（SL190-2007）和《土地利用现状调查技术规程》

（1984）和相关文献^[12]，结合采复联动下的草原露天煤矿区生态特征，为更明确反映区域植被变化情况，突出不同复合因素对区域植被覆盖度的影响，将研究区植被覆盖度分为五等（表 1）。

表 1 植被覆盖度等级划分			
Table 1 Degree of vegetation fraction			
等级 Degree	植被覆盖度 VFC	等级名称 Degree name	植被描述 Vegetation description
I	[0,0.15)	极低覆盖度	强度沙地、裸地
II	[0.15,0.30)	低覆盖度	零星植被分布
III	[0.30-0.45)	中低覆盖度	中低盖度草地、稀疏灌木
IV	[0.45,0.80)	中覆盖度	中覆盖度草地、低矮灌木
V	[0.80,1)	高覆盖度	高覆盖度草地、低矮灌木

研究区不同年份植被覆盖度及其对应等级空间分布格局整体具有一定相似性，大致以锡林河阶地沿岸为分界区，表现出东北、阶地范围高，西南低，即自西向东呈现“低—高—低—高”的整体空间分布格局（图 3）。随着时间的推移，未受矿山生产建设影响区域的植被覆盖度及其对应等级趋于相对一致，整体升高，且增加幅度明显。

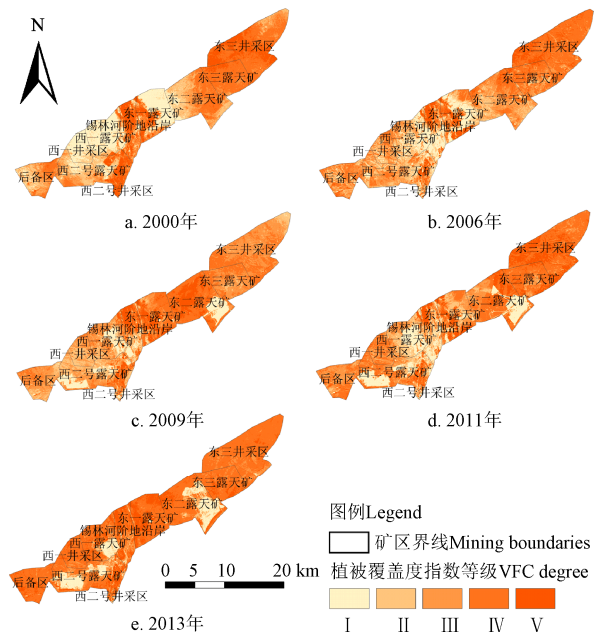


图 3 不同年份植被覆盖度等级图
Fig.3 Degree map of VFC in different years

锡林河两岸和西部的一些低洼草滩区盖度多数大于 45%。该区域地形平缓，植被以芨芨草为主，潜水埋深 2~3 m，且靠近锡林河，植被的根系可以充分吸取地下水和地表水，沙漠化占比较低，且人口密度较小，建设用地及耕地比例低。研究区东北部植被以大针茅为主，潜水位埋深为 4~5 m，人口密度和草地载畜量等社会经济压力较大。综合考虑社会经济、自然条件等，该区域生态环境的压力相对较小，因此，植被覆盖度多数处于 III 级及其以上。

沿着锡林河两岸分别往东西方向延展，属于锡林河两侧一级台地，地形平缓，潜水埋深 4~5 m，植被以克

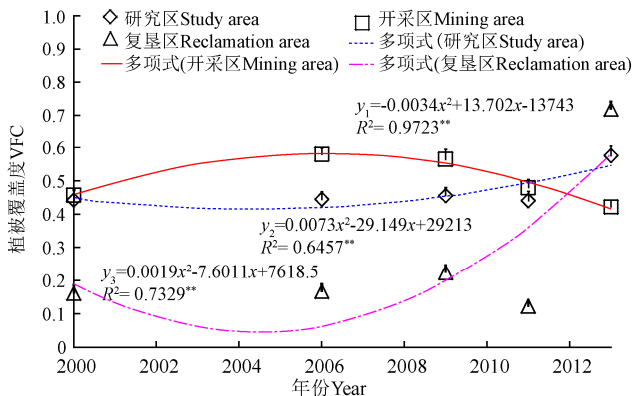
什针茅为主, 植被覆盖度小 (均值为 0.13), 虽然该区域自然因素较好, 但属锡林浩特市辐射区, 人为活动强烈, 社会经济压力大, 故而, 植被覆盖度相对较低, 2000 年表现更加突出, 随着治理工程的推进, 2009 年后植被覆盖度有所提升; 研究区西部植被覆盖度总体较低, 多数年份这些区域植被覆盖度等级基本维持在 II 等及其以下。该区域植被以沙蒿群落为主, 植被覆盖度 < 0.3, 地形地貌复杂, 坡度较大, 沙漠化土地占比 > 0.3, 潜埋深大于 7 m, 植被主要靠降水维持。

