

# 宁东煤电基地水土资源特征及其变化

刘涛<sup>1</sup>, 乌英嘎<sup>2,3</sup>, 任予鑫<sup>1,4</sup>,  
杨洋<sup>1</sup>, 马昆<sup>1,5</sup>, 王立兵<sup>2,3</sup>, 董霁红<sup>2</sup>

[1.国家能源集团宁夏煤业有限责任公司, 宁夏 银川 751410; 2.中国矿业大学  
环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116; 3.矿山生态修复教育部工程研究中心, 江苏 徐州 221116;  
4.中国矿业大学 公共管理学院(应急管理学院), 江苏 徐州 221116; 5.中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116]

**摘要:** [目的] 探究2003—2023年宁东煤电基地煤炭、水土资源的时空分布特征及其相互作用机制, 为该区域资源优化配置与生态环境保护提供理论依据。[方法] 基于多源数据, 采用土地利用转移矩阵、增长率分析等方法, 研究煤炭、水土资源的时空演变特征, 并结合供需分析评估水资源利用平衡状况。[结果] ①2003—2023年宁东煤炭产量持续增长, 年均增长率5.89%, 煤矿主要分布于基地中北部, 工矿用地面积显著增加; 水资源供需不平衡, 地表水主要依赖黄河引水, 地下水开采受限, 水体面积由21.45 km<sup>2</sup>增至45.66 km<sup>2</sup>。②土地利用类型以草地为主, 但面积减少, 工矿居民用地显著扩张, 其面积所占比例从2003年的1.40%增至2023年的8.12%; 土地资源利用率由6.14%提升至18.42%。③煤炭开发、水资源利用、土地利用变化相互作用, 煤矿开采影响水资源需求与土地占用, 水资源分布影响矿区生态格局, 土地利用变化进一步调控煤炭开采布局。[结论] 煤炭开发对水土资源利用影响显著, 未来应加强水资源优化配置, 提高土地利用效率, 推动宁东煤电基地绿色低碳发展。

**关键词:** 煤电基地; 煤炭资源; 水土资源; 分布特征; 利用变化

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)02-0408-13

中图分类号: TD88

**文献参数:** 刘涛, 乌英嘎, 任予鑫, 等. 宁东煤电基地水土资源特征及其变化[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 408-420. Liu Tao, Wu Yingga, Ren Yuxin, et al. Characteristics and changes of soil and water resources in Ningdong coal and power base [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 408-420. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.040; CSTR:32312.14.stbctb.2025.02.040.

## Characteristics and changes of soil and water resources in Ningdong coal and power base

Liu Tao<sup>1</sup>, Wu Yingga<sup>2,3</sup>, Ren Yuxin<sup>1,4</sup>,  
Yang Yang<sup>1</sup>, Ma Kun<sup>1,5</sup>, Wang Libing<sup>2,3</sup>, Dong Jihong<sup>2</sup>

(1.China Energy Ningxia Coal Industry Co., Ltd., Yinchuan, Ningxia 751410, China;

2.School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology,

Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3.Engineering Research Center of Mine Ecological Restoration,

Ministry of Education, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 4.School of Public Policy & Management School of Emergency Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 5.School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract:** [Objective] The spatio-temporal distribution characteristics and interaction mechanisms of coal, water, and soil resources in the Ningdong coal and power base from 2003 to 2023 were explored, in order to provide a theoretical basis for the optimal allocation of resources and ecological environment protection in this region. [Methods] Based on multi-source data, the spatiotemporal evolution characteristics of coal, water,

收稿日期: 2024-11-03 修回日期: 2025-01-05 采用日期: 2025-01-06

资助项目: 国家能源集团宁夏煤业有限责任公司企业项目“智慧矿山井上下可视化安全预警系统预警与应用服务”([2023]016); 中国煤炭学会项目“面向低碳目标的煤矿废弃地生态修复技术发展研究”(2023100099)

第一作者: 刘涛(1973—), 男(汉族), 宁夏回族自治区中宁县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事矿山开采多场耦合理论与实践方面的研究。Email: liutaoningmei@163.com。

通信作者: 乌英嘎(1997—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区通辽市人, 博士研究生, 研究方向为国土空间生态监测与修复。Email: tb2160022a41@cumt.edu.cn。

and soil resources were studied using methods such as a land-use transfer matrix and growth rate analysis, and the balance of water resource utilization was evaluated in combination with supply and demand analysis. [Results] ① From 2003 to 2023, coal production in Ningdong continued to increase, with an average annual growth rate of 5.89%. Coal mines were mainly distributed in the central and northern parts of the base, and the areas of industrial and mining land use had increased significantly. The supply and demand of water resources were unbalanced. Surface water relied mainly on water diversion from the Yellow River, and groundwater exploitation was restricted. The water body area increased from 21.45 to 45.66 km<sup>2</sup>. ② The dominant land use type was grassland, but its area decreased. Industrial and mining residential land use expanded significantly, and its proportion increased from 1.40% in 2003 to 8.12% in 2023; the land resource utilization rate increased from 6.14% to 18.42%. ③ The development of coal, utilization of water resources, and changes in land use interacted with each other. Coal mining affected water resource demand and land occupation. The distribution of water resources influenced the ecological patterns of mining areas. Changes in land use further regulated coal mining layouts. [Conclusion] Coal development has a significant impact on soil and water resource utilization. Efforts should be made to optimize the allocation of water resources, improve the efficiency of land use, and promote the green and low-carbon development of Ningdong coal and power bases.

**Keywords:** coal and power base; coal resources; land and water resources; distribution characteristics; utilization changes

随着中国对生态环境保护战略地位的不断提升,西部地区大型煤电基地的水土资源分布特征与煤炭资源的开发利用模式正经历着显著的转型。大型煤电基地煤炭开采活动不仅大量消耗水土资源,同时也会加剧基地环境污染,掌握西部大型煤电基地煤炭—水土资源分布特征及利用变化,不仅能深刻认识基地水土资源自然禀赋,也可以为政策导向与企业实践提供支撑和参考<sup>[1]</sup>。政府及企业层面通过增加环境保护与安全生产方面的政策和投资,促进煤炭产业朝向清洁化、高效化及可持续化的新型发展模式演进<sup>[2]</sup>。通过引入“绿色矿山”理念,借助现代信息技术与管理创新手段<sup>[3-4]</sup>,减少地表破坏和水资源消耗,有效提升煤炭开采作业区的生态恢复能力和环境管理水平,进而优化水土资源的保护与合理利用格局。此外,推动煤炭资源的清洁利用与循环经济发展路径,成为降低污染物排放<sup>[5-6]</sup>,提升煤炭资源利用效率<sup>[7]</sup>的关键。这一策略旨在通过技术革新,如煤炭气化、液化及高效燃烧技术等<sup>[8-9]</sup>,减少煤炭消费过程中的环境足迹,通过构建煤炭—电力—化工等多产业融合的循环经济体系<sup>[10-11]</sup>,实现资源的高效循环利用,进一步减轻对水土资源的压力,促进区域经济与生态环境的和谐共生。

宁东煤电基地丰富的煤炭资源储备使宁东煤电基地的煤炭开采蓬勃发展,随着煤炭资源开采规模的不断扩大,煤基固废产量急剧增加<sup>[12]</sup>,导致了土地占用<sup>[13]</sup>、地表塌陷<sup>[14]</sup>、水土流失等<sup>[15]</sup>环境问题。此外,宁东煤电基地生态环境脆弱,水资源禀赋较差,而无论是煤炭开采,还是燃煤发电和煤化工生产都需要消

耗大量的水资源<sup>[16]</sup>,这不仅给宁东煤电基地带来了巨大的水资源压力,同时也极大限制了宁东煤电基地煤炭产业的发展。在此背景下,深入解析宁东煤电基地内煤炭、水、土资源的分布特征与利用现状尤为迫切,通过研究宁东煤电基地的资源分布特征与利用变化,不仅有助于合理地规划开采布局,优化资源配置,为宁东煤电基地生态效应分析和安全生产管理提供基础数据,还能为制定科学的煤炭资源开发与利用策略提供理论依据,实现西部大型煤电基地能源安全与生态绿色低碳可持续的目标。

