

DOI: 10.20103/j.stxb.202312312897

马元博, 翟天林, 毕庆生, 常明园, 李玲, 马姿怡, 栗滢超. 基于需求层次理论和生态系统服务供需的黄河流域生态管理分区. 生态学报, 2024, 44(15): 6513-6526.

Ma Y B, Zhai T L, Bi Q S, Chang M Y, Li L, Ma Z Y, Li Y C. Ecological management zoning in the Yellow River Basin based on hierarchy of needs theory and ecosystem services supply and demand. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(15): 6513-6526.

基于需求层次理论和生态系统服务供需的黄河流域生态管理分区

马元博, 翟天林*, 毕庆生, 常明园, 李玲, 马姿怡, 栗滢超

河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450002

摘要: 生态管理分区是实现生态系统有效管理的重要途径, 是生态保护和管理的前提基础, 对改善区域生态系统结构, 实现生态文明建设, 提升人类福祉具有重要意义。以黄河流域县域为基本研究单元, 通过测算 2020 年粮食生产、产水、固碳、土壤保持、生境质量以及休闲娱乐等 6 种典型生态系统服务供给和需求, 进一步融合马斯洛需求层次理论对生态系统服务供需进行分层, 最终利用象限法和耦合协调度模型划定黄河流域生态管理分区。研究结果表明: (1) 2020 年黄河流域六种生态系统服务的供需格局差异明显, 生态系统服务供给在空间上呈现“南高北低”的分布格局, 需求则呈现“东高西低”的分布格局, 供需分布格局与区域生态用地以及人类活动有着密切关系。 (2) 综合生态系统服务供需受到人类对不同类型生态系统服务需求的差异性和层次性的影响, 综合供给高值区分布在黄河流域南部生态本底较好的区县, 综合需求高值区分布在郑州、西安、济南等核心城市及周边区县。 (3) 将黄河流域划分为五类生态管理分区: A 生态潜力型分区, 需要挖掘生态系统服务潜力, 提高生态系统服务利用效率。 B 生态改善型分区, 需要提高生态系统服务供给能力, 改善生态环境质量。 C 生态保护型分区, 需要加强生态保护和恢复, 减少外来干扰。 D 生态调节型分区, 需要维护生态环境, 调整农业产业结构以实现环境、社会、经济和生态效益的统一。 E 生态协调型分区, 需要平衡生态系统服务供需关系, 协调经济社会发展和生态保护。研究结果可为黄河流域国土空间优化和生态系统服务管理与保护提供参考。

关键词: 生态系统服务供需; 生态管理分区; 马斯洛需求层次理论; 象限法; 协调度模型

Ecological management zoning in the Yellow River Basin based on hierarchy of needs theory and ecosystem services supply and demand

MA Yuanbo, ZHAI Tianlin*, BI Qingsheng, CHANG Mingyuan, LI Ling, MA Ziyi, LI Yingchao

College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

Abstract: Ecological management zoning is a crucial approach for achieving effective ecosystem management and serves as the foundational premise for ecological conservation and management. It holds significant importance for improving the structure of regional ecosystems, advancing the construction of ecological civilization, and enhancing human well-being. This study focused on counties within the Yellow River basin as the basic research units and estimated the supply and demand for six typical ecosystem services in 2020, including grain production, water yield, carbon sequestration, soil conservation, habitat quality, and recreational recreation. By integrating Maslow's hierarchy of needs theory for a stratified analysis of ecosystem service supply and demand, and employing quadrant methods and a coupling coordination degree model, ecological management zones within the Yellow River basin were delineated. The results indicated that: (1) In

基金项目: 国家自然科学基金(42101298, 42371314); 河南省科技研发计划联合基金重点项目(225200810045); 河南省自然科学基金面上项目(222300420465)

收稿日期: 2023-12-31; **网络出版日期:** 2024-05-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gavinzhai@126.com

