

DOI: 10.5846/stxb202104020855

赵诚诚, 潘竞虎. 基于供需视角的黄河流域甘肃段生态安全格局识别与优化. 生态学报, 2022, 42(17): 6973-6984.

Zhao C C, Pan J H. Ecological safety pattern identification and optimization based on the ecological supply and demand in Gansu section of the Yellow River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(17): 6973-6984.

# 基于供需视角的黄河流域甘肃段生态安全格局识别与优化

赵诚诚, 潘竞虎\*

西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

**摘要:** 利用多源空间数据, 计算生态系统服务的高值区, 识别生态源地, 在计算土地利用程度、地均 GDP 和人口密度确定生态系统高需求区的基础上, 通过夜间灯光数据修正生态阻力面系数, 利用最小累积阻力模型提取源地与高需求区之间的生态廊道, 以此构建并优化区域生态安全格局。结果表明: (1) 黄河流域甘肃段生态源地总面积  $4.59 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占研究区总面积的 32.1%, 集中分布于甘南和陇东中部地区。(2) 生态系统服务高需求区总面积  $2.18 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占研究区总面积的 15.2%, 主要集中于陇中及陇东的城市建成区, 生态系统服务供应和需求空间匹配度差。(3) 生态廊道总长度 2908.3 km, 整体格局上形成了东西向与南北向两大主要廊道轴线。生态廊道的识别中重点考虑了生态需求空间, 提出了基于“两带—三区”的流域生态安全格局优化建议。

**关键词:** 生态安全格局; 生态系统服务供应与需求; 源地识别; 生态廊道; 黄河流域

## Ecological safety pattern identification and optimization based on the ecological supply and demand in Gansu section of the Yellow River Basin

ZHAO Chengcheng, PAN Jinghu\*

College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

**Abstract:** The ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin has been determined as a major national strategy. Ecological security pattern is considered as one of the three strategic patterns of land and space development and protection, which refers to the overall health, sustainability and perfect ecological functions of the ecosystem. Scientific understanding and evaluation of regional ecological risks and construction of ecological security pattern are conducive to comprehensively improving the level of regional ecological security. At present, for the construction of ecosystem security pattern at home and abroad, a relatively perfect pattern construction model with “source identification, resistance surface construction, corridor extraction and determination of security pattern” as the basic framework has been formed for research. In this paper, InVEST (Integrate Valuation of Ecosystem Service and Tradeoffs Tool), ArcGIS and other software are used to select four indicators that can represent the main ecological contradictions in Gansu section of the Yellow River Basin, including water conservation volume, carbon fixation and oxygen release volume, soil conservation volume and ecological and environmental quality. The index importance method is used to extract the ecological source, as well as the land use degree, population density and land average GDP to identify the spatial pattern of ecosystem service demand. Finally, the MCR (Minimum Cumulative Resistance) model is used to extract the ecological corridors between the source areas and between the source areas and the high-demand areas, thereby identifying and constructing the regionally

基金项目: 国家自然科学基金项目(42071216); 甘肃省自然科学基金项目(21JR7RA145)

收稿日期: 2021-04-02; 采用日期: 2022-04-03

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Panjh\_nwnu@nwnu.edu.cn

ecological security pattern. The results show that: (1) the total area of ecological source in Gansu section of the Yellow River Basin is  $4.59 \times 10^4 \text{ km}^2$ , accounting for 32.1% of the total area of the research area, mainly distributed in the central, southern and western Gansu Province. (2) The total area of high demand area for ecosystem services is  $2.18 \times 10^4 \text{ km}^2$ , accounting for 15.2% of the total area of the research area, mainly distributed in the urban built-up areas of the central and eastern Gansu Province, with poor spatial matching between ecosystem service supply and demand. (3) The total length of the ecological corridor is 2908.3 km. From the overall pattern, it forms two main corridor axes in east-west and north-south directions. In this research, the ecological demand space is taken into account in the identification of ecological corridors, and more attention is paid to the areas with high demand and low service, and then the optimization suggestions of watershed ecological security pattern based on “two belts—three areas” are put forward, hoping to provide scientific reference for establishing watershed ecological comprehensive management mechanism and promoting watershed protection, governance and high-quality development.

**Key Words:** ecological security pattern; ecosystem service supply and demand; source identification; ecological corridor; the Yellow River Basin

黄河流域及黄河所流经地区在国家发展中具有极为重要的战略地位<sup>[1]</sup>,黄河流域生态保护和高质量发展已被确定为重大国家战略,而生态安全格局被认为是国土空间开发保护的三大战略格局之一<sup>[2]</sup>。生态系统服务需求作为“社会—经济—环境”系统的终端<sup>[3]</sup>,对于生态系统服务的需求机制及内容的研究是实现生态安全的重要环节<sup>[4-5]</sup>,而生态廊道不仅仅提供物质能量的流动空间,还起到联系生态空间与人类社会空间的重要作用<sup>[6]</sup>。生态系统能够提供给人类社会的物质产品和生态服务,与人类社会对于生态产品与服务的消耗需求,共同形成了生态系统服务供应与需求之间的动态平衡<sup>[7]</sup>,同时也是推动经济社会和自然环境持续健康发展的基础。

生态安全格局是生态系统整体的健康性、可持续性及其所提供的完善的生态功能<sup>[8-9]</sup>。国内外对于生态系统安全格局的构建目前已经形成了相对完善的以“源地识别—阻力面构建—廊道提取—判定安全格局”为基本框架的格局构建模式开展研究<sup>[10]</sup>,但对于生态安全格局动态变化因素考虑不足,较少关注生态系统服务供应与人类社会需求之间的动态平衡。早期生态系统服务供需研究主要关注生态系统供需概念的界定与研究框架的完善,且更重视生态系统服务供应<sup>[11]</sup>;近年来主要关注生态系统服务供需量化及空间化、供需平衡、供需空间分布等<sup>[12-14]</sup>。其中,生态系统服务供需量化主要采用生态过程模拟、生态价值当量法、土地利用估计、专家评估矩阵法、生态模型等方法<sup>[15-16]</sup>;供需平衡研究则多采用生态供需比、需求率、供需协调度等方法<sup>[17]</sup>。研究尺度也从街道、流域、山区、盆地等中小尺度扩至国家、全球等尺度<sup>[18]</sup>。总体来看,已有研究多关注生态系统服务供需关系静态特征,较少关注生态系统服务供需的时空格局及空间匹配关系演变;多关注生态系统服务综合研究,对不同类型生态系统服务的关注较少<sup>[19]</sup>;研究多偏好于东部沿海地区,以及中部城市化发育完善的地区,对生态环境脆弱的西部地区关注较少<sup>[20]</sup>。

