

基于遥感生态指数的神东矿区生态环境变化监测

岳辉, 刘英, 朱蓉

(西安科技大学 测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054)

摘要: [目的] 对矿区生态环境变化进行检测分析, 为相关环境治理措施的制定提供科学依据。[方法] 以神东矿区为研究对象, 基于 1989—2016 年的 Landsat 影像, 采用遥感生态指数(RSEI)动态监测神东矿区及各个主要矿井生态环境时空动态演变特征。[结果] ①矿区尺度上, 神东矿区的生态环境质量在逐渐提升, 2015 年的中等及其以上等级所占面积比例为 59.2%, 比 1989 年增长了 23.7%; ②矿井尺度上, 不同矿井的生态环境质量存在差异, 榆家梁矿井整体生态环境质量最优, 乌兰木伦矿井的采区和锦界矿井的非采区生态环境质量最差, 相较于采区而言, 非采区的生态环境较好。[结论] 神东矿区各矿井的 RSEI 均值总体呈增加趋势, 表明矿区生态环境质量逐渐变好。

关键词: 遥感生态指数; 神东矿区; 生态环境; 矿井尺度; 矿区尺度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)02-0101-07

中图分类号: X87, X171.1

文献参数: 岳辉, 刘英, 朱蓉. 基于遥感生态指数的神东矿区生态环境变化监测[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2):101-107. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.02.016; Yue Hui, Liu Ying, Zhu Rong. Monitoring ecological environment change based on remote sensing ecological index in Shendong mining area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(2):101-107.

Monitoring Ecological Environment Change Based on Remote Sensing Ecological Index in Shendong Mining Area

Yue Hui, Liu Ying, Zhu Rong

(College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: [Objective] To provide scientific basis for the formulation of relevant environmental control measures, this study investigated the ecological environment changes in mining area. [Methods] Based on Landsat images from 1989 to 2016, remote sensing ecological index(RSEI) was used to dynamically monitor the spatiotemporal variation characteristics in the Shendong mining area and its main mines. [Results] ① In mining area scale, the ecological environment quality improve gradually; the area with the middle and above level quality in 2015 accounted for 59.2% of the study area, and increased by 23.7% compared with the area in 1989. ② In mine scale, ecological environment qualities had differences among the different mines. The ecological environment quality in the Yujialiang mine was the best, while that in the Ulan Mulun mine and JinJie mine without mining were the worst. Compared with the ecological environment in the mining area, that in the area without mining was better. [Conclusion] The mean RSEI presented an overall increasing trend in each mine, which indicated that the ecological environmental quality became better gradually.

Keywords: remote sensing ecological index(RESI); Shendong mining area; ecological environment; mine scale; mining area scale

神东矿区是中国西北地区最大的煤矿基地, 矿区煤炭资源丰富^[1]。一方面, 煤炭产业的发展带动陕北地区的经济发展, 提高当地居民收入与生活水平。另一方面, 由于煤炭是不可再生资源, 当矿区的煤炭开采力度不断增大时, 过度的开采将会导致区域土地荒

漠化加重、土壤肥力下降, 土地沉陷等致使当地生态环境日益恶化^[2-3]。因此, 利用遥感技术对神东矿区生态环境变化进行监测与评价研究刻不容缓。20 世纪 60 年代, 国外就开展了利用遥感技术对矿产资源开采状况及环境监测的研究^[4]。在矿产资源开发造

收稿日期: 2018-10-16

修回日期: 2018-11-01

资助项目: 国家自然科学基金项目“荒漠化矿区土壤湿度多分辨率时空演变机理研究”(41401496)

第一作者: 岳辉(1983—), 男(汉族), 山东省淄博市人, 博士, 讲师, 主要从事环境遥感方面的研究。E-mail: 13720559861@163.com。

通讯作者: 刘英(1982—), 女(汉族), 山东省滨州市人, 博士, 副教授, 主要从事矿区环境遥感方面的研究。E-mail: liuying712100@163.com。

成的生态环境影响中,主要研究方面从最初的矿区水环境、土壤污染等逐步扩展到对研究区地表水、土壤和植物等要素的调查,以及综合生态风险评价^[5-8]。国内在生态环境评价方面虽起步较晚但发展迅速,特别是在遥感生态评价指数的提出和应用上。2006年,国家环境保护部以行业标准的形式颁发了《生态环境状况评价技术规范》,推出了主要基于遥感技术的生态环境状况指数(ecological environment index, EI),旨在对我国县级以上生态环境提供一种年度综合评价标准。已在国内得到广泛的应用,但该指数在具体应用过程中也发现了不少问题,如权重的合理性、归一化系数的设定、指标的易获取性等^[9-11]。针对 EI 存在的问题,徐涵秋^[12-13]提出了一个完全基于遥感信息、能够集成多种指标因素的遥感综合生态指数(remote sensing ecology index, RSEI)。通过遥感生态指数中的各种指标成分如:湿度指标(WET)、干度指标(NDSI)、绿度指标(NDVI)和热度指标(LST)的计算,以及综合分析并合成这几个指标,采用主成分分析法,根据各个生态因子对各主分量的贡献来综合分析研究区的生态环境状况。RESI 不仅可用于水土流失区生态变化遥感监测^[14],又可以应用于城市生态环境遥感综合评价,而且可用于矿区生态环境监测。继徐涵秋之后,国内学者^[15-17]采用 RSEI 指数对杭州市、渭南市、常宁市等城市的生态环境质量评价进行了大量研究。