2020, the supply and demand patterns of the six ecosystem services in the Yellow River basin displayed significantly spatial differences, with supply showing a “high in the south, low in the north” distribution, and demand showing a “high in the east, low in the west” pattern, closely related to regional ecological land use and human activities. (2) The comprehensive supply and demand of ecosystem services were influenced by the diversity and hierarchy of human needs for different types of ecosystem services, with high-supply areas located in the southern basin where the ecological conditions were favorable, and high-demand areas in core cities and their surrounding counties, such as Zhengzhou, Xi'an, and Jinan. (3) The Yellow River basin was classified into five ecological management zones: A) Potential zones, which required the exploitation of ecosystem service potential and improvement of service utilization efficiency; B) Improvement zones, needing the enhanced ecosystem service supply capacity and environmental quality; C) Conservation zones, where ecological protection and restoration should be strengthened to reduce external disturbances; D) Regulation zones, necessitating maintenance of ecological environments and adjustment of agricultural structures for the unity of environmental, social, economic, and ecological benefits; E) Coordination zones, aiming to balance the supply and demand of ecosystem services and harmonize the development of economy, society, and ecological protection. The study provides references for the optimization of land space and management and conservation of ecosystem services in the Yellow River basin.

Key Words: ecosystem services supply and demand; ecological management zone; Maslow's hierarchy of needs; quadrantal method; coordination degree model

生态系统服务作为自然-社会连接的桥梁,是人类社会发展重要的物质基础,对人类社会的可持续发展具有重要意义。近年来人类不合理的活动不断增加,对生态系统造成了严重的破坏,生态系统服务供给能力不断下降^[1]。据统计世界上超过 60%的生态系统服务正在退化,而且这些生态系统服务的丧失正变得愈发的明显,严重危及人类社会的可持续发展^[2]。究其主要原因,就是未对生态系统进行有效的管理^[3]。

生态管理分区为实现生态系统有效管理提供了新的解决方案。生态管理分区本质上是通过划分不同区域进行针对性的管理,以改善区域生态系统结构,恢复生态完整性,并促进区域内生态系统服务可持续供给,从而改善人类福祉。同时生态管理分区还是生态修复和国土空间优化的重要依据,是生态保护和管理的坚实基础,也是实现社会可持续发展的途径手段^[4]。1962 年加拿大森林学家 Loucks 首先提出了生态分区概念^[5],1976 年美国生态学家 Bailey 以生态系统的观点提出了美国生态区域的等级划分,自此首个真正意义上的生态分区方案才出现^[6]。随后生态系统管理分区的研究愈发丰富,有基于绿地^[7]、湿地^[8]、农田^[9-10]等不同的生态要素开展生态管理分区研究;有基于生态系统服务簇^[11]、要素尺度特征^[12]、生态系统结构特征^[13]等生态系统服务属性开展生态管理分区研究。研究的尺度多元包括国家^[14]、区域^[15]、流域^[16-17]、省^[11]、市^[18]、县^[19-20];分区的方法多样如聚类分析法^[21]、层次分析法^[22]等。总体来说,现有的生态管理分区研究愈发趋于成熟,但更多的学者认识到依照自然生态要素进行区划的局限性。同时现有大多数研究侧重于单一或几种生态服务的评估和价值化,对生态服务的供需关系和多重需求的研究仍然较少^[23]。这种单方面的关注可能会导致管理决策偏离人类的实际需求,进而影响到生态系统服务的有效供给和合理配置。因此越来越多的学者尝试以生态系统服务供需的角度切入对区域进行管理分区研究,以求能够找出供需矛盾的主要原因和影响程度,以此来解决区域产生的生态环境问题。

当前区域环境问题产生的主要原因是由于城镇化和土地利用的变化,对区域生态系统结构和效用的稳定性产生了破坏,其实质就是区域生态系统服务供需关系的空间差异或失衡所致^[24]。因此明确生态系统服务供需关系,分析生态系统服务供需空间特征是对生态系统进行有效管理的前提^[9,25]。生态系统服务供给是指在特定区域一定时空范围内生态系统依靠自身完整性为人类提供产品和服务的能力。需求则是人类在特定的时空对生态系统产品和服务的消费和使用^[26-27]。生态系统服务供给与需求共同构成了生态系统服务从自然系统流向人类社会系统的动态过程,近年来对生态系统服务供需关系的研究成为热点^[28]。目前,已有许多

