

1973~2020 年淮北市采煤塌陷区时空 变化及其影响研究

刘沁萍¹ 李欢¹ 田洪阵¹ 魏娜¹ 杨萌萌² 乔荣锋³¹

(1. 天津工业大学经济与管理学院, 天津 300387;

2. 国立釜山大学土木与环境工程系, 韩国 釜山 46241;

3. 天津工业大学环境科学与工程学院, 天津 300387)

【摘要】: 煤炭是重要的能源, 但是在开采后形成的地表沉陷特别是塌陷在平原地区造成了对耕地和建设用地的巨大破坏, 对粮食产量、植被覆盖和塌陷区居民的生产、居住、生活产生了重大影响。利用 LandsatMSS、TM、ETM+ 和 OLI 影像, 通过目视解译获取了 1973~2020 年 6 个时段的淮北市采煤塌陷区的边界信息, 通过监督分类和目视修正提取了 5 个时段的土地利用信息, 分析了塌陷区的时空变化特征及其对土地利用、植被覆盖等的影响。结果表明: (1) 虽然塌陷区被不断地回填, 但是塌陷区的数量和总面积在近 50a 里不断增加, 在 2020 年共有塌陷区 243 个, 总面积约 1.2 万 hm^2 。(2) 塌陷的土地以耕地为主, 建设用地其次, 塌陷的耕地面积呈现增加趋势。(3) 塌陷区回填的规模不断扩大, 回填后主要用作建设用地, 其次是耕地。塌陷导致了农民失去土地、搬迁, 粮食产量减少, 同时也破坏了地表植被。研究成果可以为塌陷区的管理、开发、利用等提供科学支撑。

【关键词】: 采煤塌陷区 Landsat 遥感监测 淮北

【中图分类号】: F301.24; TP79 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)06-1370-11

能源是人类社会发展的物质基础^[1,2]。在化石能源领域, 我国是“富煤、贫油、少气”的国家, 这种资源禀赋特征决定了煤炭在我国能源生产和消费结构中所占比例较大^[1,3]。大规模、高强度的煤矿开采在带来巨大经济效益的同时, 也对资源环境产生了重要影响。尤其是煤炭开采后形成的地表沉陷特别是塌陷会对平原地区的土地资源造成巨大破坏^[4,5], 进而会对粮食产量^[4]、生态环境^[4,5,6]和塌陷区居民的生产、居住、生活产生重大影响^[7]。

采煤塌陷作为一个全世界都面临的问题^[3,5,8,9], 得到了研究者的重视, 研究者从不同学科、不同视角对其进行了研究^[8,10,11,12]。采煤塌陷区的监测是塌陷区研究的基础, 如国巧真利用 Landsat 影像, 对唐山市区南部采煤塌陷区进行了遥感解译, 并开发了采煤塌陷区遥感监测系统^[13]; 张海林^[14]利用 Landsat 和 QuickBird 影像, 通过监督分类和目视修正对龙口市采煤塌陷区的土地利用进行了分类; 李海鹰^[15]利用 Landsat 和 ASTER 影像, 通过监督分类和目视修正对开滦煤矿塌陷区的土地利用进行了分类; 程玉

作者简介: 刘沁萍(1979~), 女, 副教授, 主要研究方向为城市与区域发展. E-mail: liuqinping@tiangong.edu.cn; 田洪阵 E-mail: tianhongzhen@vip.163.com;

基金项目: 天津市哲学社会科学研究规划项目(TJGL20-012, TJGL21-025)

书等^[16]利用 DInSAR 和 WorldView-2 影像,提取了河南某县的塌陷区信息;王义方等^[17]利用 Landsat 影像,对济宁典型采煤塌陷区进行了扰动监测;He 等^[3]利用 Landsat 影像和谷歌地球引擎平台监测了 1986~2018 年间,黄淮海平原中东部,因采煤导致的塌陷水体的变化。在监测的基础上,学者们进一步开展了塌陷对生态环境影响的研究,如翟孟源等^[18]研究了乌海市煤矿开采对生态环境的影响;裴文明等^[19]对皖北刘桥矿采煤塌陷区的生态环境进行了动态监测;Padmanaban 等^[12]利用 Landsat 影像研究了德国 Kirchheller Heide 矿区煤矿和铁矿开采所导致的塌陷对植被的影响;Kopeck 等^[5]利用多源遥感数据研究了采煤塌陷对自然环境的影响。综观现有研究,一方面,针对煤矿开采导致的塌陷区变化的监测时段比较短,缺少长时间尺度的监测;受煤矿开采区不同的地质条件、自然环境、土地利用相关政策等因素的影响,通过长时间尺度的监测才能更准确反映煤矿开采塌陷区时空变化规律,并能反映不同时期国家土地利用政策实施的影响。另一方面,采煤塌陷不仅对生态环境产生影响,同时还会对土地利用特别是耕地的利用产生影响,而耕地作为人类生存的最基本资源,承载着保证粮食安全和国家安全的功能,分析塌陷对土地利用变化的影响对于实现土地可持续利用具有重要的现实意义。鉴于此,本文选择我国重要的煤炭生产基地淮北市作为研究区域,利用 1973、1984、1990、2000、2010 和 2020 年 6 个时期的 Landsat 遥感影像数据,提取并分析研究区采煤塌陷区的时空变化情况,并进一步分析塌陷对土地资源、粮食产量、植被覆盖等的影响,研究成果可以为塌陷区的管理、开发、利用等提供科学支撑。