## 1 宁东煤电基地概况

宁东煤电基地隶属宁夏回族自治区,坐标范围为东经 106°21'39"—106°56'34",北纬 37°04'48"—38°17'41",北与内蒙古自治区接壤,南与甘肃省毗邻(图 1)。宁东煤电基地地貌类型主要为丘陵和平原,丘陵在南北方向上呈现条带分布,海拔高度为 1 150~1 512 m,地势整体开阔平缓,主要的地质组成为黄土梁、洼地、沙丘等<sup>[17]</sup>。宁东煤电基地属于温带大陆性季风气候,年平均气温为 6.9~11.5℃,气温日较差大,降雨量较少且集中,一般主要在每年的 7—9 月集中降雨,年平均降雨量约 300 mm<sup>[18]</sup>。宁东煤电基地主要水系为黄河,包括一级支流的苦水河、水洞沟和二级支流的大河子沟。宁东煤电基地的主要土壤类型为灰钙土和风沙土,主要植被类型为灌木植被和草本植被,植被耐高温、耐旱、抗冻。宁东煤电基地建设于 2003 年,规划占地面积约为 3 483.70 km<sup>2</sup>,是 14 个国家亿

吨级煤炭基地之一,其凭借资源优势成为“西电东送”火电基地、煤化工产业基础和循环经济示范区。

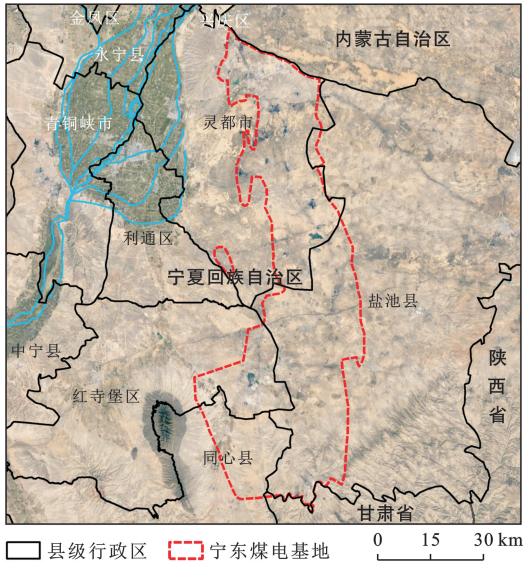


图 1 宁东煤电基地研究区域示意图

Fig.1 Diagram of Ningdong coal and power base research area

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源与处理

研究采用中国科学院资源环境科学数据平台 2003,2007,2011,2015,2019 和 2023 年的土地利用现状遥感监测影像数据与水资源栅格数据,编写代码完成对产品数据影像的日期和云量筛选、影像拼接以及影像裁剪,获取宁东煤电基地遥感影像,满足研究要求。此外,还选取了 2016—2023 年共 12 组 Sentinel-2 数据集,云量均小于 5%,并结合宁夏回族自治区的行政区划数据、统计年鉴数据等。研究时间节点的选择是基于宁东煤电基地煤矿的全生命周期。煤矿全生命周期阶段包括规划、建设、投产、达产、丰产、稳产等阶段,根据这 6 个阶段将宁东煤电基地的发展进程划分为发展初期(2003,2007 年)、发展高潮(2011,2015 年)、发展转型(2019,2023 年)三部分。研究选用这 6 个重要节点来反映宁东煤电基地 2003—2023 年煤炭、水、土资源的空间分布特征与利用变化,为宁东煤电基地煤炭、水、土资源可持续利用提供科学依据与策略建议。

### 2.2 研究方法

(1) 土地利用转移矩阵。土地利用转移矩阵用以表征不同时期内各地类之间面积的转移情况,对转移的数量、来源和去向进行描述<sup>[19]</sup>。研究通过构建土地利用转移矩阵刻画宁东煤电基地不同时期内土地利用格局的具体演化过程。基于 ArcGIS 软件对

2003,2007,2010,2015,2021,2023 年的土地利用数据进行空间叠加分析,得到宁东煤电基地各时期土地利用转移矩阵,转移矩阵计算方法如公式(1)所示。

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $S$  为土地利用类型的面积; $n$  为土地利用类型数; $S_{ij}$  表示研究时段初期  $i$  类土地到研究末期转为  $j$  类土地的面积, $i, j$  分别表示为初期、末期土地利用类型序号。

(2) 土地利用转移网络。土地利用转移网络是基于土地利用转移矩阵的进一步分析,将转移矩阵作为一个复杂网络,定量表征不同时期内各用地类型的转化状态和趋势<sup>[20-21]</sup>,分析中包括转移净变化量指数(net change index, NCI),转移总变化量指数(total change index, TCI)及转移趋势指数(trend index, TI)3 种指数,计算公式为:

$$TI_i = \frac{NCI_i}{TCI_i} = \frac{(E_i - S_i)/S_i}{(\Delta IN_{i \rightarrow} + \Delta OUT_{i \rightarrow})/S_i} \quad (2)$$

式中: $TI_i$ ,  $NCI_i$ ,  $TCI_i$  分别为宁东某时期内用地类型  $i$  的转移趋势指数、转移净变化量指数和转移总变化量指数; $S_i$  和  $E_i$  分别为用地类型  $i$  某时期内开始和结束时的面积; $\Delta IN_{i \rightarrow}$  为其他地类转化为用地类型  $i$  的总面积; $\Delta OUT_{i \rightarrow}$  为用地类型  $i$  转化为其他地类的总面积。 $TI_i \in [-1, 1]$ ,当  $0 < TI_i \leq 1$  时,用地类型  $i$  的面积呈增加趋势,其值的大小反映了该地类的扩张程度;反之当  $-1 \leq TI_i < 0$  时,用地类型  $i$  的面积减少趋势,其值的大小反映了该地类的缩减程度。

(3) 土地资源利用率。土地资源利用率是一个地区已开发利用的土地面积占该区域土地总面积的比率,即某个区域人类生产活动范围占区域土地总面积的比例<sup>[22]</sup>。土地资源利用率的计算公式为:

$$U_{Land} = \frac{L}{T} \times 100\% \quad (3)$$

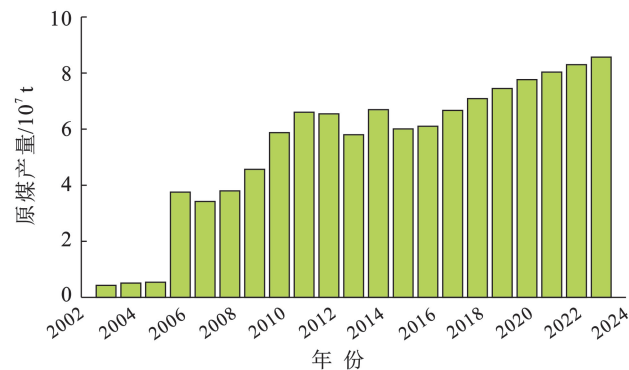
式中: $U_{Land}$  表示土地资源利用率; $L$  表示区域已经开发的土地面积,包括耕地、林地、水域和城乡居民用地; $T$  表示区域可利用土地面积。

## 3 宁东煤电基地煤炭—水土资源分布特征与利用现状

### 3.1 煤炭资源数量与分布特征

3.1.1 煤炭资源年产量变化 宁夏回族自治区能源发展“十四五”规划》中提出宁夏将进一步提升煤炭供应能力,加快煤炭先进产能建设。2003 至 2023 年宁

东煤炭基地的煤炭产量整体呈稳步上升的趋势, 年均增长率达 5.89%。随着宁东煤电基地多个煤矿陆续投产, 煤炭年产量从 2003 年的  $4.30 \times 10^6$  t 提升至 2023 年  $8.57 \times 10^7$  t (图 2)。但在 2007, 2013, 2015 年煤炭产量有明显下滑趋势, 其中 2015 年煤炭产量下降最多, 为  $6.85 \times 10^7$  t, 煤矿安全生产和环保标准的提高, 部分煤矿进行整顿与升级, 煤炭年产量受到影响。2016 年后宁东煤电基地煤炭产量持续增长, 但增长速度有所放缓, 宁东煤电基地正在向高质量发展转型, 更加注重效率提升、环境保护和可持续发展。



注: 煤炭年产量数据主要来源《宁夏统计年鉴》《宁东煤电基地经济运行情况通报》和文献数据等。

图 2 宁东煤电基地煤炭年产量

Fig.2 Annual coal production of Ningdong coal and power base

宁夏回族自治区煤炭资源丰富, 煤炭储量和产量均居全国第 8 位, 是中国重点产煤省区之一。煤炭资源主要集中分布于宁夏回族自治区银川市、石嘴山市、吴忠市、中卫市、固原市 5 个城市<sup>[19]</sup>, 煤炭产量增长趋势与全国煤炭产量相似, 整体呈上升趋势, 但增速低于全国平均水平, 波动较大并存在明显的滞后性。宁夏回族自治区煤炭产量从 2003 年  $2.05 \times 10^7$  t 增长到 2023 年  $9.89 \times 10^7$  t, 而宁东煤电基地 2023 年煤炭产量为  $8.57 \times 10^7$  t, 约占宁夏煤炭产量的 86.6%。

