



移动扫码阅读

孙茹,朱晓峻,张鹏飞,等.高潜水位采煤沉陷区积水时空演化特征研究——以安徽省矿区为例[J].煤炭科学技术,2022,50(12):215-224.

SUN Ru, ZHU Xiaojun, ZHANG Pengfei, *et al.* Study on temporal and spatial evolution characteristics of water accumulation in coal mining subsidence area with high groundwater level: taking Anhui Province Mining Area as an example[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 215-224.

高潜水位采煤沉陷区积水时空演化特征研究 ——以安徽省矿区为例

孙茹¹,朱晓峻^{1,2,4},张鹏飞¹,梁明^{1,4},张鑫¹,宁正源¹,彭雪妮¹,刘辉¹,杨晓玉³,黄文山²,颜宇²,段长征²
(1.安徽大学安徽省矿山生态修复工程实验室,安徽合肥 230601;2.淮北市自然资源和规划局,安徽淮北 235000;
3.合肥财经职业学院,安徽合肥 230601;4.自然资源部城市国土资源监测与仿真重点实验室,广东深圳 518034)

摘要:随着煤炭资源大面积、高强度开采,高潜水位矿区积水问题尤为突出,对周围生态环境产生了严重影响。为了给采煤沉陷积水区生态环境修复提供科学依据,开展了高潜水位采煤沉陷区积水的时空演化特征研究和影响因素分析。以整个安徽省矿区为研究区域,基于 Landsat TM/OLI 遥感数据,采用归一化水体指数法(NDWI)和目视解译法对 1995—2020 年(共计 22 期)和 2020 年 12 个月份(12 期)沉陷区积水区域进行提取,获取了近 25 年安徽省采煤沉陷区积水空间信息,并结合水文和降雨资料分析和讨论了沉陷区积水时空演化的影响因素。结果表明:①近 25 年来,安徽省采煤沉陷区积水面积的增长呈“缓慢—快速—稳定”3 阶段分布特征。研究期内平均积水面积增长了约 6 倍,从 18.95 km² 增长到 118.09 km²,年均增长 3.97 km²。②从时间尺度上沉陷区积水演化分为 3 阶段:第 1 阶段(1995—2005 年),由于积水初步形成还未稳定,增长速度较为缓慢,年均增长率为 4.65%;第 2 阶段(2005—2013 年),基于安徽省煤炭开采量进入快速增长期,积水面积也增长迅速,年均增长率为 6.64%;第 3 阶段(2013—2020 年)增长率开始不断减小,积水面积逐渐趋于稳定,年均增长率为 3.42%。空间尺度上,安徽省沉陷区积水主要集中在淮南市和淮北市,约占全部积水面积的 70%。③安徽省采煤沉陷区积水演化长时间尺度的主要影响因素是煤炭开采量,短时间尺度的主要影响因素则是大气降雨。④利用 Logistic 回归曲线建立了安徽省采煤沉陷区积水面积预测模型,预测得到在未来一段时间安徽省采煤沉陷积水面积将仍处于低速增长阶段,到 2030 年,枯水期积水区面积约达到 130 km²。获取了高精度的沉陷区积水信息,分析了其时空演化规律及影响因素,可以给高潜水位采煤沉陷区积水的治理以及沉陷区的生态修复提供科学依据。

关键词:高潜水位;采煤沉陷区;积水;遥感监测;时空演化;预测分析

中图分类号:TD327 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2022)12-0215-10

Study on temporal and spatial evolution characteristics of water accumulation in coal mining subsidence area with high groundwater level: taking Anhui Province Mining Area as an example

SUN Ru¹, ZHU Xiaojun^{1,2,4}, ZHANG Pengfei¹, LIANG Ming^{1,4}, ZHANG Xin¹, NING Zhengyuan¹, PENG Xueni¹, LIU Hui¹, YANG Xiaoyu³, HUANG Wenshan², YAN Yu², DUAN Changzheng²

(1. Anhui Province Engineering Laboratory for Mine Ecological Remediation, Anhui University, Hefei 230601, China; 2. Huaibei City Natural Resources and Planning Bureau, Huaibei 235000, China; 3. Hefei Vocational College of Finance and Economics, Hefei 230601, China; 4. Key Laboratory of Urban Land Resources Monitoring and Simulation, Ministry of Natural Resources, Shenzhen 518034, China)

收稿日期:2022-04-20 责任编辑:朱恩光 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.CLNH21-004

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51804001);自然资源部城市国土资源监测与仿真重点实验室开放基金资助项目(KF-2019-04-035);安徽省高校自然科学研究重点资助项目(KJ2021A0080)

作者简介:孙茹(1997—),女,安徽六安人,硕士研究生。E-mail: sunru1103@163.com

通讯作者:朱晓峻(1989—),男,江苏盐城人,副教授,硕士生导师,博士。E-mail: zhuxiaojunahu@126.com

Abstract: In recent years, with the large-scale and high-intensity mining of coal resources, the problem of water accumulation in mining areas with high groundwater levels has become particularly prominent, which has had a serious impact on the surrounding ecological environment. In order to provide scientific basis for the restoration of the ecological environment, the study on the temporal and spatial evolution characteristics and influencing factors of the coal mining subsidence area with high groundwater level were carried out. Taking the whole mining area of Anhui Province as the research subject, based on Landsat TM/OLI remote sensing data, the NDWI and visual interpretation method were used to conduct surveys on the water accumulation area in the subsidence area from 1995 to 2020 (22 periods) and 12 months in 2020 (12 periods) and the spatial information of waterlogging in the coal mining subsidence area in Anhui Province in recent 25 years was obtained. Combined with hydrological and rainfall data, the factors affecting the spatio-temporal evolution of waterlogging in the subsidence area were analyzed and discussed. The results show that: ① In the past 25 years, the area of accumulated water in the coal mining subsidence area in Anhui Province has been growing in three stages: slow, fast and stable. During the study period, the average stagnant area increased by about 6 times, from 18.95 km² to 118.09 km², with an average annual increase of 3.97 km². ② From the time scale, the evolution of accumulation area in the subsidence area can be divided into three stages: the first stage (1995—2005), due to the fact that most of the accumulation water has not yet stabilized initially, the growth rate is relatively slow, with an average annual growth rate of 4.65%; In the second stage (2005—2013), based on the rapid growth of coal mining, the area of accumulation water has also entered a period of rapid growth, with an average annual growth rate of 6.64%; In the third stage (2013—2020), the growth rate has begun to decrease, and the accumulation water has gradually stabilized, with an average annual growth rate of 3.42%. From the spatial scale, the accumulation water is mainly concentrated in Huainan and Huaibei cities, accounting for about 70% of the total accumulated water area. ③The long-term factor for the change of the water accumulation is coal mining volume, while the main influencing factor in short time scale is atmospheric rainfall. ④The logistic regression curve was used to establish a prediction model for the water accumulation area of coal mining subsidence in Anhui Province. It is predicted that the coal mining subsidence water area in Anhui Province will still be in a low-speed growth stage in the future. By 2030, the accumulation area in the dry season will reach about 130 km². The high-precision water accumulation information in the subsidence area was obtained, and its temporal and spatial evolution laws and influencing factors were analyzed, which can provide a scientific basis for the treatment of water accumulation in the coal mining subsidence area with high groundwater level and the ecological restoration of the subsidence area.