黄河流域甘肃段是整个黄河流域重要的水源涵养区和生态补给区,承担着重要的生态服务功能,向黄河流域下游提供水源涵养、土壤保持等服务,甘肃段的生态环境质量直接关系到黄河流域的生态安全。但从整体来看,黄河流域甘肃段自然环境严酷、生态区位敏感、社会经济相对落后,面临全面脱贫和保护生态的双重任务。近年来,随着社会经济快速增长的同时,加剧了对资源的过度开发和对环境造成的破坏,使得该区域在近几年饱受生态系统功能退化、水资源不足、生态环境恶化之苦,如甘南高原湿地萎缩、草场超载、水源涵养功能弱化,兰州—白银沿黄地区水污染压力大,陇东黄土丘陵沟壑区水土流失剧烈等,严重威胁区域生态安全以及经济社会可持续发展。

鉴于此,本文选取能够代表黄河流域甘肃段主要生态矛盾的水源涵养量、固碳释氧量、土壤保持量和生境质量 4 项指标,利用指标重要性法提取生态源地,结合土地利用程度、人口密度和地均 GDP 识别生态系统服

务需求空间格局,最后利用 MCR(minimum cumulative resistance,最小累积阻力)模型提取源地之间、源地与高需求区之间的生态廊道,进而识别和构建区域生态安全格局,以为建立流域生态综合治理机制,推进流域保护、治理与高质量发展提供科学参考。

### 1 研究数据与方法

#### 1.1 研究区概况

黄河流域甘肃段位于 100°—108.5°E,33°—37.5°N(图 1),地处黄河上游,黄土高原西侧,总面积 14.3×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,占黄河流域总面积的 17.65%。属温带大陆性气候,区域年均降水量 400 mm,年平均气温 7℃。行政区划上包括兰州、白银、天水、武威、定西、平凉、庆阳、甘南和临夏等 9 市(州)60 个县(区);2018 年末总人口 1830.29 万人,占甘肃省总人口的 69%;GDP 为 5769.55 亿元,占全省 GDP 总量的 70%。黄河流域甘肃段不仅是甘肃省的政治、经济、文化中心,同时也是黄河上游重要的生态涵养区,但由于该地区常年干旱少雨,水资源分布不均,风蚀现象严重,生态环境敏感、脆弱,水土流失等生态环境问题突出。

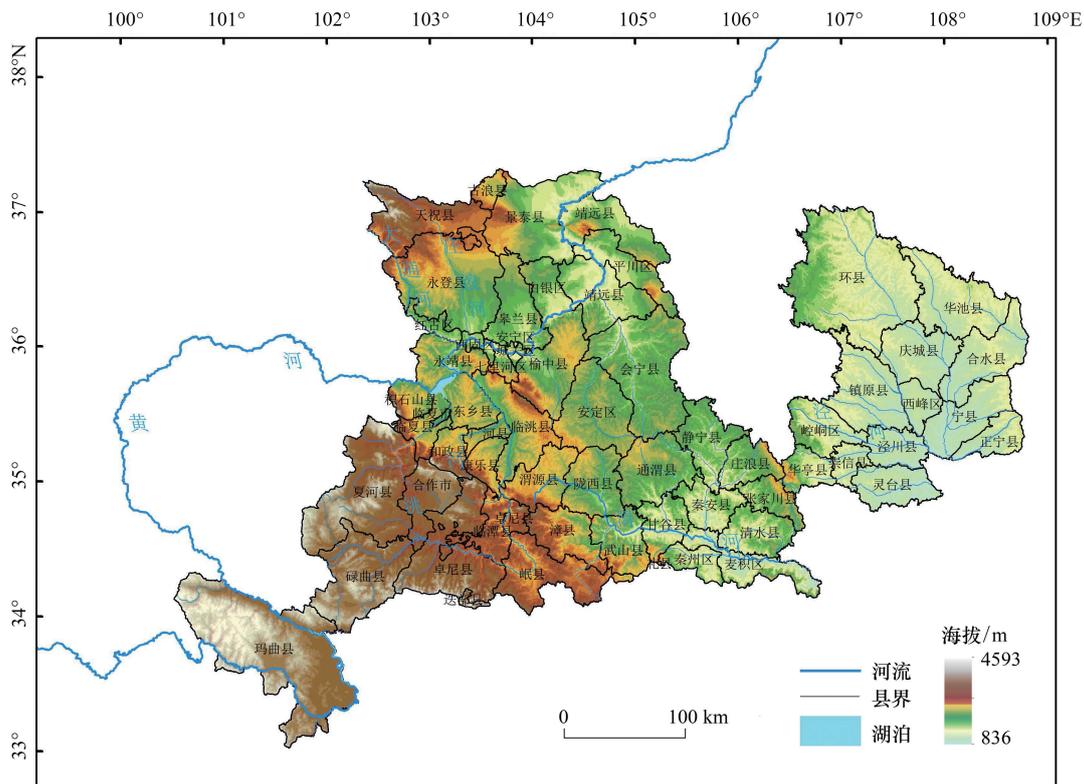


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Location of study area

#### 1.2 数据来源

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/data.aspx>),空间分辨率为 1 km。数字高程模型(DEM)数据取自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)的 GDEMv2 数据,空间分辨率 30 m。归一化植被指数(NDVI)数据使用 MODIS 数据产品 MOD13Q1,来源于 NASA(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)网站,空间分辨率为 250 m。植被净初级生产力(NPP)数据采用美国蒙大拿大学森林学院工作组([http://files.ntsg.umn.edu/data/NTSG\\_Products/MOD17/MOD17A3/Y2015/](http://files.ntsg.umn.edu/data/NTSG_Products/MOD17/MOD17A3/Y2015/))提供的 MOD17A3 数据产品,空间分辨率为 1 km。地表年均蒸散发数据及年均降水量数据来自于气象数据共享网([<http://www.ecologica.cn>](http://data.</a></p></div>
<div data-bbox=)

cma.cn/)。夜间灯光数据采用 NPP-VIIRS 数据,来源于 NOAA 夜间灯光数据中心 (<https://ngdc.noaa.gov/eog/download.html>),空间分辨率为 500 m。单位面积人口、地区生产总值空间栅格数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心,空间分辨率为 1 km。为便于统计分析,将以上各类空间数据统一重采样为 1 km。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 生态系统服务供应测算

结合已有的研究<sup>[21-22]</sup>和黄河流域甘肃段的实际情况,根据目前生态系统服务研究中常用的“千年生态系统评估”理论中有关生态系统服务所对应的类型,以及谢高地等<sup>[23-24]</sup>提取主要的生态系统服务类型理论为指导,针对黄河流域甘肃段水资源不足、水土流失严重、人口压力大、生态环境脆弱的现实情况,选取水源涵养量、固碳释氧量、土壤保持量和生境质量 4 项指标作为评价流域提供给人类的生态系统服务。

