

文章编号: 1004-4051(2023)12-0039-12

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20220839

“双碳”目标下鄂尔多斯盆地资源开发生态空间管控路径研究

付乐, 迟妍妍, 王晶晶, 张丽苹, 刘斯洋, 张信, 公滨南
(生态环境部环境规划院, 北京 100041)

摘要: 黄河流域被誉为我国的“能源流域”, 统筹协调好资源开发与生态环境保护的关系, 对于黄河流域生态保护和高质量发展具有重要现实意义。以黄河流域能源富集区域鄂尔多斯盆地研究对象, 在分析鄂尔多斯盆地资源开发利用面临的主要问题的基础上, 采用生态环境评价与分区技术方法, 从生态空间管控的视角探讨了“双碳”目标下资源开发与生态环境保护协调发展的路径。通过研究可知, 鄂尔多斯盆地存在化石能源生产消费占比高、水资源供需矛盾突出、资源开发破坏生态环境等问题。盆地生态空间由生态系统极重要(敏感)区、国家级自然保护区和国家重点生态功能区构成, 面积约 1.6×10^4 km², 占比 69.7%。基于生态空间分区管控模式, 将盆地生态空间划分为优先保护单元、重点管控单元和一般管控单元, 占生态空间的面积比例分别为 15.6%、30.0% 和 54.4%。优先保护单元生态空间限制开发, 重点开展生态保护修复工程; 重点管控单元严守资源利用上线, 合理调控资源开发强度; 一般管控单元转型升级能源发展模式, 探索建设碳中和示范矿区引领工程。通过科学划分鄂尔多斯盆地生态空间, 研究提出不同生态空间单元的管控策略, 可以有效促进黄河流域能源富集区域资源精细化、生态化和高质量化的开发利用。

关键词: “双碳”目标; 黄河流域; 鄂尔多斯盆地; 资源开发; 生态空间管控

中图分类号: X826; TD98 **文献标识码:** A

Study on the ecological space control path of resources exploitation in Ordos Basin under the goal of “carbon peak and neutrality”

FU Le, CHI Yanyan, WANG Jingjing, ZHANG Liping, LIU Siyang,
ZHANG Xin, GONG Binnan

(Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100041, China)

Abstract: The Yellow River Basin is also known as China's energy basin. Coordinating the relationship between resource development and ecological environment protection is of great practical significance for ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin. Based on the analysis of resource development issues in the Ordos Basin, this paper uses ecological environment assessment and zoning techniques to discuss the path of coordinated development of resource development and ecological environment protection under the goal of “carbon peak and neutrality” from the perspective of ecological space control. The research results show that there are

收稿日期: 2022-11-09 责任编辑: 刘硕

基金项目: 美国环保协会北京代表处项目“黄河流域生态产品价值实现机制”资助(编号: 20211020)

第一作者简介: 付乐(1992—), 男, 汉族, 陕西宝鸡人, 硕士, 助理研究员, 研究方向为生态环境空间管控等, E-mail: fule@caep.org.cn。

通讯作者简介: 迟妍妍(1981—), 女, 汉族, 山东威海人, 硕士, 副研究员, 研究方向为区域生态评价与空间管控, E-mail: chiyy@caep.org.cn。

引用格式: 付乐, 迟妍妍, 王晶晶, 等. “双碳”目标下鄂尔多斯盆地资源开发生态空间管控路径研究[J]. 中国矿业, 2023, 32(12): 39-50.

FU Le, CHI Yanyan, WANG Jingjing, et al. Study on the ecological space control path of resources exploitation in Ordos Basin under the goal of “carbon peak and neutrality” [J]. China Mining Magazine, 2023, 32(12): 39-50.

problems such as the proportion of fossil energy production and consumption in the Ordos Basin, the contradiction between supply and demand of water resources, and the destruction of the ecological environment by resource development. The ecological space area is about $1.6 \times 10^4 \text{ km}^2$, accounting for 69.7% of the total area of the basin. It is composed of extremely important (sensitive) ecosystems, national nature reserves and national key ecological function areas. Ecological space science is divided into priority protection units (15.6%), key control units (30.0%) and general control units (54.4%). Priority protection units focus on carrying out ecological protection and restoration projects, key management and control units reasonably regulate the intensity of resource development, and general management and control units transform and upgrade the energy development model. The management and control strategies of different ecological space units can effectively promote the high-quality development and utilization of resources in energy-rich regions in the Yellow River Basin.

Keywords: the goal of “carbon peak and neutrality”; Yellow River Basin; Ordos Basin; resource development; ecological space control

自然资源是经济社会发展的重要物质基础和承载要素,同时也是碳源和碳汇的空间载体,资源开发、利用和管理模式对实现经济高质量发展至关重要^[1]。在当前“双碳”背景下,将碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局,对未来应对和减缓气候变化的自然资源管理模式提出了新的要求^[2]。将碳中和目标纳入空间规划和治理中是新时代下自然资源管理领域的突破和创新,对于从基础层面推动社会经济系统低碳转型具有重要意义^[3]。

近年来,不少学者对矿产资源开发利用造成的生态环境破坏和区域碳平衡失调等问题,以及矿区空间管控路径和生态系统修复模式等方面开展了大量研究。吴文盛等^[4]从开采规模、开采阶段、开采方式以及油气开发等方面具体分析了矿产资源开发对生态环境的影响大小。杨博宇等^[5]系统阐述了矿区土地生态系统碳源和碳汇的形成机理,同时提出了损毁土地生态系统碳排放、复垦土地生态系统碳固存及矿区减排增汇途径。马丽等^[6]通过采用地理空间分析、多指标综合评价和胁迫耦合分析等方法,将黄河流域 46 个矿区城市划分为 8 个不同类型区,提出黄河流域矿产资源开发地区的管控路径。李云鹏等^[7]研究总结了矿区生态系统的演变类型、演变阶段及演变过程,提出针对受损矿区生态系统的 3 种修复模式。生态空间是指用于自然保护地、山林保护、生态防护等功能的地域^[8]。生态空间管控致力于实现社会经济发展和生态环境保护的双重目标,最为通行的方式是对资源与环境进行生态空间识别并划分管控单元,提升重点区域生态系统服务功能,达到保护生态环境的目的^[9-10]。1987—2020 年,我国因煤矿开采产生损毁土地 $1\ 800\ 080 \text{ hm}^2$,使区域碳平衡遭到严重破坏,导致矿区碳固存能力下降甚至丧失^[5]。在“双碳”目标,以及黄河流域生态保护和高质量发

展等国家重大战略背景下,持续推进黄河流域矿山生态修复和绿色持续发展需要统筹兼顾自然资源开发与生态环境保护,以生态空间作为载体促进能源富集区域生态系统碳增汇,提升生态系统对于自然资源高质量发展的保障能力,实现自然资源配置对于碳减排、碳中和的核心载体功能,进而保障黄河流域国土空间的低碳、可持续发展^[11]。

鄂尔多斯盆地位于黄河流域中游地区,是国家“5+1”能源基地之一,对保障国家能源安全具有重要作用^[12]。鄂尔多斯盆地自然资源丰富、能源开发早且生产规模大,矿产资源开发利用在推动社会经济发展的同时,也会导致区域不同程度地出现资源衰竭、环境污染、生态破坏与区域发展衰退等问题^[13-15]。在梳理鄂尔多斯盆地现阶段能源生产与消费现状,以及分析资源开发面临的主要问题的基础上,使用生态环境评价与分区方法,科学识别区域生态空间。以提升区域碳减排增汇能力为目标,提出生态空间分类分级管控体系,提出差别化管控对策和建议,以为黄河流域其他区域资源的低碳开发利用和生态环境可持续发展、促进流域高质量发展提供科学的决策依据。