煤炭产量的波动增长会导致矿井水排放量的不稳定性, 进而对地表水和地下水系统造成冲击, 若矿井水处理不及时或不达标, 可能直接污染水源, 增加水资源管理的难度, 影响水质安全; 煤炭产量波动增长期间, 还会伴随频繁的土地占用和转换, 对土地利用结构造成较大干扰, 导致土地资源开采和利用强度不稳定, 加速草地等生态敏感区域的退化。煤炭产量的平稳增长有助于矿井水排放量的稳定预测和管理, 降低水资源管理的难度, 水资源管理相对可控, 可以

更有序地推进矿井水处理设施的建设和运营, 确保水质安全; 煤炭产量平稳增长有助于对土地资源的合理规划 and 有序利用, 减少对土地利用结构的干扰。

3.1.2 煤炭资源空间分布特征 宁东煤电基地由横城矿区、韦州矿区、灵武矿区、鸳鸯湖矿区、马家滩矿区、积家井矿区、萌城矿区 7 个矿区, 21 个井田和 1 个独立井田组成<sup>[23]</sup>, 其中 7 个矿区包含红一煤矿、红二煤矿、红石湾煤矿、任家庄煤矿等 34 个煤矿, 煤矿年产量、储量、面积与建设时间见表 1。

从宁东煤电基地煤矿生产规模来看, 生产规模小于  $5.00 \times 10^6$  t 的包括四股泉、小泉、新发、丁家梁、韦一、红石湾、永安、韦二、宋新庄、贺家瑶、惠安、韦三、月儿湾、马儿庄二号、红一、红二、银星二号、新乔、马儿庄一号、韦四、任家庄、马莲台、灵新、金家渠、金凤、双马等 26 个煤矿, 主要集中分布在宁东煤电基地的南部, 零星分布于基地北部。生产规模在  $5.00 \times 10^6 \sim 1.00 \times 10^7$  t 的煤矿为银星一号、石槽、红柳、麦垛山、枣泉 5 个煤矿, 主要分布于宁东煤电基地的中部区域。生产规模大于  $1.00 \times 10^7$  t 的煤矿包括羊场湾、清水营、梅花井 3 个煤矿, 主要集中分布于宁东煤电基地的北部。基地内煤矿主要集中在中部和北部, 结合煤矿生产规模来看, 煤矿生产规模越大, 其地理分布越为集中。

### 3.2 水土资源空间特征与演变

3.2.1 水资源分布特征与时空变化 基于 2003, 2007, 2011, 2015, 2019, 2023 年水资源栅格数据, 分析 2003—2023 年宁东煤电基地水体分布格局 (如图 3 所示), 宁东煤电基地自 2003 年开发建设以来, 水资源分布格局发生了显著变化。

2003—2011 年基地主要依赖黄河水供给, 通过供水工程解决工业发展用水需求, 基地内水体零星分布于基地北部与中部。2015—2023 年基地水体面积明显增加, 增加主要集中在基地的中部和南部地区, 虽然基地内水资源利用效率逐渐提升, 但仍面临水资源短缺和分布不均的问题。提取宁东煤电基地水体面积并计算水体增长率 (表 2), 并绘制宁东煤电基地水体面积与水体增长率折线图 (如图 4 所示)。2003—2023 年宁东煤电基地的水资源利用格局从单一依赖黄河水向多元化、高效化转变, 保障了基地的工业发展, 为生态环境保护提供了有力支撑。2003—2023 年宁东煤电基地水体面积呈逐年增长趋势。2003—2007 年宁东煤电基地处于初级开发阶段, 基地内工业和生活用水需求增加, 水体面积由 2003 年  $21.45 \text{ km}^2$  增长至 2007 年  $24.90 \text{ km}^2$ , 增长率为 16.08%; 2007—2011 年水体面积增长速率有所减缓, 但仍保

持增长态势,2011 年水体面积达到 25.42 km<sup>2</sup>; 2015—2019 年宁东煤电基地水体面积扩张最为显著,从 29.11 km<sup>2</sup> 增至 39.15 km<sup>2</sup>,表明宁东煤电基地

水资源保护力度加大、生态环境得到改善;2023 年宁东煤电基地水体面积相较于 2019 年有所增长,但增幅较小,仅增加了 6.51 km<sup>2</sup>。

表 1 宁东煤电基地煤矿生产规模、储量、面积与建设时间

Table 1 Annual production, reserves, area and construction time in Ningdong coal and power base

矿区名称	矿山名称	生产规模/(10 <sup>4</sup> t·a <sup>-1</sup> )	资源量/10 <sup>4</sup> t	可采资源量/10 <sup>4</sup> t	煤矿面积 km <sup>2</sup>	建设年份
红墩子矿区	红一煤矿	240	46 700	18 703	33.49	2019
	红二煤矿	240	34 500	16 513	22.70	2019
横城矿区	红石湾煤矿	110	5 300	4 163	6.65	2008
	任家庄煤矿	400	26 000	14 500	17.76	2009
	马莲台煤矿	360	19 800	11 856	24.71	2006
	丁家梁煤矿	90	14 700	9 078	7.51	2022
灵武矿区	灵新煤矿	390	15 200	14 000	12.09	1989
	枣泉煤矿	800	94 900	43 400	65.20	2005
	羊场湾煤矿	1 200	110 400	44 000	51.60	2006
鸳鸯湖矿区	清水营煤矿	1200	74 900	74 900	63.50	2006
	梅花井煤矿	1 200	251 100	143 300	71.30	2006
	石槽村煤矿	600	104 000	59 671	31.40	2008
	红柳煤矿	800	118 800	118 814	79.55	2008
	麦垛山煤矿	800	197 900	113 886	65.00	2008
	银星一号煤矿	600	90 600	52 143	59.80	2008
积家井矿区	银星二号煤矿	240	74 700	27 185	45.20	2017
	宋新庄煤矿	150	25 000	9 777	30.70	2019
	新乔煤矿	240	48 800	21 033	44.85	2022
	月儿湾煤矿	180	33 300	17 917	29.15	2010
	马儿庄一号煤矿	240	23 000	14 530	30.03	2023
	马儿庄二号煤矿	180	16 300	10 200	28.90	2023
马家滩矿区	金家渠煤矿	400	60 000	33 636	26.89	2011
	金凤煤矿	400	62 800	46 239	35.00	2008
	双马一矿	400	56 500	56 458	68.20	2009
	贺家瑶煤矿	150	28 500	15 071	26.93	2014
萌城矿区	惠安煤矿	150	22 900	14 669	16.22	2011
	四股泉煤矿	60	9 100	9 061	11.23	2012
	小泉煤矿	60	5 300	4 932	4.64	2010
韦州矿区	新发煤矿	60	7 900	4 210	6.71	2013
	永安煤矿	120	23 500	11 315	21.68	2015
	韦一煤矿	90	20 700	9 632	26.63	2007
	韦二煤矿	120	46 900	29 463	38.40	2014
	韦三煤矿	150	31 400	14 559	31.14	2018
	韦四煤矿	240	45 800	4 916	32.52	2024

注:宁东煤电基地煤矿生产规模、储量、面积与建设时间来源于煤矿现场调研数据、全球能源监测网站 <https://globalenergymonitor.org/zh-CN/about/> 和文献数据。

整体来看,2015—2023 年宁东煤电基地水体面积出现持续大幅度增加,这一时期基地内工业快速发

展,导致工业用水与居住用水需求量大幅增加,宁东煤电基地通过一系列供水工程增加了水资源存储,同

时改善生态环境,加大了水资源保护力度。在工矿用水中,黄河引水量的比例较大,大约在 70%~80%。这是因为黄河作为该地区附近最大的地表径流,水量相对稳定且充足,能够满足基地大规模工业生产和生活用水需求。地下水在工矿用水中所占比例相对较小,约为 10%~20%<sup>[24]</sup>。过度开采地下水可能导致地面沉降、地下水位下降等一系列环境问题,所以对地下水的开采有严格的管控措施。地表水主要来源于黄河水以及降雨形成的地表径流。黄河引水是地表水的重要补充来源,通过引黄渠道将黄河水引入基地内的湖泊、水库等水体,增加了地表水的水量和水面面积。地下水与地表水之间存在相互补给关系,在一定条件下,地下水可以补给地表水,地表水也可以下渗补充地下水。当降水较多或黄河引水量较大时,地表水水位上升,可能会向地下渗透,补充地下水;而在干旱季节或用水量较大时,地表水水位下降,地下水可能会向上补给地表水。受黄河引水量和降水等因素的影响,由黄河引水和降雨形成的地表水面面积