已生产建设的西一、西二、东二等露天采区几乎全部为 I 等, 露天煤矿开采强度大, 导致植被丧失、浅水层破坏, 人为活动剧烈且生态自恢复能力弱; 由于受到矿山开采的影响, 矿区周边的区域, 植物群落向旱生及超旱生群落演替, 生物多样性减少, 植被盖度降低, 特别是大规模开采后表现更加突出^[35]。

3.2 植被覆盖度时间演变及其驱动因素分析

3.2.1 植被覆盖度变化趋势及其驱动因素分析

为进一步清楚揭示采复活动对露天煤矿区域植被覆盖度的响应, 在对整个研究区进行分析的基础上, 再分别分析 2000 至 2013 年开采和复垦区植被覆盖度变化趋势 (图 4)。根据多年变化情况, 通过图上测算, 大约为采区、排土场及其附属设施周边平均 1.5 km 范围, 基于 ArcGIS10.0, 对 2013 年开采东二露天矿现状受损范围 (图 1) 进行 1.5km 缓冲区分析, 以此缓冲区作为待分析的开采区; 复垦区包括西一内排土场以及东排土场和南排土场 (图 1)。



注: 拟合方程中 x 代表年份, y_1 、 y_2 、 y_3 分别代表开采区、研究区和复垦区的植被覆盖度。

Note: x represents the year, and y_1 , y_2 , y_3 represent VFC values for mining area, study area and reclamation area, respectively.

图 4 不同区域植被覆盖度随时间变化图

Fig.4 Change map of VFC with time for different regions

图 4 显示, 随着时间的推移, 研究区植被覆盖度均值整体呈现小幅增加趋势, 且增加幅度逐年加大; 相应年份的植被覆盖度标准差也呈现较为相似的规律。由于长期受到气候和自然灾害的影响, 研究区沙化严重, 天然植被逐渐稀疏, 草原生态屏障作用日渐削弱, 研究区 2000 年本底植被覆盖度较差, 呈裸露地表状态 (植被覆盖度等于或接近 0)。但是, 随着《锡林浩特市城郊和周边地区禁牧管理办法》(2001) 的颁布、国家和自治区

治理工程 (如生态移民、退耕还林、舍饲禁牧等) 的逐步推进, 研究区植被覆盖度整体上有了较大幅度的提高。从 2000 至 2009 年的十年间, 研究区内植被覆盖度年均增加 0.00132 (图 4)。2009 至 2011 年, 随着西一、西二、东三矿已大规模投入生产, 覆盖度年均减少 0.0051, 业已投产的露天采区以及周边区域内植被覆盖度减少趋势十分明显 (3 a 内下降了近 0.4); 在矿山生产建设、矿区复垦等多重因素的影响, 2011 至 2013 年间植被覆盖度年均增加 0.045, 远高于研究区年平均增加值, 这也在一定程度上表明复垦活动能在一定程度上提高区域植被覆盖度。随着时间的推移, 植被覆盖度高低分化越明显, 离散程度越大, 标准差越大。

开采区在矿山生产建设前后变化比较明显。在未生产前, 开采区植被覆盖度总体较高, 达到 0.50 以上 (图 4), 属于 IV 等 (中等覆被); 自 2009 年开始, 开采区植被覆盖度整体呈大幅下降趋势, 年均下降 0.0197, 至 2013 年, 开采区植被覆盖度已低至 0.42, 露天煤矿开采和固体废弃物的堆放将彻底改变地表物质组成, 地表植被将荡然无存, 随着矿山生产的推进, 东二矿及其周边影响区植被覆盖度趋低, 且趋于一致。而对应的标准差也表现出相同的特征, 2013 年标准差为 0.020, 低于同样存在矿山开采的 2009 和 2011 年。

复垦区包括东排土场、南排土场和西一内排土场。东排土场于 2006 年开始复垦, 南排土场和西一内排土场于 2012 年开始复垦。2000 至 2009 年, 复垦区植被覆盖度处于较低水平, 但整体呈增加趋势, 年均增加 0.0062; 而到 2011 年, 由于东排复垦后退化, 南排、西内排受损扩大以及矿山建设活动的推进等原因, 植被覆盖度又降至 0.12。随着 3 个区域的复垦工作的完成, 2013 年植被覆盖度接近 80%。无论是多个区域组合复垦区, 还是单一排土场复垦区 (如复垦工作较早的东排土场), 复垦植被恢复将经历一个“高 (复垦前 3 a) — 低 (复垦 3~6 a) — 高 (6 a 后)” 的周期循环, 因此, 为确保复垦恢复植被的可持续性和稳定性, 在周边受损干扰同时存在的情况下, 建议干旱草原区复垦管护期应尽量保证在 6a 以上。对比复垦区和同时间其他未受矿山生产建设影响区域植被情况可知, 研究区复垦标准较高。