##### (1) 水源涵养量

采用水量平衡方程,将研究区年降水量和用于植物蒸腾作用以及其他消耗的水量做差,即可得到研究区单位面积不同生态系统类型下的水源涵养量  $TQ(\text{m}^3)$ <sup>[22]</sup>,公式如下:

$$TQ = \sum_{i=1}^j (P_i - R_i - ET_i) \times A_i \times 10^3 \quad (1)$$

式中, $i$  表示研究区第  $i$  类生态系统类型, $j$  为生态系统类型总数, $P_i$  表示研究区降水总量 (mm), $R_i$  表示通过 ArcGIS 软件的水文分析模块,利用 DEM 计算得出的地表径流量 (mm), $ET_i$  表示地表蒸散发量 (mm), $A_i$  表示第  $i$  类生态系统的面积 ( $\text{km}^2$ )。

##### (2) 固碳释氧量

根据前人研究<sup>[25]</sup>,绿色植物光合作用每生产出 1 g 干物质就能固定并吸收空气中 1.63 g 的  $\text{CO}_2$ ,然后释放在空气中 1.2 g 的  $\text{O}_2$ ,根据这一理论计算研究区内的绿色植物固碳释氧量  $C_a$ ,公式为:

$$C_a = \frac{\text{NPP}}{45\%} \times (1.2 + 1.63) \quad (2)$$

式中, $C_a$  为植被固碳释氧量 ( $\text{g}/\text{m}^2$ ),NPP 为植被净初级生产力。

##### (3) 土壤保持量

目前应用最广泛的土壤保持量计算方法是通过修正土壤流失方程 (RUSLE) 计算土壤保持量  $A_c(\text{t}/\text{hm}^2)$ 。由于篇幅所限,具体的计算过程参考文献<sup>[26-27]</sup>:

$$A_c = A_p - A_r = R \times K \times L \times S \times (1 - C \times P) \quad (3)$$

式中, $A_p$  为潜在土壤侵蚀量 ( $\text{t}/\text{hm}^2$ ), $A_r$  为实际土壤侵蚀量 ( $\text{t}/\text{hm}^2$ ), $R$  为根据降水数据计算得出的研究区降雨侵蚀力因子 ( $\text{MJ mm hm}^{-2}$ ), $K$  为不同土壤类型下的可侵蚀性因子 ( $\text{t MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$ ), $L$ 、 $S$  分别为根据高程数据计算出的坡长、坡度因子, $C$  为土壤覆被与人为管理因子, $P$  为水土保持措施实施因子。

##### (4) 生境质量

用于评估区域生境质量常用的方法是 InVEST (Integrate Valuation of Ecosystem Service and Tradeoffs Tool) 模型的 Habitat Quality 模块。本文基于研究区土地利用数据,利用 ArcGIS 分别提取不同类型的土地利用数据,除作为系统生境的耕地、草地、林地、水体外,其余均为非生境。考虑到人类活动强度对生境的影响,本文综合选取公路、铁路、建设用地、人类活动强度 4 个因素作为生境威胁源,其中,用夜间灯光的强弱来反映人类社会活动强度指标。参考模型的使用和前人研究<sup>[28]</sup>,具体的评估参数如表 1 所示。

#### 1.3.2 生态系统服务需求测算

以人类社会在经济发展进程中希望从自然生态环境中获得的产品或服务的支持量为计算依据<sup>[29]</sup>,结合研究区的实际情况和社会经济数据的可获得性,选取土地利用程度、人口密度和地均 GDP 3 项指标来综合反映研究区的生态系统服务需求量。

表 1 生境质量评估参数

Table 1 Habitat quality evaluation parameters

威胁源 Threat source	权重 Weights	敏感度 Sensitivity				最大影响距离/km Maximum influence distance
		耕地 Farmland	林地 Woodland	草地 Grassland	水体 Water	
公路 Highway	1	0.5	0.55	0.2	0.55	5
铁路 Railway	0.8	0.8	0.65	0.3	0.65	3
建设用地 Construction land	1	0.5	1	0.7	0.9	8
人类活动强度(夜间灯光) Human activity intensity (Night lights)	1	0.75	0.75	0.5	0.8	10

### (1) 土地利用程度

人类活动对于生态系统中土地资源开发利用最主要的消耗是耕地和建设用地,同时由于土地属于特殊资源以及其具有开发利用的不可逆性等特点,通过研究区内建设用地占比来反映人类社会对于生态系统服务的消耗,占比越大表明消耗越高。

### (2) 人口密度

人口密度在某种程度上可以反映对生态系统服务的需求量。采用中国科学院资源环境科学数据中心公布的分辨率为 1 km 的全国人口分布栅格数据,人口密度数值越大,表明该区域对于获得生态系统服务的数量也越大。

### (3) 地均 GDP

地均 GDP 反映人类社会对于生态系统服务产品的利用效率。采用分辨率为 1 km 的全国单位面积 GDP 空间分布栅格数据,地均 GDP 越高,则说明该单位面积土地产生的经济生产总值越高,经济实力强,对于生态系统服务需求量也就相应越高。

为了消除少数经济发展较好地区和人口较为集中地区由于人口密度和地均 GDP 与其他地区的明显差异,分别将人口密度数据和地均 GDP 数据进行取对数处理,缩小与土地利用程度的差异,减小数据自身的波动。计算式为<sup>[25]</sup>:

$$X = x_{i1} \times \lg x_{i2} \times \lg x_{i3} \quad (4)$$

式中, $X$  代表流域段生态系统服务需求量, $x_{i1}$ 、 $x_{i2}$ 、 $x_{i3}$  分别表示土地利用程度、人口密度和地均 GDP。

## 1.3.3 基于供需视角的生态安全格局构建

### (1) 生态源地识别

传统方法常以研究区内的自然保护区、林地等自然生态系统较好的区域作为生态源地,过于主观、片面,生态安全的内涵要求源地应能维护现有景观过程的完整性,保证生态系统服务的可持续性并防止生态系统退化带来的各种生态问题。因此,源地应提供重要的生态服务功能且生境质量较高。本文在定量评估研究区生态系统服务供应能力的基础上,识别生态系统服务供应的重要区域,将其作为源地识别的有效方法。分别在每种生态系统服务空间分布上选取前 20% 区域,取并集作为服务供应的重要区域,在选取出的指标前 20% 区域中去除非生态功能用地<sup>[30]</sup>,即可得到流域段内的重要生态源地,其余斑块为一般生态用地。