生态环境是近年来人们越来越关注的一个话题,对于生态环境的变化进行监测与评价是一个重大而有意义的研究。在此基础上进行城市生态环境的变化分析较为常见,但是利用该指数进行矿区生态环境质量监测的研究并不多见。因此,本文以神东矿区为研究对象,利用 RSEI 指数对矿区生态环境进行动态监测,旨在为神东矿区的生态环境参数服务,为建设高效的环境保护政策体系提供决策参考,以及为政府部门关于治理环境问题提供科学依据。

1 数据与研究区域

1.1 研究区概况

神东矿区是神府东胜矿区的简称,位于我国西北地区毛乌素沙漠南侧与黄土高原北端的过渡地带,横跨陕西省神木县、府谷县、内蒙古自治区东胜市,地理位置位于北纬 38°56′—39°49′,东经 108°58′—110°25′之间,南北长约 80 km,东西宽约 15~55 km,是我国典型的干旱、半干旱荒漠化矿区。矿区北部与东北部为黄土高原丘陵区,地形较为破碎。近年来,由于地下开采过于严重,导致矿区地下水位下降、土壤肥力

下降、水资源污染、土壤水分蒸发强烈等一系列环境问题出现,使得原本脆弱的生态环境进一步恶化。

1.2 数据来源与处理

本文所用的数据为神东矿区(行列号 127,33) 1989—2016 年的 TM,ETM⁺ 和 OLI 遥感影像,通过“地理空间数据云”和“美国地质调查局 USGS”(http:// glovis. usgs. gov/) 进行免费数据的获取。遥感影像时间基本集中在 9—10 月份,影像晴空无云,质量较好。数据预处理包括辐射定标、大气校正和影像配准等,使配准的均方根误差控制在 0.5 个像元以内。

2 研究方法

2.1 RSEI 指数的构建

构建湿度、绿度、干度、热度总共 4 种指数组成的 RSEI 指标,利用主成分分析进一步的监测神东矿区的生态环境质量,即:

$$RSEI=f(EV, Eet, LST, NDSI) \quad (1)$$

式中: FV, WET, LST, NDSI——绿度指标、湿度指标、热度指标和干度指标。

2.2 湿度指标

遥感缨帽变换的湿度、绿度、亮度分量已被大量应用于生态环境质量评价,其中湿度分量对土壤和植被的湿度有较好的反映。以 Landsat 5TM 为例,反射率数据的湿度指标计算公式为^[18]:

$$WET_{TM}=0.031\ 5\times R_{Blue}+0.202\ 1\times R_{Green}+0.310\ 2\times R_{Red}+0.159\ 4\times R_{Nir}-0.680\ 6\times R_{Swir1}-0.610\ 9\times R_{Swir2} \quad (2)$$

式中: R_{Blue} , R_{Green} , R_{Red} , R_{Nir} , R_{Swir1} , R_{Swir2} ——TM, ETM⁺ 和 OLI 影像的蓝、绿、红、近红外、短波红外 1 和短波红外 2 波段的反射率数据。

2.3 绿度指标

归一化植被指数(NDVI)能够反映植物生物量、叶面积指数以及植被覆盖度,是使用最广泛的植被指数。因此选用 NDVI 来计算植被覆盖度 F_v ,并用其来代替绿度指标,具体表达式为^[19]:

$$NDVI=(\rho_{NIR}-\rho_{Red})/(\rho_{NIR}+\rho_{Red}) \quad (3)$$

式中: ρ_{NIR} , ρ_{Red} ——TM 和 OLI 近红外和红波段的反射率。

$$F_v=(NDVI-NDVI_{min})/(NDVI_{max}-NDVI_{min}) \quad (4)$$

其中, $NDVI_{max}$ 和 $NDVI_{min}$ 一般取一定置信度范围内的 NDVI 的最大和最小值。

2.4 热度指标

采用地表温度代表热度,先用 Landsat 用户手册的模型计算出亮温 T ,然后对其进行比辐射率校正,

获得地表温度 LST^[20]:

$$Li = gain \cdot DN + bias \quad (5)$$

$$T = k_2 / \ln(k_1 / Li + 1) \quad (6)$$

式中:Li——TM/ETM⁺/OLI 热红外波段的像元在传感器处的辐射值;DN——像元灰度值,gain,bias——热红外波段的增益值与偏置值,可以从影像的头文件获得; T ——传感器处亮度温度值; K_1 , K_2 ——定标参数。

经过公式(6)计算的温度 T 必须进行比辐射率

式中:SI= $[(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) - (\rho_{Blue} + \rho_{NIR})] / [(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) + (\rho_{Blue} + \rho_{NIR})]$

$$IBI = \{2\rho_{SEIR1} / (\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) - [\rho_{NIR} / (\rho_{NIR} + \rho_{Red}) + \rho_{Green} / (\rho_{Green} + \rho_{SWIR1})]\}$$

$$\{2\rho_{SWIR1} / (\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) + [\rho_{NIR} / (\rho_{NIR} + \rho_{Red}) + \rho_{Green} / (\rho_{Green} + \rho_{SWIR1})]\}$$

式中: ρ_{Blue} , ρ_{Green} , ρ_{Red} , ρ_{NIR} , ρ_{SWIR1} ——TM 和 OLI 蓝、绿、红、近红外、短波红外 1 波段的反射率。

2.6 RSEI 指数的计算

由于各项指标的单位 and 数值范围存在差异,各项指标需进行标准化处理,计算公式为^[22]:

$$NI = (I - I_{min}) / (I_{max} - I_{min}) \quad (9)$$

式中:NI——标准化后的指标值; I ——该指标的数值大小; I_{max} , I_{min} ——该指标的最大和最小值。

$$RSEI_0 = PCA(FV, WET, LST, NDSI) \quad (10)$$

式中:PCA——主成分分析。

纠正才能成为地表温度 LST:

$$LST = T / [1 + (\lambda \cdot T / \rho) \ln \epsilon] \quad (7)$$

式中: λ ——TM/ETM⁺ 热红外波段的中心波长($\lambda = 11.435 \mu m$),OLI 热红外波段的中心波长($\lambda = 10.9 \mu m$); $\rho = 1.438 \times 10^{-2} mK$; ϵ ——地面比辐射率。