采用公式 (4) 计算获取不同格点一元线性回归斜率 θ_{slope} 和对应的相关系数 r (图 4)。

图 5 显示, 研究区植被覆盖度呈增加和减少的区域面积比为 2:3, θ_{slope} 普遍在 0.02 以上。从斜率正负上看, 区域以正向变化为主 (图 5)。然而, 显著性 t 检验结果显示, 相关系数在 -0.9266~0.4805 之间, θ_{slope} 正值范围相关性并不显著, 而负值部分范围相关性显著。本文根据 t 检验结果, 将变化趋势显著性分成 4 个等级: $\theta_{\text{slope}} < 0$, $0.01 < P < 0.025$, 处于极显著与显著之间, 本文将其命名为“较极显著减少”; $\theta_{\text{slope}} < 0$, $0.025 < P < 0.05$, 显著减少; $\theta_{\text{slope}} < 0$, $0.05 < P < 0.1$, 处于显著和不显著之间, 本文将其命名为“较显著减少”; $P > 0.1$, 无论正负, 一概为不显著变化。相关系数 r 在 -0.9266~-0.895 的范围内, 通过

了 0.025 显著性检验, 植被受损最为严重, 属于较极显著性变化, 植被覆盖度减少的幅度为 $-0.084\sim-0.069$, 几乎都分布在已开采的西二、西一和东二露天采场及其固体废弃物堆场、工业场地和场外道路等, 面积约为 4.85 km^2 , 占研究区总面积的 1.27%; 相关系数 r 在 $-0.895\sim-0.834$ 之间的范围通过了 0.05 显著性检验, 植被受损较为严重, 植被覆盖度年均减少约在 $-0.069\sim-0.054$ 之间, 其面积为 2.76 km^2 , 占总面积的 0.73%, 主要分布在露天煤矿开采区、生产区以及周边区域 1.5 km 左右范围内, 影响范围比干旱荒漠区要小, 姚峰^[12]等研究表明干旱荒漠区采矿影响范围为平均 3.2 km , 这可能是由于本研究区自然条件相对较好, 且在损毁的同时, 区域的生态建设工程也在同步进行。相关系数 r 在 $-0.834\sim-0.736$, 通过 0.10 显著性检验, 植被覆盖度变化约在 $-0.054\sim-0.032$ 之间, 面积为 3.82 km^2 , 占研究区总面积的 1.00%。其他均未通过显著性检验。通过对比斜率 θ_{slope} 与相关系数 r 可知, 相比于促进研究区植被覆盖度提升的因素, 矿山生产建设工作对植被覆盖度的影响更大。

研究区年际间植被覆盖度标准差 (SD) 处于 $0\sim0.49$ 之间 (图 5), 本文将其划分成低幅度 ($0\sim0.15$)、中幅度 ($0.15\sim0.3$) 和高幅度 ($0.3\sim0.49$) 3 个等级, 三者的面积分别为 135.23 、 212.00 和 34.56 km^2 , 以中低幅度变化为主。这和斜率的分析结果也是一致的 (图 5), 斜率绝对值的大小代表幅度情况, 绝对值越大, 植被覆盖度变化的幅度越大, 反之则增加幅度越小。根据露天煤矿开采时序可知, 土层剥离至露天采场开采境界后, 采区范围植被几乎不复存在, 后期的开采将不会对植被覆盖度产生多大影响, 均处于极度退化状态^[36], 因此, 对于开采时间较长的西一、西二露天矿而言, 其标准差变化较小; 研究区内高幅度变化的主要集中 3 个区域, 各自成因也不尽相同。1) 东二露天矿及其周边影响区、西二露天矿新建辅助设施。自投产以来, 周围区域植被状况正逐渐趋于恶化, 尤其是自然生境较好的植被恶化趋势更为明显, 植被受损速度越快。2) 南排土场和西一内排土场复垦区。相比于东排土场, 这两个区域复垦较晚, 复垦前后植被覆盖度变化较大; 3) 东二