1 研究区概况

鄂尔多斯盆地位于黄河流域中游,北起阴山、大青山,南抵秦岭,西至贺兰山、六盘山,东达吕梁山、太行山,总面积约 $37 \times 10^4 \text{ km}^2$,占黄河流域总面积的 29%,是我国第二大沉积盆地^[16]。鄂尔多斯盆地横跨陕西省、甘肃省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区和山西省等五个省(区),包括 22 个地市和 93 个县区(图 1)。鄂尔多斯盆地是我国五大综合能源基地之一,石油、天然气、煤、铀矿等能源矿产同盆共存富集。其中,天然气、煤层气和煤炭资源探明储量均居全国首位,储量分别占全国总量的 29%、16% 和 39%;

石油探明储量居全国第三位(占全国总量的 15%), 铀矿资源探明地质储量居全国第一位^[17]。鄂尔多斯盆地属于干旱向半干旱区过渡地带, 气候干旱少雨,

地面植被稀少, 生态环境较为脆弱; 盆地内有毛乌素沙漠、库布齐沙漠和黄土高原, 荒漠化和水土流失问题严重^[18]。

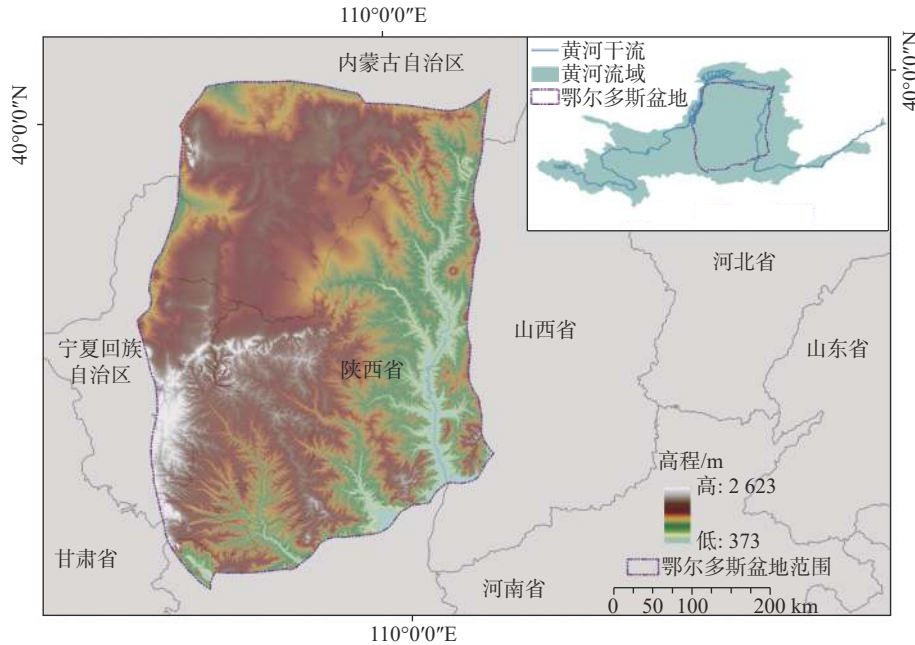


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

2 研究方法与数据

2.1 数据来源

研究所需的栅格(矢量)数据均以陕西省、甘肃省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区和山西省等五个省(区)行政边界下载, 再通过鄂尔多斯盆地边界进行裁剪。土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>), 是基于美国陆地卫星 Landsat TM 影像, 通过人工目视解译生成, 分辨率为 1 km×1 km。植被覆盖度数据来源于美国国家航空航天局(NASA)的MODIS 网站(<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/>), 通过像元二分法(FVC)模型将卫星遥感反演数据为 16 d 合成的全球归一化植被指数(NDVI)产品数据转换为植被覆盖度数据。气象数据来源于中国地面气候资料数据集(<http://cdc.cma.gov.cn/>), 主要包括气温、降水、风速等相关数据。土壤数据来源于中国科学院南京土壤研究所的中国土壤数据库(<http://vdb3.soil.csdb.cn/>)。高程数据来源于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn>), 空间分辨率为 30 m×30 m。考虑到鄂尔多斯盆地边界不是行政边界, 选择鄂尔多斯市、榆林市、延安市、铜川市、平凉市、吴忠市和庆阳市代表鄂尔多斯盆地。能源数据来源于以上地市的统计年鉴(2006—2021 年), 水资源数据来源于地市每年发布的水资源公报。

2.2 研究方法

2.2.1 生态系统服务重要性评价

生态系统服务价值反映某个区域的生态环境质量和生态风险抵抗能力, 目前生态系统服务功能采用的评价方法主要有模型评价法和 NPP 定量指标评价法^[19]。鄂尔多斯盆地属于干旱向半干旱区过渡地带, 依据区域生态环境现状、主导生态系统服务功能定位和自然资源开发利用过程中出现的生态问题, 选取防风固沙、水土保持、固碳释氧、生物多样性维护等四类生态系统服务功能指标进行评价。

1) 防风固沙功能评价。防风固沙是生态系统通过防风、固沙、阻沙, 以及对风沙土的改良作用等途径对地表土壤形成保护, 减少风蚀输沙量, 以潜在风蚀量与实际风蚀量的差值作为生态系统减少风蚀的防风固沙量, 风速、降雨、温度、土壤、地形和植被等因素影响区域防风固沙能力^[20]。鄂尔多斯盆地主要是由于风蚀所导致的土壤侵蚀, 计算公式见式(1)~式(5)。

$$W_s = NPP_m \times B \times Q_s \times C \quad (1)$$

$$Q_s = 0.01 \sum_{i=1}^{12} \alpha^3 \left\{ \frac{ATP_i - P_i}{ATP_i} \right\} \times d \quad (2)$$

$$ATP_i = 0.19 \times (20 + T_i)^2 \times (1 - S_i) \quad (3)$$

$$\alpha_2 = \alpha_1 (\sigma_2 / \sigma_1)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$F = \frac{1}{\cos(\sigma)} \quad (5)$$

式中: W_s 为防风固沙能力指数, 无量纲; NPP_m 为 15 年间植被净初级生产力平均值, $g \times c / m^2$; B 为土壤侵蚀影响因子, $t \times hm^2 \times h / hm^2 / MJ / mm$; Q_s 为多年气候侵蚀量平均值, t ; C 为地表粗糙度影响因子, 无量纲; α_1 、 α_2 为在 σ_1 、 σ_2 不同高度处的风速值, m / s ; ATP_i 为潜在蒸发量, mm / M ; P_i 为降水量, mm / M ; d 为当月天数, d ; T 为月平均温度, $^{\circ}C$; S_i 为月平均相对湿度, 无量纲。

2) 水土保持功能评价。水土保持是生态系统通过其结构与过程减少由于水蚀所导致的土壤侵蚀的作用。将潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量的差值作为生态系统水土保持重要性的评价指标, 采用修正自通用水土流失方程 (USLE) 的水土保持服务模型^[21]。合理安全有效地建造水土保持设施, 保护植被和水土资源有利于改善区域生态环境, 计算见式 (6)。

$$S_a = A \times B \times L \times S \times (1 - Z) \quad (6)$$

式中: S_a 为水土保持能力, $t / hm^2 / a$; A 为降雨侵蚀因子, $MJ \times mm / hm^2 / h / a$; B 为土壤侵蚀影响因子, $t \times hm^2 \times h / hm^2 / MJ / mm$; L 为坡长, m ; S 为坡度, 无量纲; Z 为植被覆盖度因子, 无量纲。

3) 固碳释氧功能评价。固碳能力即大自然的碳封存能力, 绿色植物将 CO_2 转换为 O_2 的过程中, 产生生态系统净初级生产力 (NPP), 体现区域固碳释氧的能力^[22]。CASA 模型是典型的参数模型, 充分考虑了环境条件以及植被本身的特征, 借助遥感数据可以实现区域尺度实时动态估测植被 NPP^[23]。使用 CASA 模型计算 NPP 来代表植被的固碳释氧服务能力。