研究对不同尺度和范围的生态系统服务供需进行了评估和分析。例如,彭健等以修正的生态系统服务价值量核算生态系统服务供给量,以土地利用开发程度、人口密度和地均 GDP 表征生态系统服务需求量,基于供需分析广东省绿地生态网络建设分区^[7]。岳文泽等基于多源数据,以乡镇为尺度单元量化区域生态系统服务供给量和需求量,构建供需匹配与协调关系,划定宁夏固原生态修复分区^[18]。曹继等以南京都市圈各县市为研究单元,对 2010—2020 年南京都市圈生态系统服务供需动态情况、空间相关性和内部分布特征进行研究^[29]。熊昕莹等以新疆为研究区,选取 10 种生态系统服务类型,基于生态系统服务供需关系及空间流动,划分生态管理分区并提出相应管控措施^[4]。然而,这些研究虽然可以清晰的表征不同区域的生态系统服务供需状况,但却未能考虑人类对不同类型生态系统服务需求的差异性和层次性,忽略了不同类型的生态系统服务之间的相互作用和协调效应,以至于对区域进行管理分区划分时有一定的局限性。因此,需要寻找一种更合理和科学的方法,来评估和分析不同区域的生态系统服务供需。

需求层次理论是由美国心理学家马斯洛提出的一种描述人类需求的理论,它将人类需求分为五个层次,从低到高依次为生理需求、安全需求、社会需求、尊重需求和自我实现需求。尽管该理论最初是用于心理学和管理学领域,但其对人的需求层次的划分为生态管理提供了新的思路。根据这一理论,人的需求是多层次、多维度的,从生理到心理,从个体到社会,从现实到理想,都存在不同的需求。人类只有满足了较低层次的需求,才会追求较高层次的需求。生态系统服务也可以按照这一理论进行分类,如生理需求对应于粮食生产、产水等基本的生存保障服务;安全需求对应于土壤保持、防洪减灾等减少自然灾害风险的服务;福祉提升需求对应于温度调节、空气净化、降噪和水净化等生态系统服务,可以改善生活环境,提高人类福祉;社交和文化需求对应于休闲娱乐、文化遗产等服务,可以增进人际交往和社会认同感的服务;自我实现需求对应于文化服务中的教育科研、宗教信仰等类型,能够促进个人成长和价值实现的服务。这一理论为分析和理解生态系统服务的多重价值、多重功能提供了有力的理论工具。结合需求层次理论对人的多重需求进行分析,不仅可以更为全面和深入地理解生态服务的价值,也有助于提高生态管理分区的科学性和有效性。

黄河流域是我国重要的生态屏障,在经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的地位^[30]。黄河流域生态本底差,水资源短缺,水土流失严重,资源环境承载能力弱,流域各省区发展不平衡不充分问题尤为突出。为此,本研究以黄河流域为研究区,以县域为基本研究单元,测算 2020 年粮食生产、产水、固碳、土壤保持、生境质量以及休闲娱乐等 6 种典型生态系统服务供给和需求并分析其空间分布特征,进一步融合马斯洛需求层次理论对生态系统服务供需进行分层,探究生态系统服务供需匹配差异,最终基于四象限法耦合生态系统服务供需协调度模型对黄河流域进行生态管理分区,为黄河流域国土空间优化和生态系统服务管理与保护提供理论基础。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

黄河流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东九省,流域面积 75 万多 km^2 ^[31],本研究的研究区为黄河流域所在县市行政区,总面积约为 117 万 km^2 (图 1)。黄河流域内不同区域气候差异明显,包含暖温带、中温带以及高原亚寒带,多年平均降雨量在 446mm。据统计 2020 年黄河流域总人口约 1.7 亿,占全国人口 11.5%,农牧业基础较好,粮食和肉类产量占全国三分之一,能源资源富集,是我国重要的能源、化工、原材料和基础工业基地,文化根基深厚,历史文化遗产星罗棋布。然而,黄河流域生态环境脆弱,资源环境