2.5 干度指标

干度指标由裸土指数(SI)和建筑指数(IBI)合成,记为 NDSI,其计算公式为^[21]:

$$NDSI = (SI + IBI) / 2 \quad (8)$$

对 RSEI 进行正规化,以便于指标的度量和比较,计算公式为:

$$RSEI = (RSEI_0 - RSEI_{min}) / (RSEI_{max} - RSEI_{min}) \quad (11)$$

RSEI 为遥感生态指数,其值介于 $[0, 1]$ 之间。RSEI 值越接近 1,生态越好,反之,越差。

3 结果与分析

3.1 各指标因子分析

选取 1989,1994,2005 和 2015 年这 4 个典型年份完成专题图(图 1—4)。

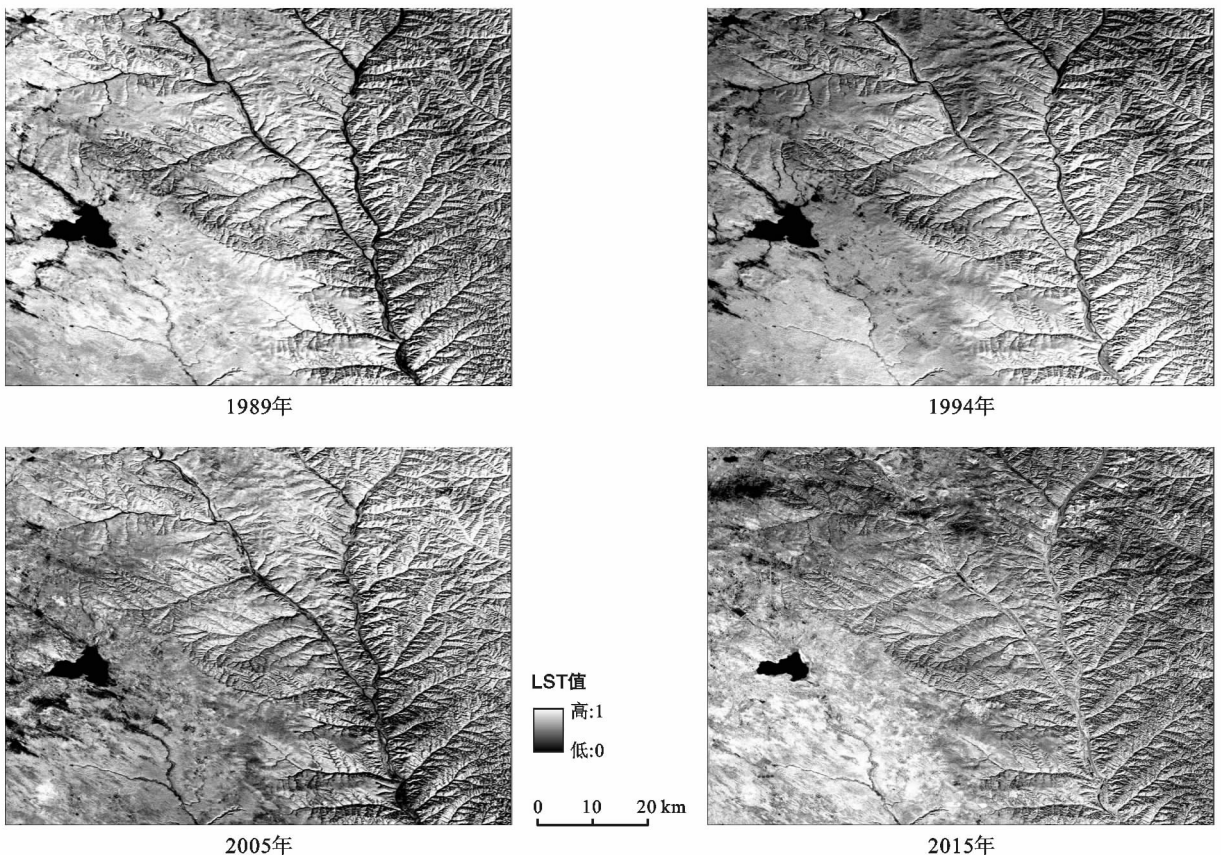


图 1 神东矿区热度指标 LST 分级

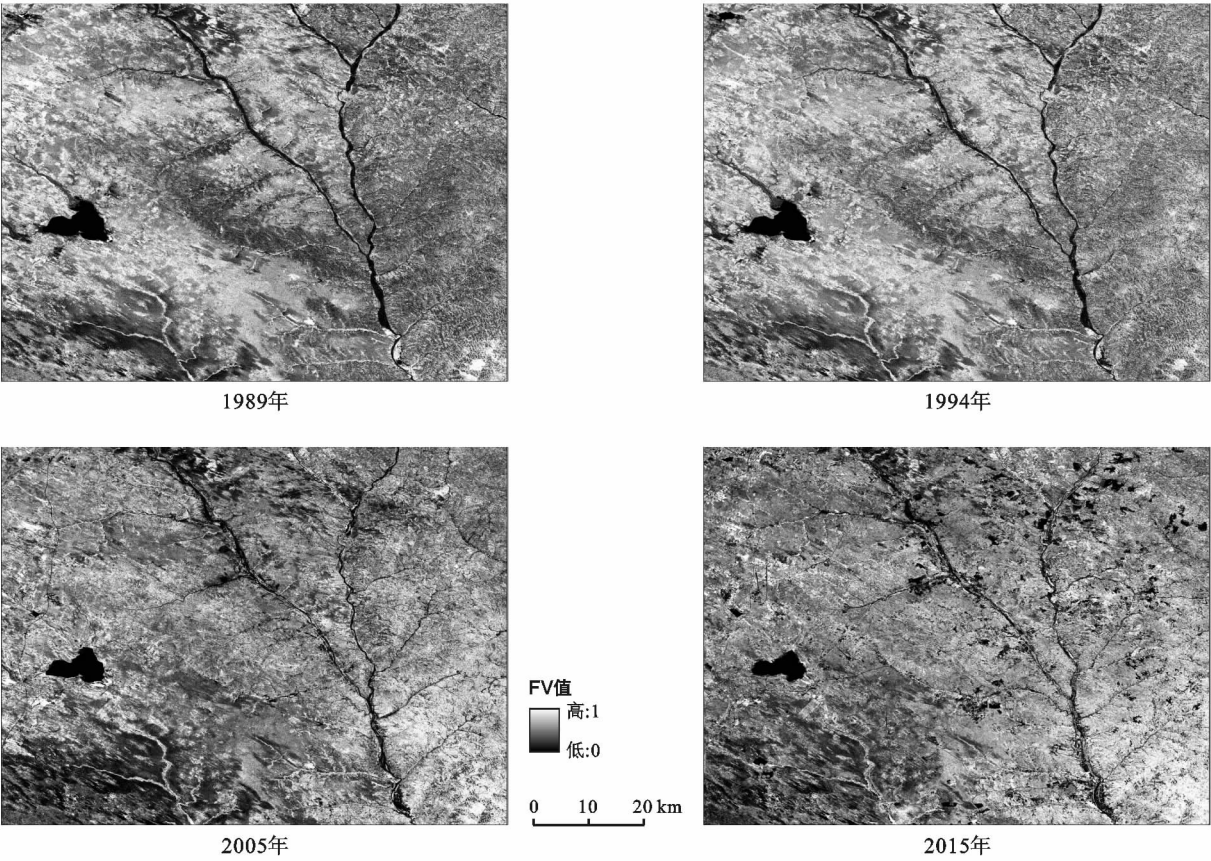


图 2 神东矿区绿度指标 FV 分级