1 研究区概况

淮北市位于安徽省东北部,地处黄淮海平原南侧的淮北平原,116° 24' E~117° 03' E、33° 16' N~34° 10' N,市域面积 2741.4km²(图 1)。地层为河湖相冲积层,空隙水蕴藏丰富,地下潜水位高。该区属于暖温带半湿润季风气候,季风明显,降水多集中在夏季。下辖 3 区 1 县,2019 年末常住人口 227 万,全年地区生产总值 1077.9 亿元,原煤产量 3804.6 万 t,发电量 213.4 亿 kW·h,粮食产量 149.2 万 t。它是我国重要的煤炭基地和重要的商品粮生产基地。

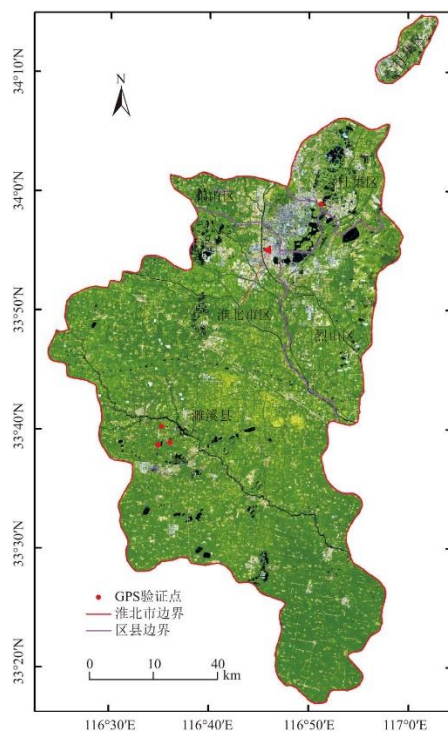


图 1 研究区域图

2 数据与方法

2.1 数据

用于提取采煤塌陷区和土地利用分类的遥感数据包括 1973、1984、1990、2000、2010 和 2020 年 6 个时期的 LandsatMSS、TM、ETM+和 OLI 影像,数据来源于美国地质调查局网站(<https://www.usgs.gov>)。处理级别为 L1TP 的影像已经进行过辐射校正和地形校正,L2SP 级别的影像是在 L1TP 的基础上,采用 LEDAPS(Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System)和 LaSRC(Land Surface Reflectance Code)中的算法对大气分子、气溶胶和水汽吸收和散射所产生的时间、位置和波谱变化进行了校正,最终计算得到地表反射率数据。遥感影像处理的详细信息可访问美国地质调查局网站(<https://www.usgs.gov>)。所选取的影像,除 2010 年条带号为 122/036 的影像云覆盖率为 8%(云主要出现在影像西北角,研究区并未受到云的影响),其它影像的云覆盖率均不高于 3%。本文尽量选取暖季(5~9 月)的影像,因为这个时段植被长势好,有助于土地利用分类,另外,这个季节降水量高,塌陷区淹没面积大,有利于准确提取塌陷区。所用 Landsat 影像详细信息见表 1。

从德克萨斯大学奥斯汀分校(<https://legacy.lib.utexas.edu/maps/ams/china/>)下载了由美国陆军制图局编绘的 20 世纪 40 年代的研究区地形图,用于辅助确定 1973 年的采煤塌陷区。百度地图和谷歌地球上的高精度遥感影像被用于辅助提取塌陷区和验证土地分类结果。通过实地测量获取了 72 个 GPS 点,用于验证提取的采煤塌陷区的空间精度。

表 1 所用 Landsat 遥感数据列表

条带号	卫星/传感器	最高空间精度(m)	获取日期	处理级别
131/036	Landsat1/MSS	60	1973-11-19	L1TP
131/037	Landsat1/MSS	60	1973-11-19	L1TP
122/036	Landsat5/TM	30	1984-04-19	L1TP、L2SP
121/037	Landsat5/TM	30	1984-09-03	L1TP、L2SP
122/036	Landsat5/TM	30	1990-05-06	L1TP、L2SP
122/037	Landsat5/TM	30	1990-05-06	L1TP、L2SP
122/036	Landsat7/ETM+	15	2000-09-14	L1TP、L2SP
122/037	Landsat7/ETM+	15	2000-09-14	L1TP、L2SP
122/036	Landsat5/TM	30	2010-09-18	L1TP、L2SP
122/037	Landsat5/TM	30	2010-09-18	L1TP、L2SP
122/036	Landsat8/OLI	15	2020-08-28	L1TP、L2SP
122/037	Landsat8/OLI	15	2020-08-28	L1TP、L2SP