并不固定。在丰水期,引水量大且降水较多,水面面积可能会达到几十平方公里甚至更大;而在枯水期,水面面积会相应减少。目前并没有一个准确的固定数值来描述这种动态变化的水面面积。因开采地下水形成的水面相对较小,且多为分散的小型水坑或地下水位下降形成的局部低洼积水区域,总体面积通常在几平方公里以内。矿井水是煤炭开采过程中,从井下煤层、岩层中涌出的水。矿井水形成的水面面积同样受到开采规模、开采区域地质条件等多种因素影响。在一些大型煤矿区,矿井水经过处理后,会集中排放到专门的蓄水池或低洼区域,形成一定面积的水面,一般在几平方公里左右;而对于一些小型煤矿,矿井水排放量相对较小,形成的水面面积可能只有几百平方米到数千平方米不等。矿井水如果未经有效处理直接排放,可能会对周边地表水和土壤环境造成污染,因此目前宁东煤炭基地十分重视矿井水的处理和资源化利用,将部分处理后的矿井水用于矿区的绿化、降尘、工业生产补水等,减少了对其他水源的依赖。

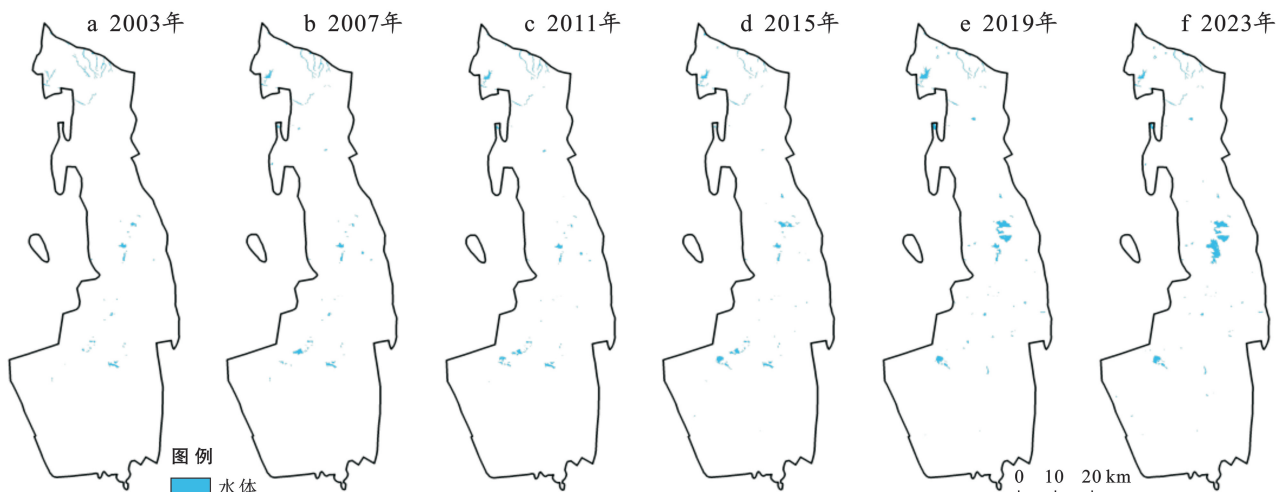


图 3 2003—2023 年宁东煤电基地水体分布结构

Fig.3 Distribution structure of water bodies in Ningdong coal and power base from 2003 to 2023

表 2 宁东煤电基地水体面积及增长所占比例

Table 2 Water bodies area and proportion of Ningdong coal and power base

年份	2003	2007	2011	2015	2019	2023
水体面积/km <sup>2</sup>	21.45	24.90	25.42	29.11	39.15	45.66
增长所占比例/%	6.71	16.08	2.09	14.52	34.49	16.63

注:宁东煤电基地水资源栅格数据来源于中国科学院资源环境科学数据平台(<https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=360>)。

宁东煤电基地的水体面积在二十年间经历了从缓慢增长到快速扩张,再到趋于稳定的过程,未来需更注重基地水资源的可持续利用和生态环境的平衡发展。

### 3.2.2 土地利用类型时空演变特征

(1) 宁东土地利用时空分布特征。利用 ArcGIS 空间分析中重分类和栅格计算工具,提取 2003—2023 年宁东煤电基地土地利用类型,结果如图 5 所示。2003—2023 年宁东煤电基地主要用地类型为草地;水域主要分布在基地中部与北部;工矿居民用地呈逐渐扩张趋势,主要集中在基地北部,零星分布在基地中部与南部;耕地、裸地、沙漠戈壁和未利用地等分布零散。利用 GIS 字段计算器计算 2003—2023 年宁东土地利用类型面积(如表 2 所示)。2003—2023 年,宁东煤电基地的土地利用类型发生了显著变化,

反映了该地区经济发展和环境治理的动态过程。耕地主要分布在研究区西南部,面积呈现波动增长趋势,总体保持相对稳定。林地主要分布在研究区北部,面积较小,呈现缓慢增长趋势。草地是研究区的主要土地利用类型,面积持续下降,从 2003 年的 1 602.48 km<sup>2</sup> 减少到 2023 年的 1 448.84 km<sup>2</sup>。水域面积增长剧烈,20 a 间增加了 24.21 km<sup>2</sup>,可能与水资源管理政策和水利工程实施有关。工矿居民用地主要分布在研究区北部,面积增加显著,从 2003 年的 48.26 km<sup>2</sup>,增至 2023 年的 280.28 km<sup>2</sup>,尤其在 2015—2019 年期间增长最为迅速。裸地和沙漠戈壁面积均呈下降趋势,但整体下降幅度不显著。

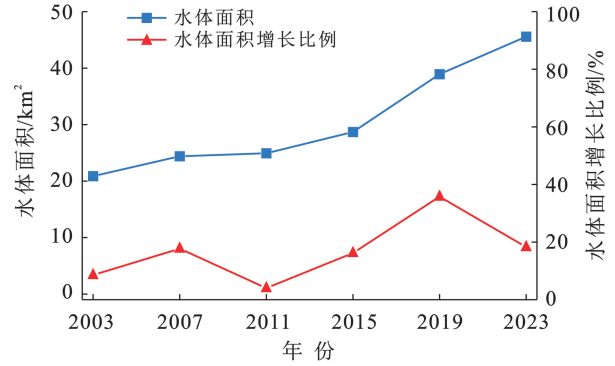


图 4 2003—2023 年宁东煤电基地水体面积及增长比例  
Fig.4 Area and growth rate of water bodies in Ningdong coal and power base from 2003 to 2023

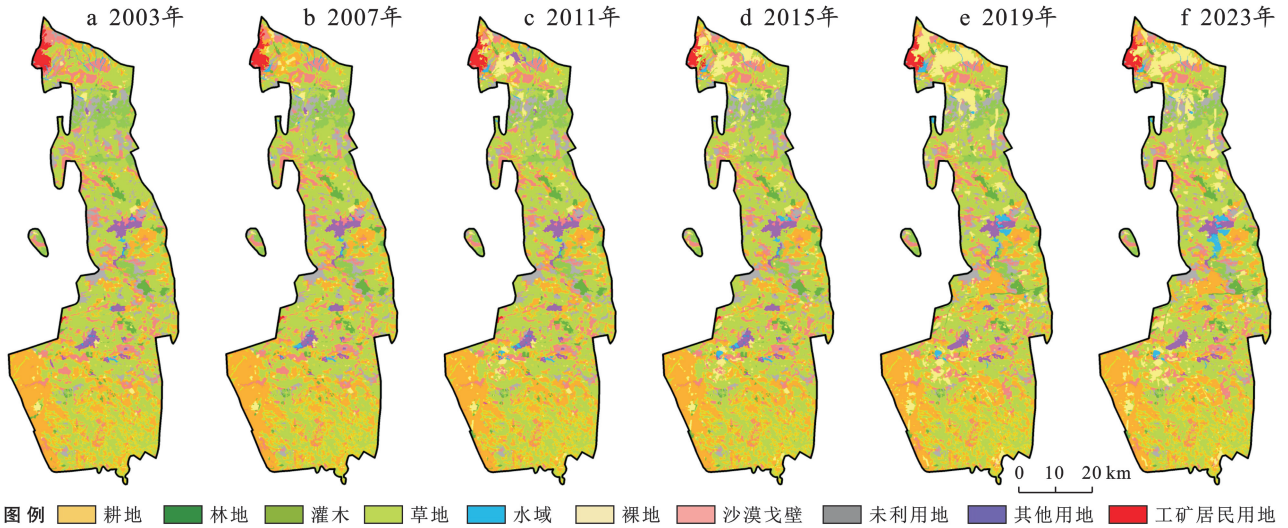


图 5 2003—2023 年宁东煤电基地土地利用类型分布

Fig.5 Distribution of land use types in Ningdong coal and power base from 2003—2023