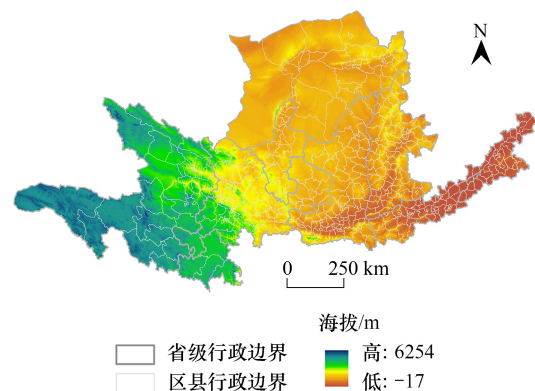


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Location of study area

高负载。近年来人类活动更使得黄河流域生态问题加剧。而推动黄河流域生态保护和高质量发展已经成为国家重要战略,保护好黄河流域生态环境促进流域社会与生态和谐可持续发展更是国家长久的发展目标。

1.2 数据来源

本研究采用的土地利用数据与行政区边界数据均来源于中国科学院环境与数据中心,土地利用数据通过 ArcGIS10.8 软件重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 类;气象数据、蒸散数据均来源于国家系统科学数据中心;土壤数据来源于联合国粮农组织的世界土壤数据库土壤数据集;数字高程模型数据来源于地理空间数据云。所有数据均为 2020 年,采用 ArcGIS10.8 软件重采样为 1000m 空间分辨率,并统一为 Albers 投影坐标(表 1)。

表 1 数据来源
Table 1 Data source

数据 Data	来源 Source
土地利用数据、行政区边界 Land use data、administrative boundaries	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resd.cn/)
气象数据、蒸散数据 Meteorological data、evaporation data	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn/)
土壤数据 Soil data	世界土壤数据库(HWSD)土壤数据集(https://www.fao.org/)
数字高程模型 Digital elevation model	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)

2 研究方法

2.1 生态系统服务供需测算

本研究考虑黄河流域生态系统类型、社会经济现状及数据可获取性,选取支持服务、调节服务、供给服务、文化服务四种生态系统服务亚类;粮食生产、产水量、固碳、土壤保持、生境质量以及休闲娱乐六种生态系统服务,构建生态系统服务供需评估指标体系。利用不同的模型对黄河流域这六种生态系统服务类型进行测算,计算方法如下(表 2):

表 2 生态系统服务供给计算方法
Table 2 Calculation Method of ecosystem service supply

生态系统服务供给 Ecosystem service supply	计算公式 Calculation formula	变量解释 Variable interpretation
粮食服务 Grain production supply	$F_i = F_{sum} \times NDVI_i / NDVI_{sum}$	F_i 为栅格 i 分配的粮食产量; F_{sum} 为粮食总量; $NDVI_i$ 为栅格单元 i 的归一化植被指数; $NDVI_{sum}$ 为归一化植被指数的和。
产水服务 Water yield supply	$Y_i = P_i - AET_i$	Y_i 为栅格 i 的年产水量; AET_i 为 i 栅格年实际蒸发量; P_i 为栅格 i 的年平均降水量。
固碳服务 Carbon sequestration supply	$C_{total} = (C_a + C_b + C_s + C_d)$	C_{total} 为碳存量; C_a 为地上生物碳存量; C_b 为地下生物碳存量; C_s 为土壤碳存量; C_d 为凋落物碳存量。
土壤保持服务 Soil conservation supply	$UKLS_i = R_i \times K_i \times L_i \times S_i$ $SDR_i = RKLS_i - USLE_i$	SDR_i 为栅格 i 的土壤保持量; $USLE_i$ 为栅格 i 的土壤侵蚀量; $RKLS_i$ 为栅格 i 的土壤潜在侵蚀量; R_i 为栅格 i 降雨侵蚀力因子; K_i 为栅格 i 土壤可侵蚀性因子; L_i 为栅格坡长系数; S_i 为栅格 i 坡度系数。
生境质量服务 Habitat quality supply	$Q_{sj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{sj}^z}{D_{sj}^z + k^z} \right) \right]$	H_j 为 j 类土地利用类型的生境适宜度; D_{sj} 为 j 类生境在栅格 x 处收到的威胁程度; z 是常数,默认值为 2.5; k 是半饱和系数,默认为 0.5。
休闲娱乐服务 Recreational recreation supply	$RS = \sum_{j=1}^n A_{ij} / A_i$	RS 为休闲娱乐服务量; A_{ij} 为 i 栅格中 j 类休闲娱乐用地面积; A_i 为 i 栅格面积。