4) 生物多样性维护功能评价。生物多样性维护是生态系统发挥着维持基因、物种、生态系统多样性的功能, 其为生态系统提供最主要的功能之一, 通常采用基于物种的评价方法和基于生境多样性的评价方法^[24]。研究因部分物种分布数据不全, 故采用生境多样性评价方法计算生物多样性维护能力指数来表征鄂尔多斯盆地的生物多样性丰富程度, 计算公式见式 (7)。

$$S_{bio} = NPP_m \times F_{pre} \times F_{tem} \times (1 - F_{alt}) \quad (7)$$

式中: S_{bio} 为生物多样性维护能力指数, 无量纲; NPP_m 为多年植被净初级生产力平均值, $g \times c / m^2$; F_{pre} 为多年平均降水量, mm ; F_{tem} 为多年平均气温, $^{\circ}C$; F_{alt} 为海拔因子, 无量纲。

5) 生态系统服务功能重要评价分级。生态系统服务功能重要评价分级标准采用《生态保护红线划

定指南》中的分级标准^[25]。通过模型计算, 得到不同类型生态系统服务功能值栅格图。在 ArcGIS 软件中, 运用栅格计算器, 输入公式 “ $\ln t([某一要素评估的栅格数据] / [某一要素评估的栅格数据的最大值] \times 100)$ ”, 得到归一化后的生态系统服务功能值栅格数据。在数据属性表中计算累加服务功能值。利用重分类工具, 将生态系统服务功能重要性分为极重要、重要和一般重要 (表 1)。

表 1 生态系统服务功能评估分级

重要性等级	一般重要	重要	极重要
累加服务功能值占服务功能总值比例/%	20	30	50

2.2.2 生态敏感性评价

鄂尔多斯盆地植被稀少, 针对区域生态敏感性特征, 选择水土流失和土地沙化作为评价指标开展区域生态敏感性评价, 定量揭示鄂尔多斯盆地生态敏感性的空间分布特征, 表征在人类活动干扰下区域发生生态环境破坏问题的可能性^[25]。

1) 水土流失敏感性评价。根据通用水土流失方程的基本原理, 选取降水侵蚀力、土壤可蚀性、坡度坡长和地表植被覆盖等作为评价指标, 将反映各因素对水土流失敏感性的单因子评价数据, 运用 ArcGIS 软件进行乘积运算, 计算公式见式 (8)^[23]。

$$SS_i = \sqrt[4]{R_i \times K_i \times LS_i \times C_i} \quad (8)$$

式中: SS_i 为 i 空间单元水土流失敏感性指数, 无量纲; R_i 为降雨侵蚀力, 无量纲; K_i 为土壤可蚀性, 无量纲; LS_i 为坡长坡度, 无量纲; C_i 为地表植被覆盖度, 无量纲。

2) 土地沙化敏感性评价。土地沙化主要受气候干燥程度影响表现为气候干燥、植物生长困难、地表植被覆盖度低。干燥气候减缓了地表土壤形成过程, 使地表结构分散, 土壤的抗风蚀沙漠化能力与土壤水分含量成正比^[26]。研究选取干燥指数、起沙风天数、土壤质地、植被覆盖度等作为土地沙化敏感性评价指标, 计算公式见式 (9)。

$$T_i = \sqrt[4]{L_i \times C_i \times W_i \times P_i} \quad (9)$$

式中: T_i 为评估范围内的土地沙化能力指数, 无量纲; L_i 为评估区域干燥程度, 无量纲; C_i 为评估区域的起沙风天数, d ; W_i 为评估区域的土壤质地, 无量纲, 通过土壤数据库获取; P_i 为评估区域的植被覆盖度, 无量纲。

3) 生态敏感性评价分级。生态敏感性评价分级标准采用《生态保护红线划定指南》中的分级标准^[25]。

利用 ArcGIS 软件得到生态敏感性评价栅格图, 使用软件自带的重分类工具, 将生态敏感性评估结果分为一般敏感、敏感和极敏感(表 2)。

表 2 生态敏感性评估分级

敏感性等级	一般敏感	敏感	极敏感
分级赋值	1	3	5
分级标准	1.0~2.0	2.1~4.0	>4.0

2.2.3 综合评价

1) 生态系统综合服务功能重要性评价。根据防风固沙、水土保持、固碳释氧、生物多样性维护等功能的评价分级结果, 采用析取运算进行生态系统综合服务功能重要性评价, 计算公式见式(10)。

$$ESI = \text{Max}\{ESI_f, ESI_s, ESI_g, ESI_w\} \quad (10)$$

式中: ESI 为生态系统综合服务功能重要性评价结果; ESI_f 为防风固沙功能重要性评价结果; ESI_s 为水土保持功能重要性评价结果; ESI_g 为固碳释氧功能重要性评价结果; ESI_w 为生物多样性维护功能重要性评价结果。

2) 生态综合敏感性评价。根据水土流失和土地沙化敏感性的评价分级结果, 可以采用析取运算进

行生态综合敏感性评价, 计算公式见式(11)。

$$ES = \text{Max}\{ES_s, ES_t\} \quad (11)$$

式中: ES 为生态环境综合敏感性评价结果; ES_s 为水土流失敏感性评价结果; ES_t 为土地沙化敏感性评价结果。

3 结果与分析

3.1 资源开发面临的主要问题

3.1.1 煤炭生产和消费占比高, 低碳减排任务重

鄂尔多斯盆地能源开发早、规模大, 为地区及全国社会经济发展提供了源源不断的动力^[27]。图 2 展示了 2005—2020 年鄂尔多斯盆地能源生产和消费变化情况。由图 2 可知, 2005—2020 年, 鄂尔多斯盆地能源生产总量始终呈上升趋势, 增长了约 148%, 能源生产结构一直以煤炭为主, 占比始终保持在 70% 以上。2020 年, 鄂尔多斯盆地能源消费总量约 1.43×10^4 t 标准煤, 占黄河流域的 12%。能源消费结构仍以化石能源为主, 煤炭消费总量占比约 80%, 高于黄河流域(61%)和全国(56.8%)。尽管近年来风、光等新能源的规模有所扩大, 但是高比例的煤炭能源生产、消费体系并未发生根本性变化。因此, 鄂尔多斯盆地要降低化石能源生产、消费比例以实现减排, 任务异常艰巨。

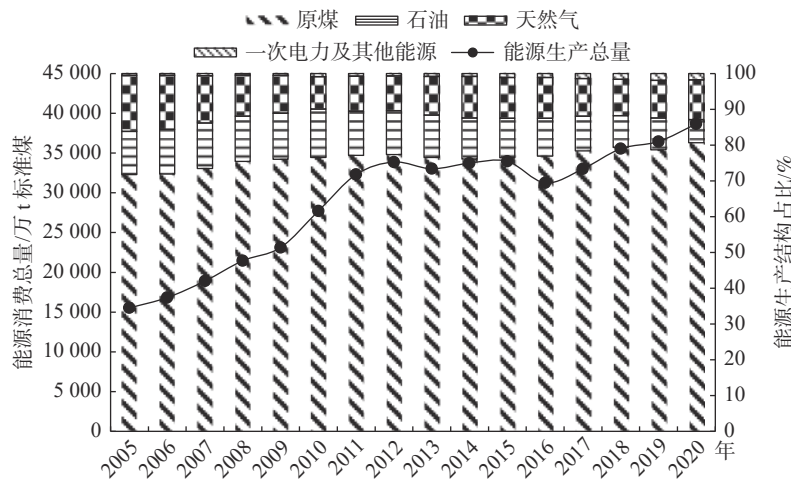


图 2 2005—2020 年鄂尔多斯盆地能源生产和消费变化情况

Fig. 2 Changes in energy production and consumption in Ordos Basin from 2005 to 2020

3.1.2 水资源开发利用率高, 供需矛盾突出

2020 年, 鄂尔多斯盆地水资源总量约 $2.6 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 占黄河流域水资源总量的 32%。地表水开发利用率达到 37% 左右, 接近 40% 的生态警戒线。煤炭开采耗水量巨大, 根据有关研究推算^[14], 每开采 1 t 煤炭将破坏 2.54 m^3 的地下水资源。以鄂尔多斯盆地 2020 年煤炭开采量 ($3.4 \times 10^8 \text{ t}$) 进行估算, 将破坏 $8.64 \times 10^8 \text{ m}^3$