Key words: high groundwater level; coal mining subsidence area; water accumulation; remote sensing monitoring; spatiotemporal evolution; predictive analysis

0 引 言

煤炭资源是我国非常重要的能源基础,煤炭资源的开采也是国民经济的基础产业之一^[1]。在推进中国经济发展的同时也产生了一系列负面影响^[2]。随着采煤工业的不断发展,煤炭开采量的增多引起了地表变形、沉陷甚至坍塌^[3]。大面积耕地破坏、土地资源浪费以及基础设施损毁,破坏了原有的生态环境,对当地居民安全产生了严重的威胁^[4]。近些年,政府也出台一些环境保护相关政策和法规,减轻沉陷区的破坏现状,阻止环境继续恶化^[5]。对高潜水位采煤沉陷区积水时空演化特征的研究可以进一步了解沉陷区积水面积的变化情况,有利于煤炭开采后沉陷区的环境治理。

针对沉陷区积水的研究方法有实地测量和遥感数据提取,实地测量所得到的数据精准但是在某些复杂的矿区环境中难以操作,且工作量大。近些年随着遥感技术的发展,利用遥感技术对矿区进行研究逐渐成为主流。彭苏萍^[6]、汪宝存^[7]、李新举^[2]、陈晓谢^[8]等通过获取不同时相的遥感数据对矿区的

积水以及矿山沉陷动态变化进行了分析和探讨,反应了采煤沉陷区的一些动态信息。但是现有的研究大多都侧重于单一矿区或工作面,少有大面积、长时空的沉陷区积水动态演化特征研究,且对积水动态变化的影响因素分析较少,沉陷区积水面积演化规律分析不够全面。

安徽省矿区位于安徽省北部,地下水丰富,受构造条件影响,自南向北潜水位逐渐增高^[9],属于典型的高潜水位矿区。目前,尚未有完整的数据来分析整个安徽省采煤沉陷区积水的时空演化特征,因此亟需科学的方法与数据进行长时序、大面积的积水变化研究。以整个安徽省的矿区为研究区域,获取了1995—2020年枯水期和丰水期各11期以及2020年12期积水动态变化数据。深入从时间尺度和空间尺度上分析了沉陷区积水的演化特征及其影响因素,丰富、科学的沉陷区积水数据为高潜水位采煤沉陷区的治理提供了有效的依据。

1 研究区概况

安徽省位于中国华东地区,总面积14.01万km²,

是中国重要煤炭基地之一。采矿历史悠久，矿区煤层厚度大，种类多样且埋藏较深，煤炭以井工开采为主。随着开采量的增大以及时间的变化导致矿区地表沉陷、潜水位下降、积水等一系列问题日益突出^[10]。安徽省属于季风气候区，夏季炎热多雨，冬季寒冷干燥，旱涝转变突然，降水量的年际变化大，丰、枯水年降水量比差达 3~4 倍。矿区主要分布在安徽省的北部(图 1)。

由于特殊的地质构造条件，松散含水岩分布广，富水性较好，地下水是重要水源，大部分地区的潜水位在 2 m 左右。皖北平原的东南部到西北部，整体浅层地下水的埋深是在逐渐增大的^[11]，变化范围在 1~4 m。煤矿开采后上部覆盖的土地和岩石失去支撑，原始应力平衡破坏，在重力作用下地表下沉^[12]，大气降水和地表径流的作用使得沉陷区逐渐形成积水。

2 数据与方法

随着遥感技术的成熟，考虑其周期短、精准度高、数据量大等特点，遥感技术逐渐成为水域监测的重要技术手段。在研究中采用 Landsat-5 和 Landsat-8 系列遥感影像，2 个传感器分辨率均为 30 m，属于中分辨率传感器，其在地表水动态监测过程中较为理想也应用较多^[13]。

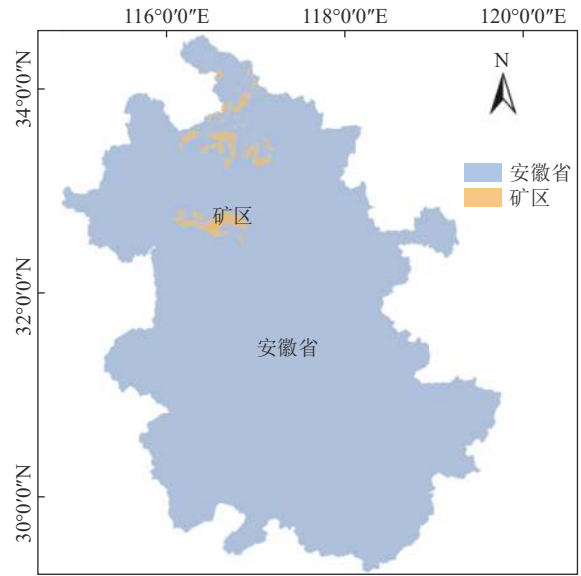


图 1 安徽省矿区分布

Fig.1 Distribution of mining areas in Anhui Province

在 1995—2020 年间选取合适的遥感影像，经过处理最终获取 34 期满足水体提取要求的影像，即 11 期枯水影像，11 期丰水影像和 2020 年 12 期影像，见表 1。根据降雨量的差异，一年中 6—9 月份为丰水期，3—5 月份为平水期，12 至末年 2 月份为枯水期。为了使数据更具有代表性，取丰水期与枯水期的均值为平均积水面积。

表 1 安徽省矿区遥感影像信息

Table 1 Remote sensing image information of mining areas in Anhui Province

年份	传感器类型	时期	获取日期	分辨率/m	年份	传感器类型	时期	获取日期	分辨率/m
1995	Landsat-5 TM	枯水期	1995-02-02	30	2010	Landsat-5 TM	枯水期	2010-02-06	30
		丰水期	1995-06-21				丰水期	2010-09-18	
1998	Landsat-5 TM	枯水期	1998-12-15	30	2013	Landsat-8 OLI	枯水期	2013-02-15	30
		丰水期	1998-07-15				丰水期	2013-07-24	
2000	Landsat-5 TM	枯水期	2000-02-20	30	2015	Landsat-8 OLI	枯水期	2015-01-28	30
		丰水期	2000-06-11				丰水期	2015-07-30	
2003	Landsat-5 TM	枯水期	2003-12-20	30	2018	Landsat-8 OLI	枯水期	2018-02-21	30
		丰水期	2003-06-20				丰水期	2018-07-22	
2005	Landsat-5 TM	枯水期	2005-01-07	30	2020	Landsat-8 OLI	枯水期	2020-02-02	30
		丰水期	2005-06-11				丰水期	2020-08-28	
2008	Landsat-5 TM	枯水期	2008-02-10	30					
		丰水期	2008-06-24						