其中,粮食供给中粮食产量来源于各县区统计年鉴;产水服务 Z 系数参考之前的相关研究^[32],并参考黄河水资源公报对系数进行修改确定;固碳服务参考 InVEST 模型推荐取值以及之前相关研究^[33-34] 确定不同地类的碳库参数;生境质量服务参考前人的研究^[35-36] 设置威胁源的权重以及敏感度。

根据定义生态系统服务只是一种服务,如果没有人类受益者,生态系统功能和过程就不能形成真正意义上的服务^[37],因此对需求的评估在整个生态系统服务研究中愈发的重要。本研究对黄河流域生态系统服务需求的评估方法如(表 3)所示:

表 3 生态系统服务需求计算方法

Table 3 Calculation methods of ecosystem service demand

生态系统服务需求 Ecosystem service demand	计算公式 Calculation formula	变量解释 Variable interpretation
粮食服务 Grain production demand	$FD = F_{\text{pcfc}} \times P_{\text{pop}}$	FD 为食品需求量; F_{pcfc} 为人均食物需求量; P_{pop} 为人口密度
产水服务 Water yield demand	$WD = D_{\text{pcwc}} \times P_{\text{pop}}$	WD 为水资源需求量; D_{pcwc} 为人均耗水量; P_{pop} 为人口密度
固碳服务 Carbon sequestration demand	$D_c = D_{\text{cp}} \times P_{\text{pop}}$	D_c 为固碳服务需求量; D_{cp} 为人均碳排放量; P_{pop} 为人口密度
土壤保持服务 Soil conservation demand	$USLE = R \times K \times LS \times C \times P$	R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可侵蚀性因子; L 坡长系数; S 为坡度系数
生境质量服务 Habitat quality demand	$QD = Q_{\text{sj}}$	QD 为生境质量服务需求; $\bar{Q}_{\text{sj}}$ 为生境质量的平均 水平
休闲娱乐服务 Recreational recreation demand	$RD = R \times P_{\text{pop}}$	RD 为休闲娱乐服务需求; R 为每人休闲游憩用 地标准面积; P_{pop} 为人口密度

其中人均食物需求量参考《中国经济简报》中 2020 年中国人均粮食消费量;人均耗水量参考《中国水资源公报》全国人均用水量;人均碳排放量来源于 Our World in Data (<https://ourworldindata.org/>);本研究假设生境质量的平均水平代表了对这种生态系统服务的需求^[38];每人休闲游憩用地标准面积参考以往研究^[39]。

为消除供需量纲影响,对原始供给量和需求量进行极差标准化处理,公式如下(式 1):

$$X = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

式中, X 为标准化后的生态系统服务供给量或需求量; x_i 为第 i 个网格供给量或需求量; $x_{\max}$ 为研究区最大值; $x_{\min}$ 为研究区最小值。