的地下水资源, 占鄂尔多斯盆地地下水资源总量 ($117 \times 10^8 \text{ m}^3$) 的 7% 左右。目前, 鄂尔多斯盆地仍然存在不少高耗水的煤化工项目, 虽然大型企业循环用水已初显成效, 但小而散的企业用水方式仍然较为粗放^[28]。

3.1.3 生态本底敏感脆弱, 资源开发破坏植被

2020 年, 鄂尔多斯盆地生态系统类型结构以草

地和农田为主,面积分别为 $1.26 \times 10^5 \text{ m}^2$ 和 $0.57 \times 10^5 \text{ m}^2$,占比分别为 52.4% 和 23.8%,其他生态系统类型面积占比相对较小。从空间上看,草地生态系统主要分布在鄂尔多斯盆地北部,农田生态系统分布在鄂尔多斯盆地中部(图 3)。鄂尔多斯盆地整体植被覆盖度较低,2020 年平均植被覆盖度为 47.8%,且空间分布差异明显,整体上南部高于北部(图 4)。盆地中部的黄土高原生态本底敏感脆弱,水土保持功能极其重要,直接关系到中下游地区的防洪安全与生态安全。近年来,在资源开发和人类活动的影响下,黄土高原水土流失问题依然严重^[29]。鄂尔多斯盆地煤炭储存富集区气候干旱、降雨量少,区域抗扰动力差。煤炭规模开采引起地表沉陷、地面塌陷和裂缝,导致矿区地下水位大范围、大幅度疏降。大面积的乔、灌、草等荒漠植被衰败减少,草场退化,又加速荒漠化进程,形成资源与生态环境之间的恶性循环。

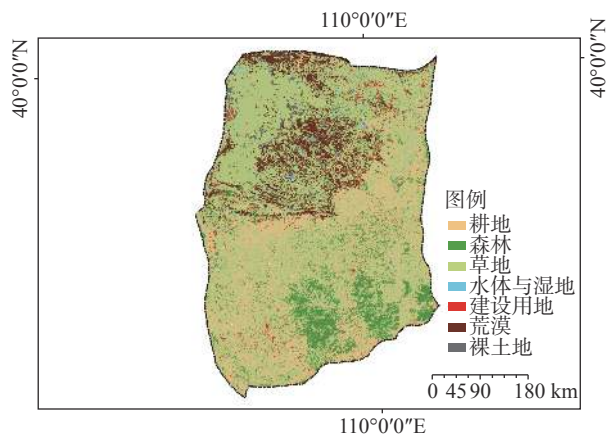


图 3 2020 年鄂尔多斯盆地生态系统空间分布

Fig. 3 Space distribution of ecosystems in Ordos Basin in 2020

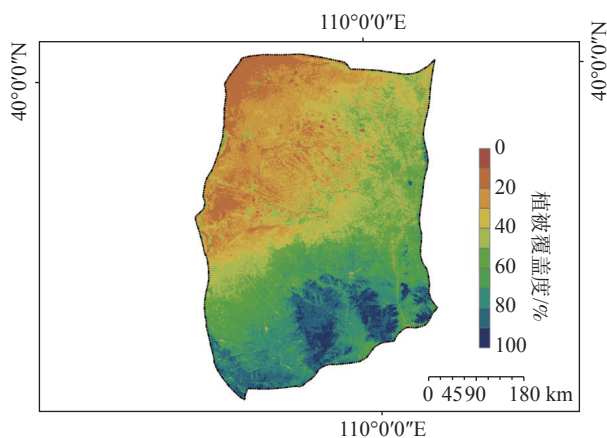


图 4 2020 年鄂尔多斯盆地植被覆盖情况

Fig. 4 Vegetation cover in Ordos Basin in 2020

3.2 生态空间识别

3.2.1 生态空间重要性和敏感性评价

1) 生态系统服务功能重要性评价。鄂尔多斯盆

地生态空间重要性评价的目的在于定量揭示各种类型的生态系统服务功能的重要程度,明确其不同等级重要性的空间分布。鄂尔多斯盆地四种生态系统服务功能重要性评价如图 5 所示。由图 5 可知,鄂尔多斯盆地的主导生态功能为防风固沙。防风固沙生态功能极重要区域面积占比 30.1%,主要位于盆地北部宁夏回族自治区、内蒙古自治区等区域,主要是由于北部以沙区为主,毛乌素沙漠和库布齐沙漠分布其中。生物多样性保护功能极重要区域面积占比 19.4%,主要位于盆地西北部的自然保护区,重点保护野生动植物。固碳释氧能力由植被净初级生产力(NPP)体现,极重要区域面积占比 11.7%,主要分布在黄河干流两岸陕西省和山西省境内,该区域植被丰富多样。水土保持能力极重要区域面积占比 12.8%,主要分布在盆地南部黄土高原,需要重点防治水土流失,保护、改良与合理利用山区、丘陵区 and 风沙区的水土资源。

2) 生态敏感性评价。鄂尔多斯盆地两种生态敏感性评价如图 6 所示。由图 6 可知,鄂尔多斯盆地的生态敏感性评价以水土流失敏感性为主。水土流失极敏感区域面积占比 9.4%,主要位于陕西省和山西省境内的黄土高原地带,与我国水土流失重点治理区空间上基本一致。土地沙化极敏感区域面积占比 8.0%,集中分布在盆地北部的毛乌素沙漠和库布齐沙漠,土地荒漠化严重,每年黄河携带着大量的泥沙由黄土高原进入中原地区,致使黄河干流在河南开封一带成为地上“悬河”。

3) 重要性和敏感性综合评价结果。鄂尔多斯盆地生态系统综合服务功能极重要区域面积占比 44.4%,主要分布在盆地西北部;重要区域占比 45.4%,主要分布在盆地南部。鄂尔多斯盆地生态综合极敏感区域占比 22.6%,集中分布于盆地中部;敏感区域面积占比为 50.6%,分布在盆地西北大部分区域。图 7 展示了鄂尔多斯盆地生态系统极重要(敏感)区域。由图 7 可知,按照生态系统完整性和连续性保护的原则,利用 ArcGIS 软件将鄂尔多斯盆地生态系统综合服务功能极重要区和生态综合极敏感区进行空间叠加分析,得到盆地生态空间的重要组成部分,即生态系统极重要(敏感)区域,面积约 $1.1 \times 10^5 \text{ m}^2$,占盆地面积的 48.4%。

3.2.2 重点生态功能区和自然保护区

根据《全国主体功能区规划》,鄂尔多斯盆地有一处国家级重点生态功能区,即黄土高原丘陵沟壑水土保持生态功能区(图 8),面积约 $7 \times 10^4 \text{ m}^2$,占盆地面积的 30.4%。该生态功能区是黄河流域水土流失重点保护和治理区,具有重要的土壤保持能力,对区