植被能够综合反映陆地表面物理性质和人类活动对自然系统的影响,植被质量的好坏直接表征了区域生态环境质量的高低^[20,21]。相关研究表明植被指数与植被的生长状况、盖度和生物量等有很好的相关性^[22,23],其中,归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index,NDVI)是最常用的一种植被指数,所以本文利用 NDVI 数值来反映植被覆盖率和生长情况。研究

区位于安徽省东北部,属于暖温带半湿润季风气候,为了使 NDVI 能够更好地反映区域塌陷区植被状况,本文选用植被生长季 5~9 月 NDVI 的均值来反映植被状况。利用谷歌地球引擎(Google Earth Engine)中的 Landsat32dNDVI 数据来反映塌陷区植被变化。该数据集是由 Landsat5 的 TM 影像和 Landsat8 的 OLI 影像计算得到,时间跨度是 1984~2020 年,2012 年无数据。

2.2 方法

2.2.1 采煤塌陷区提取方法

本研究所提取的采煤塌陷区指的是因采煤而导致的地表出现了明显塌陷的区域,其中心区域常出现积水,外围区域土地受到扰动呈现裸地特征。采煤塌陷区由于构成比较复杂,有水体、植被、裸地、人工搭建物等,因而波谱特征复杂难以用计算机自动准确提取,故本研究采用了目视解译的方法提取采煤塌陷区。采煤塌陷区在人工改造前其边界具有自然水体的特征呈平滑状,有别于人工坑塘。另外,其中心区域多出现积水,外围区域土地受到扰动呈现裸地特征。通过对比不同时期的影像可以发现其具有从无到有,前期不断扩大,后期被不断改造利用、缩小甚至消失的演化特征,该特征也有别于人工坑塘。其附近伴有煤矿出现,这也有助于辅助判断是否是采煤塌陷区(图 2)。

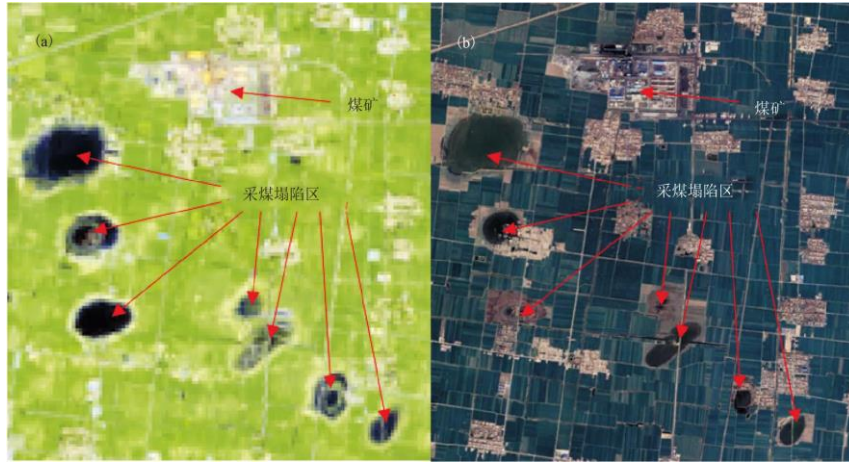


图 2 采煤塌陷区特征

(a) 2020 年 LandsatOLI 假彩色影像(7、6、4 波段分别对应红、绿、蓝) (b) 2019 年谷歌地图高精度影像

淮北市地处黄淮海平原,因地下潜水位高,采煤塌陷区积水率较高,水体信息有助于辅助提取采煤塌陷区。本文利用 Landsat 的地表反射率数据(L2SP 级别数据),采用归一化水体指数法(Normalized Difference Water Index, NDWI)^[24]提取了研究区 1984 年以来的各个时期的水体,NDWI 的计算方法如下:

$$NDWI = \frac{(GREEN - NIR)}{(GREEN + NIR)} \quad (1)$$

式中: GREEN 表示绿色波段; NIR 为近红外波段。

对于包含 15m 波段的 ETM+和 OLI 影像,进行了全色锐化(Pan-sharpening)得到了 15m 分辨率的多光谱图像。把真彩色以及

不同假彩色影像作为底图，结合所提取的水体以及百度地图和谷歌地图中的高精度影像，通过目视解译提取了各个时期的采煤塌陷区。

2.2.2 土地利用分类方法

在 ArcGIS10.8 中对 1984、1990、2000、2010 和 2020 年的遥感影像进行了波段合成、拼接和裁剪预处理。然后利用 ENVI5.2，通过监督分类的方法，对土地利用类型进行了分类。通过测试对比最大似然法、最小距离法、马氏距离法和波谱角分类法 4 种监督分类方法，结合目视判别，最终选择了精度较高的马氏距离法作为监督分类的方法。对于监督分类的结果，我们进行了目视修正。根据研究区的具体情况以及研究需要，把研究区的土地利用类型分为耕地、建设用地、水体、塌陷区和其它用地。土地利用分类的范围是过去或现在曾经是塌陷区的所有区域。