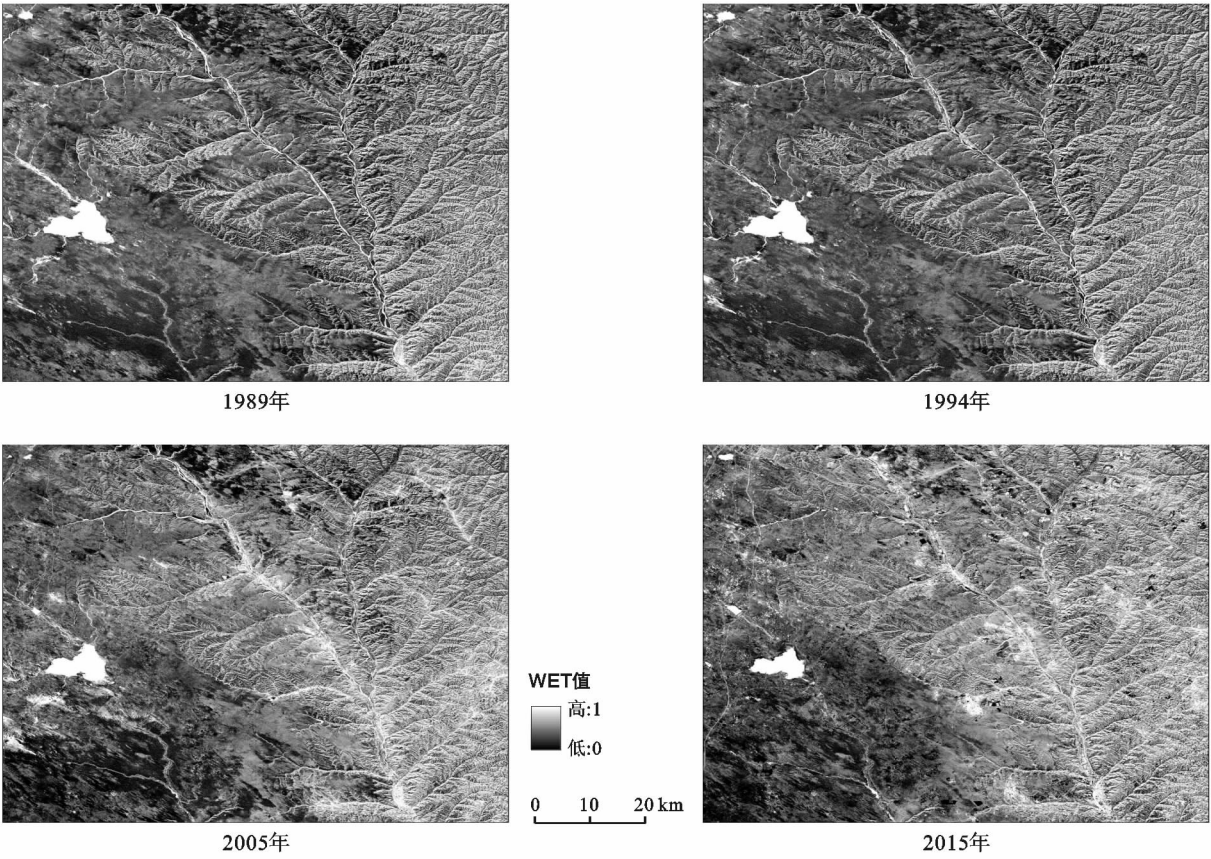


图 3 神东矿区湿度指标 WET 分级

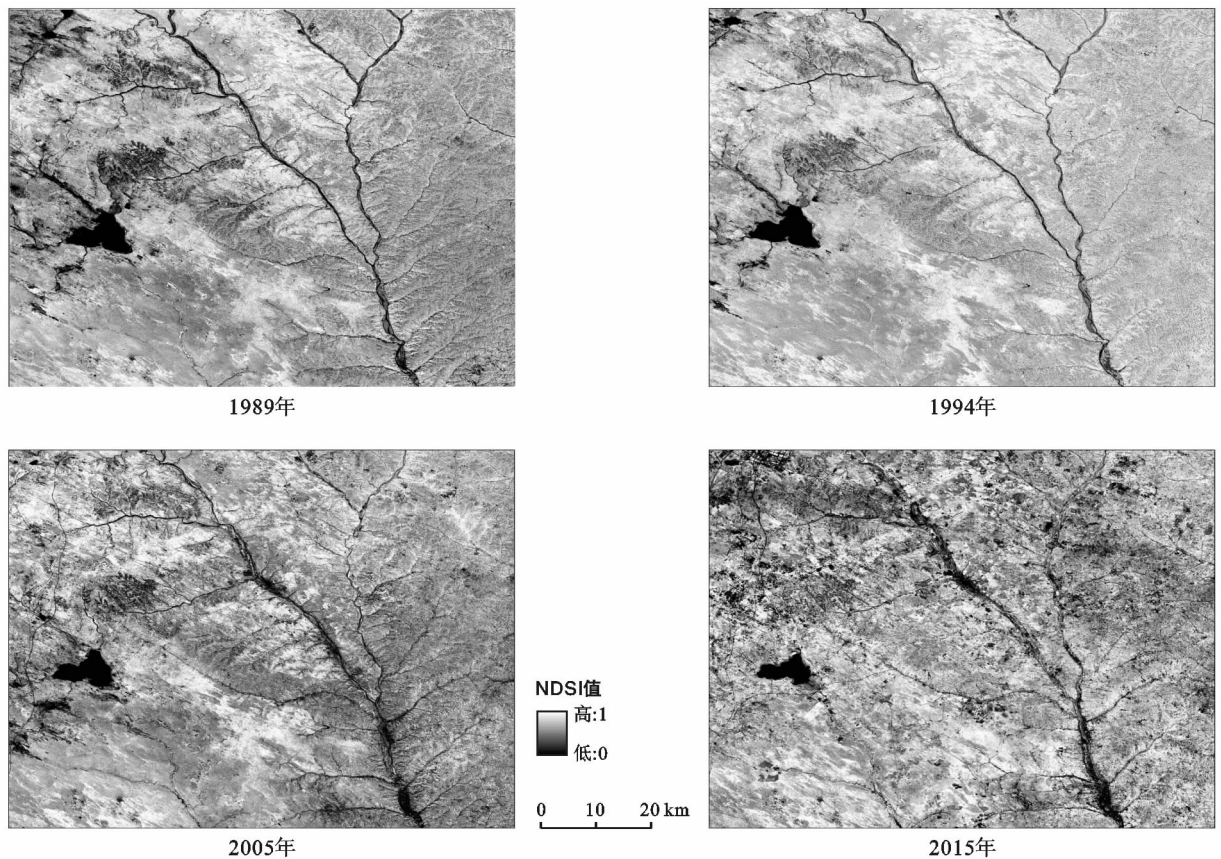


图 4 神东矿区干度指标 NDSI 分级

由图 1—4 可知,从 1989—2015 年,神东矿区的绿度指标(FV)存在有规律的变化,专题图颜色由深灰到浅灰,浅灰色越明显的区域,表示植被覆盖度高,反之,则表示植被覆盖度较低,从四年的专题图中的颜色变化来看,2005 年的植被覆盖度最低,1989—2005 年,植被覆盖度逐年降低,而在 2005 年之后,植被覆盖度先增加后减少。与 NDVI 作用相同的是,湿度指标 WET 同样对生态环境质量呈正相关,其是表示生态环境良好的一个特征。1989—2015 年,WET 指标均值接近于 1 所占区域总体面积范围逐渐增大,表明生态环境质量越来越好。LST 与生态环境质量良好程度成负相关,神东矿区 1989—2015 年,明显的温度指标趋于优良化,进一步表明神东矿区的生态环境逐步变好。神东矿区 1989—1994 年,NDSI 值接近于 1 的区域范围有所增加,尤其是 1994 年,其 NDSI 反映的生态质量差的区域达到了最大,而 1994 年之后,随着年份的增长,NDSI 值接近于 1 的区域范围每年都比前一年有所减小,表明生态环境质量逐渐得到恢复。

3.2 神东矿区尺度生态环境分析

经过正规化后的 RSEI 数值范围在 $[0,1]$ 之间,

值越接近于 1 表示生态环境质量越好,反之生态质量则越差。根据值的范围,进一步将各年份的 RSEI 以 0.2 为间隔分成 5 级,分别代表差、较差、中等、良和优 5 个等级,对应的值的范围为 $[0,0.2)$, $[0.2,0.4)$, $[0.4,0.6)$, $[0.6,0.8)$ 和 $[0.8,1]$ ^[13]。由图 5 和表 1 可知,虽然中间个别年份之间有波动,但神东矿区总体生态环境质量呈上升趋势,由 1989 年的 0.366 增加到 2015 年的 0.477(图 5)。