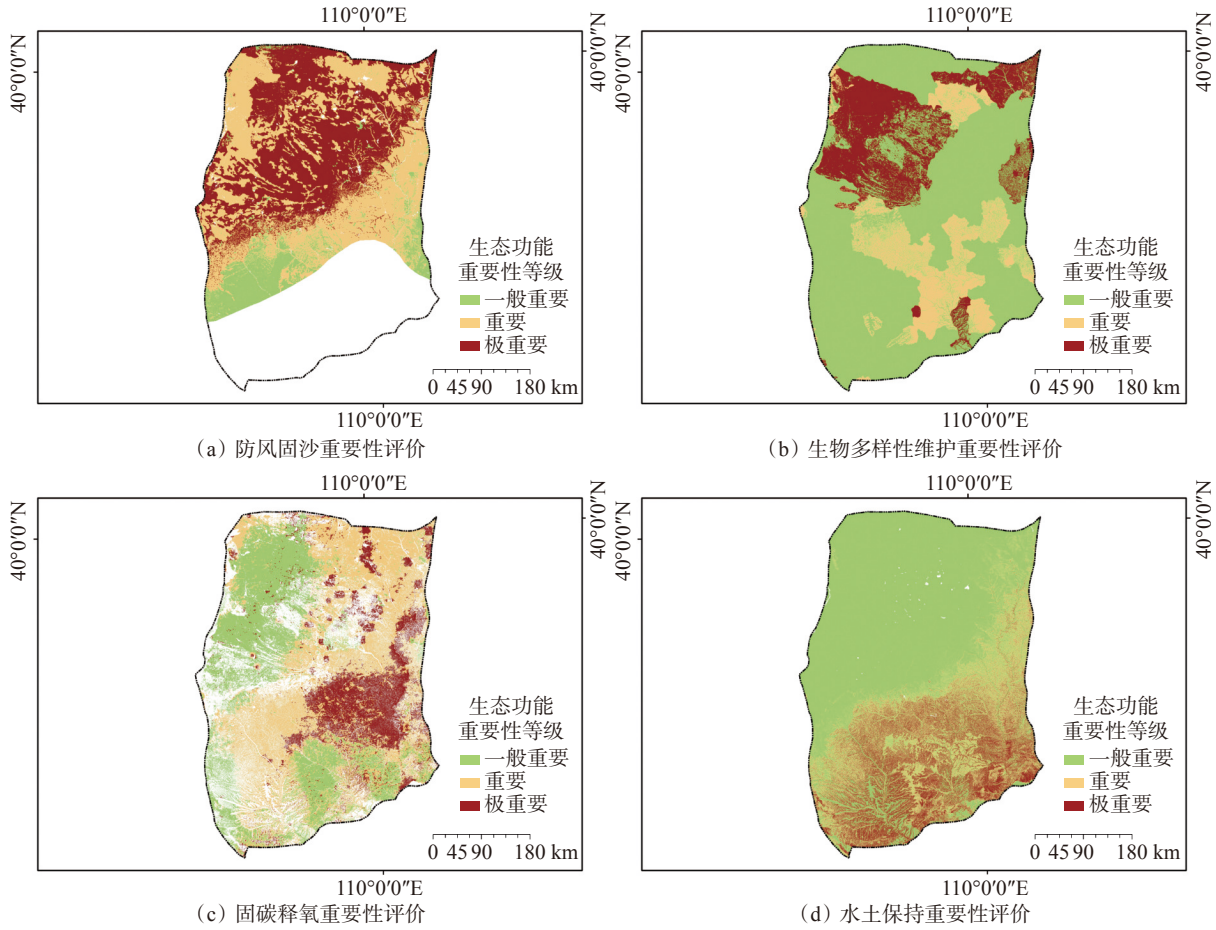


图 5 四种生态功能重要性评价结果

Fig. 5 Importance evaluation results of four ecological functions

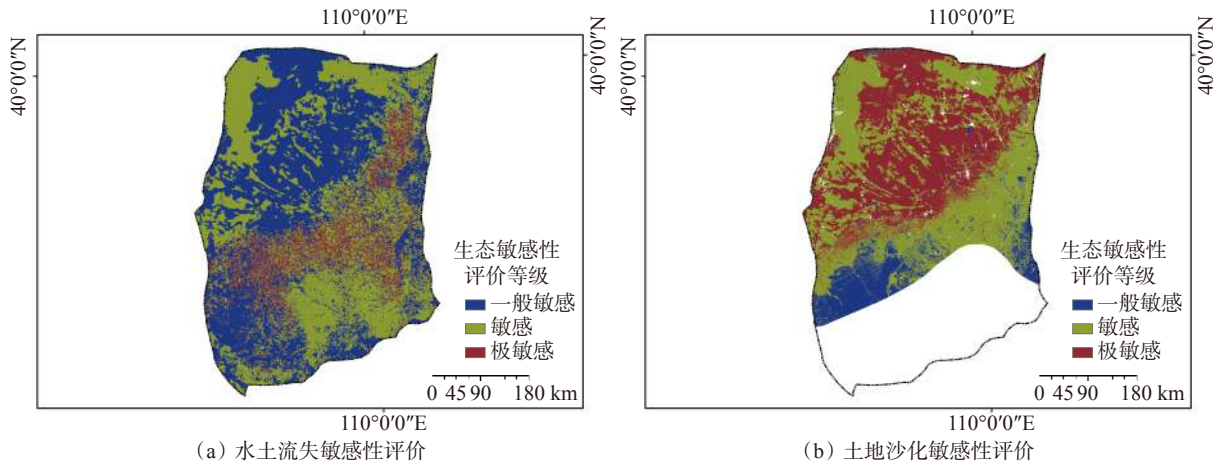


图 6 水土流失和土地沙化敏感性评价结果

Fig. 6 Sensitivity evaluation results of soil erosion and land sanding

域可持续发展和黄河下游地区生态安全具有重要意义,全部纳入生态空间。鄂尔多斯盆地共有四处国家级自然保护区,分别是内蒙古西鄂尔多斯国家级自然保护区、宁夏灵武白芨滩国家级自然保护区、宁夏罗山国家级自然保护区和宁夏六盘山国家级自然保护区,位于盆地内面积分别为 1 031 km²、707 km²、