### (2) 阻力面构建

参考前人关于生态阻力面构建以及关于生态阻力系数的研究<sup>[10]</sup>,本文对于基本生态阻力系数值的设定为:由于林地植被覆盖程度高、生态系统服务能力强,则其生态阻力系数值也为最小值 1;建设用地人类活动最强、对生态系统的流动阻力最大,则将其阻力系数赋值为最大值 500;以此类推,分别设定不同土地利用类型的生态阻力系数为:耕地 100,草地 20,水体 200,未利用地 300。在设置不同土地利用类型阻力系数值的基础上,通过 NPP-VIIRS 夜间灯光栅格数据对设定的研究区内生态阻力面数值进行修正,得到栅格  $i$  中的修正生态阻力系数  $R_i$ ,计算式为:

$$R_i = \frac{NL_i}{NL_a} \times R \tag{5}$$

式中,  $NL_i$  为栅格  $i$  的原始夜间灯光指数数据值,  $NL_a$  为栅格  $i$  所在土地利用类型  $a$  中的平均夜间灯光指数数据值,  $R$  为栅格  $i$  所在的景观类型初始的阻力值。

(3) 生态廊道提取

基于 MCR 模型进行研究区生态廊道的识别和提取, 计算生态系统中的能量、物质、信息等服务从生态源地到生态需求地所要克服的累积阻力, 而这一最小阻力值即为 MCR 模型的结果, 也是在一定空间范围内找到的一条适合流动的最小阻力路径。计算式为<sup>[31]</sup>:

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i \tag{6}$$

式中,  $i, j$  分别表示两个不同的生态源地,  $D_{ij}$  为物种从  $j$  源地到  $i$  源地的空间距离,  $R_i$  表示不同土地利用方式下的景观类型  $i$  对物种迁移和扩散的生态阻力系数,  $f_{\min}$  为最小累积阻力与物质迁移之间的函数关系。

通过分析流域内生态系统服务供应和需求的分布格局, 综合考量生态空间与生态系统服务需求空间的相互联系和两者在区域生态安全中的重要作用, 耦合区域经济社会系统和自然环境生态系统, 集中于生态供需视角下的源地识别与廊道提取, 在高需求区的基础上, 有机连接自然生态源地和人类社会需求, 促进建立流域“生态—经济—社会”耦合协调的正向反馈机制, 推动生态供需平衡, 保障区域生态安全。本文所采用的技术路线如图 2 所示。

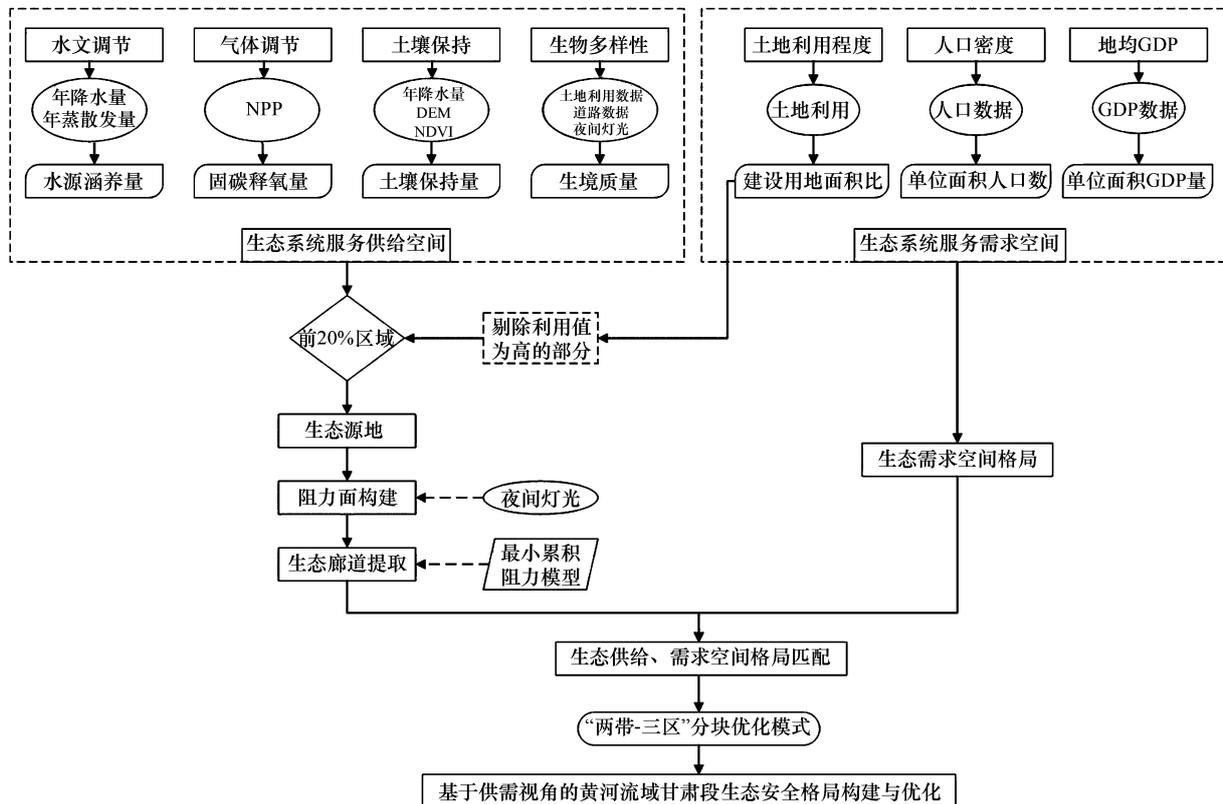


图 2 技术路线图

Fig.2 Technical flow chart

NPP: 净初级生产力 Net primary productivity; NDVI: 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; DEM: 数字高程模型 Digital elevation model

## 2 结果分析

### 2.1 生态系统服务供应

2018 年黄河流域甘肃段生态系统服务空间分布如图 3 所示。生境质量服务的平均值为 0.90,最低值为 0,最高值为 1,林地和草地占生境质量高值区域的 93%,土地利用类型方面,生境质量值依次为:林地>草地>耕地>水体>未利用地>建设用地。通过计算可得,土壤保持服务最大值为 71699 t/hm<sup>2</sup>,而平均值仅为 816.24 t/hm<sup>2</sup>,说明总体上土壤保持服务处于较低水平。从空间分布来看,高值区主要沿渭河沿线、太子山、兴隆山、六盘山和甘南草原分布。水源涵养服务呈现出“南高北低”的空间分布特征,服务最大值为 14.6×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>,水源涵养高值区主要分布于研究区南部的甘南湿地,其次分布于中南部的草地和陇东地区,主要受降水和地表蒸散发的影响,平均值为 6.32×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>,且表现出明显的空间分布不均的格局。固碳释氧服务整体上与研究区内的林地、河流分布呈现空间一致性,研究区平均固碳释氧量为 1261 g/m<sup>2</sup>,林地固碳释氧量最高为 2474 g/m<sup>2</sup>,低值区主要分布于建设用地和未利用地。