工矿居民用地变化最显著,呈现快速增长趋势,从 2003 年的 48.26 km<sup>2</sup> 增至 2023 年的 280.28 km<sup>2</sup>,其面积所占比例由 1.40% 增加到 8.12%,增加了近 5 倍。2015—2019 年期间增长最为迅速,清楚地反映了宁东煤电基地能源产业的快速发展。这些变化揭

示了宁东煤电基地在经济发展与生态保护之间寻求平衡的过程,工矿用地的大幅增加反映了能源产业的快速发展,而耕地和林地面积的增加以及裸地和沙漠戈壁面积的下降则表明了区域在追求经济增长的同时,也在努力改善生态环境。

表 3 宁东煤电基地土地利用类型面积及其比例

Table 3 Area of land use types and its proportions in Ningdong coal and power base

土地利用类型	面积/km <sup>2</sup>						面积所占比例/%					
	2003 年	2007 年	2011 年	2015 年	2019 年	2023 年	2003 年	2007 年	2011 年	2015 年	2019 年	2023 年
耕地	663.42	692.13	680.82	678.75	686.76	690.1	19.22	20.05	19.72	19.66	19.89	19.99
林地	71.98	75.16	75.4	75.24	77.34	76.14	2.09	2.18	2.18	2.18	2.24	2.21
灌木	136.55	134.02	135.16	134.61	122.72	119.88	3.96	3.88	3.91	3.9	3.55	3.47
草地	1 602.48	1 602.04	1 572.83	1 541.17	1 459.67	1 448.84	46.42	46.4	45.56	44.64	42.28	41.96
水域	21.45	24.9	25.42	29.11	39.15	45.66	0.62	0.72	0.74	0.84	1.13	1.32
裸地	459.89	441.06	422.33	421.68	418.99	418.74	13.32	12.78	12.33	12.21	12.14	12.13
沙漠戈壁	349	326.16	324.79	320.87	293.41	291.98	10.11	9.45	9.41	9.29	8.5	8.46
未利用地	67.63	64.12	69.45	60.16	56.33	54.53	1.96	1.86	2.01	1.74	1.63	1.58
其他用地	31.71	29.77	27.89	21.09	24.41	26.21	0.92	0.86	0.81	0.61	0.71	0.76
工矿居民用地	48.26	63.01	118.28	169.69	273.59	280.28	1.40	1.83	3.43	4.92	7.92	8.12

(2) 土地利用类型变化分析。基于 ArcGIS 软件对 2003—2023 年间 5 个时段 (2003—2007, 2007—2011, 2011—2015, 2015—2019, 2019—2023 年) 宁东煤电基地的土地利用类型变化进行了精确计算与分析。根据宁东煤电基地的具体地域特征和土地利用实际状况, 将该区域的土地利用类型细致划分为以下 10 类, 即耕地、林地、灌木、草地、水域、裸地、沙漠戈壁、未利用地、其他用地和工矿居民用地。这一分类体系不仅涵盖了耕地、林地、草地和水域等传统土地利用类型, 还特别对裸地、沙漠戈壁、未利用地、其他用地和工矿居民用地进行了深入的细分。

具体而言, 灌木指没有明显主干、呈丛生状态且植株相对矮小的树木, 高度通常在 3.5 m 以下; 裸地类别涵盖了原生荒原 (指历史上从未生长过植被的地

表)、次生荒原 (指原有植被因破坏而消失的地表) 以及裸岩等; 沙漠戈壁则是指地表完全由沙覆盖、缺乏流水、广泛分布砾石且植被稀疏的区域, 其地表构成与典型的沙漠沙质地表有所差异; 未利用地则包括盐碱地等难以直接用于农业生产或工业建设的土地类型; 其他用地则指规划范围内除特定用途外的所有用地类型, 如特殊用地和风景名胜设施用地等; 工矿居民用地则涵盖了城市、建制镇、村庄及居民点以外的工矿企事业单位用地, 以及这些用地内部的交通设施、绿化地带等附属用地。

为了直观展示 2003—2023 年间这 10 类土地利用类型之间的内部转移情况, 本研究采用 Origin 软件绘制了宁东煤电基地 2003—2023 年间各时期的土地利用转移桑基图 (如图 6 所示)。

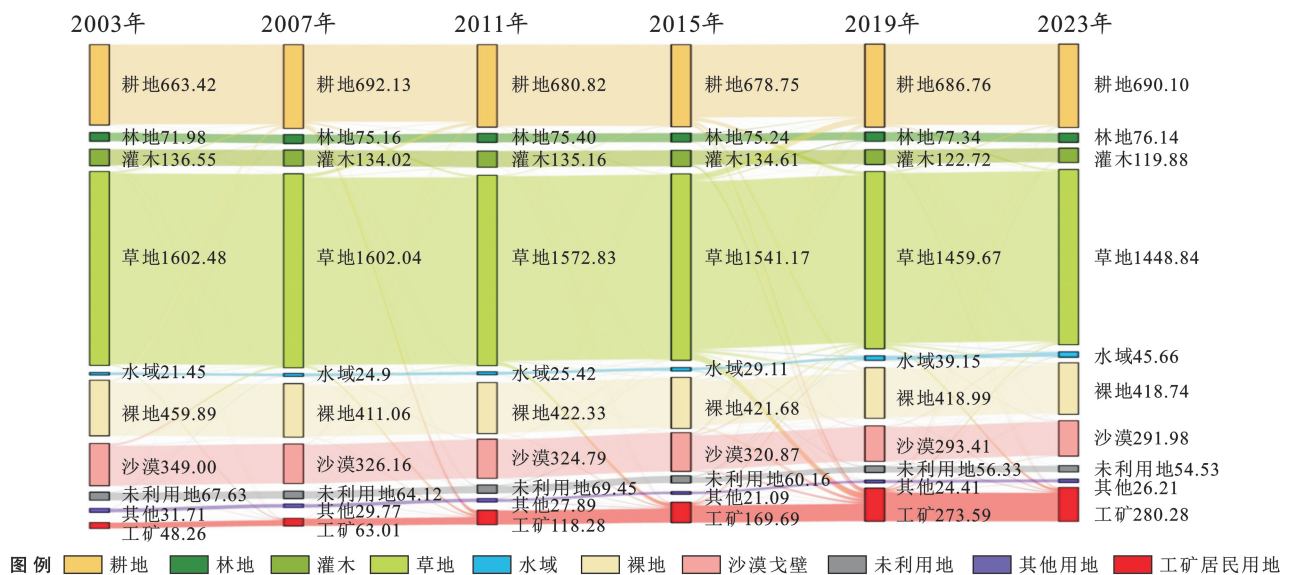


图 6 宁东煤电基地土地利用转移矩阵的桑基图

Fig.6 Sankey diagram of land use transfer matrix in Ningdong coal and power base

2003—2023 年宁东煤电基地土地利用转移总体趋势为草地转为其他地类, 工矿居民用地和耕地的转入面积最多, 土地利用转移面积呈逐渐增加的趋势, 其中 2003—2019 年土地利用转移面积呈增强趋势, 2019—2023 年转移面积增加逐渐趋于平稳。2003—2023 年, 宁东煤电基地草地是主要转出地类, 主要流转为耕地和工矿居民用地。2003—2023 年宁东煤电基地耕地的转入面积累计为 26.68 km<sup>2</sup>, 工矿居民用地的转入面积累计为 232.02 km<sup>2</sup>。林地、水域、未利用地和其他用地由于自身面积较小, 除水域面积外, 整体土地流转强度较弱。2003—2023 年宁东煤电基地裸地面积整体呈流出趋势, 主要流向工矿居民用地。

(3) 土地利用转移网络分析。宁东煤电基地在 2003—2023 年间, 工矿居民用地和水域的 NCI, TCI

和 TI 指数普遍较高且为正值 (表 4), 表明其变化幅度较大, 并呈现扩张趋势。相较之下, 草地、灌木、裸地、沙漠戈壁及未利用地的各项指数普遍较小且多为负值, 说明这些土地类型变化不明显, 且面积有所减少。2003—2007 年, 工矿居民用地的 NCI 最高, 沙漠戈壁最低。TCI 方面, 水域最高, 灌木和草地最低。TI 指数以工矿居民用地最高, 其他用地最低, 整体土地利用变化较为平稳。2007—2011 年, 工矿居民用地的 NCI 依然最高, 其他用地最低。TCI 指数显示工矿居民用地增长最显著, 沙漠戈壁最低。TI 指数同样以工矿居民用地最高, 其他用地最低。2011—2015 年, 工矿居民用地在 NCI, TCI 和 TI 中均占据最高值, 而其他用地指数最低, 表明工矿居民用地扩张最为明显。2015—2019 年, NCI 最高为工矿居民