191 km² 和 14 km², 主要保护对象是珍稀野生动植物及森林生态系统,全部纳入生态空间。

3.2.3 生态空间划分

生态空间是提高资源开发区域空间治理水平的重要抓手,落实生态空间用途分区和管控要求,提升生态系统对于自然资源高质量发展的保障能力。鄂

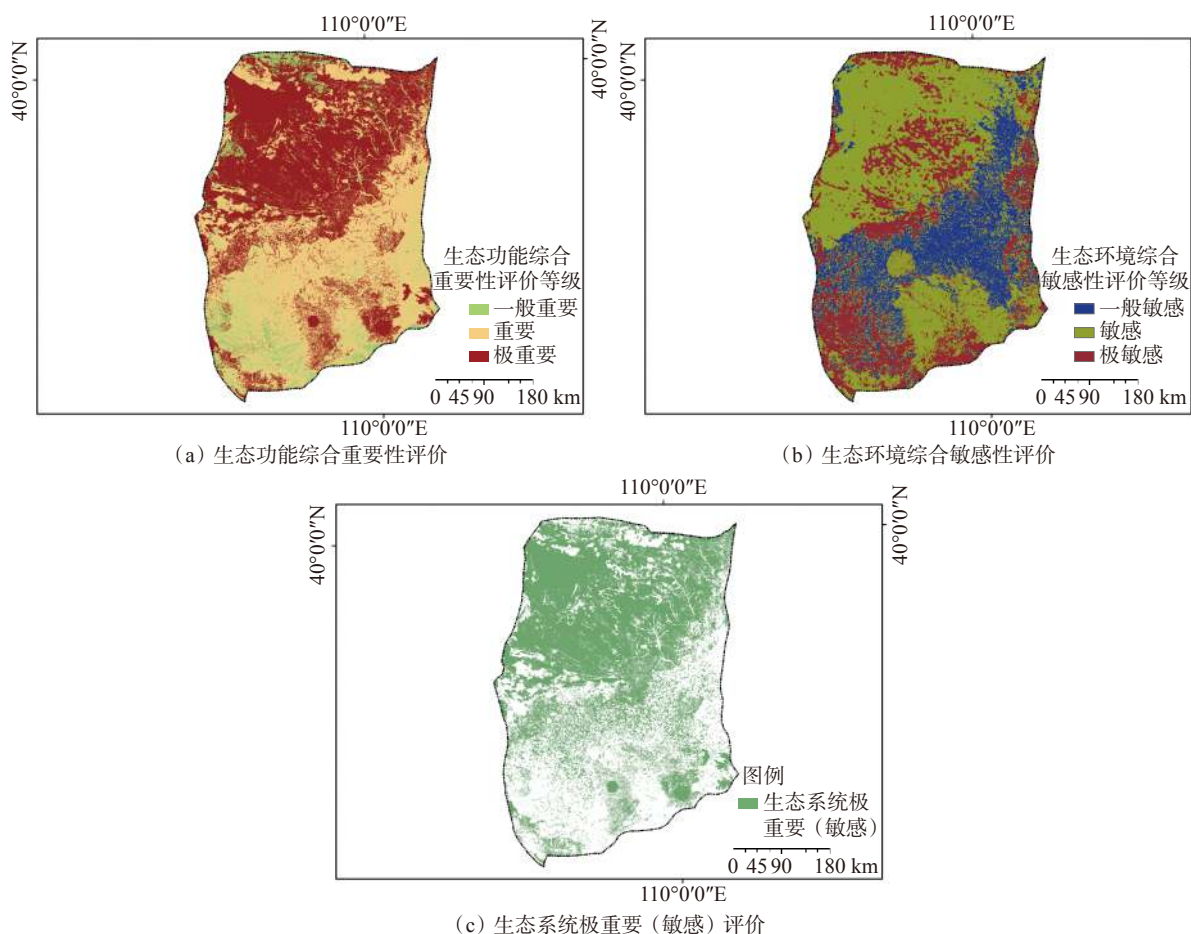


图 7 鄂尔多斯盆地生态系统极重要(敏感)区域

Fig. 7 Extremely important (sensitive) areas of Ordos Basin ecosystem

鄂尔多斯盆地生态空间面积约 $16 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占盆地总面积的 69.7%。生态空间主要包括生态系统极重要(敏感)区、国家重点生态功能区和国家级自然保护区, 不同生态空间类型面积见表 3。

统筹考虑资源开发利用空间、资源产能规模、资源绿色开发、矿区土地复垦和污染物排放管控等因素, 充分发挥配置资源开布局对盆地降碳增汇的核心载体功能, 因地制宜划定生态空间的不同管控单元。图 9 为生态空间管控单元分布图。由图 9 可知, 优先保护单元以国家级自然保护区、生态保护极重要区与国家重点生态功能区重叠区域为主, 面积约 $2.5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占生态空间面积的 15.6%, 主要位于盆地中西部。重点管控单元以国家重点生态功能区为主, 面积约 $4.8 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占生态空间面积的 30.0%, 主要位于盆地中东部。一般管控单元以生态系统极重要(敏感)区为主, 面积约 $8.7 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占生态空间面积的 54.4%, 主要位于盆地北部。

3.3 生态空间管控路径

3.3.1 优先保护单元稳定提升生态空间质量

鄂尔多斯盆地约 6.8% 的区域为生态空间优先

保护单元, 主要为国家级自然保护区、国家重点生态功能区和生态系统极重要(敏感)区域重叠部分, 集中分布在黄河干流两岸和盆地中部区域, 生态系统服务功能重要和生态敏感性脆弱, 需要严格保护和监管。优先保护单元要落实国土空间管控要求, 执行最严格的生态环境保护制度, 严禁新建、扩建高能耗、高污染项目, 国家重要规划矿区和能源资源基地需统筹处理好资源开发与生态保护的关系。严格制定用地管理指标, 将优先保护单元生态空间作为刚性指标并严控此类生态空间转出, 确保生态系统不被破坏。大力推进国土绿化行动, 巩固退耕还林还草成果, 扩大林草资源总量。实施森林质量精准提升工程, 提升森林生态系统质量和稳定性以及对气候变化的抗性和恢复力。积极应对草原退化和荒漠化趋势, 加强草原生态保护修复, 提高草原综合植被盖度^[30]。开展耕地质量提升行动, 提升土壤有机碳储量。盆地范围内各地市、区县要加大资金投入, 争取黄河流域重点生态保护修复治理资金, 全面开展矿区生态修复, 统筹制定全生命周期矿山生态修复方案, 按照“宜林则林、宜草则草”的原则, 选择适应性

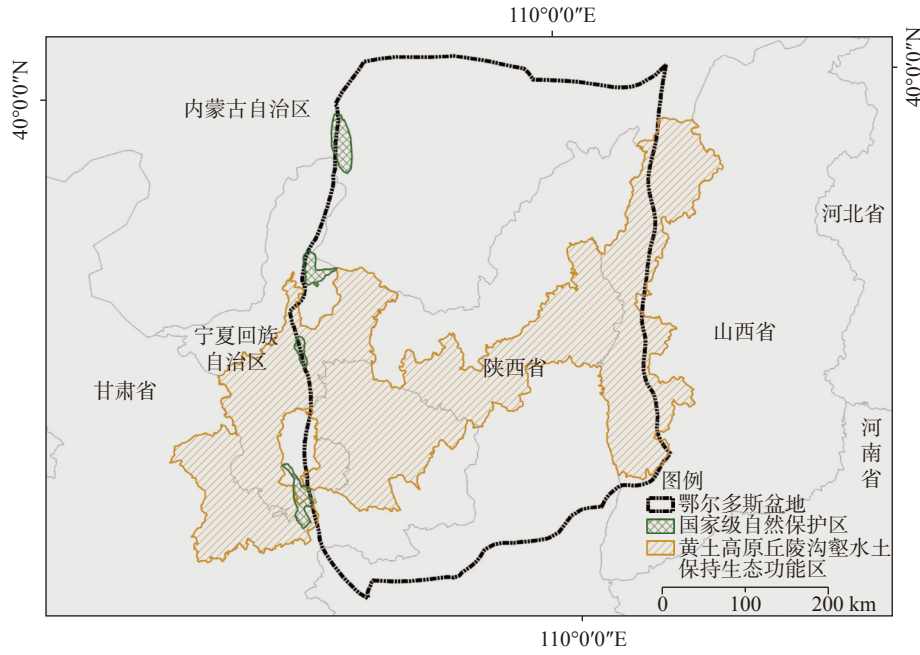


图 8 重点生态功能区和自然保护区分布情况

Fig. 8 Distribution of key ecological function areas and nature reserves

表 3 生态空间组成情况

Table 3 Composition of ecological space

生态空间类型	面积(扣除重叠后)/km ²	生态空间面积占比/%	盆地面积占比/%
生态系统极重要(敏感)区	89 045.2	55.2	38.5
国家级自然保护区	1 944.3	1.2	0.8
国家重点生态功能区	70 376.7	43.6	30.4
合计	161 366.2	100	69.7