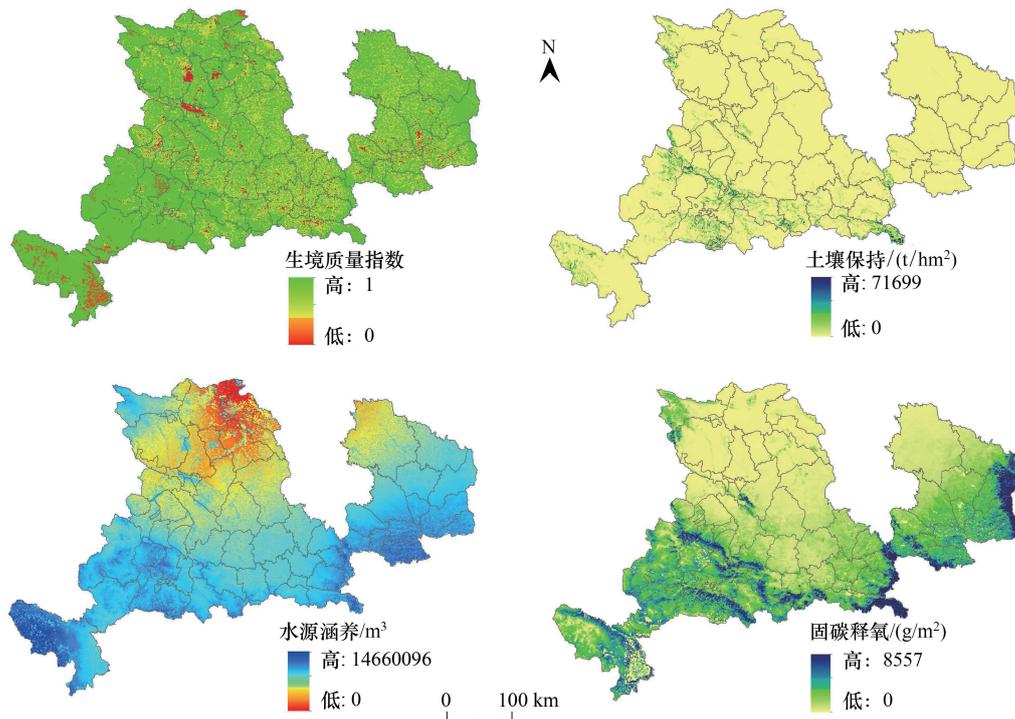


图3 黄河流域甘肃段生态系统服务供应空间分布

Fig.3 Spatial distribution of ecosystem services supply in Gansu section of the Yellow River Basin

### 2.2 生态系统服务需求

综合研究区各项生态系统服务需求指标来看,土地利用程度最低的未利用地生态需求最低,其面积为 3087 km<sup>2</sup>,占整个研究区总面积的 2.1%;耕地面积为 4.07×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,占整个研究区总面积的 28.6%,在流域内分布较为分散,同时由于受到人类活动干扰较大,对生态系统服务的需求也相应较高;建设用地需求最高,面积为 3300 km<sup>2</sup>,占研究区面积的 2.3%,主要分布于各个县(区)的建成区。人口密度和地均 GDP 表现出相似的空间分布特征,人口密度最高值为 42327 人/km<sup>2</sup>,地均 GDP 最高值为 68781 万元/km<sup>2</sup>,两者均位于兰州市城关区;但同时研究区内还存在着 3496 km<sup>2</sup>的区域人口密度为 0 人/km<sup>2</sup>,结合生态需求空间格局,该区域的生态需求值为最低值 0,生态需求最高值为 22.15,基本与研究区内的人口、建成区空间分布一致(图 4)。

整体来看,黄河流域甘肃段生态系统服务需求空间分布格局呈现出“高低值聚集”的特征,高值聚集区有

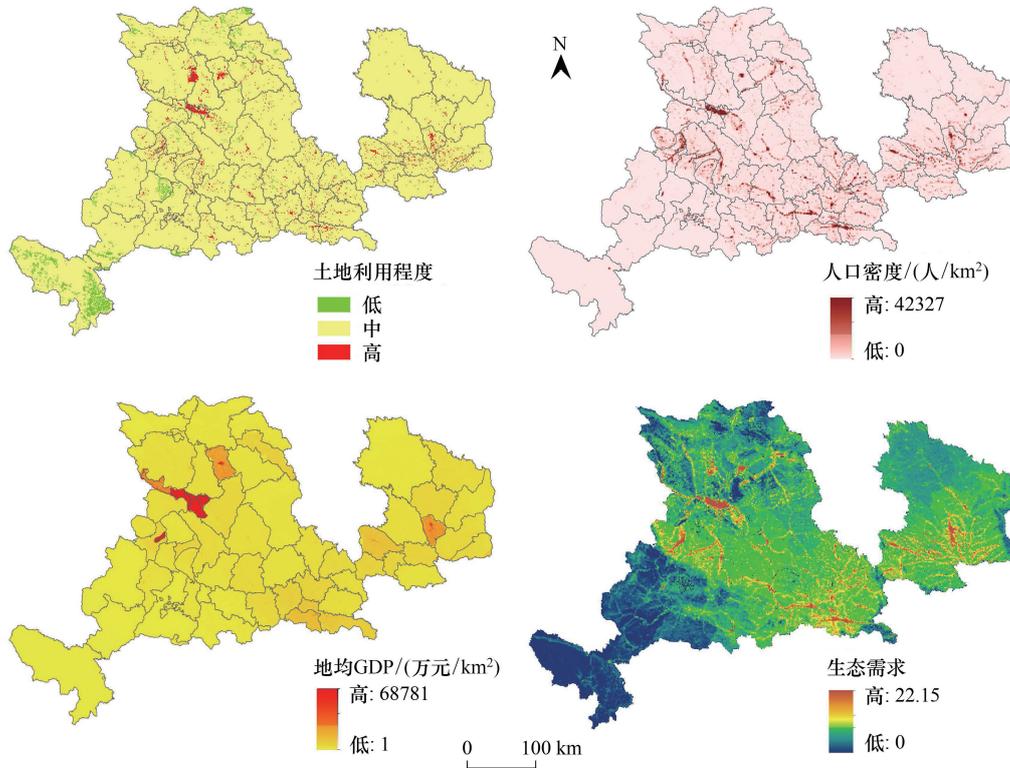


图4 黄河流域甘肃段生态系统服务需求空间分布

Fig.4 Spatial patterns of ecosystem services demand in Gansu section of the Yellow River Basin

两大片,其一是沿黄河分布的兰州市区及兰州新区-白银区一线高需求区,其二是沿渭河一线分布的定西市、天水市和平凉市部分区域,上述地区由于人口密度大,土地利用程度高,经济发展水平好,相对来说生态系统服务需求也相应较高。而在甘南州、临夏州和天祝县、景泰县等部分区域,由于人口分布相对稀疏,土地利用程度不高,经济发展以农牧业为主,缺少对资源消耗较大的重工业企业,所以生态系统服务需求呈现低值聚集分布的格局。