矿和东一矿交界处。该区域基年植被覆盖度较低, 沙化严重, 但其在草原生态建设的影响下, 变化幅度较大。

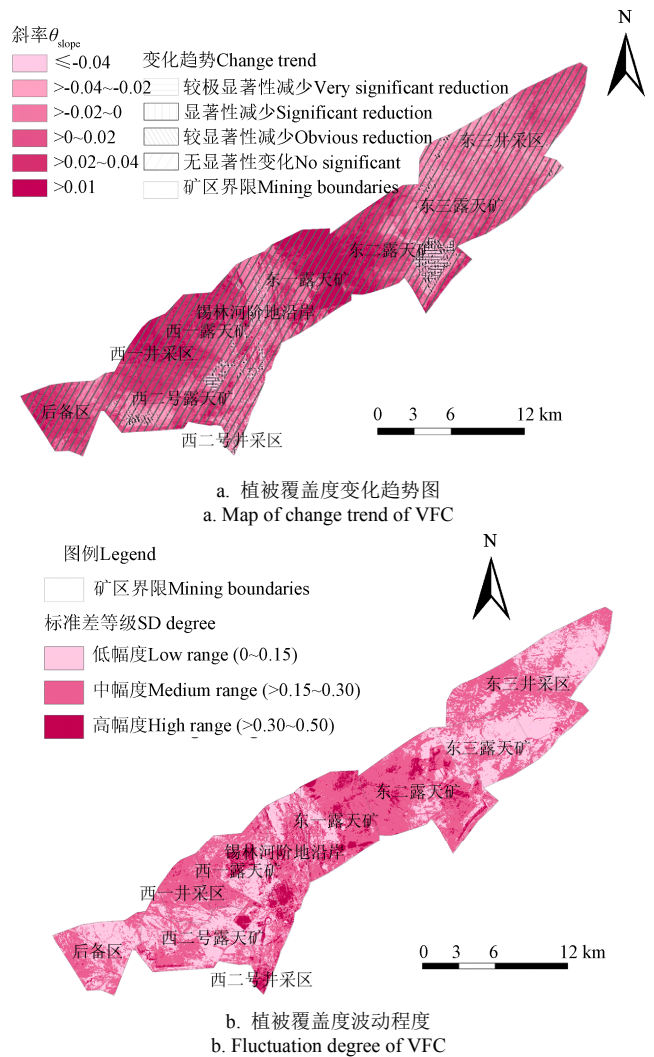


图 5 研究区植被覆盖度变化趋势和波动程度图
Fig.5 Map of change trend and fluctuation degree of VFC in study area

3. 2. 2 植被覆盖度等级变化及其驱动因素分析

统计不同年份不同等级植被覆盖度面积及相关衡量变化的参数 (表 2)。计算相互间转换矩阵 (表 3)。

表 2 研究区不同年份植被覆盖度等级变化
Table 2 Degree change of VFC for different years in study area

等级 Degree	不同年份等级面积 Area of grade in different years/ km^2				平均面积百分比 Average area percentage/%	标准差 Standard deviation	变异系数 CV/%
	2000 年	2009 年	2011 年	2013 年			
I	78.34	32.32	52.15	34.84	12.94	18.37	37.17
II	66.43	53.96	43.55	16.51	11.82	18.40	40.78
III	58.97	130.82	81.91	34.46	20.05	35.55	46.45
IV	121.93	123.69	149.50	236.54	41.36	46.69	29.57
V	56.11	40.99	54.68	59.44	13.83	7.03	13.32

表 2 显示, 研究区植被覆盖度以中 (IV 等)、中低 (III 等) 为主, 按多年均值计, 分别占区域总面积的 41.36% 和 20.05%, 两者之和占研究区总面积的 80% 以上, 其他 3 个等级占研究区总面积的比例相差不大。从不同植被覆盖度等级年际变化上看, 中、中低覆盖度 (IV、III 等)

基本呈上升趋势, 特别是 IV 等上升幅度明显, 低覆盖度 (II) 呈下降趋势, 极低和高覆盖度变化不明显。基年 (2000 年) 植被覆盖度较低, I 等面积达到 78.34 km^2 , 为研究时段的最高值。到 2009 年, 未受矿山生产建设活动影响的西一井采区、西二和东一露天矿整体提高了 1~

4 个等级不等。随着时间进一步推移, 极低等 (I 等) 植被覆盖度的区域呈增加趋势, 2011 年达到 52.15 km²。

表 2 显示, 植被覆盖度各等级面积相对波动程度呈现“中间大、两头小”的格局, 中间的 III 级和 II 级波动程度最大, 植被受损最为严重。I 等波动程度也较大 (CV=37.17%), 矿山生产建设活动是影响其变动的主要原因。