水域提取的常见方法有单波段阈值法、归一化水体指数法(NDWI)、归一化植被指数法(NDVI)和阴影水体指数法等^[14]，这些方法在提取大面积水域时可以达到快速、精准，但是沉陷区积水与普通水体光谱相似，现有算法无法精准提取。为了提高精准度，结合归一化水体指数法(NDWI)和目视解译法提取积水。相较于单一目视解译法，半自动化积水提取方法减小了 40% 的工作量。如图 2 所示进行目视

解译。

NDWI 的计算公式如下：

$$NDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{NIR}}{\rho_{Green} + \rho_{NIR}}$$

式中： ρ_{Green} 为绿波段反射率， ρ_{NIR} 为近红外波段反射率。在 Landsat-5 中分别代表 band 2 和 band 4，land-sat-8 中则代表 band 3 和 band 5。

沉陷区积水提取的主要流程如图 3 所示：

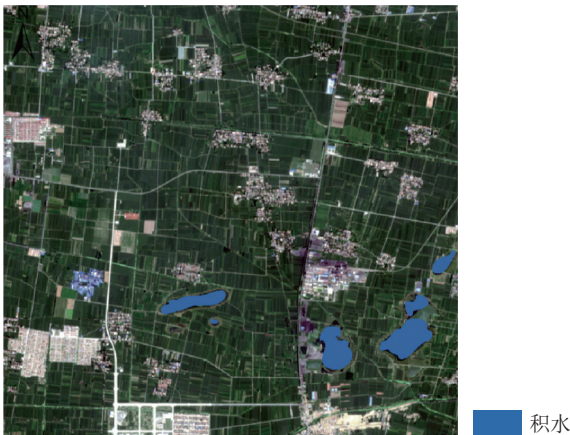


图2 沉陷区积水提取结果

Fig.2 Results of water extraction in subsidence area

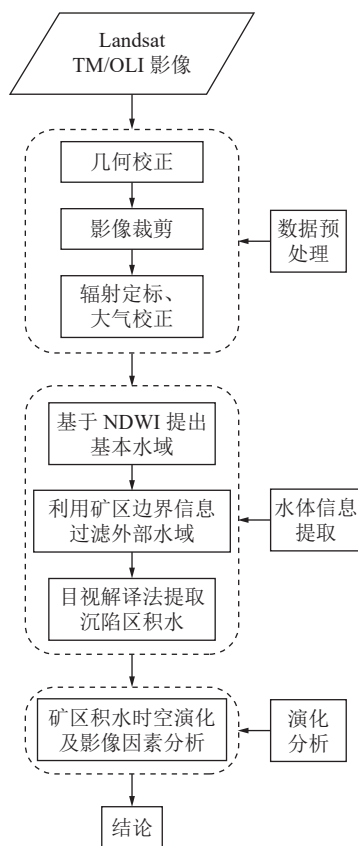


图3 研究方法流程

Fig.3 Flow chart of research method

1)原始影像的预处理,包括几何校正、辐射定标、大气校正、裁剪等步骤。

2)对预处理后的遥感影像首先基于 NDWI 提取出基本水域,根据矿区边界信息过滤掉矿区外的水域,再通过目视解译法精准提取矿区内部沉陷区积水。

3)通过栅失转换、面积统计等 GIS 方法获取沉陷区积水的空间信息^[15]。根据多期变化数据分析积水的空间演化规律。

3 沉陷区积水演化结果与分析

利用上述研究方法对安徽省采煤沉陷区积水进行提取,采集了近 25 a 枯水期和丰水期积水动态变化信息,图 4 所示的是以丰水期为例的矿区积水分布,图 5 为各时期积水面积变化趋势。通过多年积水信息的横向、纵向比较进一步分析了大气降雨、潜水位变化和煤炭开采量对沉陷区积水面积演化的影响,同时还获取了单一煤矿的积水信息。

3.1 安徽省采煤沉陷区积水面积变化分析

受外界各种因素的影响,煤矿塌陷区积水的面积逐年增加^[16]。从时间角度分析,25 a 内安徽省采煤沉陷区积水面积增长主要经历缓慢-快速-平稳。平均积水面积从 1995 年的 18.95 km² 增加到 2020 年的 118.09 km²,年均增加 3.97 km²。从图 6 中可以看出 1995—2005 年积水面积的增长较为平缓,平均积水面积增长了 11.23 km²,年均增长率为 4.65%。在 2005—2013 年,沉陷区的积水面积的年均增长率大于 20%,处于快速增长时期,从 30.18 km² 增加到 89.82 km²,年均增长率为 6.64%,并且在 2008 年积水面积年际增长率达到最大值 26.75%。2013 年之后积水面积的增长又开始放缓逐渐趋于稳定,2013—2020 年积水面积增加了 28.27 km²,年均增长率为 3.41%,约为上一阶段的 50%,并在 2020 年的年际增长率达到近 25 年最小值,仅为 4.39%,相较于最大值减少了 22.36%。

3.2 安徽省不同矿区的积水面积变化特征

为研究不同矿区的积水面积演化,进一步统计了安徽省在 1995—2020 年间出现沉陷积水的煤矿,表 2 列出 10 个具有代表性的煤矿。从表中可以看出不同矿区,积水变化差异较大。张集煤矿、潘一煤矿沉陷区积水面积增加最为剧烈,在这 25 年间积水面积增加了 15.5 km² 和 8.24 km²,张集煤矿在 2020 年沉陷区积水面积已达到矿区总面积的 21.41%。其次谢桥煤矿和潘三煤矿增加了 7.74 km² 和 7.07 km²;其他煤矿的沉陷区积水增加的面积都少于 5 km²。

根据积水变化特征将矿区分为两类,第 1 类是在 1995 年之前就存在积水的矿区,由于原有开采导致积水已经形成,后期的多煤层重复开采使得积水深度不断增加但积水面积变化不明显。例如百善煤矿、双龙煤矿,在 1995—2020 年沉陷区积水面积仅增加 1.32 km² 和 0.59 km²。第 2 类是在 1995 年之后才出现积水的矿区并且积水面积增长迅速,由于上部煤层刚刚开采形成新的地表沉陷区域,导致积