### 2.3 重要生态源地

从黄河流域甘肃段生态源地的总体空间分布来看(图5),生态源地集中分布于研究区南部和东南部区域,主要包括黄河首曲、尕海、洮河、太子山、兴隆山、六盘山等6个自然保护区所辖区域,以及西北部祁连山自然保护区的部分区域。研究区生态源地总面积约 $4.59 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占研究区总面积的32.2%。从土地利用类型来看,生态源地主要为林地和草地,林地虽然仅占了研究区总面积的12.5%,但在生态源地中属于林地的面积占比为58.5%,这说明林地在区域生态系统支持和调节等方面有着突出贡献。

### 2.4 生态阻力面构建及生态廊道提取

#### 2.4.1 生态阻力面

夜间灯光亮度值能在一定程度上很好地反映地区经济、人口、产业等发展水平,由图6可知,研究区内夜间灯光亮度最大值位于兰州市城关区,这也与其经济发展水平和城市化程度最高一致,其他各县区的中心城

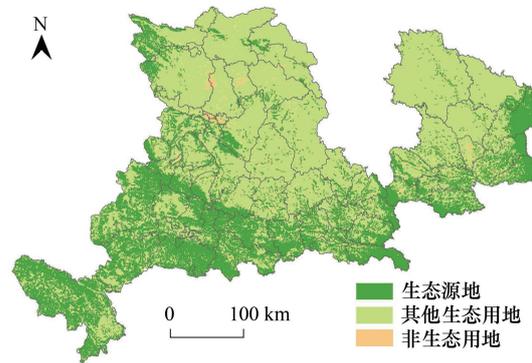


图5 黄河流域甘肃段生态源地空间分布

Fig.5 Spatial distribution of ecological sources in Gansu section of the Yellow River Basin

区城市化水平较高,所以亮度也较周围地区高,并逐渐向四周扩散。基于研究区夜间灯光亮度值,对设定的基本生态阻力系数数值利用公式(5)进行修正,结果如图 6 所示。可以看出,研究区生态阻力系数空间分布也表现出一定的规律性,经修正后的阻力值最大为 34161.3,平均值为 58.86。高值分布于各个城区的中心区域,且生态阻力系数高值表现出沿流域内主要交通线和人口聚集区分布的形态特征;而大部分阻力值较低的区域表现为与灯光数据的一致性,主要位于农村地区 and 人口分布较少的区域。

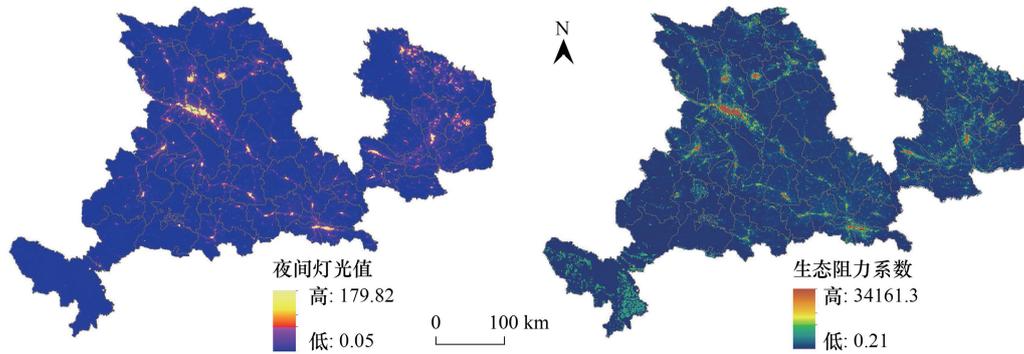


图 6 黄河流域甘肃段夜间灯光值和修正生态阻力系数

Fig.6 Spatial distribution of DN value and revised resistance surface in Gansu section of the Yellow River Basin

### 2.4.2 生态廊道

本文利用 ArcGIS 软件的空间分析工具,将各生态源地几何中心点(共计 13 个点)作为起始点,以剩余的其他 12 个点为目标点集群,依次对每个点进行分析,利用 MCR 模型计算最小成本路径,并基于最小阻力计算结果对黄河流域甘肃段的生态廊道进行提取。基于生态系统服务需求空间格局,利用 ArcGIS 中的提取分析工具,对流域内的生态需求空间格局进行多次阈值提取,得到一条链接各主要生态需求区的平滑曲线为生态需求廊道,如图 7 所示。

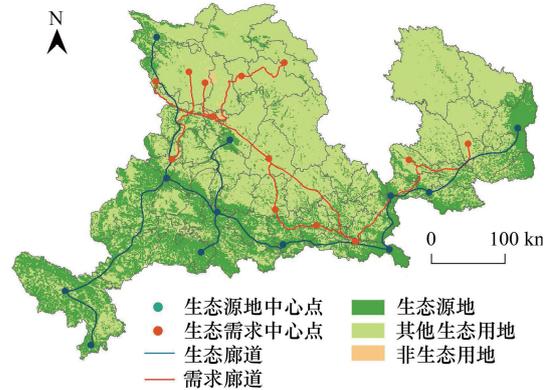


图 7 黄河流域甘肃段生态安全格局

Fig.7 Ecological security pattern in Gansu section of the Yellow River Basin

黄河流域甘肃段源间生态廊道共 11 条,总长度 1390.79 km,整体格局上形成了东西向与南北向的两大主要廊道轴线,同时中部分别向兴隆山和洮河源地之间有南北向的延伸。需求廊道共 13 条,总长度 1517.51

km,整体格局上主要的需求中心点分布于白银区、兰州新区、城关区、安定区、秦州区、崆峒区和西峰区等研究区内几大主要城市建成区,廊道将高需求点进行了有效的连接。通过分析生态廊道和需求廊道的空间分布,即流域内部生态系统物质流动通道与社会发展能量需求之间的空间联系,进而能够合理地建设生态源地,拓宽源地的服务空间范围。

### 2.5 生态安全格局构建

综合前文黄河流域甘肃段生态系统服务功能的供应、需求空间分布格局的现实状况,以及存在供需空间不匹配的实际问题,结合甘肃省政府编制的《甘肃省主体功能区规划》中对于“三屏四区”生态功能区的划分,以修复生态、保护环境、提供生态产品供应作为重要生态源地的发展指导理论,结合地形地貌特征,划分出陇中人口产业生态需求区、甘南水源补给生态供给区和陇东黄土丘陵沟壑水土保持生态需求—供给区。以生态廊道作为生态系统物种、物质、能量、信息等在两个相邻生态源地之间的迁移和扩散的通道,以生态系统服

务高需求区的集合中心点为起始点,以剩余的 13 个点为目标点集群,以沿线道路、居民点为框架,得到生态需求廊道。以沿黄河流向分列南北的洮河—大通河和黄河最大支流渭河作为生态供给区与生态需求区之间的核心“动脉”,加强生态建设。据此,本文提出了“两带—三区”的研究区生态安全格局分块优化模式,如图 8 所示。