表 3 研究区植被覆盖度等级转换矩阵
Table 3 Degree transformation matrix of VFC in study area

等别 Degree		2013 年					总面积 Total area/km ²	总转出面积 Total transfer area/km ²	复垦转出面积 Reclamation transfer area/km ²
		I	II	III	IV	V			
2000 年	I	6.32	2.71	6.03	50.01	13.27	78.34	72.02	5.70
	II	7.45	3.24	5.25	41.43	9.06	66.43	63.19	0.62
	III	7.76	3.77	4.68	36.08	6.68	58.97	54.29	0.33
	IV	10.84	5.61	13.29	78.44	13.76	121.94	43.50	0.49
	V	2.47	1.18	5.21	30.58	16.67	56.11	39.44	0.16
总面积 Total area/km ²		34.84	16.51	34.46	236.54	59.44	381.78		
总转入面积 Total transfer area/km ²		28.52	13.27	29.78	158.10	42.77	272.44		
受损转入面积 Impaired area/km ²		24.99	8.49	3.84	1.94	1.84			
占总转入比例 Proportion/%		87.62	63.98	12.89	1.23	4.30			

表 3 显示, 基末年总转入转出量为 272.44 km², 占区域总面积的 71.36%, 植被覆盖度等级转换较为频繁。转入 I 等植被覆盖度的面积达到 28.74 km², I 等有 71.92 km² 向 II、III、IV 等植被转移, 转入 I 等的主要为 IV 等, 下降 3 个等级, 降幅较大。虽然 I 等植被覆盖度转出量与转入量之比为 5:2, 但在转入的 I 等植被覆盖度中有 24.99 km² 是由采矿受损转入的, 占总转入量将近 90%。转入 V 等植被覆盖度的面积 42.77 km², 转出 39.44 km², 转入转出较为接近, 转出的区域主要为新增的露天采区、排土场以及服务于矿山生产的辅助设施区, 转入的区域包括东一、东二露天矿交界处、西一井采区北部、西一内排土场复垦区。通过复垦植被恢复转入 IV、V 等的占到总复垦区 61.77%, 这也进一步的验证了研究区复垦质量相对较高。

4 讨 论

研究区植被覆盖度整体呈现东北、阶地范围高, 西南低的总体特征。这样的空间分布格局是由自然因素与人为因素共同决定的, 通过实地调查发现, 不同的水资源 (地下水埋深, 离地表水系的远近) 分布格局、人类活动的频繁程度与该区域植被覆盖度存在较强的空间相关性。人为因素包括正向因素 (休牧、退耕还林、舍饲禁牧等草原生态的建设政策和工作、矿山复垦) 和负向因素 (煤矿开采、固体废弃物的堆放、粉尘等矿山生产建设人为因素、沙化等) (图 2 和图 3)。这和全占军等^[35]的研究成果也是一致。

从驱动因素上看, 本文分析时段包括了研究区“未开采建设+草原生态建设滞后、小范围开采建设+草原生态建设逐步开展+局部复垦、大范围开采建设+持续生态建设+局部复垦”3 个阶段, 若无后续阶段的采矿活动, 在持续的生态建设下, 研究区植被覆盖度应随着时间的变化整体呈十分明显的增加态势。然而, 实际情况并非如此, 在耦合了采矿、复垦活动等驱动因素后, 研究区

植被覆盖度随时间变化呈现先降后升的趋势, 波动较大。通过斜率 θ_{slope} 、相关系数 r 的显著性和标准差分析可以得知, 露天煤矿采复活动是研究区植被受损的重要因素之一, 植被覆盖度降低与煤矿开采规模的不断扩大、人为活动随之增强有密切联系, 如采区和排土场面积和规模的增加、运输活动对周围植被的影响、人为生活垃圾的丢弃等。而生活区小范围的植被覆盖度有小幅的增加, 是由于生活区人工植被的种植, 这和李长春等^[37]在干旱荒漠区研究成果也是相似。针对采矿和复垦活动复合下的露天煤矿区, 提升区域内的植被覆盖度需从减小社会压力和提高生态恢复力两方面入手。减少社会压力方面应考虑煤炭开采工艺, 如分层、限面积开采; 对于固体废弃物堆放, 应尽量考虑采场内排; 对于工业场地等辅助设施应及时进行绿化, 增加地表覆盖度。从提高生态恢复力角度看, 增加复垦治理投入, 提高区域植被恢复系数。

本文基于遥感和调查数据, 借助于回归斜率、标准差和基末年等级转换矩阵技术手段与方法, 通过对比分析研究区、采矿区、复垦区植被覆盖度时空演变差异, 重点研究了采复联动下的植被覆盖度时空演变规律以及采复活动对植被覆盖度演变的影响。虽然考虑了矿区所在区域生态建设、矿区复垦和开采等正向或负向因素耦合影响, 但在系统化关系方面尚有待进一步深入分析研究。

5 结 论

基于多时相的 Landsat TM 卫星遥感影像数据, 本文对草原区露天煤矿采复联动过程中植被覆盖度时空演变规律及其驱动因素进行分析。获得以下主要结论:

1) 不同年份间植被覆盖度和等级空间分布特征整体具有一定相似性, 以锡林河阶地沿岸为界, 呈现东北、阶地范围高, 西南低的总体特征。矿山采复活动在一定程度上打破了区域植被覆盖时空演变格局。