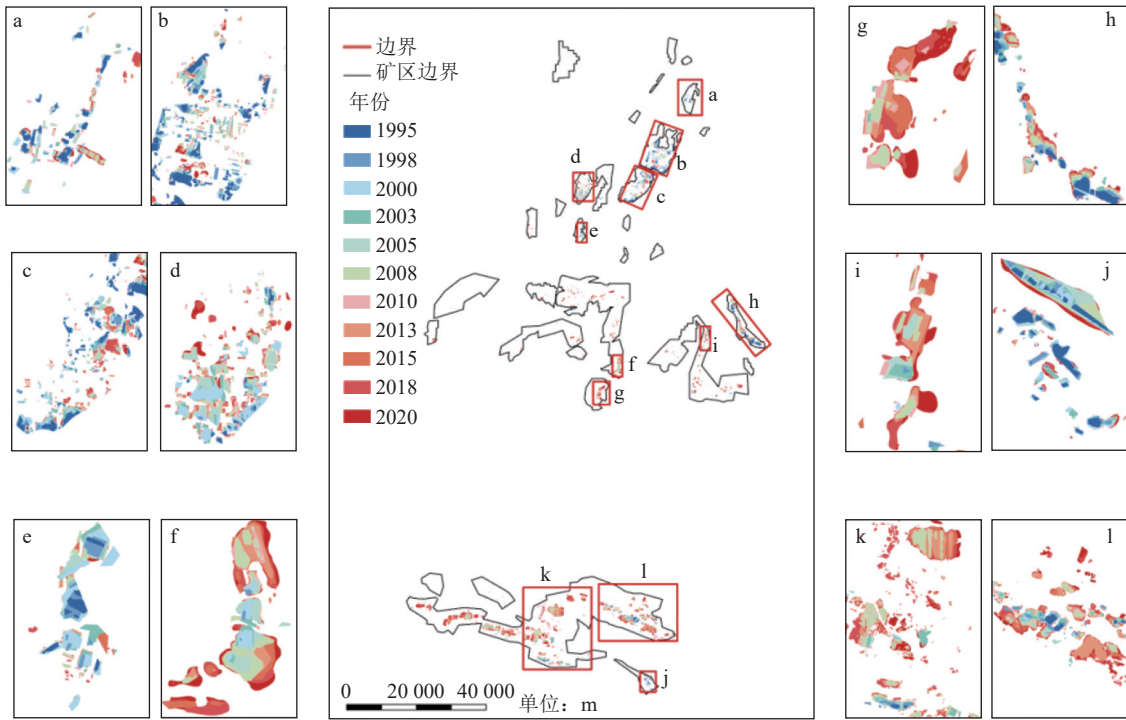


图 4 1995—2020 年矿区积水变化(丰水期)

Fig.4 Distribution of accumulated water in mining area from 1995 to 2020(Wet season)

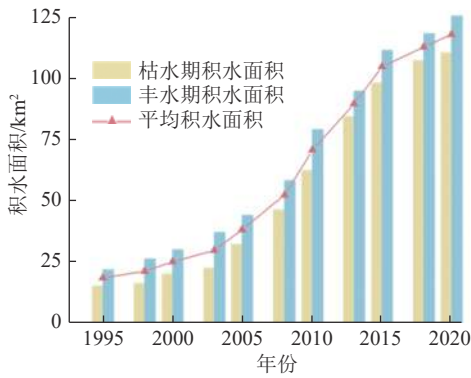


图 5 1995—2020 年沉陷区积水面积变化趋势

Fig.5 Change trend of accumulated water in subsidence area from 1995 to 2020

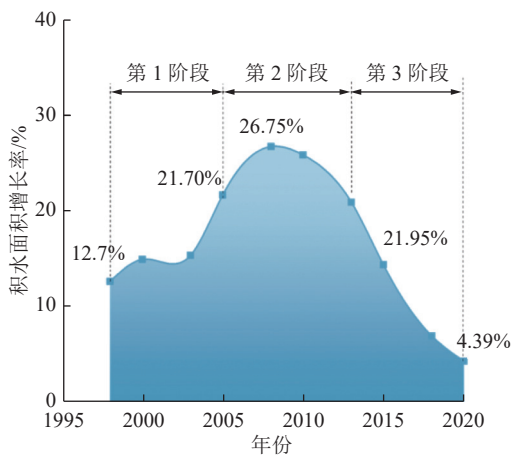


图 6 积水面积增长率变化

Fig.6 Change of growth rate of stagnant water area

水面积增长迅速。例如张集煤矿和谢桥煤矿, 1995 年时还未积水, 但到 2020 年是积水面积已经达到 15.5 km² 和 7.74 km²。

3.3 安徽省不同资源型城市矿区积水情况分析

安徽省的煤矿主要集中在淮南市和淮北市, 矿区面积占整个安徽省矿区面积的 31.16% 和 30.74%, 而宿州市、亳州市和阜阳市分布较少, 占整个矿区面积的 38%。

从空间角度来看, 安徽省采煤沉陷区积水面积的增加也主要发生在淮南市和淮北市。1995 年淮北市的沉陷区积水面积远超过其他地区为 12.79 km², 但其增长速度较平缓, 年均增长率为 2.54%。亳州市和阜阳市在前期积水问题还不明显, 图 7 可以看出 2005 年亳州市还未出现积水, 并且其积水面积一直是保持最小, 25 年内只增加了 5.32 km², 积水面积占比也一直最小。阜阳市在 1998 年才开始出现积水, 但是却在 2020 年积水面积达到 21.98 km², 仅次于淮南市和淮北市, 积水面积占其矿区面积的比例在 2003—2018 年快速上升, 从 0.24% 增加到 8.41%。淮南市沉陷区积水一直处于快速增长的状态, 积水占比从 0.39% 增加到 6.91%, 并在 2009 年以后积水面积远多于其他城市, 到 2020 年淮南市的积水占全部积水面积的 36.75%。在 25 a 内, 淮南市积水面积增加了 27.75 km², 年均增加 1.85 km², 年际变化率

表2 部分煤矿积水情况

Table 2 Water accumulation in some coal mines

煤矿	年份										
	1995	1998	2000	2003	2005	2008	2010	2013	2015	2018	2020
谢桥煤矿	0	0.07	0.15	0.60	0.92	2.12	3.81	5.00	6.11	6.83	7.74
张集煤矿	0	0.20	0.32	0.56	1.16	3.36	4.60	7.33	6.87	9.17	15.50
潘一煤矿	0.83	1.82	1.77	3.06	3.14	3.15	4.00	7.90	5.22	10.52	9.07
潘三煤矿	0	0.63	0.44	1.07	1.59	1.87	2.10	3.50	4.10	5.01	7.07
临涣煤矿	0	0.61	0.39	0.22	0.22	0.35	0.64	0.92	1.33	1.69	1.46
百善煤矿	0.36	0.75	2.68	2.91	1.72	1.65	1.47	1.67	1.62	1.28	1.68
刘桥煤矿	0.18	0.31	1.61	0.80	1.91	2.08	2.17	1.95	2.50	2.04	3.69
杨庄煤矿	2.16	3.18	3.46	3.53	4.97	3.76	2.77	2.93	3.33	4.42	6.48
双龙煤矿	2.27	1.93	3.16	2.20	1.89	1.96	2.10	1.54	1.91	1.85	2.86
石台煤矿	0.96	1.09	1.68	1.60	2.29	2.06	1.93	1.67	2.01	2.19	2.95