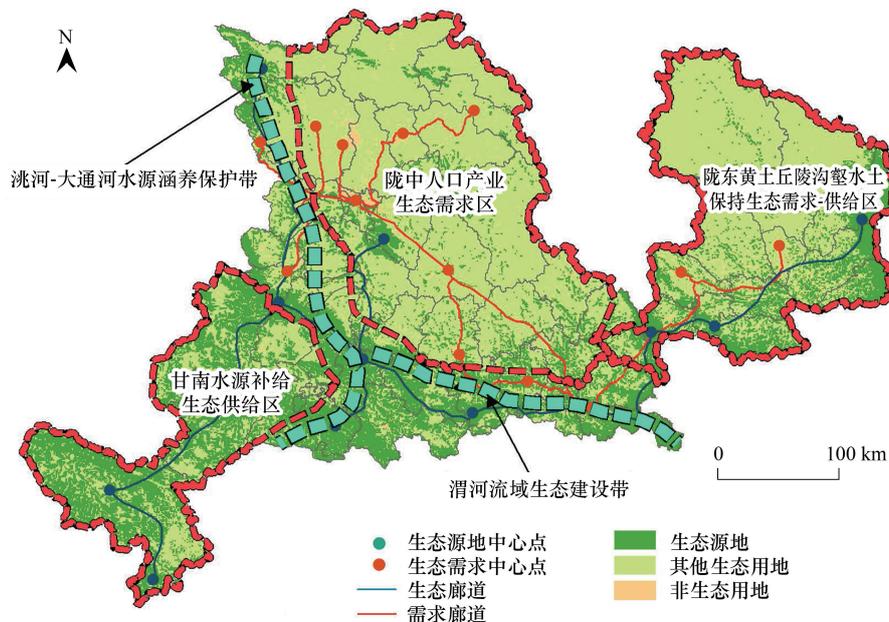


图 8 黄河流域甘肃段生态安全格局优化

Fig.8 Optimization of ecological security pattern in Gansu section of the Yellow River Basin

“两带”分别指:洮河—大通河水源涵养保护带;渭河沿线生态建设带。

(1)沿黄河流向分列南北的洮河—大通河连线的生态水源保护带,主要沿洮河经渭源县南部、临洮县西部区域,至临夏州永靖县汇入黄河,以及与黄河北侧经天祝县、永登县于兰州市汇入黄河的大通河流域。在满足黄河上游水源保护的同时,要确保沿岸生态用水需求。

(2)沿黄河支流渭河分布的渭河沿线生态建设带,聚集了研究区内大量的人口,人类活动频繁。该建设带内以生态系统服务供应为主,同时也是黄河流域甘肃段重要生态源地与主要需求区域的分界线,措施上应减少人类不合理的经济活动,保护河流湿地,建设滨河绿化带,保证黄河整体上的水量流入和突出黄河流域对于区域环境和生态调节中的主要作用。

“三区”分别指:甘南水源补给生态供给区,陇中人口产业生态需求区和陇东黄土丘陵沟壑水土保持生态需求—供给区。

(1)甘南水源补给生态供给区是黄河重要的水源补给区,总面积 33031.24 km<sup>2</sup>,总人口 154.1 万人。该区域分布有大面积的沼泽湿地,形成了黄河上游重要的水资源补给区,在生态系统服务供需方面属典型的高供应低需求区。应坚持生态优先,加强草原草场综合治理措施和重点区段沙漠化防治,增强洮河上游水源涵养能力,逐步控制草场逐年退化,引导超载人口有序转移。

(2)陇中人口产业生态需求区总面积约 76795.7 km<sup>2</sup>,该区域人口密度大,人口总数约占研究区总人口的 67.53%。建设用地占比最大,生态系统服务需求方面以高需求为主;在生态系统服务供应方面,仅在兴隆山、马衔山区域提供少量的生态系统服务供应。应合理构建人口分布与产业结构需求,实现经济发展与生态保护的动态平衡。

(3)陇东黄土丘陵沟壑水土保持生态需求—供给区面积约 32722.56 km<sup>2</sup>。该区主要位于黄土高原,水土

流失严重。生态系统服务供应方面,土壤保持服务平均值仅为  $243.24 \text{ t/hm}^2$ ,远低于研究区其他区域的平均值。生态系统服务需求方面,主要的需求区与人口空间分布较为一致。措施上首先须坚持“防治结合、保护优先”的水土保持方针,加大退耕还林还草力度,大力培育现代农业,加快改善人居环境。

在进行各个功能区建设过程中,应着重考虑各个区划的主体功能,避免在经济社会发展过程中出现将生态系统服务供应与需求的空间不匹配进一步扩大的风险。同时在城市化发展进程中,要注意扩张的“红线禁止”区域,避免对生态源地及自然保护区的侵占,加大对于供应和需求廊道的合理保护和开发建设,以改善研究区生态系统服务在供需空间上存在的匹配问题和提高流域本身生态系统服务的功能。

### 3 讨论

已有研究在构建生态安全格局时,往往聚焦于生态系统服务的高供应区,或者强调保护生态源地,但对于生态供应差而生态需求高的地区关注不够<sup>[32-33]</sup>。本文研究发现,黄河流域甘肃段存在严重的人口经济与生态资源空间不匹配的问题,生态系统服务供需呈现南部的甘南、临夏州生态系统服务供应高、需求低,陇中、陇东地区生态系统服务供应低、需求高的空间格局。在区域生态规划中,除了要加强区域重要生态空间如兴隆山-马衔山、黄河湿地、连城林区、子午岭、六盘山等的保护力度外,更重要的应当是缓解区域生态稀缺问题,逐步改善生态空间与生活空间、生产空间的冲突现状。黄河流域“生态—经济—社会”耦合系统中,存在交互作用和复杂机制,这些最终都可归结为供需关系,因此,流域可持续发展的实质也就是满足生态系统服务供需平衡,构建生态安全格局。黄河流域甘肃段除人口经济与生态资源空间不匹配外,还存在贫困区与生态脆弱区高度重合的问题,如生态系统服务主要的供应方甘南和临夏州,由于很难分享陇中和陇东受益方从流域生态服务中取得的惠益,导致流域生态不断恶化,进一步限制了生态服务受益方可持续发展。

本文在生态系统服务指标的计算中,受限于数据获取困难,舍弃了一些重要但精度难以达到要求的指标,如文化服务中,计算文化服务所必需的社会经济指标难以空间化和量化,不得不进行舍弃。另外,部分区域计算出的建设用地水源涵养量较高,这可能是由于不透水面的降雨入渗较低、洪峰流量大所致,须在后续研究中深入分析。20%区域作为服务供应的重要区域存在一定的主观性。期望今后在获得高精度地理空间数据的情况下,能够开展更为细致深入的研究。此外,基于流域内部物质、能量流动的生态供需评估研究也是下一步关注的重点。