2) 露天采区、排土场以及周边区域 1.5 km 影响区范围植被覆盖度呈显著下降趋势, 且随着时间推移, 趋于一致。建议研究区复垦管护期限应保证在 6 a 以上。研究区复垦质量相对较高。

3) 研究区植被覆盖度以中 (IV 等)、中低 (III 等) 为主, 按多年均值计算, 两者之和占研究区总面积的 80% 以上; 研究区植被覆盖度呈增加和减少的区域面积比为 2:3, 相关系数在 $-0.9266 \sim 0.4805$ 之间, 斜率正值范围内相关性并不显著, 而负值部分范围相关性显著。

4) 区域内 III 级和 II 级的植被覆盖度面积波动程度最大, 受损最严重。70% 以上区域植被覆盖度等级发生转换, 较为频繁, 转入 I 等植被覆盖度中的 90% 是由采矿受损转入的。

[参 考 文 献]

- [1] 黄元仿, 张世文, 张立平, 等. 露天煤矿土地复垦生物多样性保护与恢复研究进展[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 72—82.
Huang Yuanfang, Zhang Shiwen, Zhang Liping, et al. Research progress on conservation and restoration of biodiversity in land reclamation of opencast coal mine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 72—82. (in Chinese with English abstract)
- [2] 罗明. 土地复垦潜力调查评价研究[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2013.
- [3] Monjezi M, Shahriar K, Dehghani H, et al. Environmental impact assessment of open pit mining in Iran[J]. Environmental Geology, 2009, 58(1): 205—216.
- [4] Antwi E K, Wiegand G. Standards and indicators for monitoring impact of disturbance on biodiversity in a post-mining area using GIS[M]//Schmidt M, Glasson J, Emmelin L, et al. Standards and Thresholds for Impact Assessment. Berlin: Springer, 2008.
- [5] Charou E, Stefouli M, Dimitrakopoulos D, et al. Using remote sensing to assess impact of mining activities on land and water resources[J]. Mine Water and the Environment, 2009, 29(1): 45—52.
- [6] Horler D H N, Dockray M, Barber J. The red edge of plant leaf reflectance[J]. International Journal of Remote Sensing, 1983, 4(2): 273—288.
- [7] Katpatal Y B, Patil S A. Spatial analysis on impacts of mining activities leading to flood disaster in the Erai watershed, India[J]. Journal of Flood Risk Management, 2010, 3(1): 80—87.
- [8] Erener A. Remote sensing of vegetation health for reclaimed areas of Seyitomer opencast coal mine[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 86: 20—26.
- [9] Latifovic R, Fytas K, Chen J, et al. Assessing land cover change resulting from large surface mining development[J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2005, 7(1): 29—48.
- [10] Mcgwire K, Minor T, Fenstermaker L. Hyperspectral mixture modeling for quantifying sparse vegetation cover in arid environments[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 27(3): 360—374.
- [11] Wolfgang B, Rosangela S, Edgar P, et al. Advanced imaging techniques for study of plant growth in coal mining area[J]. Trends in Plant Science, 2013, 3: 13—18.
- [12] 姚峰, 古丽·力帕尔, 包安明, 等. 基于遥感技术的干旱荒漠区露天煤矿植被群落受损评估[J]. 中国环境科学, 2013, 33(4): 707—713.
Yao Feng, Guli Jiapaer, Bao Anming, et al. Damage assessment of the vegetable types based on remote sensing in the open coalmine of arid desert area[J]. China Environmental Science, 2013, 33(4): 707—713. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王金满, 张萌, 白中科, 等. 黄土区露天煤矿排土场重构土壤颗粒组成的多重分形特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4): 230—238.
Wang Jinman, Zhang Meng, Bai Zhongke, et al. Multi-fractal characteristics of reconstructed soil particle in opencast coal mine dump in loess area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(4): 230—238. (in Chinese with English abstract)
- [14] 毕如田, 白中科, 李华, 等. 基于 3S 技术的大型露天矿区复垦地景观变化分析[J]. 煤炭学报, 2007, 32(11): 1157—1161.
Bi Rutian, Bai Zhongke, Li Hua, et al. Landscape change analysis of reclamation land in open cast coal mine based on 3S technology[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(11): 1157—1161. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张灵, 白中科, 景明, 等. 黄土区大型露天煤矿复垦排土场植被恢复立地类型划分—以安太堡露天煤矿为例[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6): 54—60.
Zhang Ling, Bai Zhongke, Jing Ming, et al. Type classification for vegetation restoration on dump of large opencast coal-mine in loess area-taking Antaibao opencast coal-mine as an example[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(6): 54—60. (in Chinese with English abstract)
- [16] 黄丹, 刘庆生, 刘高焕. 黑岱沟煤矿生态修复遥感监测及效果评价[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(1): 69—74.
Huang Dan, Liu Qingsheng, Liu Gaohuan. Remote sensing monitoring and effect evaluation on ecological restoration of Heidaigou coal mining[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(1): 69—74. (in Chinese with English abstract)
- [17] 殷贺, 李正国, 王仰麟, 等. 基于时间序列植被特征的内蒙古荒漠化评价[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 653—661.
Yin He, Li Zhenguo, Wang Yanglin, et al. Assessment of desertification using time series analysis of hyper-temporal vegetation indicator in Inner Mongolia[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 653—661. (in Chinese with English abstract)
- [18] Qi J, Marsett R C, Moran M S, et al. Spatial and temporal dynamics of vegetation in the San Pedro River basin area[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2000, 105(1/2/3): 55—68.