用地,最低为灌木和沙漠戈壁。TCI 最高为水域,最低为草地。TI 最高为其他用地,最低为沙漠戈壁。2019—2023 年,工矿居民用地的 NCI,TCI 和 TI 指数均最高,未利用地的 NCI 和 TI 最低,表明工矿居

民用地持续扩张,而未利用地变化幅度较小且有所减少。总体而言,宁东煤电基地的工矿居民用地和水域扩展明显,而草地、灌木、裸地及未利用地的面积则逐步缩减。

表 4 宁东煤电基地土地利用类型指数变化

Table 4 Changes in land use type index of Ningdong coal and power base

时期	指标	土地利用类型									
		耕地	林地	灌木	草地	水域	裸地	沙漠戈壁	未利用地	其他用地	工矿用地
2003—2007 年	NCI	0.04	0.04	-0.02	0.00	0.16	-0.04	-0.07	-0.05	-0.06	0.31
	TCI	0.06	0.08	0.03	0.03	0.44	0.07	0.07	0.07	0.06	0.31
	TI	0.72	0.57	-0.74	-0.01	0.37	-0.62	-0.95	-0.77	-1.00	1.00
2007—2011 年	NCI	-0.02	0.00	0.01	-0.02	0.02	-0.04	0.00	0.08	-0.06	0.10
	TCI	0.15	0.10	0.04	0.05	0.20	0.07	0.04	0.21	0.07	14.66
	TI	-0.11	0.03	0.19	-0.36	0.10	-0.57	-0.11	0.40	-0.89	0.88
2011—2015 年	NCI	0.00	0.00	0.00	-0.02	0.15	0.00	-0.01	-0.13	-0.24	0.94
	TCI	0.14	0.03	0.04	0.05	0.39	0.08	0.04	0.17	0.25	0.94
	TI	-0.02	-0.08	-0.11	-0.43	0.37	-0.02	-0.33	-0.80	-0.96	1.87
2015—2019 年	NCI	0.01	0.03	-0.09	-0.05	0.34	-0.01	-0.09	-0.06	0.16	57.14
	TCI	0.18	0.29	0.17	0.15	0.99	0.27	0.17	0.34	0.32	0.43
	TI	0.06	0.10	-0.51	-0.36	0.35	-0.02	-0.52	-0.19	0.50	0.46
2019—2023 年	NCI	0.00	-0.02	-0.02	-0.01	0.17	0.00	0.00	-0.03	0.07	0.95
	TCI	0.06	0.07	0.10	0.06	0.45	0.10	0.11	0.09	0.10	1.49
	TI	0.08	-0.23	-0.23	-0.11	0.37	-0.01	-0.04	-0.34	0.73	52.90

NCI 为转移净变化量指数; TCI 为转移总变化量指数; TI 为转移趋势指数。

### 3.3 资源利用管理现状

3.3.1 地表水与地下水开采量及供水潜力管理 黄河是宁东煤电基地内最主要的水系,流向由南向北,在基地内全长约 47 km<sup>[25]</sup>,主要支流有苦水河、大河子沟、西天河等,是宁东煤炭基地生态环境的重要组成部分,对维护其生态平衡和可持续发展发挥着关键作用。苦水河发源于甘肃省甜水堡南部,向北流入宁夏,径流量较少,水质差,矿化度高,年径流量约  $1.20 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。大河子沟发源于灵武市杨家窑,年径流量约为  $4.37 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,水质较差。西天河发源于宁夏回族自治区中卫市五疙瘩,为常年性地表径流,从南向北经过磁窑堡矿区转而向西流出,水质较差,河流水量较小,枯水期径流量约为  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ ,丰水期径流量约为  $261.60 \text{ m}^3/\text{h}$ ,为季节性洪流冲沟。

2018 年宁东煤电基地总用水量约  $1.97 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中工业用水量  $1.77 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,占用水总量的 88%,工业用水中又以煤炭、煤电、煤化工三大产业用水为主,合计用水量  $1.56 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,宁东煤电基地 2018 年用水结构和各产业所占比例的情况如图 7 所示。

在地表水管理方面,宁东煤电基地地表水主要有边沟、西天河、鸭子荡水库、园疙瘩湖、鸳鸯湖和南

湖<sup>[26]</sup>。边沟东起宁东镇清水营,长约 55 km,流域面积  $505 \text{ km}^2$ ,为季节性沟道,汛期出现短暂的水流,非汛期为干沟,流域内分布着水洞沟水库、马莲台水库、上沟湾水库、清水营水库等小型水库。为了合理利用边沟水资源,相关部门制定了严格的取水许可制度,规定在汛期允许企业根据生产需求申请一定量的取水指标,非汛期则禁止取水,以保障沟道生态用水。同时,加强对水库的管理,定期监测水库水位和水质,根据水位变化调整水库的蓄放水计划。

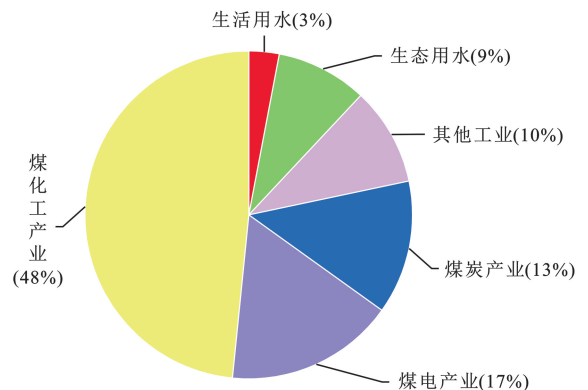


图 7 2018 年宁东煤电基地用水结构  
Fig.7 Water use structure of Ningdong coal and power base in 2018

西天河流经马家滩、宁东镇永利村、马跑泉村、临河镇甜水河村和临河镇二道沟村,属于间歇性河流,汛期河道行洪,河流洪水由暴雨径流形成,具有峰高量小、历时短的洪水特性。自 2003 年宁东煤电基地建设以来,陆续有企业废水排入,现已成为宁东煤电基地工业和生活废水的汇集、排泄通道,每年接纳宁东煤电基地矿井水、工业废水及生活污水近  $2.00 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。为了改善西天河的水质,当地环保部门加大了对企业废水排放的监管力度,要求企业必须建设污水处理设施,确保废水达标排放。同时,制定了西天河水质改善计划,投入专项资金用于河道生态修复,通过种植水生植物,投放微生物制剂等方式,提高河水的自净能力。

已经探明可向宁东煤电基地供水的地下水水源地有骆驼井水源地、灵武大泉水源地、灵武崇兴水源地、陶乐平原水源地和吴忠平原傍河水源地 5 处<sup>[27]</sup>。骆驼井水源地处于基地西部,现状开采量为  $1.80 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ ,工程可开采量为  $6.40 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ ,尚有  $4.60 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$  供水能力;灵武大泉水源地包括北部大泉乡现有水源地和大泉 1 号备选水源地,现状开采量为  $9.00 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ ,工程可开采量为  $2.79 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ ,该水源地尚有  $1.89 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$  供水能力;灵武崇兴水源地现状开采量为  $4.00 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ ,工程可开采量为  $7.00 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ ,该水源地尚有  $3.00 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$  供水能力,也是灵武市区的供水水源地。

在地下水管理方面,相关部门建立了地下水动态监测网络,对各水源地的水位、水质和开采量进行实时监测。根据监测数据,制定了科学合理的地下水开采计划,严格控制各水源地的开采量,确保不超过工程可开采量。例如,对于骆驼井水源地,规定每年的开采量不得超过现状开采量与剩余供水能力之和的一定比例(如 70%),以保障水源地的可持续利用。同时,加强对地下水水源地的保护,划定了水源地保护区,禁止在保护区内进行可能污染地下水的活动,如建设垃圾填埋场、化工企业等。地下水水源地的现状开采量、工程可开采量及供水能力统计如表 5 所示。

表 5 宁东煤电基地水源地地下水开采量及开采潜力

Table 5 Quantity and potential of groundwater extraction in source area of Ningdong coal and power base  $10^8 \text{ m}^3/\text{a}$

水源地	位置	现状开采量	工程开采量	供水能力
骆驼井水源地	基地西部	0.018	0.064	0.046
灵武大泉水源地	基地东部	0.090	0.279	0.189
灵武崇兴水源地	基地东部	0.040	0.070	0.030
陶乐平原水源地	基地北部	0.010	0.123	0.113
吴忠平原傍河水源地	基地东部	0.000	0.246	0.246
总计		0.158	0.782	0.624