2.2 基于需求层次理论的综合生态系统服务供需评估

人类对不同类型的生态系统服务需求具有差异性和层次性,因而对生态系统服务管理研究时需要考虑生态系统服务的层次差异。根据马斯洛需求层次理论,为人类生存提供基本资源并维持基本生活环境以支持人类生理需求的服务应该是最基础的;维护生态系统稳定性和可持续性以满足其自身生命和安全需求的服务等级应为第二层次;改善生活环境和促进人类福祉的生态系统服务应处于第三层次;可以增进人际交往和社会认同感的服务应该处于第四层次;能够促进个人成长和价值实现的服务可以认为是第五层次。因此,根据需求层次理论和生态系统服务类型,生态系统服务可从低到高分五个层次,如(图 2)所示:

本研究根据需求层次理论将选取的六类生态系统服务划分为不同层次:产水、粮食生产作为支持人类生存最基础生理需求的生态系统服务,划为第一层;土壤保持、固碳、生境质量作为维护人类生存安全需要的生态系统服务,划为第二层;休闲娱乐则作为满足人类精神文化社会需求的生态系统服务,划为第四层。根据生态系统服务所在的层次,赋予权重进行综合生态系统服务供给与需求评估,计算公式如下(式 2、式 3):

$$TES_s = \sum_{i=1}^j (6 - L_i) \times ES_{ip} \quad (2)$$

$$TES_d = \sum_{i=1}^j (6 - L_i) \times ES_{id} \quad (3)$$

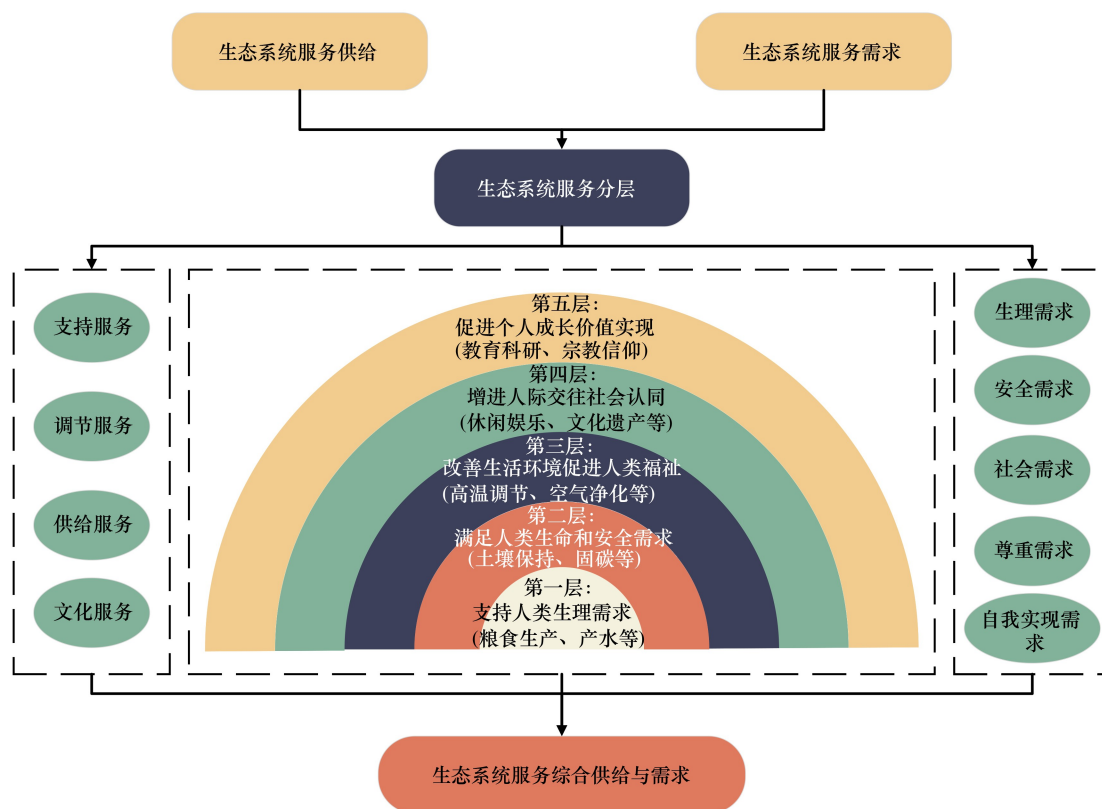


图2 需求层次理论

Fig.2 Hierarchy of needs theory

式中, TES_s 和 TES_d 分别指区域内生态系统服务的综合供给与需求, L_i 是生态系统服务所在层次, ES_{ip} 为第 i 种的生态系统服务供给, ES_{id} 为第 i 种的生态系统服务需求。