### 4 结论

本文评估了黄河流域甘肃段生态系统服务供应、需求的空间分布格局,识别研究区内重要生态源地,基于MCR模型提取研究区生态廊道,构建生态安全格局并提出优化措施。研究结果表明:

(1)黄河流域甘肃段生态源地总面积约  $4.59 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,集中分布于南部和东南部区域,生态源地中林地占比为 58.5%。

(2)黄河流域甘肃段生态系统服务供应与需求空间错位明显,高服务区域与高需求区域呈现出以渭河流域为分界线的明显特征。

(3)黄河流域甘肃段源间生态廊道共 11 条,总长度 1390.79 km,形成了东西向与南北向的两大主要廊道轴线,需求廊道共 13 条,总长度 1517.51 km。在分析了研究区供需匹配视角的生态系统安全格局基础上,提出了“两带—三区”的生态系统格局优化建议。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] 陆大道,孙东琪. 黄河流域的综合治理与可持续发展. 地理学报, 2019, 74(12): 2431-2436.
- [ 2 ] 樊杰. 我国国土空间开发保护格局优化配置理论创新与“十三五”规划的应对策略. 中国科学院院刊, 2016, 31(1): 1-12.
- [ 3 ] Wolff S, Schulp C J E, Verburg P H. Mapping ecosystem services demand: a review of current research and future perspectives. Ecological Indicators, 2015, 55: 159-171.

- [ 4 ] 黄智洵, 王飞飞, 曹文志. 耦合生态系统服务供求关系的生态安全格局动态分析——以闽三角城市群为例. 生态学报, 2018, 38(12): 4327-4340.
- [ 5 ] Ariken M, Zhang F, Liu K, Fang C L, Kung H T. Coupling coordination analysis of urbanization and eco-environment in Yanqi Basin based on multi-source remote sensing data. *Ecological Indicators*, 2020, 114: 106331.
- [ 6 ] 王云, 潘竟虎. 基于生态系统服务价值重构的干旱内陆河流域生态安全格局优化——以张掖市甘州区为例. 生态学报, 2019, 39(10): 3455-3467.
- [ 7 ] 韩增林, 刘澄浩, 闫晓露, 李欣媛, 王学哲. 基于生态系统服务供需匹配与耦合协调的生态管理分区——以大连市为例. 生态学报, 2021, 41(22): 9064-9075.
- [ 8 ] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. 生态学报, 1999(1): 8-15.
- [ 9 ] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 关文彬. 区域生态安全格局: 概念与理论基础. 生态学报, 2004, 24(4): 761-768.
- [ 10 ] 彭建, 郭小楠, 胡熠娜, 刘焱序. 基于地质灾害敏感性的山地生态安全格局构建——以云南省玉溪市为例. 应用生态学报, 2017, 28(2): 627-635.
- [ 11 ] Zhai T L, Wang J, Jin Z F, Qi Y, Fang Y, Liu J J. Did improvements of ecosystem services supply-demand imbalance change environmental spatial injustices? *Ecological Indicators*, 2020, 111: 106068.
- [ 12 ] Wu X, Liu S L, Zhao S, Hou X Y, Xu J W, Dong S K, Liu G H. Quantification and driving force analysis of ecosystem services supply, demand and balance in China. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 1375-1386.
- [ 13 ] Xu Q, Yang R, Zhuang D C, Lu Z L. Spatial gradient differences of ecosystem services supply and demand in the Pearl River Delta region. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 279: 123849.
- [ 14 ] Guan Q C, Hao J M, Ren G P, Li M, Chen A Q, Duan W K, Chen H. Ecological indexes for the analysis of the spatial-temporal characteristics of ecosystem service supply and demand: a case study of the major grain-producing regions in Quzhou, China. *Ecological Indicators*, 2020, 108: 105748.
- [ 15 ] Ala-Hulkko T, Kotavaara O, Alahuhta J, Hjort J. Mapping supply and demand of a provisioning ecosystem service across Europe. *Ecological Indicators*, 2019, 103: 520-529.
- [ 16 ] Talukdar S, Singha P, Shahfahad, Mahato S, Praveen B, Rahman A. Dynamics of ecosystem services (ESs) in response to land use land cover (LU/LC) changes in the lower Gangetic plain of India. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106121.
- [ 17 ] 谢余初, 张素欣, 林冰, 赵银军, 胡宝清. 基于生态系统服务供需关系的广西县域国土生态修复空间分区. 自然资源学报, 2020, 35(1): 217-229.
- [ 18 ] Meng S T, Huang Q X, Zhang L, He C Y, Inostroza L, Bai Y S, Yin D. Matches and mismatches between the supply of and demand for cultural ecosystem services in rapidly urbanizing watersheds: a case study in the Guanting Reservoir Basin, China. *Ecosystem Services*, 2020, 45: 101156.
- [ 19 ] 赵雪雁, 马平易, 李文青, 杜昱璇. 黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化. 地理学报, 2021, 76(11): 2780-2796.
- [ 20 ] 刘立程, 刘春芳, 王川, 李鹏杰. 黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究——以兰州市为例. 地理学报, 2019, 74(9): 1921-1937.
- [ 21 ] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17-29.
- [ 22 ] 张豆, 渠丽萍, 张桀滢. 基于生态供需视角的生态安全格局构建与优化——以长三角地区为例. 生态学报, 2019, 39(20): 7525-7537.
- [ 23 ] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [ 24 ] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [ 25 ] 吴平, 林浩曦, 田璐. 基于生态系统服务供需的雄安新区生态安全格局构建. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(9): 5-11.
- [ 26 ] 潘竟虎, 李真. 干旱内陆河流域生态系统服务空间权衡与协同作用分析. 农业工程学报, 2017, 33(17): 280-289.
- [ 27 ] He Q, Dai X A, Chen S Q. Assessing the effects of vegetation and precipitation on soil erosion in the Three-River Headwaters Region of the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Journal of Arid Land*, 2020, 12(5): 865-886.
- [ 28 ] 戴云哲, 李江凤, 杨建新. 长沙都市区生境质量对城市扩张的时空响应. 地理科学进展, 2018, 37(10): 1340-1351.
- [ 29 ] Villamagna A M, Angermeier P L, Bennett E M. Capacity, pressure, demand, and flow: a conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery. *Ecological Complexity*, 2013, 15: 114-121.
- [ 30 ] 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 胡熠娜, 杨旸. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略. 地理学报, 2018, 73(4): 701-710.
- [ 31 ] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 1992, 23(1): 1-16.
- [ 32 ] 景永才, 陈利顶, 孙然好. 基于生态系统服务供需的城市群生态安全格局构建框架. 生态学报, 2018, 38(12): 4121-4131.
- [ 33 ] 严岩, 朱捷缘, 吴钢, 詹云军. 生态系统服务需求、供给和消费研究进展. 生态学报, 2017, 37(8): 2489-2496.