- [19] 包妮沙, 白中科, 叶宝莹. 基于 RS 和 Markov 链的平朔矿区土地利用变化分析及预测[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2008, 42(4): 654—658, 664.
Bao Nisha, Bai Zhongke, Ye Baoying. Prediction on land use change in Pingshuo opencast mine based on Remote Sensing and Markov Model[J]. Journal of Central China Normal University: Natural Science, 2008, 42(4): 654—658, 664. (in Chinese with English abstract)
- [20] 毕如田, 白中科. 基于遥感影像的露天煤矿区土地特征信息及分类研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 77—82.
Bi Rutian, Bai Zhongke. Land characteristic information and classification in opencast coal mine based on remote sensing images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(2): 77—82. (in Chinese with English abstract)
- [21] 陈华丽, 陈刚, 李敬兰, 等. 湖北大冶矿区生态环境动态遥感监测[J]. 资源科学, 2004, 26(5): 132—138.
Chen Huali, Chen Gang, Li Jinglan, et al. RS Based Ecological environmental dynamic monitoring in mining area[J]. Resources science, 2004, 26(5): 132—138. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张召, 白中科, 贺振伟, 等. 基于 RS 与 GIS 的平朔露天矿区土地利用类型与碳汇量的动态变化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 230—236.
Zhang Zhao, Bai Zhongke, He Zhenwei, et al. Dynamic changes of land use type and carbon sinks based RS and GIS in Pingshuo opencast coal mine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(3): 230—236. (in Chinese with English abstract)
- [23] 李小文. 遥感原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [24] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 80(1): 76—87.
- [25] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1255—1268.
Mu Shaojie, Li Jianlong, Chen Yizhao, et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in inner mongolia during 2001—2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(9): 1255—1268. (in Chinese with English abstract)
- [26] Jiang Z, Huete A R, Chen J, et al. Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 101: 366—378.
- [27] Zeng X, Rao P. Interannual variability and decadal trend of global fractional vegetation cover from 1982 to 2000[J]. Journal of Applied Meteorology, 2003, 42: 1525—1530.
- [28] 乔玉良, 费燕明, 王栋. 应用卫星遥感进行生态环境动态监测[J]. 航天返回与遥感, 2009, 30(3): 50—57.
Qiao Yuliang, Fei Yanming, Wang Dong. Dynamic monitoring of ecological environment based on remote sensing and GIS[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2009, 30(3): 50—57. (in Chinese with English abstract)
- [29] 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. 资源科学, 2004, 26(4): 153—159.
Li Miaomiao, Wu Bingfang, Yan Changzhen, et al. Estimation of vegetation fraction in the upper basin of Miyun Reservoir by remote sensing[J]. Resources Science, 2004, 26(4): 153—159. (in Chinese with English abstract).
- [30] Rundquist B C. The influence of canopy green vegetation fraction on spectral measurements over native tallgrass prairie[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(1): 129—135.
- [31] 任健美, 尤莉, 高建峰, 等. 鄂尔多斯高原近 40 a 气候变化研究[J]. 中国沙漠, 2006, 25(6): 874—879.
Ren Jiangmei, You Li, Gao Jianfeng, et al. Study on climatic change of last 40 years on Erdos Plateau[J]. Journal of Desert Research, 2006, 25(6): 874—879. (in Chinese with English abstract).
- [32] 何彬方, 冯妍, 吴文玉, 等. 安徽省近十年植被指数时空变化特征[J]. 生态学杂志, 2010, 29(10): 1912—1918.
He Bingfang, Feng Yan, Wu Wenyu, et al. Recent ten years spatiotemporal variation characteristics of vegetation index in Anhui Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(10): 1912—1918. (in Chinese with English abstract).
- [33] 辜智慧, 陈晋, 史培军, 等. 锡林郭勒草原 1983—1999 年 NDVI 逐旬变化量与气象因子的相关分析[J]. 植物生态学报, 2005, 29(5): 753—765.
Gu Zhihui, Chen Jin, Shi Peijun, et al. Correlation analysis of NDVI difference series and climate variables in Xilinggole steppe from 1983 to 1999[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29(5): 753—765. (in Chinese with English abstract)
- [34] 毛飞, 孙涵, 张艳红, 等. 近 20 年藏北草地地表参数动态变化研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 166—171.
Mao Fei, Sun Han, Zhang Yanhong, et al. Dynamic changes of land surface variables on grassland in Northern Tibet in recent 20 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(4): 166—171. (in Chinese with English abstract)
- [35] 全占军, 李远, 李俊生, 等. 采煤矿区的生态脆弱性——以内蒙古锡林郭勒草原胜利煤田为例[J]. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1729—1738.
Quan Zhanjun, Li Yuan, Li Junsheng, et al. Ecological vulnerability of coal mining area: A case study of Shengli coal field in Xilinguole of Inner Mongolia, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(6): 1729—1738. (in Chinese with English abstract)
- [36] 李晋川, 白中科. 露天煤矿土地复垦与生态重建[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [37] 李长春, 姚峰, 齐修东, 等. 新疆准东煤田五彩湾露天矿区植被受损分析[J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2015, 34(1): 124—128.
Li Chuangchun, Yaofeng, Qi Xiudong, et al. Analysis of vegetation damage in area of Xinjiang Zhundong Wucuiwan open coalmine[J]. Journal of HPU: Nature Science, 2015, 34(1): 124—128. (in Chinese with English abstract)