2.2.3 植被指数处理方法

根据 32 天的 NDVI 数据，计算了暖季(5~9 月)的 NDVI 的平均值，后统计了暖季 NDVI 在区域内的平均值，区域范围同土地利用分类范围，计算是在谷歌地球引擎中通过编程实现的。

2.2.4 精度验证方法

为了验证所提取的采煤塌陷区的精度，我们对 4 个塌陷区进行了 GPS 测量，在塌陷区边缘获取了 72 个 GPS 采样点。GPS 采样点与目视解译的塌陷区边界的平均距离为 29.95m，标准差 17.90m。在谷歌地球中，分别选取了 2010 年的 26 个、2020 年的 32 个采样点，对土地利用分类结果进行了验证。2010 和 2020 年的分类总精度(Overall Accuracy)分别是 88.58%和 95.13%，2010 和 2020 年的 kappa 系数分别是 0.82 和 0.91。目视解译提取的采煤塌陷区精度和土地利用分类的精度均达到了研究所需要的精度。

3 结果与分析

3.1 塌陷区时空变化特征

1973~2020 年淮北市采煤塌陷区的数量和总面积都一直在增加，2020 年达到 11669.49hm²。最大的塌陷区面积为 2185.79hm²，最小的 0.31hm²，平均面积从 1984 年起逐渐缩小。塌陷区新增面积整体呈现增加趋势，减少面积呈增加趋势，塌陷区净增面积维持在 2000hm²左右(表 2)。

表 2 塌陷区数量及面积变化

年份	数量	最大面积 (hm ²)	最小面积 (hm ²)	平均面积 (hm ²)	总面积 (hm ²)	新增面积 (hm ²)	减少面积 (hm ²)	净增面积 (hm ²)
1973	17	160.34	2.87	57.10	970.66	-	-	-
1984	34	401.55	2.94	99.39	3379.22	2658.27	249.71	2408.55
1990	55	1496.19	2.55	93.20	5126.02	2479.65	732.84	1746.80
2000	101	914.46	2.67	74.10	7484.44	3929.16	1570.74	2358.42
2010	168	959.92	0.31	56.03	9412.33	4180.47	2252.57	1927.89

2020	243	2185.79	0.41	48.02	11669.49	4731.31	2474.15	2257.16
------	-----	---------	------	-------	----------	---------	---------	---------

从表 2 和图 3 可以看出, 1973 年塌陷区主要出现在淮北东北部的杜集区, 数量和面积相对较小; 随着时间的推移, 塌陷区的数量不断增多, 总面积不断扩大, 分布范围向西、向南扩大, 到 2020 年全区都出现有塌陷区。从时间尺度上来看, 2000 年之后, 塌陷区的数量和新增面积快速增加, 新增的塌陷区主要集中在濉溪县, 到 2020 年单个塌陷区最大面积也达到最大。主要的原因是淮北市煤矿开采开始的年份较早, 煤炭地下开采引起的塌陷, 需要达到一定的开采规模, 地表的沉陷以及塌陷也需要比较长时间的累积, 所以在 2000 年之后, 伴随着开采规模的扩大, 煤矿开采引起的塌陷现象变得严重, 使得这个时期塌陷区的数量以及塌陷面积增速变大。