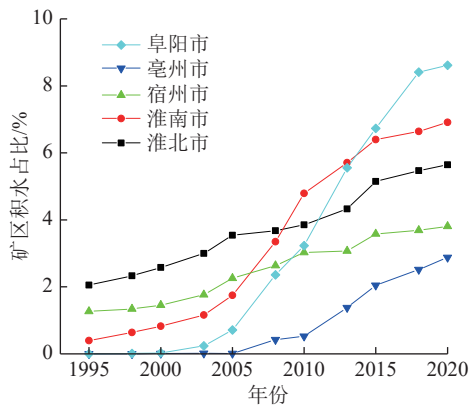


图7 安徽省不同资源型城市积水面积占矿区比例

Fig.7 Percentage of water accumulation in different resource-based cities in Anhui Province

为6.12%。主要原因可能是安徽省南部的降水量多于北部，潜水位也更高，地下水与地表水联系紧密；其次淮南市的矿区面积大且集中，积水之间的相互影响也更大。

3.4 安徽省采煤沉陷区积水面积演化影响因素分析

从3.1节数据分析来看，在1995—2020年，安徽省采煤沉陷区积水面积在不同阶段增长趋势有所差别。从《安徽省统计年鉴》收集了安徽省矿区近25年的降雨量、煤炭的生产量以及潜水位的变化量，对沉陷区1995—2020年间积水面积的演化进行影响因素分析。

3.4.1 降雨量对安徽省采煤沉陷区积水面积演化分析

在没有其他影响因素的情况下，大气降雨作为沉陷区积水的直接补给来源，对积水面积演化会产生一定影响^[17]。从图8中可以看出，1995—2005年安徽省矿区年际降雨量波动明显，枯水年和丰水年

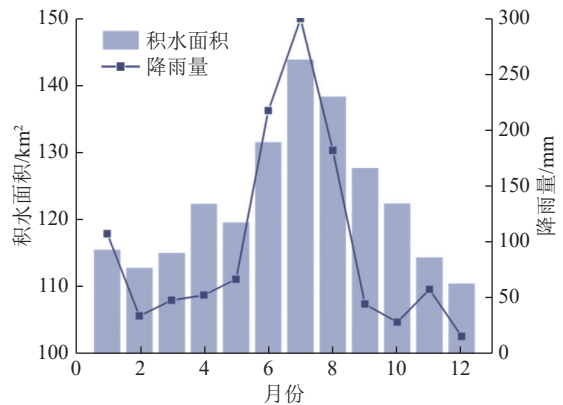


图8 矿区积水面积增加与降雨量对比

Fig.8 Contrast chart of increase in water accumulation area and rainfall in mining area

降水量差异较大，这期间积水面积的增长并不明显，10年间增长了11.23 km²。2005—2018年，该地区年际降雨量波动较小，呈平稳状态，但是这期间积水面积却呈大幅上升，从38.54 km²增加到112.91 km²，积水面积的增加量也在这期间达到最大，2013年之后积水面积增加量开始减小。所以从长时间尺度来看，大气降雨并不是沉陷区积水面积变化的主要影响因素。从图5枯水期和丰水期积水面积的对比可以看出不同时期积水面积差异较大，平均相差11.9 km²。特别是在丰水年里差异更为明显，例如2020年安徽淮河地区遭遇近十年一遇的流域性较大洪水，强降水覆盖了整个淮河以南地区，这一年枯水期和丰水期的积水面积差值也达到近25 a最大，15.09 km²；其次2003年二者相差14.39 km²。图9是安徽省2020年12个月份沉陷区积水面积变化和降雨量对比。从图9中可以看出，一年中不同月份沉陷区积水面积会随降雨量变化而变化，7月份降雨量最多，

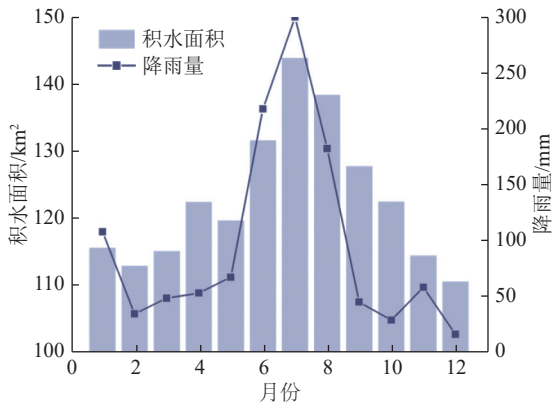


图 9 2020 年积水面积变化和降雨量对比

Fig.9 Comparison chart of water accumulation change and rainfall in 2020

积水面积也最大。1—7 月积水面积逐渐增大,在 7 月达到最大值 143.69 km²,7—12 月积水面积又开始减小。2020 年丰水期的积水面积为 135.26 km²,平水期的积水面积为 118.99 km²,枯水期的积水面积为 112.98 km²,3 个时期积水面积差异明显。所以从短时间尺度来分析,降雨量是积水面积变化的主要影响因素。

3.4.2 地下水对安徽省采煤沉陷区积水面积演化分析

地下水和地表水的相互补给作用产生一定的水力联系。潜水位受降雨量和人工开采的影响较大,潜水位通常在丰水年上涨,枯水年下降。在高潜水位矿区,地下水对沉陷区积水有一定水文补给作用,因此潜水位的变化对沉陷区积水面积会产生一定影响^[18]。在整个安徽省矿区附近城市选取不同地下水观测站点采集地下水高程,如图 10 所示淮南地区的地下水水位要明显高于淮北地区,故淮南地区地下水与地表水的水力联系更为紧密。

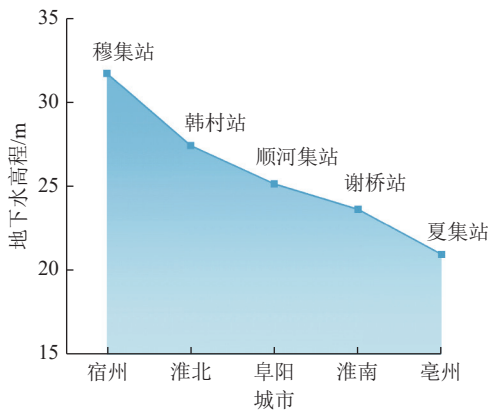


图 10 不同城市地下水高程变化

Fig.10 Groundwater depth changes at different cities

从 1995—2020 年安徽省矿区整个潜水位的变化和积水面积增加量对比图来看(图 11),潜水位

增长量要多于下降量。潜水位高度累计增长 10.2 m,下降 8.17 m。1995—2005 年间潜水位波动较大,例如 1997 年和 2001 年潜水位下降了 1.93 m 和 1.8 m,整体潜水位下降 0.8 m,这可能也在一定程度上导致这一时期积水面积增加缓慢。2005—2015 年,潜水位的高度整体上升了 0.87 m,积水面积在这期间增长迅速。2015—2020 年,潜水位高度也是呈上升趋势,升高了 0.69 m,但是积水面积呈弱增长趋势。所以潜水位的变化影响地下水和地表积水之间的水力联系,但并不是积水面积变化的最主要影响因素。