3.3.2 土地资源开发利用变化管理 土地资源的供给能力是固定的,而需求却在不断增加,因此,通过各种措施提高土地利用效率是区域实现土地供需平衡的主要手段。根据 2003—2023 年宁东土地利用类型面积,计算宁东煤电基地 2003,2007,2011,2019,2023 年土地资源开发利用率(如图 8 所示)。宁东煤电基地土地资源利用率主要分为 3 个阶段:2003—2007 年缓慢增长阶段,2007—2019 年加速增长阶段,2019—2023 年高速增长与稳定阶段。

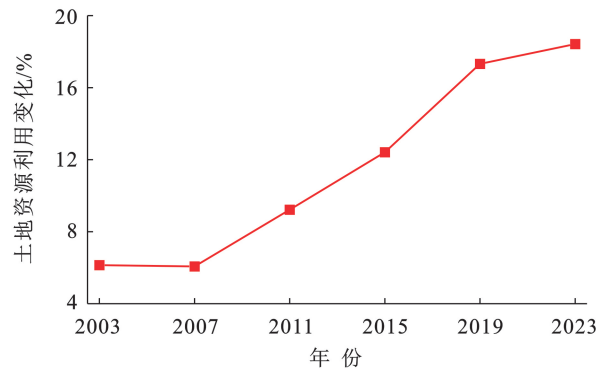


图 8 2003—2023 年宁东煤电基地土地资源利用变化  
Fig.8 Changes of land resource utilization in Ningdong coal and power base from 2003 to 2023

在土地资源管理方面,2003—2007 年缓慢增长阶段,宁东土地资源利用率从 6.14% 下降为 6.07%,由于宁东煤电基地的开发建设处于起步阶段,土地利用规划尚不完善,相关管理制度也在逐步建立中。在此期间,主要是对土地进行初步的调查和规划,制定了一些基础性的土地利用政策,如明确了不同产业用地的基本要求和审批流程。但由于基础设施建设和产业布局等仍在逐步推进中,土地资源利用率增长率较小且略有下降。

2007—2019 年加速增长阶段,随着 2009 年《宁东能源化工基地开发总体规划》的制定和 2010 年宁夏宁东、内蒙古鄂尔多斯、陕西榆林能源“金三角”战略的提出,土地利用有了明确的战略规划和政策支持。宁东煤电基地管理部门加强了土地利用的统筹规划,根据产业发展需求,合理调整土地利用结构,优先保障重点产业项目的用地需求。同时,建立了土地储备制度,对闲置土地进行统一收储和管理,提高土地的供应效率。通过这些措施,宁东煤电基地的开发建设进入了加速期,宁东土地资源利用率从 2007 年 6.07% 提升至 2019 年 17.32%。

2019—2023 年高速增长与稳定阶段,宁东煤电基地进一步完善了土地资源管理的各项制度,加强了对土地利用的监管和考核。建立了土地利用动态监测

系统,实时掌握土地的使用情况,对违规用地行为进行严厉打击。同时,鼓励企业进行土地节约集约利用,通过给予税收优惠、政策扶持等方式,引导企业提高土地利用效率。在此期间,宁东土地资源利用率提升到 18.42%,进入了一个高速增长阶段。

宁东煤电基地的土地资源开发利用经历了从初期缓慢增长到加速增长,再到高速增长与稳定的变化过程,反映了宁东煤电基地在经济社会发展、产业结构优化、基础设施建设等方面的改善。随着政策环境的持续优化、科技创新的不断推进以及产业结构的调整升级,宁东煤电基地未来应聚焦于土地资源利用率的进一步提升,确保经济发展与生态环境保护协调发展,为区域经济的可持续发展提供支撑。

## 4 宁东煤电基地煤炭—水土资源综合管治策略

(1) 煤炭资源管制策略与优化。①针对煤矿主要集中在中部和北部的现状,应进一步优化开采布局,避免过度集中于某一区域,以减少对当地生态环境的压力。推广先进的开采技术和设备,提高开采效率,减少资源浪费。②通过地理信息技术与大数据分析,精准掌握煤炭资源分布和开采条件,实现资源的最优化配置。推广煤炭洗选、深加工等技术,提高煤炭的附加值和利用率。③鼓励使用清洁能源替代煤炭,减少煤炭消费过程中的碳排放。发展煤炭气化、液化等低碳利用技术,降低煤炭消费对环境的负面影响。

(2) 水资源管治策略与优化。①针对矿井水排放对地表水的影响,应建立完善的矿井水处理系统,确保矿井水达标排放。探索矿井水的资源化利用途径,如用于灌溉、工业生产等,减少对水资源的浪费。②加强对地下水水源地的保护和管理,确保水源地的水质和水量安全。推动节水技术的应用,提高水资源利用效率,减少水资源浪费。③利用处理后的矿井水或其他可用水资源,对基地内的水域进行生态补水,维护水域生态平衡。

(3) 土地资源管制策略与优化。①针对土地资源利用率整体呈上升趋势但仍有提升空间的现状,应进一步优化土地利用结构,提高土地利用效率。加强对闲置土地的清理和利用,盘活土地资源,为煤电基地建设提供更多的土地支持。②针对草地等生态敏感区域面积减少的问题,应加强对这些区域的生态保护,防止进一步退化。实施生态修复工程,如植树造林、草地恢复等,提高区域生态质量。③在煤电基地建设过程中,应坚持土地集约利用原则,合理规划用地,避免土地资源的浪费。鼓励使用多层建筑、地下

空间等立体利用方式,提高土地容积率。

(4) 综合管治策略与优化措施。①成立专门的煤炭—水土资源综合管治机构,负责协调各方资源,推动综合管治策略的实施。制定详细的实施计划和时间表,确保各项措施能够按时、按质、按量完成。②建立煤炭—水土资源综合管治的监测体系,对各项措施的实施效果进行定期监测和评估。根据监测和评估结果,及时调整和优化综合管治策略,确保策略的有效性和可持续性。③加强宣传和教育,提高公众对煤炭—水土资源综合管治的认识和参与度。鼓励公众积极参与煤电基地的生态环境保护和资源利用工作,形成全社会共同参与的良好氛围。

## 5 结论

宁东煤电基地在煤炭开采的全生命周期中,水土资源特征及其变化呈现明显的阶段性特征。随着煤炭开发的推进,土地资源利用率不断提高,水资源需求持续增长,同时伴随着环境问题的加剧。这些变化不仅影响基地的可持续发展,也对周边生态环境产生深远影响。

(1) 在煤炭开发方面,数量上,2003—2023 年宁东煤电基地产量稳步上升,年均增长 5.89%,从  $4.300 \times 10^6$  t 增至  $8.568 \times 10^7$  t,2016 年后增速放缓。全国同期煤炭产量由  $1.667 \times 10^9$  t 增至  $4.710 \times 10^9$  t,宁夏回族自治区产量增长趋势与全国相似,但增速低、波动大且存在滞后性。空间上,宁夏煤炭资源集中于 5 市,宁东煤电基地内煤矿分布呈现规模越大越集中在中部和北部的特点。

(2) 在水资源方面,宁东煤电基地在 2003—2011 年主要依赖黄河水源供水,并通过一系列供水工程满足工业需求。2015—2023 年,水体明显增加且集中在中部和南部,水资源利用格局向多元化、高效化转变。黄河水占工矿用水的 70%~80%,受季节影响较大;地下水在工矿用水中所占比例较小,约为 10%~20%,受严格管控;地表水与地下水相互补给,部分区域有特殊特征。

(3) 在土地资源方面,空间分布上,2003—2023 年宁东煤电基地主要用地类型为草地,水域分布于中部与北部,工矿居民用地逐渐向北部扩张,并在中部与南部有零星分布。耕地主要位于西南部,林地集中于北部,而裸地、沙漠戈壁和未利用地分布较为零散。面积变化上,耕地在西南部呈波动增长且总体稳定,林地在中部缓慢扩展,草地面积从 2003 年的  $1\ 602.48$  km<sup>2</sup> 减少至 2023 年的  $1\ 448.84$  km<sup>2</sup>;水域面积 20 a 间增长  $24.21$  km<sup>2</sup>;工矿居民用地在北部

显著增加,从2003年的48.26 km<sup>2</sup>增至2023年的280.28 km<sup>2</sup>,其中2015—2019年增速最快。裸地和沙漠戈壁面积虽呈下降趋势,但变化幅度不大。土地资源利用率由2003年6.14%上升至2023年18.42%,整体呈上升趋势。