通过统计不同等级面积所占总矿区面积的百分比可知,1989—2005 年神东矿区的生态环境质量有所改善,1989 年生态环境质量为“差”和“较差”的面积分别占整个研究区域的 33.8%和 30.7%,两者之和几乎占整个神东矿区总面积的 4/5,而 2005 年分别为 23.0%和 26.3%;“中等”以下生态环境质量 2005 年 46.3%,2015 年减少到 40.8%,呈现逐渐下降的趋势;2005—2015 年神东矿区的生态环境质量总体趋于稳定并保持继续向生态环境质量好的方向发展,“中等”及以上等级之和 2005 年为 50.7%,2015 年为 59.2%,呈现逐渐上升趋势,表明神东矿区 2005—2015 年的生态环境质量逐渐在改善并趋于稳定。

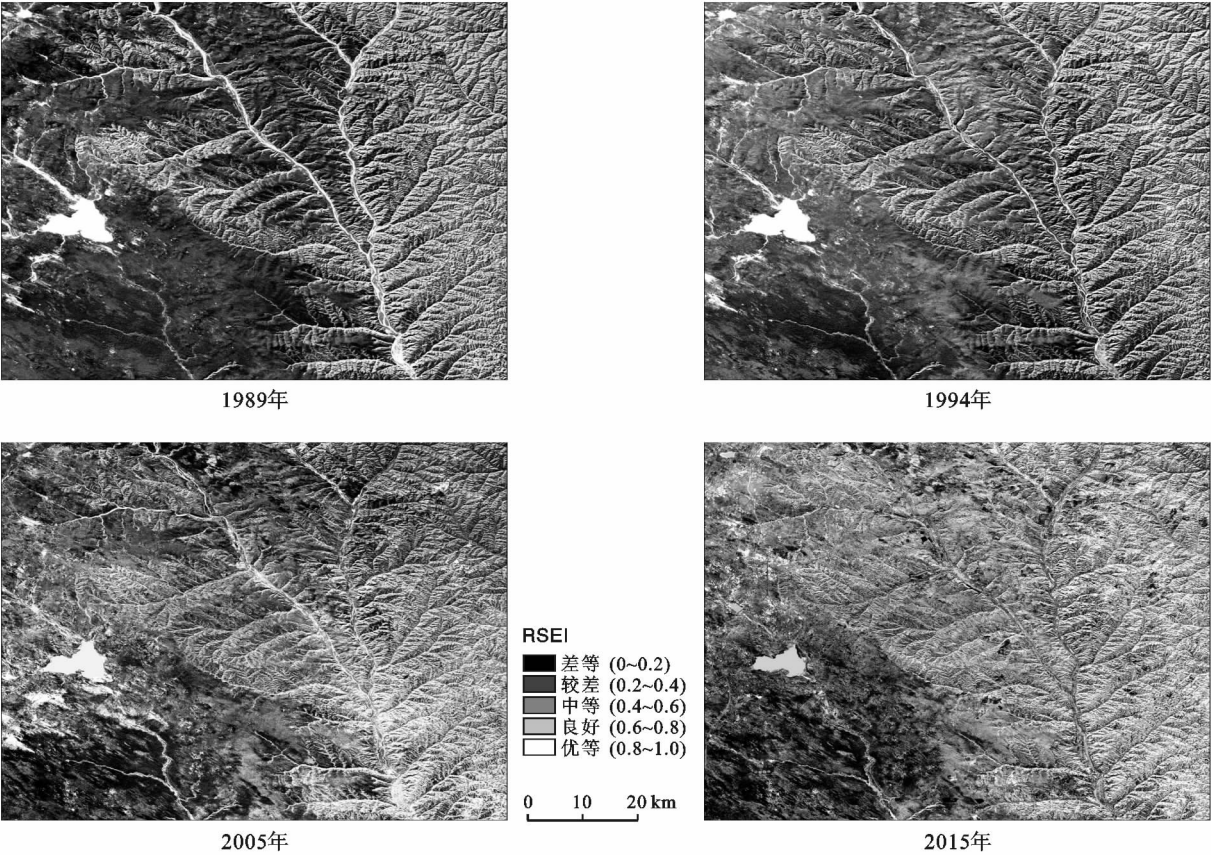


图 5 神东矿区遥感综合生态指数 RSEI 分级

表 1 神东矿区 1989—2015 年各年份遥感综合生态指数 RSEI 均值

年份	1989	1990	1991	1994	1998	1999	2000	2001	2003
RSEI 均值	0.366	0.429	0.367	0.418	0.430	0.420	0.433	0.378	0.449
年份	2004	2005	2006	2008	2009	2011	2013	2014	2015
RSEI 均值	0.445	0.440	0.451	0.459	0.466	0.455	0.409	0.473	0.477

3.3 神东矿区矿井尺度生态环境质量分析

神东矿区中所包含的矿井有:布尔台、金烽寸草塔、柳塔、乌兰木伦、寸草塔、石圪台、哈拉沟、尔林兔、补连塔、上湾、大柳塔、活鸡兔、榆家梁和锦界煤矿,共计 14 个,本文主要讨论其中的 9 个矿区生态环境质量变化趋势。根据矿井开采时间和影像时间,分为 1998 年之前采区和非采区,2000 年之前采区和非采区等不同开采时间段(详见表 2)。

由表 2 可知,补连塔矿井 2000—2011 年采区和非采区 RSEI 均值的变化情况,从时间分布来看,采区 RSEI 均值 2000 年为 0.476,2006 年减少为 0.371,到 2011 年又增加到 0.539,总体 RSEI 均值呈先减少后增加的趋势;非采区从 2000 年的 RSEI 均值 0.419 逐渐增加到 2011 年的 0.532,总体呈增加趋势。大柳塔矿井 1998—2011 年采区和非采区的 RSEI 均值均在增加,分别从 1998 年的 0.414,0.466 增加到 2011 年的 0.599,0.612,非采区每年的 RSEI 均值均大于