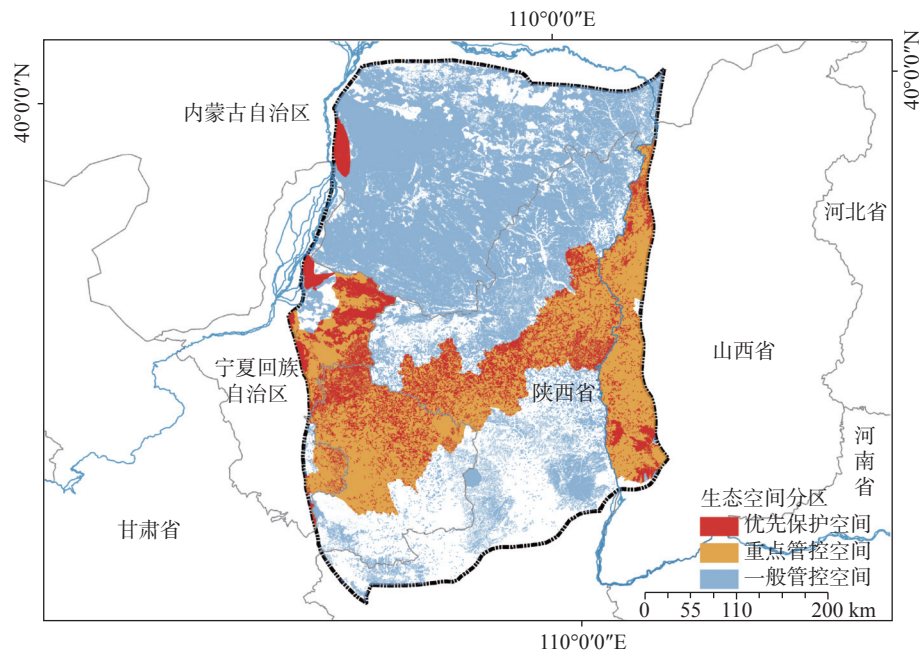


图 9 生态空间管控单元分布

Fig. 9 Distribution of ecological space control units

强、生长良好的树种和草种进行造林绿化,改善土壤理化性质,创造新的经济效益,提高土壤碳截获能力,增加植物碳储量。

3.3.2 重点管控单元合理调控资源开发强度

重点管控单元占鄂尔多斯盆地总面积的 13%,作为鄂尔多斯盆地的资源开发强度管控区,主要位于黄土高原丘陵沟壑水土保持生态功能区,重点保护和治理该区域水土流失和土地沙化。加强限制矿产资源勘查开发准入管理,合理调控资源开发强度。强化源头管理,提高矿产资源勘查开发的规划准入条件,严格控制采矿权设置总量和开采规模,严守资源利用上线。优化矿山开发规模与结构,严格限制开发总量较小、生态环境影响较大、生态环境治理能力不足的开发项目。有效整合矿山企业,提高大中型矿山比例,集中规模化开采资源,将绿色发展理念贯穿矿产资源开发全过程,开展绿色矿山建设行动,配套实施生态系统保护和修复工程。在煤炭、石油、天然气等资源富集地区集中开发,建立枯竭矿山和落后企业淘汰机制,逐步分类整合重组产能不符的资源矿产^[4]。推行低碳土地利用理念,使用先进技术手段和管理措施,减少土地占用和损毁,提高土壤质地和矿山复垦,实现矿区土地利用“低效排放、高额碳汇、最大收益”的发展状态。建立矿山开采全生命周期管理制度,提升创新能力促进节能减排,实现资源的高效开发与利用,提高矿产资源的综合利用度。

3.3.3 一般管控单元转型升级能源发展模式

鄂尔多斯盆地约 23.5% 的区域为一般管控单元,主要由生态系统极重要(敏感)区组成,集中分布在盆地北部大片区域。该区域重点提高矿产资源节约与综合利用水平,以“减煤、稳油、增气、大力发展可再生能源”为基本思路,探索建设碳中和示范矿区引领工程。推广煤炭清洁化利用、先进燃煤发电、非化石能源开发利用等技术,推动重点行业开展余热、余压、节水、节材等综合利用节能项目,提高煤炭等资源开发利用效率。健全资源循环利用体系,优化废弃物资回收模式,推动再生资源规范化、规模化、清洁化利用。积极推进鄂尔多斯市地热资源开发,扩大地热资源利用规模,科学开发高效利用地热资源,发展以康养、洗浴、度假旅游和供热为主要服务方向地热能开发。充分发挥鄂尔多斯盆地煤矿区优势,以煤电为核心,与太阳能发电、风电协同发展,构建多能互补的清洁能源系统,将煤矿区建设成为地面-井下一体化的风、光、电、热、气多元协同的综合能源基地。

4 结 论

鄂尔多斯盆地是黄河流域以及我国重要的能源基地,是保障国家能源安全的战略支点。在“双碳”目标、黄河流域生态保护和高质量发展等国家重大战略背景下,探讨鄂尔多斯盆地资源开发生态空间管控路径具有重要意义。本文分析了鄂尔多斯盆地资源开发利用现状以及存在的问题,通过科学识别生态空间和划定管控单元,对不同生态空间单元提出了差别化的管控策略和要求,主要结论如下所述。

1) 鄂尔多斯盆地现有能源体系中化石能源占比高,2020 年煤炭生产和消费总量占比分别在 70% 和 80% 以上,碳减排任务艰巨。能源生产利用与水资源保护矛盾突出,2020 年鄂尔多斯盆地地表水开发利用接近 40% 的生态警戒线。植被覆盖整体上较低,资源开发对生态环境的影响巨大。

2) 鄂尔多斯盆地约 69.7% 的区域为生态空间,由生态系统极重要(敏感)区、国家级自然保护区和国家重点生态功能区组成。为了促进资源开发区域生态保护精细化治理和高质量发展,将生态空间划分为优先保护单元、重点管控单元和一般管控单元,占生态空间面积的比例分别为 15.6%、30.0% 和 54.4%。

3) 建立了鄂尔多斯盆地生态空间分级分类管控体系,提出制定差别化管控策略和要求。优先保护单元严禁开采矿产资源 and 大规模高强度工业化开发活动,实施生态保护修复工程,提升生态系统固碳能力。重点管控单元加强限制矿产资源勘查开发准入管理,合理调控资源开发强度。一般管控单元以绿色低碳转型升级驱动生态经济高质量发展,探索建设碳中和示范矿区。

参考文献(References):

- [1] 赵荣钦,黄贤金,鄯文聚,等.碳达峰碳中和目标下自然资源管理领域的关键问题[J].自然资源学报,2022,37(5):1123-1136. ZHAO Rongqin, HUANG Xianjin, XUN Wenju, et al. Key issues in natural resource management under carbon emission peak and carbon neutrality targets[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1123-1136.
- [2] 沈镭,钟帅,胡纾寒.新时代中国自然资源研究的机遇与挑战[J].自然资源学报,2020,35(8):1773-1788. SHEN Lei, ZHONG Shuai, HU Shuhan. Opportunities and challenges of natural resources research of China in the new era[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(8): 1773-1788.
- [3] 丁明磊,杨晓娜,赵荣钦,等.碳中和目标下的国土空间格局优化:理论框架与实践策略[J].自然资源学报,2022,37(5):1137-1147. DING Minglei, YANG Xiaona, ZHAO Rongqin, et al. Optimization