2.3 生态系统服务供需象限划分

基于上述生态系统服务供给、需求核算方法, 对结合层次需求理论测算出的综合生态系统服务供给与需求进行 z-score 标准化, 方法如下(式 4、式 5、式 6):

$$x = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad (4)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

式中, X 为评价单元标准化后的生态系统服务供给量、需求量, x_i 为第 i 个评价单元的生态系统服务供给量、需求量, $\bar{x}$ 为研究区黄河流域平均值, s 为研究区标准差, n 为评价单元的总数。以标准化后的生态系统服务供给量表征 x 轴, 以标准化后的生态系统服务需求量表征 y 轴, 划分出四个象限: 象限 I 低供给-高需求 ($x < 0, y > 0$)、象限 II 高供给-高需求 ($x > 0, y > 0$)、象限 III 低供给-低需求 ($x < 0, y < 0$)、象限 IV 高供给-低需求 ($x > 0, y < 0$)^[7]。

2.4 生态管理分区

基于需求层次理论得到综合生态系统服务供给与需求并进行标准化处理, 进而构建生态系统服务供需协调指数, 评价生态系统的可持续性, 方法如下(式 7、式 8、式 9)。

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (7)$$

$$C = \sqrt{\frac{P_s \times P_d}{[(P_s \times P_d) / 2]^2}} \quad (8)$$

$$T = \alpha P_s \times \beta P_d \quad (9)$$

式中, D 为协调度, D 值越大表明该地区生态系统服务供给与需求协调性越好; C 为耦合度; T 为综合指数; P_s 表示归一化后供给, P_d 表示归一化后需求; α 、 β 为供给与需求的权重系数,本研究设定生态系统服务供需同等重要, $\alpha=\beta=0.5$,并按自然断点法将黄河流域生态系统服务供需协调度划分为5个等级。最后,对研究区生态系统服务供需匹配与协调关系进行结合分析,并参考区域现状,划定黄河流域生态管理分区。

3 结果分析

3.1 生态系统服务供需分析

黄河流域生态系统服务供给具有显著的空间异质性,产水服务、固碳服务、生境质量服务、土壤保持服务、休闲娱乐服务的供给能力整体上都呈现南高北低,西高东低的趋势(图3)。从地形地域方面看,黄河流域西起星宿海,南临秦岭,这些区域植被覆盖率高,人口分布较少,生态环境较好,因此在生态系统服务供给能力上相对较强。而黄河流域北部是黄土高原的戈壁荒漠,自然资源匮乏;东部的华北平原人口密度大,人类活动频繁,侵扰破坏自然生态,因而生态系统服务的供给能力偏弱。但粮食供给服务的强弱则是根据黄河流域内部平原分布而变化的,供给能力强的区域分布在黄河中下游的华北平原、关中平原、河套平原,这些区域地势平坦土地肥沃,土地利用多为耕地,粮食产量高。但正是由于这些区域地势平坦,耕地、建设用地面积广,人口密度大,人类活动频繁,因而土壤保持量相对较少,休闲娱乐用地占比少,休闲娱乐服务供给能力较低。同时产业密集,