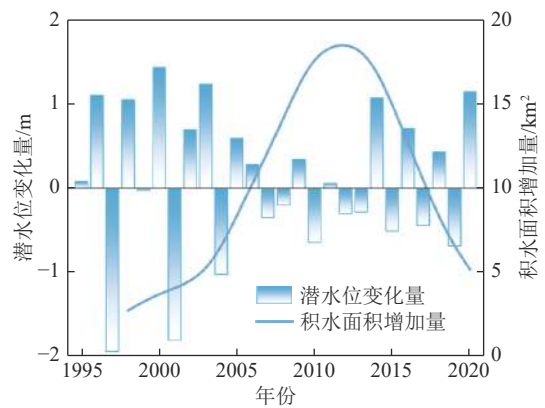


图 11 矿区潜水位变化与积水面积增加量对比

Fig.11 Comparison of changes in phreatic level and increase in water accumulation in mining area

3.4.3 煤炭开采量对安徽省沉陷区积水面积演化的影响分析

矿区地表沉陷的最直接原因是煤炭的开采^[19],故积水面积在一定程度上与煤炭产能有一定联系。早期煤矿的储量丰富,在 2000 年之前安徽省年均煤矿存储量约为 245 亿 t,但是受开采技术影响,煤炭开采规模较小。如图 12 所示,1995—2003 年煤炭产能较低,相应年份的积水面积也是呈小幅增长状态。2003 年到 2013 年这 10 年间煤炭生产量显著增加,从 0.34 亿 t 增加到 1 亿 t,随着煤炭开采量的快速增加,积水面积也在迅速扩张,共增长了 59.65 km²。经过大规模的煤炭开采,安徽省的煤炭储量逐渐枯竭,2013 年安徽省的煤炭储量仅为 113.28 亿 t,约为 2000 年的 1/2。随后政府颁布一系列政策,关闭大量中小型煤矿,以及“十三五”规划推进采煤沉陷区的治理。2013 年以后煤炭开采量开始减少,积水面积的增长率也相应减小,积水面积逐渐趋于稳定。

对煤炭的生产量和沉陷区的积水面积进行相关性分析得出 $R=0.955, p<0.05$,两者呈显著的正相关。结合文中数据以及变化趋势可以将 1995—2020 年安徽省采煤沉陷区积水面积变化分为 3 个阶段,分

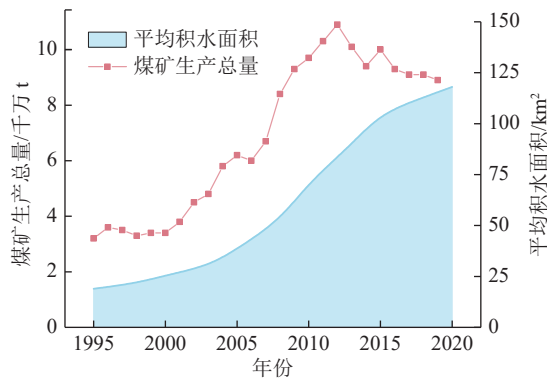


图12 安徽省1992—2020年沉陷区积水面积与煤炭产能对比

Fig.12 Comparison of water accumulation area and coal production capacity in subsidence areas in Anhui

别为1995—2005年、2005—2013年、2013—2020年,对不同变化阶段分析如下:

第1阶段为1995—2005年,这一阶段积水面积增长的速度较慢,年均增长量为 1.41 km^2 。早期煤炭需求量较小,开采设备简易,开采规模小,所以在1995年到2005年这10 a煤炭的总体产量是较少的,地表塌陷不明显,积水区域刚刚出现还不稳定即积水面积增长较为缓慢。

第2阶段为2005—2013年,以年均增长率20%为分界点,这一阶段积水面积的年均增长率均超过20%,年均增长量为 5.96 km^2 。从图12可以看出这一阶段煤矿的开采量是逐年增多的,煤炭产量年均增长679.3万t。这一期间基于我国国情的需要,煤炭产业成为我国能源供应的支柱产业。各个煤矿不断扩大开采规模,提升煤炭产能,我国的煤炭开采也进入了鼎盛期。煤炭开采规模以及开采量的不断扩大导致这一阶段积水面积增长迅速。

第3阶段为2013—2020年,积水面积的增长率开始减小,到2020年增长率仅为4.39%,年均增长 4.04 km^2 。一方面,受环境保护政策和煤炭开采量的双重影响,煤炭的产量开始减少。从2013年到2019年煤矿的生产量减少了约0.1亿t。这期间,针对环境问题国家颁布了若干政策,政府关闭了很多中小煤矿,矿井数量在不断减少^[20]。另一方面安徽省的煤矿储量也在不断减少,一些煤矿逐步闭坑,向资源枯竭型城市过度。随着浅层煤矿的枯竭,大部分煤矿向更深层开采。首次地下煤层采出后将引起地表沉陷,进而形成大面积积水,产生的积水面积与地下开采范围比值为90%~120%。而重复开采后,岩层经二次扰动平衡被打破,地表进一步下沉,沉降范围进一步扩大,积水面积也随之扩大。二次开采形

成的新的沉陷积水面积与开采范围比值20%~50%(图13)。从新增积水面积比例看,重复开采增加的沉陷区积水面积相较于初次开采产生的积水面积增加量较小。所以重复开采对沉陷区积水面积的演化也会产生一定影响,但是影响并不明显。这也是这一阶段积水面积增长率减缓的重要因素。

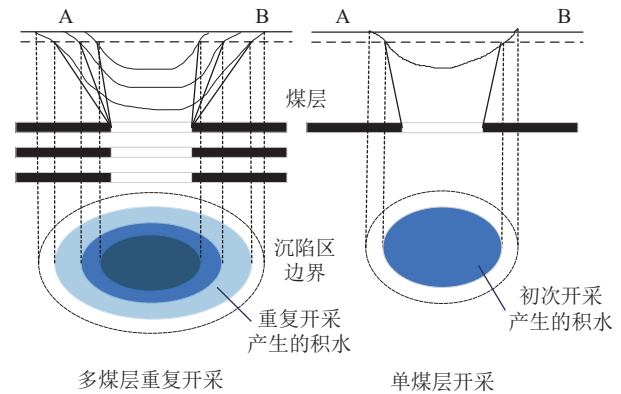


图13 煤炭开采沉陷积水示意

Fig.13 Diagram of subsidence water in coal mining

通过数据分析以及产能对比可以看出沉陷区积水面积的变化速率与安徽省的煤炭开采量紧密相关。煤炭的开采不可避免的导致地表的沉陷,从而对积水面积的演化产生直接影响。沉陷区积水面积增长的3个不同阶段基本上都是与煤炭开采量产生直接联系。1995—2005年,煤炭的开采量处于较少的阶段,中间经历安徽省煤炭行业的鼎盛发展,到2013年以后受多方面因素影响,煤炭开采量开始逐渐减少。1995—2005年和2013—2020年积水面积的增加量占1995—2020年安徽省采煤沉陷区积水面积增加量的25.68%。由此可见,煤炭开采量是安徽省煤炭开采沉陷区积水面积变化的最主要影响因素。