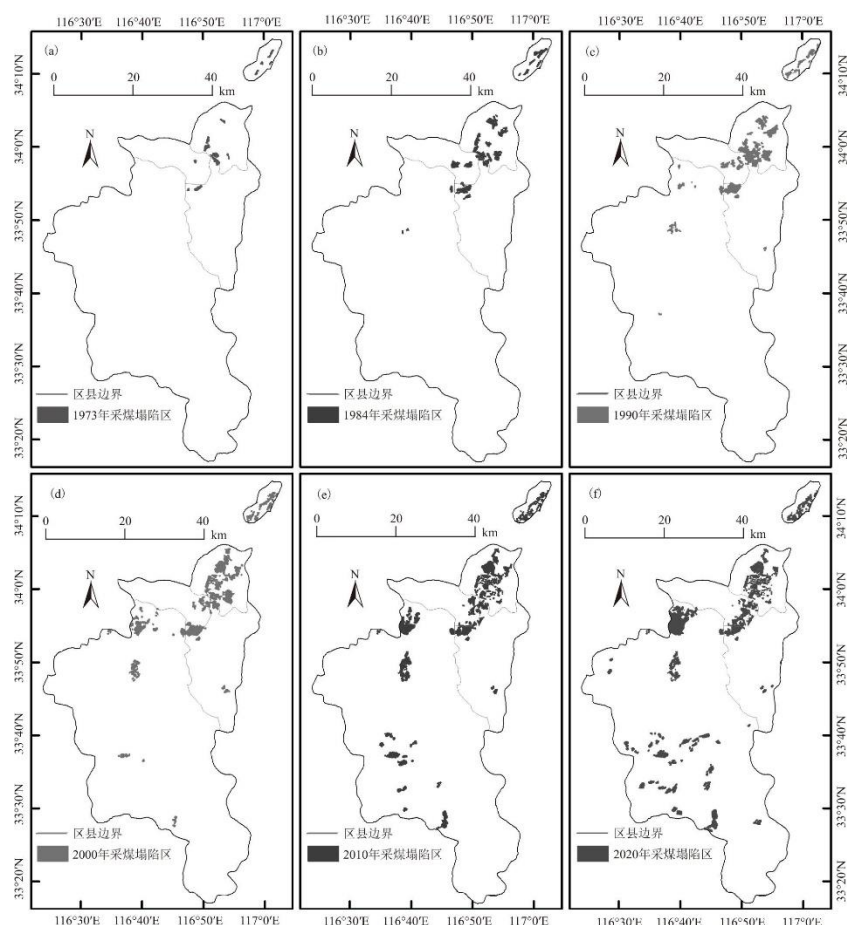


图 3 1973(a)、1984(b)、1990(c)、2000(d)、2010(e) 和 2020 年(f)淮北市采煤塌陷区分布

从塌陷区减少面积的变化趋势来看, 减少面积整体上呈现增加趋势, 从 1990 年开始, 塌陷区减少面积迅速增加, 主要原因是国家和地方有关土地复垦政策的制定和实施, 国家 1986 年颁布以及 1996、2009 年修订的矿产资源法明确规定了开采矿产资源造成土地破坏的, 矿山企业应当因地制宜采取复垦利用。1986 年颁布, 1998、2019 年修订的土地管理法也明确规定因挖损、塌陷等造成土地破坏, 用地单位和个人应当按照国家有关规定负责复垦, 没有条件或者复垦不符合要求的应当缴纳土地复垦费, 专项用于土地复垦。1989 年国务院颁布并实施了土地复垦规定, 明确了土地复垦的概念以及“谁破坏、谁复垦”的基本原则。淮北市也于 2009 年编制了《淮北市土地整理复垦开发与压煤村庄搬迁用地规划》, 2012 年发布实施了《淮北市工矿废弃地复垦利用实施方案》, 2014 年发布实施了《淮北市开展农村土地整治村庄拆迁安置复垦项目专项清理工作实施方案》, 2016 年编制了《淮北市工矿废弃地复垦利用专项规划(2016-2020 年)》。

3.2 塌陷区土地利用变化特征

塌陷区内土地利用变化剧烈(图4,表3、表4)。从表3可以看出,每个研究时间段内新增塌陷区占用的土地主要是建设用地和耕地(累计占90%以上),水体和其它用地所占比例较低。新增塌陷的耕地面积一直在增加,2020年达到4036.91hm²,占到新增塌陷面积的85.32%;对比1984年(图4a)和2020年(图4e)塌陷区土地利用图,可以看出塌陷区占用的主要是耕地,说明在平原地区的粮食主产区,煤炭开采导致的塌陷对耕地造成了极大破坏。

从表2和表4可以看出,1984~2010年间,塌陷区回填利用的规模在不断扩大;其中,1984~2010年回填土地的主要利用类型为建设用地,主要的原因是这个时期伴随着中国经济的快速发展,国家及当地政府对建设用地的需求量增加,同时,建设用地开发利用的经济价值远远大于其他用地类型。

从表4可以看出,1990~2020年塌陷区回填为建设用地的比例呈现下降趋势,回填为耕地的比例呈现上升趋势,尤其是在2000年以后,上升趋势明显变强,在2020年塌陷区回填成耕地的比例达到59.44%。从面积上来看,1990年开始,塌陷区被复垦成耕地的面积也一直在增加,尤其是2000年后增加量明显变大,2020年复垦为耕地的面积达到1470.64hm²。主要原因是这个时期国家和地方有关土地复垦以及耕地保护政策的制定和实施,例如,1998年新修订的土地管理法首次明确提出国家实行土地用途管制制度和耕地占补平衡制度,将基本农田保护制度纳入耕地保护体系;同时土地管理法还规定因挖损、塌陷、压占等破坏的土地,复垦后应当优先用于农业;2008年中央关于推进农村改革发展若干重大问题的决定提出坚持最严格的耕地保护政策,坚决守住1.2亿hm²耕地保护红线;2013年中央农村工作会议提出了确保粮食安全,坚守1.2亿hm²耕地红线。淮北市也于2009年编制了《淮北市土地整理复垦开发与压煤村庄搬迁用地规划》,同年出台了《淮北市人民政府办公室关于加强耕地保护工作的实施意见》,2010年,发布实施了《淮北市耕地保护责任目标考核办法》,2012年发布实施了《淮北市工矿废弃地复垦利用实施方案》,2014年发布实施了《淮北市开展农村土地整治村庄拆迁安置复垦项目专项清理工作实施方案》,2016年编制了《淮北市工矿废弃地复垦利用专项规划(2016-2020年)》。