采区的 RSEI。活鸡兔矿井的采区 2008 年的 RSEI 均值相较于 2000 年有所增加,2009 年的 RSEI 均值相较于 2000 年和 2008 年均增加,非采区的 RSEI 均值随年份增加而增加,时间序列 RSEI 均值特征表明活鸡兔矿井的生态环境质量逐渐提升。榆家梁矿井的采区和非采区 2008 年的 RSEI 均值相较于 2003 年有所增加,而 2011 年的 RSEI 均值相较于 2008 年有所减少,这表明榆家梁矿井的生态环境质量存在变差的趋势。哈拉沟矿井采区和非采区 RSEI 均值变化,总体来看不论是采区和非采区,RSEI 值均在增加,且 1998—2002 年非采区的 RSEI 值均大于采区的 RSEI 值,2007 年两区域的生态环境处于较平衡状态。乌兰木伦矿井的整体生态环境质量较差,其 1998 年采区的 RSEI 值仅为 0.157,到 2002 年质量有所提升,之后又逐渐减小,非采区的生态环境处于一个均衡状态,随着年份的增加 RSEI 值 0.364 围绕上下浮动。造成这种问题的可能原因是其位于毛乌素沙漠边缘,

干旱少雨,植被覆盖度较低。石圪台矿井采区和非采区的 RSEI 均值均在逐渐增大,分别从 2007 年 0.302,0.416 逐渐增加到 2011 年的 0.487,0.480,非采区的 RSEI 均值大于采区的 RSEI 均值,而 2011 年,采区和非采区的 RSEI 处于平衡状态。锦界矿井 2007 年和 2011 年两年采区和非采区 RSEI 结果显示,2007 年和 2011 年采区的 RSEI 均值均大于非采区的 RSEI 均值,表明采区的生态环境质量优于非采区的生态环境质量。上湾 2007 年和 2011 年两年采区和非采区 RSEI 均值结果表明,前后两年采区和非采区的 RSEI 均值逐渐增加,分别从 2007 年的 0.452,0.482 增大到 2011 年的 0.567,0.498。从空间范围来看,2007 年非采区的生态环境优于采区,而 2011 年采区的生态环境质量优于采区。

表 2 神东矿区各矿井采区和非采区 RSEI 均值变化

矿 井	年 份	采 区	非采区
补连塔矿井	2000 年	0.476	0.419
	2006 年	0.371	0.407
	2011 年	0.539	0.532
大柳塔矿井	1998 年	0.414	0.466
	2000 年	0.455	0.466
	2011 年	0.599	0.612
活鸡兔矿井	2000 年	0.373	0.450
	2008 年	0.493	0.461
	2009 年	0.573	0.565
榆家梁矿井	2003 年	0.661	0.716
	2008 年	0.750	0.769
	2011 年	0.639	0.625
哈拉沟矿井	1998 年	0.435	0.436
	2002 年	0.506	0.511
	2007 年	0.516	0.505
乌兰木伦矿井	1998 年	0.157	0.364
	2002 年	0.363	0.444
	2007 年	0.263	0.363
石圪台矿井	2007 年	0.302	0.416
	2011 年	0.487	0.480
锦界矿井	2007 年	0.486	0.352
	2011 年	0.373	0.349
上湾矿井	2007 年	0.452	0.482
	2011 年	0.567	0.498

4 结 论

神东矿区地处西北内陆,其脆弱的生态环境是制约煤炭绿色开采的关键要素。当今以传统开采方式导致矿区生态环境破坏严重,主要体现在地表植被的

破坏,地表水和地下水的污染,开采导致的土地沉陷,以及水土流失加剧的荒漠化趋势等^[23-25]。当前,对生态环境的分析主要集中在单一环境要素中,比如地表植被、地表温度、土壤湿度、植被净初级生产力等,而集多种环境要素进行综合分析的研究较少。RSEI 指数是基于湿度,绿色,热度和干度指标构建的基于遥感信息的综合指数,RSEI 指数不是各个分指数的人为加权求和,而是依赖于客观自然和环境信息的客观指数,RSEI 能够客观地耦合湿度,绿色,热度和干度各个分指标,能够合理反映区域生态环境质量现状。

(1) 矿区尺度上,神东矿区的生态环境质量整体呈上升趋势,2015 年的“中等”及其以上等级所占面积为 59.2%,比 1989 年同等级面积增长了 23.7%。

(2) 矿井尺度上,不同矿井的生态环境质量存在差异,采区和非采区之间又有差别,榆家梁矿井整体生态环境质量最优,乌兰木伦矿井的采区和锦界的非采区生态环境质量最差。

(3) 综合矿区和矿井尺度而言,矿区 RSEI 均值总体呈增加趋势,表明矿区生态环境质量逐渐改善。

[参 考 文 献]

[1] 吴立新,马保东,刘善军. 基于 SPOT 卫星 NDVI 数据的神东矿区植被覆盖动态变化分析[J]. 煤炭学报, 2009,34(9):1217-1222.

[2] 孙亚军,张梦飞,高尚,等. 典型高强度开采矿区保水采煤关键技术与实践[J]. 煤炭学报,2017,42(1):56-65.

[3] 杨俊哲,陈苏社,王义,等. 神东矿区绿色开采技术[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9):34-39.

[4] 钱丽萍. 遥感技术在矿山环境动态监测中的应用研究[J]. 安全与环境工程, 2008, 15(4):5-9.

[5] Legg C A. Applications of remote sensing to environmental aspects of surface mining operations in the United Kingdom[M]//Remote sensing: an operational technology for the mining and petroleum industries. Springer Netherlands, 1990.