3.4.4 沉陷区治理对积水面积演化的影响分析

通过分析近25年安徽省沉陷积水区遥感影像,可以看出早期对沉陷积水区的治理并不明显,后期由于沉陷区生态环境破坏严重,政府颁布一系列政策对沉陷区积水进行治理。安徽省对沉陷区积水问题的综合治理主要分为两类:第1类是改变水域性质,例如对积水区进行回填造田(图14a)。这种治理模式会在一定程度上减小积水面积,但是受到遥感影像分辨率限制,不能准确计算出减小的积水面积。第2类是不改变水域性质,例如挖深造塘(图14b)、建造湿地生态建筑景观^[21](图14c)、新能源建设^[22](图14d)。这种治理模式对积水面积影响不大,主要是将原本废弃水域改造成功能性水域,并创造一定的生态和经济价值。

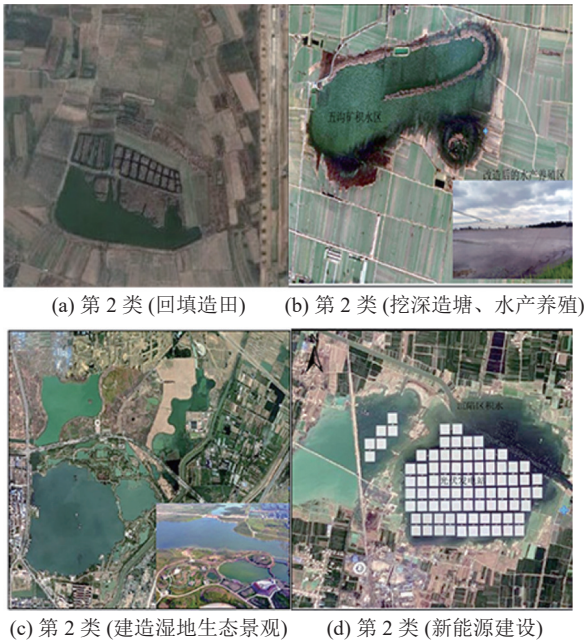


图 14 安徽省沉陷积水区治理模式

Fig.14 Management model of subsidence waterlogged area in Anhui Province

4 安徽省采煤沉陷区积水面积的预测分析

通过对 1995—2020 年的沉陷积水区面积分析,发现其满足 Logistic 线性方程假设。因此采用 Logistic 回归模型对统计年份与沉陷积水区面积之间的关系进行定量分析。选择 1995—2020 年枯水期的积水数据作为训练样本,建立适合的 Logistic 回归模型。沉陷积水区面积预测模型公式为

$$S(T) = \frac{137.6057}{1 + 19.7575e^{-0.18(T-1994)}} \quad (1)$$

式中: S 为积水面积; T 为积水年份; 残差平方和(SSE)为 198.453 8, 均方根误差(RMSE)为 4.980 6, 相关系数 $R = 0.986 2$, 说明公式拟合效果较好。通过拟合可

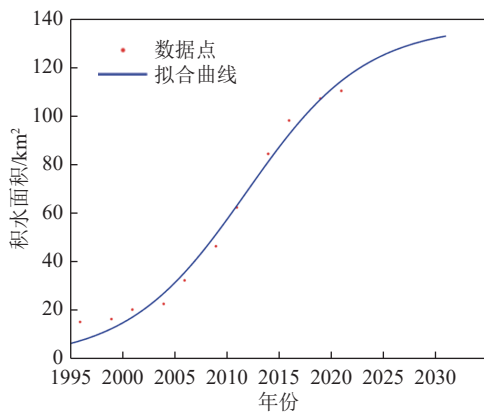


图 15 安徽省 1995—2020 年沉陷积水区面积拟合曲线

Fig.15 Fitting curve of subsidence waterlogging area in Anhui Province from 1995 to 2020

以直观地看到面积数值的变化情况,如图 15 所示。

通过预测分析可知,在未来一段时间内安徽省采煤沉陷区的枯水期积水面积将达到 130 km^2 , 积水面积仍保持低速增长,与面积变化量分析的结果一致。

5 结 论

1)1995—2020 年近 25 a 以来,安徽省采矿沉陷区的积水面积整体呈增长趋势,但是增长化率却在各个阶段并不相同。1995—2005 年受煤矿开采技术、开采量等因素影响,沉陷区积水面积的增长率较小。2005—2013 年应国家基建需要,全面提高煤炭产能,安徽省的煤炭开采也达到了鼎盛时期,这一期间煤炭开采量达到最大,相应年份的沉陷区积水面积增长率也达到最大。2013—2020 年基于环境保护政策以及煤炭资源的枯竭等因素,积水面积的增长开始放缓。

2)安徽省高潜水位采煤沉陷区积水演化特征分析可以得出,积水面积变化的主要影响因素有大气降雨、潜水位变化、煤炭开采量以及沉陷积水区的治理,其中长时间尺度上煤炭开采量是沉陷区积水面积演化的主要影响因素,短时间尺度上大气降雨则是主要影响因素。

3)利用 Logistic 回归曲线建立了安徽省采煤沉陷区积水面积预测模型,预测得到在未来一段时间安徽省采煤沉陷积水面积将仍处于低速增长阶段,到 2030 年,枯水期积水区面积约达到 130 km^2 。

参考文献(References):

[1] 胡炳南,郭文砚.我国采煤沉陷区现状、综合治理模式及治理建议[J].煤矿开采,2018,23(2):1-4.
HU Bingnan, GUO Wenyan. The status quo of coal mining subsidence areas in my country, comprehensive treatment models and treatment suggestions[J]. Coal Mining Technology, 2018, 23(2): 1-4.

[2] 李新举,周晶晶.高潜水位煤矿区地表沉陷信息提取方法研究[J].煤炭科学技术,2020,48(4):105-112.
LI Xinju, ZHOU Jingjing. Study on the method of surface subsidence information extraction in coal mine area with high phreatic level[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(4): 105-112.

[3] 刘欢欢,张有全,王 荣,等.京津高铁北京段地面沉降监测及结果分析[J].地球物理报,2016,59(7):2424-2432.
LIU Huanhuan, ZHANG Youquan, WANG Rong, et al. Monitoring and analysis of land subsidence along the Beijing-Tianjin high-speed railway (Beijing section)[J]. Acta Geophysica Sinica, 2016, 59(7): 2424-2432.