3.3 塌陷区植被指数变化特征

通过计算塌陷区1984~2020年每一年暖季(5~9月)NDVI的平均值,得到其变化曲线(图5)。为了更好地分析塌陷区植被变化规律,对NDVI曲线进行二阶多项式拟合,得到拟合曲线(显著性水平高于99%)。从图5可以看出,在1984~2020年NDVI整体上呈现先下降后上升的趋势,趋势发生变化是在2007年左右;从1984年到2007年由于煤矿开采造成了开采区尤其是塌陷区生态环境变差,即使在开采过程中部分塌陷区在不断复垦,但是生态环境质量总体上还是在下降;2007~2020年生态环境又呈现向好趋势。主要原因是国家和地方政府在这一时期有关生态文明建设的一系列文件和政策的制定和实施,如2007年党的十七大首次提出建设生态文明;2009年淮北市出台了《淮北市矿山地质环境治理项目管理暂行办法》;2012年十八大提出大力推进生态文明建设;2015年中共中央、国务院发布的关于加快推进生态文明建设的意见特别指出生态文明建设是中国特色社会主义事业的重要内容,关系人民福祉,关乎民族未来;2017年十九大指出建设生态文明是中华民族永续发展的千年大计;2017年安徽省出台了《矿山地质环境保护与土地复垦方案》《安徽省绿色矿山建设工作方案(2017-2025年)》等。

表3 新增塌陷区占用土地情况

年份	建设用地		耕地		水体		其它用地	
	(hm ²)	(%)	(hm ²)	(%)	(hm ²)	(%)	(hm ²)	(%)
1990	1118.85	45.12	1265.68	51.04	7.87	0.32	87.24	3.52
2000	1940.68	49.39	1839.47	46.82	7.92	0.20	141.09	3.59

2010	1580.33	37.80	2301.33	55.05	63.34	1.52	235.46	5.63
2020	406.05	8.58	4036.91	85.32	48.29	1.02	240.07	5.07

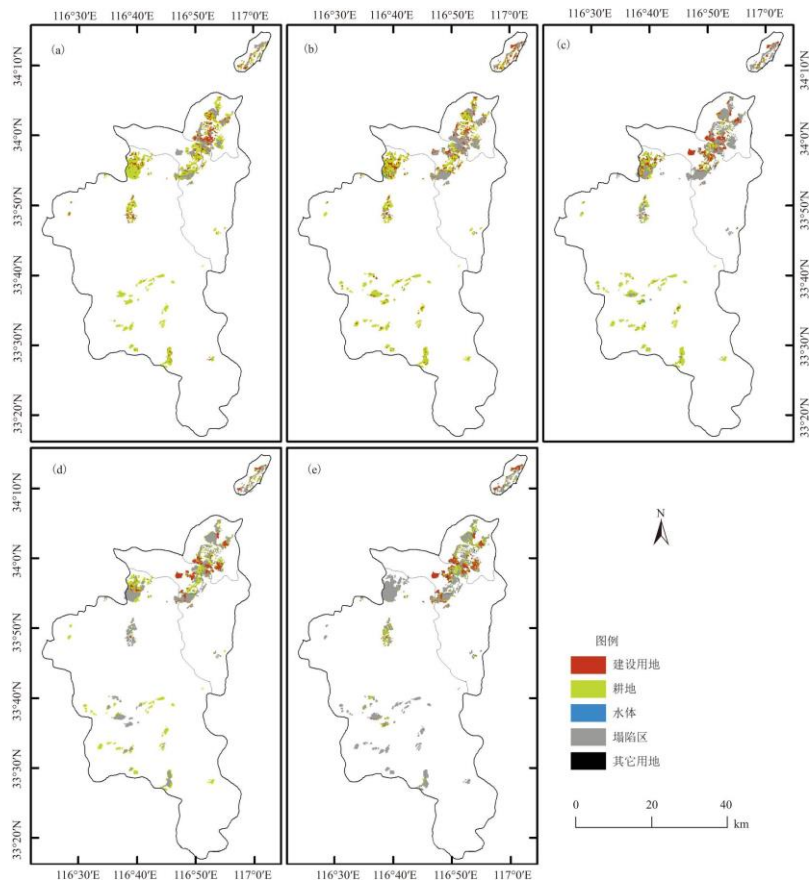


图 4 1984(a)、1990(b)、2000(c)、2010(d)和2020年(e)淮北市采煤塌陷区土地利用图

表 4 塌陷区回填利用情况

年份	建设用地		耕地		其它用地	
	(hm ²)	(%)	(hm ²)	(%)	(hm ²)	(%)
1984	142.52	57.07	97.15	38.90	10.05	4.02
1990	659.09	89.94	44.95	6.13	28.80	3.93
2000	1246.91	79.38	251.46	16.01	72.37	4.61
2010	1229.68	54.59	851.38	37.80	171.52	7.61
2020	683.54	27.63	1470.64	59.44	319.98	12.93