(4) 宁东煤电基地应进一步提高土地资源利用率,优化水资源配置,确保经济发展与生态环境保护协调推进,为区域经济的可持续发展提供有力支撑。

## 参考文献(References)

- [1] 李秋白,刘涛,王圣,等.黄河流域能源企业高质量发展面临的挑战与转型途径[J].中国煤炭,2022,48(9):18-25.  
Li Qiubai, Liu Tao, Wang Sheng, et al. Challenges and transformation paths of high-quality development of energy enterprises in the Yellow River basin [J]. China Coal, 2022,48(9):18-25.
- [2] 葛世荣,樊静丽,刘淑琴,等.低碳化现代煤基能源技术体系及开发战略[J].煤炭学报,2024,49(1):203-223.  
Ge Shirong, Fan Jingli, Liu Shuqin, et al. Low carbon modern coal-based energy technology system and development strategy [J]. Journal of China Coal Society, 2024,49(1):203-223.
- [3] 段娜,肖筱瑜,何辉.国家级绿色矿山建设的环境保护要求[J].中国矿业,2024,33(S1):84-90.  
Duan Na, Xiao Xiaoyu, He Hui. Environmental protection requirements of national green mine construction [J]. China Mining Magazine, 2024,33(S1):84-90.
- [4] 王金满,杨曼,刘彪,等.绿色矿山建设碳源/汇与减排增汇研究进展[J].煤炭学报,2024,49(3):1597-1610.  
Wang Jinman, Yang Man, Liu Biao, et al. Carbon sources/sinks and emission reduction and sink enhancement in green mining [J]. Journal of China Coal Society, 2024,49(3):1597-1610.
- [5] 高天明,张艳.中国煤炭资源高效清洁利用路径研究[J].煤炭科学技术,2018,46(7):157-164.  
Gao Tianming, Zhang Yan. Study on high efficient and clean utilization ways of China's coal resources [J]. Coal Science and Technology, 2018,46(7):157-164.
- [6] 刘峰,曹文君,张建明,等.我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J].煤炭学报,2021,46(1):1-15.  
Liu Feng, Cao Wenjun, Zhang Jianming, et al. Current technological innovation and development direction of the 14<sup>th</sup> Five-Year Plan period in China coal industry [J]. Journal of China Coal Society, 2021,46(1):1-15.
- [7] 李成宇,张士强.中国省际煤炭资源利用效率研究[J].中国煤炭,2020,46(3):13-22.  
Li Chengyu, Zhang Shiqiang. Study on the utilization efficiency of provincial coal resources in China [J]. China Coal, 2020,46(3):13-22.
- [8] 付楚芮.现代煤化工气化能耗评价及节能潜力研究[J].中国煤炭,2024,50(8):181-188.  
Fu Churui. Research on energy consumption evaluation and energy conservation potential of modern coal chemical gasification [J]. China Coal, 2024,50(8):181-188.
- [9] 张凯,王雅静,赵茜阳,等.我国典型煤化工技术潜在出口能力评价[J].煤炭科学技术,2022,50(6):313-320.  
Zhang Kai, Wang Yajing, Zhao Xiyang, et al. Evaluation on potential export capacity of China's typical complete coal chemical industry [J]. Coal Science and Technology, 2022,50(6):313-320.
- [10] 朱静茂,宋绍伟.“双碳”目标下煤基能源产业高质量发展路径研究[J].中国煤炭,2023,49(12):21-25.  
Zhu Jingmao, Song Shaowei. Research on high-quality development path of coal-based energy industry under the goals of carbon peak and carbon neutrality [J]. China Coal, 2023,49(12):21-25.
- [11] 郝成亮.我国煤炭清洁高效利用现状与未来发展方向研究[J].煤炭经济研究,2022,42(12):38-42.  
Hao Chengliang. Current situation analysis and future trend research on clean and efficient utilization of Chinese coal [J]. Coal Economic Research, 2022,42(12):38-42.
- [12] 杨科,何淑欣,何祥,等.煤电化基地大宗固废“三化”协同利用基础与技术[J].煤炭科学技术,2024,52(4):69-82.  
Yang Ke, He Shuxin, He Xiang, et al. Foundation and technology of coordinated utilization of bulk solid waste 'Three modernizations' in coal power base [J]. Coal Science and Technology, 2024,52(4):69-82.
- [13] 刘畅,张红,张霄羽,等.半干旱地区矿区土地利用时空演变与预测[J].干旱区研究,2022,39(1):292-300.  
Liu Chang, Zhang Hong, Zhang Xiaoyu, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of land use in semi-arid mining areas [J]. Arid Zone Research, 2022,39(1):292-300.
- [14] 拜梦童,杜华栋,范鹏辉,等.黄土沟壑区采煤塌陷地不同土地利用类型土壤性质损害特征[J].土壤通报,2022,53(5):1029-1037.  
Bai Mengtong, Du Huadong, Fan Penghui, et al. Damage characteristics of soil properties in different land use types under mining subsidence areas in loess hilly area [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022,53(5):1029-1037.
- [15] 宋世杰,张家杰,杨帅,等.黄河上中游采煤沉陷区水土流失效应的探索与思考[J].绿色矿山,2024(2):169-182.  
Song Shijie, Zhang Jiajie, Yang Shuai, et al. Exploration and thinking on soil erosion effect of coal mining subsidence area in the upper and middle reaches of the

- Yellow River [J]. *Journal of Green Mine*, 2024(2): 169-182.
- [16] 蔡美峰, 吴允权, 李鹏, 等. 宁夏地区煤炭资源绿色开发现状与思路[J]. *工程科学学报*, 2022, 44(1): 1-10.  
Cai Meifeng, Wu Yunquan, Li Peng, et al. Present situation and ideas of green development of coal resources in Ningxia [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(1): 1-10.
- [17] 马永强. 宁东能源化工基地生态承载力评价及预警研究[D]. 宁夏 银川: 宁夏大学, 2019.  
Ma Yongqiang. Study on ecological carrying capacity evaluation and early warning of Ningdong energy and chemical industry base [D]. Yinchuan, Ningxia: Ningxia University, 2019.
- [18] 刘昭媛. 宁东基地生态文明建设可持续发展路径研究[D]. 宁夏 银川: 宁夏大学, 2015.  
Liu Zhaoyuan. Study on sustainable development path of ecological civilization construction in Ningdong base [D]. Yinchuan, Ningxia: Ningxia University, 2015.
- [19] 马凤华, 张勇, 张晓东, 等. 宁夏矿产资源开发利用现状及方向[J]. *矿产综合利用*, 2024(1): 92-98.  
Ma Fenghua, Zhang Yong, Zhang Xiaodong, et al. Current situation of development and utilization and directions of mineral resources in Ningxia [J]. *Multi-purpose Utilization of Mineral Resources*, 2024(1): 92-98.
- [20] 冯洁, 侯恩科, 王苏健. 宁东煤炭基地煤炭开采对地下水的影响预测[J]. *地质通报*, 2018, 37(12): 2184-2191.  
Feng Jie, Hou Enke, Wang Sujian. The prediction of the influence of coal mining on the groundwater in Eastern Ningxia coal production base [J]. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(12): 2184-2191.
- [21] 董彭蓓, 任宗萍, 李鹏, 等. 土地利用变化下宁夏生态系统服务权衡协同关系研究[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(6): 1032-1044.  
Dong Pengbei, Ren Zongping, Li Peng, et al. Ecosystem services trade-offs and synergies driven by landuse changes in Ningxia [J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(6): 1032-1044.
- [22] 徐步然. 灰色 GM(1,1) 模型在能源消费预测中的应用[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2014, 28(9): 130-133.  
Xu Buran. Prediction of gross energy consumption for Chongqing based on GM(1,1) model [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2014, 28(9): 130-133.
- [23] 宋新华. 宁夏矿产资源产业布局研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.  
Song Xinhua. Study on industrial layout of mineral resources in Ningxia [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010.
- [24] 张旭, 王小军, 刘永刚, 等. 宁东煤炭基地水资源需求预测分析[J]. *地下水*, 2017, 39(3): 99-102.  
Zhang Xu, Wang Xiaojun, Liu Yonggang, et al. Water resources prediction of coal base in Ning Dong [J]. *Ground Water*, 2017, 39(3): 99-102.
- [25] 王国瑞. 宁东煤炭高强度开采生态地质环境风险评价与预警研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2022.  
Wang Guorui. Study on eco-geological environment risk assessment and early warning of high intensity coal mining in Ningdong [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2022.
- [26] 韩秀云, 李聪. 宁东基地水环境状况及水资源综合利用初探[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(6): 278-282.  
Han Xiuyun, Li Cong. Present situation of water environment and the comprehensive utilization of water resources in Ningdong base [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(6): 278-282.
- [27] 钱开铸, 吕京京, 王旭升, 等. 考虑生态因子敏感性的骆驼井水源可开采量评价模型[J]. *勘察科学技术*, 2013(5): 10-15.  
Qian Kaizhu, Lv Jingjing, Wang Xusheng, et al. Eco-environmental sensitivity evaluation model of groundwater exploitable yields in Luotuojing water resource field [J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2013(5): 10-15.