- of territorial space pattern under the goal of carbon neutrality: theoretical framework and practical strategy[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(5): 1137-1147.
- [4] 吴文盛, 李小英. 矿产资源开发与生态环境恢复治理[J]. *中国矿业*, 2021, 30(2): 21-24.
WU Wensheng, LI Xiaoying. Exploitation of mineral resources and restoration of ecology[J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(2): 21-24.
- [5] 杨博宇, 白中科. 碳中和背景下煤矿区土地生态系统碳源/汇研究进展及其减排对策[J]. *中国矿业*, 2021, 30(5): 1-9.
YANG Boyu, BAI Zhongke. Research advances and emission reduction measures in carbon source and sink of land ecosystems in coal mining area under the carbon neutrality[J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(5): 1-9.
- [6] 马丽, 田华征, 康蕾. 黄河流域矿产资源开发的生态环境影响与空间管控路径[J]. *资源科学*, 2020, 42(1): 137-149.
MA Li, TIAN Huazheng, KANG Lei. Eco-environmental impact and spatial control of mineral resources exploitation in the Yellow River Basin[J]. *Resources Science*, 2020, 42(1): 137-149.
- [7] 李云鹏, 孔胃, 楚储, 等. 矿区生态系统演变与修复模式研究[J]. *中国矿业*, 2023, 32(1): 60-66.
LI Yunpeng, KONG Wei, CHU Chu, et al. Study on the evolution and restoration model of mining area ecosystem[J]. *China Mining Magazine*, 2023, 32(1): 60-66.
- [8] 王金南, 许开鹏, 蒋洪强, 等. 基于生态环境资源红线的京津冀生态环境共同体发展路径[J]. *环境保护*, 2015, 43(23): 22-25.
WANG Jinnan, XU Kaipeng, JIANG Hongqiang, et al. Coordinated development path of ecological environment community in Beijing-Tianjin-Hebei Area that based on ecological red line[J]. *Environmental Protection*, 2015, 43(23): 22-25.
- [9] 林勇, 樊景凤, 温泉, 等. 生态红线划分的理论和技术[J]. *生态学报*, 2016, 36(5): 1244-1252.
LIN Yong, FAN Jingfeng, WEN Quan, et al. Primary exploration of ecological theories and technologies for delineation of ecological red-line zones[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(5): 1244-1252.
- [10] 张贵祥. 城市滨海经济带产业与生态空间布局协调研究: 以温州市为例[J]. *资源与产业*, 2010, 12(3): 81-86.
ZHANG Guixiang. A case study on Wenzhou City: a concerted spatial layout between industries and ecology in coastal new economic zone[J]. *Resources & Industries*, 2010, 12(3): 81-86.
- [11] 董春诗, 金龙涛. 能源富集区域产业同构测度研究: 以环鄂尔多斯盆地陕甘宁晋蒙五省区为例[J]. *统计与信息论坛*, 2015, 30(2): 47-53.
DONG Chunshi, JIN Longtao. Price volatility of resources, resource dependence and economic growth[J]. *Journal of Statistics and Information*, 2015, 30(2): 47-53.
- [12] 黄启, 于光, 何大义. 鄂尔多斯盆地能源矿产勘查开发政策研究[J]. *资源与产业*, 2014, 16(1): 29-33.
HUANG Qi, YU Guang, HE Dayi. Study on energy minerals exploration and development in Ordos Basin[J]. *Resources & Industries*, 2014, 16(1): 29-33.
- [13] 唐梅英, 张权, 姚帅, 等. 黄河干流水风光一体化能源综合开发研究[J]. *人民黄河*, 2022, 44(6): 6-10,33.
TANG Meiyang, ZHANG Quan, YAO Shuai, et al. Research on the integration development of hydropower, wind power and photovoltaic power generation on the main stream of the Yellow River[J]. *Yellow River*, 2022, 44(6): 6-10,33.
- [14] 任保平, 杜宇翔. 黄河流域高质量发展背景下产业生态化转型的路径与政策[J]. *人民黄河*, 2022, 44(3): 5-10.
REN Baoping, DU Yuxiang. Industrial ecologicalization in the context of high-quality development in the Yellow River Basin[J]. *Yellow River*, 2022, 44(3): 5-10.
- [15] 石婷, 班远冲, 刘志媛, 等. 基于“双碳”目标的生态文明建设升级路径研究[J]. *环境科学与管理*, 2022, 47(5): 139-143.
SHI Ting, BAN Yuanchong, LIU Zhiyuan, et al. Research on the upgrade path of ecological civilization construction under the targets of carbon peak and carbon neutralization[J]. *Environmental Science and Management*, 2022, 47(5): 139-143.
- [16] 路玉林, 林燕, 易继宁, 等. 鄂尔多斯盆地矿产资源现状及勘查开发建议[J]. *中国矿业*, 2015, 24(10): 15-21, 32.
LU Yulin, LIN Yan, YI Jining, et al. The present situation and the suggestion for exploration and development of mineral resources in Ordos Basin[J]. *China Mining Magazine*, 2015, 24(10): 15-21, 32.
- [17] 韩铮铮, 金心岫, 杨鹏, 等. 鄂尔多斯盆地油气田勘探开发水土流失预防治理[J]. *油气田环境保护*, 2020, 30(5): 66-69, 78.
HAN Zhengzheng, JIN Xinxiu, YANG Peng, et al. Soil erosion prevention and management in oil and gas field exploration and development in Ordos Basin[J]. *Environmental Protection of Oil & Gas Fields*, 2020, 30(5): 66-69, 78.
- [18] FENG H H, ZOU B, LUO J H. Coverage-dependent amplifiers of vegetation change on global water cycle dynamics[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 550: 220-229.
- [19] 迟妍妍, 许开鹏, 王晶晶, 等. 京津冀地区生态空间识别研究[J]. *生态学报*, 2018, 38(23): 8555-8563.
CHI Yanyan, XU Kaipeng, WANG Jingjing, et al. Identifying regional ecological space in Beijing, Tianjin, and Hebei[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(23): 8555-8563.
- [20] 高爽, 董雅文, 张磊, 等. 基于资源环境承载力的国家级新区空间开发管控研究[J]. *生态学报*, 2019, 39(24): 9304-9313.
GAO Shuang, DONG Yawen, ZHANG Lei, et al. Research on urban space development and control of national new areas based on environmental carrying capacity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(24): 9304-9313.
- [21] 熊善高, 秦昌波, 于雷, 等. 基于生态系统服务功能和生态敏感性的生态空间划定研究: 以南宁市为例[J]. *生态学报*, 2018, 38(22): 7899-7911.
XIONG Shangao, QIN Changbo, YU Lei, et al. Methods to identify the boundary of ecological space based on ecosystem service functions and ecological sensitivity: a case study of Nanning City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(22): 7899-7911.
- [22] 杨姗姗, 邹长新, 沈渭寿, 等. 基于生态红线划分的生态安全格局构建: 以江西省为例[J]. *生态学报*, 2016, 35(1): 250-258.
YANG Shanshan, ZOU Changxin, SHEN Weishou, et al. Construction of ecological security patterns based on ecological red line: a case study of Jiangxi Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(1): 250-258.

- [23] 刘军会, 马苏, 高吉喜, 等. 区域尺度生态保护红线划定: 以京津冀地区为例[J]. 中国环境科学, 2018, 38(7): 2652-2657.
LIU Junhui, MA Su, GAO Jixi, et al. Delimiting the ecological conservation redline at regional scale: a case study of Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. China Environmental Science, 2018, 38(7): 2652-2657.
- [24] 谢花林, 姚干, 何亚芬, 等. 基于GIS的关键性生态空间辨识: 以鄱阳湖生态经济区为例[J]. 生态学报, 2018, 38(16): 5926-5937.
XIE Hualin, YAO Gan, HE Yafen, et al. Study on spatial identification of critical ecological space based on GIS: a case study of Poyang Lake Ecological Economic Zone[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(16): 5926-5937.
- [25] 生态环境部. 生态保护红线划定指南(环办生态[2017]48号)[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/t20170728_418679.htm.
- [26] 任利广, 马维伟, 李广, 等. 基于GIS的甘肃省农牧交错带土地沙化敏感性时空分布格局[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(6): 149-156.
REN Liguang, MA Weiwei, LI Guang, et al. Temporal and spatial distribution pattern of land desertification sensitivity in agro pastoral ecotone of Gansu Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(6): 149-156.
- [27] 郑志红, 李登华, 王志欣, 等. 我国重点盆地致密油气资源潜力评价[J]. 中国矿业, 2017, 26(8): 22-29.
ZHENG Zhihong, LI Denghua, WANG Zhixin, et al. Assessment of the potential of tight oil and gas in major basins in China[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(8): 22-29.
- [28] 孙亚军, 李鑫, 冯琳, 等. 鄂尔多斯盆地煤-水协调开采下矿区水资源异位回灌-存储技术思路[J]. 煤炭学报, 2022, 47(10): 3547-3560.
SUN Yajun, LI Xin, FENG Lin, et al. Technical thinking on ectopic injection and storage of mine area water resources under the coordinated exploitation of coal and water background in Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(10): 3547-3560.
- [29] 庞启航, 毕忠飞, 樊晓华, 等. 新时期黄土高原水土流失治理存在问题与对策[J]. 人民黄河, 2022, 44(S1): 73-74.
PANG Qihang, BI Zhongfei, FAN Xiaohua, et al. Existing problems and countermeasures of soil and water loss control in the Loess Plateau in the new period[J]. Yellow River, 2022, 44(S1): 73-74.
- [30] 牟雪洁, 张箫, 王夏晖, 等. 黄河流域生态系统变化评估与保护修复策略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(1): 113-121.
MOU Xuejie, ZHANG Xiao, WANG Xiahui, et al. Ecological change assessment and protection strategy in the Yellow River Basin[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(1): 113-121.
- [31] 卞正富, 于昊辰, 雷少刚, 等. 黄河流域煤炭资源开发战略研判与生态修复策略思考[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1378-1391.
BIAN Zhengfu, YU Haochen, LEI Shaogang, et al. Strategic consideration of exploitation on coal resources and its ecological restoration in the Yellow River Basin, China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1378-1391.