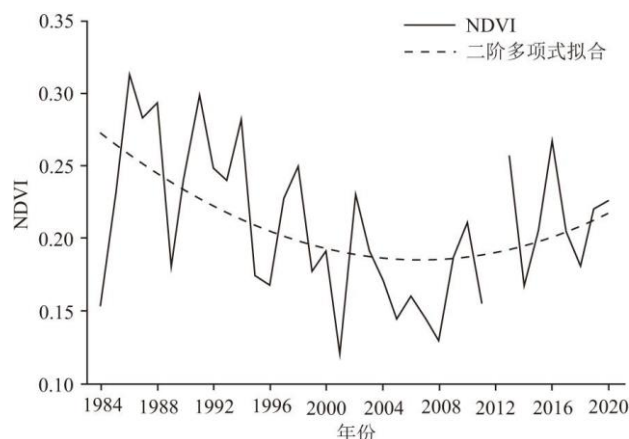


图 5 塌陷区暖季(5~9 月)NDVI 变化

4 讨论

淮北地区煤炭开采历史较长,但是受到开采技术和规模的限制,解放前并未形成大规模的塌陷。上世纪 40 年代的地形图上除华家湖(现在的化家湖水库)外,在淮北地区未见大规模的水体,说明当时可能并未形成大的塌陷区。新中国建立后,不断兴建煤矿,开采规模不断扩大,1964 年原煤产量达到 202 万 t,到 2019 年原煤产量达到 3804.6 万 t,原煤产量扩大了将近 20 倍,煤炭开采规模的扩大导致了塌陷区的数量增加和面积的扩大。

塌陷导致了大量农民失去土地,粮食减产和人口搬迁。在 2000 年前后,淮北市的人均耕地面积为 0.067hm^2 ,据此估算因采煤塌陷导致了约 10~20 万农民失去土地,据《淮北市矿山地质环境保护与治理规划(2009-2020 年)》显示,截至 2008 年末,据不完全统计,因塌陷(主要为采煤塌陷)25 万多农民无地可种,失去土地的农民被迫外出打工或从事其它行业来维持生计。按照粮食年亩产 0.5~0.7t 估算,塌陷导致每年损失粮食产量约 4~6 万 t。根据淮北地区宅基地面积标准(户均 220m^2),按宅基地占建设用地比例约 30%,户均 3~5 人估算,采煤塌陷导致了 20~34 万人搬迁,据《淮北市矿山地质环境保护与治理规划(2009-2020 年)》显示,截至 2008 年末,据不完全统计,因塌陷(主要为采煤塌陷)先后搬迁的村庄近 300 个,涉及 16 个乡镇,135 个行政村 50 多万人,在安置搬迁居民的过程中,因安置办法、安置费用等问题,产生了一系列的社会问题。

随着经济的不断发展、城市化进程的加剧以及人口规模的不断增加,人地矛盾不断加剧,塌陷区的回填利用规模也在不断扩大。因为建设用地的经济价值较大,因而从 1984~2010 年,回填土地的主要利用类型为建设用地。受耕地保护、占补平衡等政策的影响,塌陷区复垦的规模从 1990 年至今不断扩大。

煤矿开采塌陷的过程中植被遭到大量破坏,地表植被受到负面影响。整个研究时段内,塌陷区植被指数虽然在 2007 年之后有上升的趋势,但是在 1984~2007 年塌陷区植被指数下降十分显著,说明塌陷对植被的破坏作用巨大,随着国家一系列生态环境保护政策的制定和实施,植被覆盖会逐步改善;但是和开采初期相比,目前塌陷区内的植被总体上变差,说明煤矿开采产生的塌陷对植被覆盖影响巨大,塌陷区植被的恢复需要很长一段时间。考虑到当前的原煤开采规模和塌陷区面积净增状况,未来塌陷区的面积很有可能会进一步增加,塌陷对土地资源的破坏,对粮食产量、生态环境的负面影响以及对塌陷区居民的生产、居住、生活的负面影响会进一步加大。未来在对塌陷区进行开发利用及管理的过程中,需要更多地考虑生态环境的因素,积极提升塌陷区生态环境质量。

因研究的时间分辨率较大,大部分时段都在 10a 左右,在每个时段内都可能存在先塌陷后被回填的情况,这些塌陷在结果中无法反映,因而实际的塌陷面积和影响会更大。这也使得估算的失地农民数量和搬迁人口数量低于相关统计数据。

5 结论

利用 1973~2020 年的 LandsatMSS、TM、ETM+和 OLI 影像,通过目视解译获取了 6 个时期淮北市采煤塌陷区信息,通过监督分类和目视修正提取了 5 个时段的土地利用信息。近 50a 来,随着原煤开采量的不断增加,塌陷区的数量不断增多,面积不断扩大,在 2020 年共有塌陷区 243 个,总面积约 1.2 万 hm^2 。塌陷破坏了耕地和建设用地,对粮食产量和植被状况产生了负面影响。塌陷导致了农民失去土地、搬迁,并产生了一些社会问题。未来,塌陷区面积很有可能会进一步增加,需要对塌陷区做更多监测,评估塌陷对土地资源、生态环境和社会经济的影响,统筹煤炭资源开发利用与土地资源利用、生态环境保护和社会经济可持续发展的关系。