Analysis of spatio-temporal evolution and driving factors of vegetation fraction for opencast coal mine in grassland area

Zhang Shiwen¹, Ning Huirong², Xu Daliang¹, Ye Huichun³, Zheng Yin¹, Zhang Hongyan⁴, Huang Yuanfang^{5*}

(1. College of Earth and Environmental Sciences, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. School of Economics and Management, Anhui Agricultural University, Hefei 230036; 3. Institute of Remote Sensing and Digital Earth Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 4. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 5. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Based on Landsat TM satellite remote sensing image data, the paper utilized the vegetation index and vegetation fraction to analyze their spatio-temporal evolution and its driving factors. Spatial heterogeneity and its driving mechanism of vegetation fraction were analyzed under the linkage of mining and reclamation. Based on regression coefficient, standard deviation, gradation conversion matrix, and so on, we revealed the response of the vegetation cover to the mining and reclamation activities with time through the analyses of the trend and fluctuation of vegetation coverage in the study area, the mining area and the reclamation area. The results showed that the vegetation fraction and its grade in different years had some similarity, and the pattern of spatio-temporal evolution was broken by mining and reclamation activities in open pit mines to some extent. The vegetation coverage in the study area was mainly the middle (Grade IV) and the middle-low (Grade III) level, and according to the average of many years, both of them accounted for more than 80% of the total area of the study area. The ratio of the area with increased vegetation cover degree to the area with decreased vegetation cover degree was 2:3, and correlation coefficient was between -0.9266 and 0.4805. The correlation was not significant in the range of positive value, but was significant in the negative part. Correlation coefficient from -0.9266 to -0.895 was through the significance test of 0.025, and vegetation damage was the most severe, which belonged to a very significant change, and almost all were distributed in the exploited Xi'er, Xiyi and Dong'er open-pit stope and their solid waste yard, industrial sites and road with an area of about 4.85 km². The standard deviation (SD) of inter-annual vegetation fraction for the study area was in 0-0.49. The vegetation fraction of open pit area, dump and surrounding areas with a range of 1.5 km was significantly decreased, and had gradually converged. Reclamation revegetation would experience a "high-low-high" cycle in the study area, and according to the changes of vegetation reclamation, protection period must ensure more than 6 years in semiarid grassland. In the study area, the land reclamation standard was higher than the surrounding area, and the recovery effect was better. More than 70% of areas had the transition of vegetation fraction, and the transition was relatively frequent. The fluctuation degree for the area of Grade III and II was the largest, which were the most damaged. There was 90 percent of the area of Grade I which was transferred by the mining activities. To enhance the vegetation coverage in the study area, it was required to reduce the social pressure and improve the ecological resilience. To reduce social pressure, we should consider the coal mining and solid waste stacking technology, with minimal impact on the ecological process in the form of a layered, limited mining area and stope arrangement for solid waste. The improvement of ecological resilience should increase the input of land reclamation, and steadily improve the coefficient of vegetation restoration in the mining area. The research results will provide information support for the ecological environmental protection and decision making, restoration and management in the area of open pit coal mine.

Keywords: remote sensing; coal mines; reclamation; vegetation fraction; spatio-temporal evolution; driving factors