[6] Sawaya K E, Olmanson L G, Heinert N J, et al. Extending satellite remote sensing to local scales: land and water resource monitoring using high-resolution imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 88(1/2): 144-156.

[7] 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.

[8] Schroeter L, Cornelia Gläßer. Analyses and monitoring of lignite mining lakes in Eastern Germany with spectral signatures of Landsat TM satellite data[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 86(1):27-39.

- (S1):3095-3101.
- [4] 赵华,黄润秋. 岩石边坡生态护坡特点及其关键技术问题探讨[J]. 水文地质工程地质,2004,1(1):87-90.
 - [5] 杨涛,李绍才,孙海龙. 岩石边坡植被护坡研究中的关键问题[J]. 水土保持研究,2007,14(6):14-16.
 - [6] 胡兴,陈璋,李成俊,等. 植物护坡工程质量的等级评价研究[J]. 水土保持通报,2013,33(3):180-185.
 - [7] 余海龙,顾卫. 高速公路边坡生态护坡效果定量评价研究[J]. 水土保持通报,2011,31(1):203-206.
 - [8] 冯晓,秦浪朝,王熙博. 山区高速公路边坡植被系统稳定性评价[J]. 中外公路,2016,36(3):12-17.
 - [9] 杨志民. 未确知信息的数学处理方法[J]. 中国管理科学,2000,11(8):182-196.
 - [10] 刘开第,庞彦军,孙光勇,等. 城市环境质量的未确知测度评价[J]. 系统工程理论与实践,1999,12(12):52-58.
 - [11] 张水,曹庆贵,俞凯. 基于未确知测度理论的矿井通风安全评价[J]. 矿业安全与环保,2016,28(5):32-35.
 - [12] 刘志祥,郭永乐,周士霖. 隧道下穿桥梁的桥墩稳定性未确知测度评价研究[J]. 中国安全科学学报,2011,21(4):91-97.
 - [13] 陈顺满,许梦国,王平,等. 基于未确知测度理论的地下金属矿山合理产能优选[J]. 武汉科技大学学报,2013,36(6):461-464.
 - [14] 曾佳龙,黄锐,关燕鹤,等. 熵权—未确知测度理论在尾矿库安全标准化中的应用研究[J]. 中国安全生产科学技术,2014,10(2):160-166.
 - [15] 栾婷婷,谢振华,吴宗之,等. 基于未确知测度理论的排土场滑坡风险评价模型[J]. 中南大学学报:自然科学版,2014,45(5):242-247.
 - [16] 梁力,季贵斌,赵颖. 高速公路边坡暖季型草本植物生态适应性评价[J]. 东北大学学报:自然科学版,2018,39(1):128-132.
 - [17] 穆成林,黄润秋,裴向军,等. 基于组合赋权—未确知测度理论的围岩稳定性评价[J]. 岩土工程学报,2016,38(6):1057-1063.
 - [18] 胡晓雪,杨晓华,郦建强,等. 河流健康系统评价的集对分析模型[J]. 系统工程理论与实践,2008,5(5):164-170,176.
 - [19] 张旭,周绍武,林鹏,等. 基于熵权—集对的边坡稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(S1):3400-3410.
 - [20] 李绍才,孙海龙,杨志荣,等. 坡面岩体—基质—根系互作的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(12):2074-2081.

(上接第 107 页)

- [9] 孟岩,赵庚星. 基于卫星遥感数据的河口区生态环境状况评价:以黄河三角洲垦利县为例[J]. 中国环境科学,2009,29(2):163-167.
- [10] 叶有华,梁永贤,沈一青,等. 《生态环境状况评价技术规范(试行)》中若干值得商榷的问题[J]. 热带地理,2009,29(4):404-406.
- [11] 张媛. 关于生态环境状况评价指标计算的问题与探讨[J]. 河北工业科技,2008,25(6):363-365.
- [12] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. 中国环境科学,2013,33(5):889-897.
- [13] 徐涵秋. 水土流失区生态变化的遥感评估[J]. 农业工程学报,2013,29(7):91-97.
- [14] 李粉玲,常庆瑞,申健,等. 黄土高原沟壑区生态环境状况遥感动态监测:以陕西省富县为例[J]. 应用生态学报,2015,26(12):3811-3817.
- [15] 罗春,刘辉,戚陆越. 基于遥感指数的生态变化评估:以常宁市为例[J]. 国土资源遥感,2014,26(4):145-150.
- [16] 刘智才,徐涵秋,李乐,等. 基于遥感生态指数的杭州市城市生态变化[J]. 应用基础与工程科学学报,2015,23(4):728-739.
- [17] 宋慧敏,薛亮. 基于遥感生态指数模型的渭南市生态环境质量动态监测与分析[J]. 应用生态学报,2016,27(12):3913-3919.
- [18] Baig M H A, Zhang L, Shuai T, et al. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance[J]. Remote Sensing Letters, 2014, 5(5):9.
- [19] Goward S N, Xue Y, Czajkowski K P. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements[J]. Remote Sensing of Environment, 2002,79(2):225-242.
- [20] Nichol J. Remote sensing of urban heat islands by day and night[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2005, 71(5):613-622.
- [21] Xu Hanqiu. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(14):8.
- [22] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. 生态学报,2013,33(24):7853-7862.
- [23] 刘英,侯恩科,岳辉. 基于 MODIS 的神东矿区植被动态监测与趋势分析[J]. 国土资源遥感,2017,29(2):132-137.
- [24] 王安. 神东矿区生态环境综合防治体系构建及其效果[J]. 中国水土保持科学,2007,5(5):83-87.
- [25] 刘英,吴立新,岳辉. 基于梯度结构相似度的矿区土壤湿度空间分析[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2018,43(1):87-93.