参考文献:

- [1]刘晓龙,葛琴,姜玲玲,等.中国煤炭消费总量控制路径的思考[J].中国人口·资源与环境,2019,29(10):160-166.
- [2]HU Z,XU X,ZHAO Y.Dynamic monitoring of land subsidence in mining area from multi-source remote-sensing data — a case study at Yanzhou,China[J].International Journal of Remote Sensing,2012,33(17):5528-5545.
- [3]HE T,XIAO W,ZHAO Y,et al.Continues monitoring of subsidence water in mining area from the eastern plain in China from 1986 to 2018 using Landsat imagery and Google Earth Engine[J].Journal of Cleaner Production,2021,279:123610.
- [4]REN H,XIAO W,ZHAO Y,et al.Land damage assessment using maize aboveground biomass estimated from unmanned aerial vehicle in high groundwater level regions affected by underground coal mining[J].Environmental Science and Pollution Research,2020,27(17):21666-21679.
- [5]KOPEC´A, TRYBAŁA P, GŁAŻBICKI D,et al.Application of remote sensing,GIS and machine learning with geographically weighted regression in assessing the impact of hard coal mining on the natural environment[J].Sustainability,2020,12(22):9338.
- [6]XU J,ZHAO H,YIN P,et al.Impact of underground coal mining on regional landscape pattern change based on life cycle:A case study in Peixian,China[J].Polish Journal of Environmental Studies,2019,28(6):4455-4465.
- [7]LI Z,WU S,ZHANG S,et al.Optimization of land reuse structure in coal mining subsided areas considering regional economic development:A case study in Pei county,China[J].Sustainability,2020,12(8):3335.
- [8]HANNEMANN W,BROCK T,BUSCH W.GIS for combined storage and analysis of data from terrestrial and synthetic aperture radar remote sensing deformation measurements in hard coal mining[J].International Journal of Coal Geology,2011,86(1):54-57.
- [9]GRZOVIC M,GHULAM A.Evaluation of land subsidence from underground coal mining using TimeSAR (SBAS and PSI) in Springfield,Illinois,USA[J].Natural Hazards,2015,79(3):1739-1751.
- [10]XU J,YIN P,HU W,et al.Assessing the ecological regime and spatial spillover effects of a reclaimed mining subsided lake:A case study of the Pan'an Lake wetland in Xuzhou[J].PLOS ONE,2020,15(8):e0238243.

-
- [11] KUMAR S, KUMAR D, CHAUDHARY S K, et al. Land subsidence mapping and monitoring using modified persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar in Jharia Coalfield, India[J]. Journal of Earth System Science, 2020, 129(1):146.
- [12] PADMANABAN R, BHOWMIK A, CABRAL P. A remote sensing approach to environmental monitoring in a reclaimed mine area[J]. International Journal of Geo-Information, 2017, 6(12):401.
- [13] 国巧真. 采煤塌陷区遥感动态监测系统研究[D]. 唐山: 河北理工大学, 2004.
- [14] 张海林. 龙口煤矿塌陷区遥感动态监测及土地复垦利用研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2006.
- [15] 李海鹰. RS 与 GIS 技术在采煤塌陷区生态环境时空监测中的研究与应用——以开滦煤矿塌陷区为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2007.
- [16] 程玉书, 郭凌飞, 朱琳, 等. 基于 DInSAR 技术与 WorldView-2 影像的煤矿塌陷区信息提取研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(7):91-93.
- [17] 王义方, 李新举, 李富强, 等. 基于多时相遥感影像的采煤塌陷区典型扰动轨迹识别——以山东省济宁市典型高潜水位矿区为例[J]. 地质学报, 2019, 93(S1):301-309.
- [18] 翟孟源, 徐新良, 江东, 等. 1979~2010 年乌海市煤矿开采对生态环境影响的遥感监测[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(6):933-940.
- [19] 裴文明, 姚素平, 董少春, 等. 皖北刘桥矿采煤塌陷区生态环境动态监测[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(2):67-72.
- [20] 许幼霞, 周旭, 赵翠薇, 等. 1990~2015 年间贵州省植被生态环境质量变化特征[J]. 地球与环境, 2017, 45(4):434-440.
- [21] 孙明, 杨洋, 沈渭寿, 等. 基于 TM 数据的雅鲁藏布江源区草地植被盖度估测[J]. 国土资源遥感, 2012, (3):71-77.
- [22] 刘沁萍, 杨永春, 田洪阵, 等. 快速城市化时期中国城市建成区植被状况的时空分异特征[J]. 自然资源学报, 2014, 29(2):223-236.
- [23] RHEW I C, VANDER S A, KEARNEY A, et al. Validation of the normalized difference vegetation index as a measure of neighborhood greenness[J]. Annals of Epidemiology, 2011, 21(12):946-952.
- [24] MCFEETERS S K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7):1425-1432.