[4] QU Feifei, ZHANG Qin, LU Zhong, et al. Land subsidence and

- ground fissures in Xi'an, China 2005–2012 revealed by multi-band InSAR time-series analysis[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 9(8): 366–376.
- [5] 孙 达, 聂振邦, 余兴江, 等. 浅谈湖北省大冶市某露天矿山地质环境治理与恢复[J]. *资源环境与工程*, 2021, 35(1): 68–71.
SUN Da, NIE Zhenbang, YU Xingjiang, *et al.* On the treatment and restoration of the geological environment of an open-pit mine in Daye City, Hubei Province[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2021, 35(1): 68–71.
- [6] 彭苏萍, 王 磊, 孟召平, 等. 遥感技术在煤矿区积水塌陷动态监测中的应用: 以淮南矿区为例[J]. *煤炭学报*, 2002(4): 374–378.
PENG Suping, WANG Lei, MENG Zhaoping, *et al.* The application of remote sensing technology in the dynamic monitoring of water accumulation in coal mine area: Taking Huainan Mining Area as an example[J]. *Journal of China Coal Society*, 2002(4): 374–378.
- [7] 汪宝存, 苗 放, 晏明星, 等. 基于遥感技术的开滦煤矿地面塌陷积水动态监测[J]. *国土资源遥感*, 2007(3): 94–97, 112.
WANG Baocun, MIAO Fang, YAN Mingxing, *et al.* Dynamic monitoring of ground subsidence and water in Kailuan coal mine based on remote sensing technology[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2007(3): 94–97, 112.
- [8] 陈晓谢, 张文涛, 朱晓峻, 等. 高潜水位采煤沉陷区积水范围动态演化规律[J]. *煤田地质与勘探*, 2020, 48(2): 126–133.
CHEN Xiaoxie, ZHANG Wentao, ZHU Xiaojun, *et al.* Dynamic evolution law of water accumulation area in coal mining subsidence area with high phreatic level[J]. *Coal Geology and Exploration*, 2020, 48(2): 126–133.
- [9] 乔丛林, 史明礼, 苏 娅, 等. 淮北平原地区水文特征[J]. *水文*, 2000(3): 55–58.
QIAO Conglin, SHI Mingli, SU Ya, *et al.* Hydrological characteristics of Huaibei Plain[J]. *Hydrology*, 2000(3): 55–58.
- [10] XU Zhanjun, ZHANG Yuan, YANG Jason, *et al.* Effect of underground coal mining on the regional soil organic carbon pool in farmland in a mining subsidence area[J]. *Sustainability*, 2019, 11(18): 4961.
- [11] 王发信, 柏 菊. 淮北平原浅层地下水埋深区域分布特点[J]. *地下水*, 2014, 36(5): 51–53.
WANG Faxin, BAI Ju. The regional distribution characteristics of shallow groundwater depth in Huaibei Plain[J]. *Groundwater*, 2014, 36(5): 51–53.
- [12] 姜 岳, R. MISA, 李鹏宇, 等. 矿山开采沉陷理论发展历程综述[J]. *金属矿山*, 2019(10): 1–7.
JIANG Yue, R. MISA, LI Pengyu, *et al.* Overview of the development history of mining subsidence theory[J]. *Metal Mine*, 2019(10): 1–7.
- [13] HUANG Chang, CHEN Yun, ZHANG Shiqiang, *et al.* Detecting, extracting, and monitoring surface water from space using optical sensors: a review[J]. *Reviews of Geophysics*, 2018, 56(2): 333–360.
- [14] 刘瑞杰. 基于多源遥感数据提取密云水库水体的方法效果探究[J]. *国土资源信息化*, 2020(3): 50–57.
- LIU Ruijie. Exploration of the method effect of water body extraction in Miyun Reservoir based on multi-source remote sensing data[J]. *Informatization of Land and Resources*, 2020(3): 50–57.
- [15] 许 冬, 吴 侃. 济宁煤矿区地表塌陷积水时空演变[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2014, 33(10): 1307–1311.
XU Dong, WU Kan. The temporal and spatial evolution of surface subsidence water in Jining coal mine area[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition)*, 2014, 33(10): 1307–1311.
- [16] 魏矿灵, 王启春, 郭广礼, 等. 利用遥感数据监测矿区开采沉陷积水变化[J]. *煤矿安全*, 2014, 45(1): 13–16.
WEI Kuangling, WANG Qichun, GUO Guangli, *et al.* Using remote sensing data to monitor changes in mining subsidence water in mining areas[J]. *Safety in Coal Mines*, 2014, 45(1): 13–16.
- [17] 万华伟, 康 峻, 高 帅, 等. 呼伦湖水面动态变化遥感监测及气候因素驱动分析[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(3): 894–898.
WAN Huawei, KANG Jun, GAO Shuai, *et al.* Remote sensing monitoring of water surface dynamic changes in Hulun Lake and analysis of driving factors of climate factors[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(3): 894–898.
- [18] 张 磊, 秦小光, 刘嘉麒, 等. 淮南采煤沉陷区积水来源的氢氧稳定同位素证据[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2015, 45(5): 1502–1514.
ZHANG Lei, QIN Xiaoguang, LIU Jiaqi, *et al.* Hydrogen and oxygen stable isotopic evidence of the source of accumulated water in Huainan coal mining subsidence area[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2015, 45(5): 1502–1514.
- [19] 申 涛, 朱占荣. 陕北矿区煤炭开采沉陷实测参数分析[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(12): 207–213.
SHEN Tao, ZHU Zhanrong. Analysis of measured parameters of coal mining subsidence in northern Shaanxi mining area[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(12): 207–213.
- [20] 陈登红, 华心祝, 李寒旭, 等. 安徽省煤炭产业发展概况及未来发展趋向[J]. *安徽科技*, 2020(10): 36–38.
CHEN Denghong, HUA Xinzhu, LI Hanxu, *et al.* General situation and future development trend of coal industry in Anhui Province[J]. *Anhui Science and Technology*, 2020(10): 36–38.
- [21] 林承辰, 郑刘根, 魏祥平, 等. 淮北中湖采煤沉陷区治理前后景观格局变化研究[J]. *环境监测管理与技术*, 2021, 33(2): 14–19.
LIN Chengchen, ZHENG Liugen, WEI Xiangping, *et al.* Study on the change of landscape pattern before and after the treatment of Huaibei Zhonghu Coal Mining Subsidence Area[J]. *Environmental Monitoring Management and Technology*, 2021, 33(2): 14–19.
- [22] 许正刚. 采煤沉陷区治理技术现状及发展趋势[J]. *区域治理*, 2019(44): 69–71.
XU Zhenggang. The status quo and development trend of coal mining subsidence area treatment technology[J]. *Regional Management*, 2019(44): 69–71.