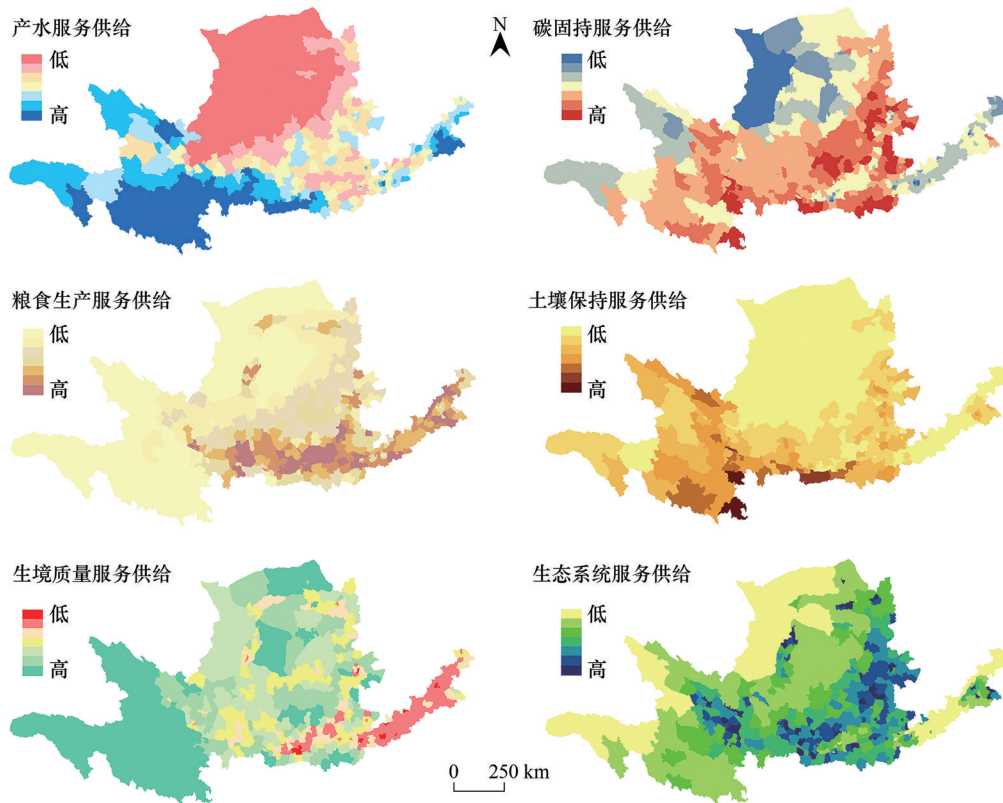


图3 黄河流域生态系统服务供给空间分布

Fig.3 Spatial distribution map of ecosystem service supply in the Yellow River Basin

植被覆盖率低,固碳能力也较弱。相对的生态环境受侵扰面积较大,生境质量服务供给能力也相对较弱。

总的来看,产水服务供给与土壤保持服务供给分布相似,在黄河河源以及祁连山脉、秦岭山脉、泰山山脉等降雨充沛、植被覆盖度高、固水能力强的区域是高值,在黄土高原荒漠戈壁植被覆盖少,不利于储存水源且降雨较稀少的地区为低值区。粮食供给服务和生境质量服务的分布都与人口分布密切相关,且两种服务存在明显的空间负相关。粮食供给服务的高值区是在地势平坦适宜人类居住的平原区域,因而人口密度高,环境受人类活动侵扰也使得这些区域为生境质量服务供给的低值区。固碳服务与休闲娱乐服务的高值区都分布在黄河流域内的山西、陕西、陇东地区,这里多山地丘陵,植被茂盛,不仅区域的固碳能力强,同时由于多山多绿地旅游资源丰富,休闲娱乐服务供给能力也高。

从需求角度看,人口密度直接决定了黄河流域生态系统服务需求在空间上的分布(图4)。生态系统服务需求高值区都分布在在黄河中下游的华北平原、关中平原、河套平原这些人口密集区域。这些区域城镇化程度高,人口密度大,对水、粮食、休闲娱乐需求量很大。并且,上述区域各类产业分布密集,经济发达,资源消耗多,高能耗使得这些区域碳排放压力大,对固碳服务的需求也很大。反观,需求的低值区都分布在剩余的人口稀少区域。土壤保持服务需求高值区主要集中在黄河流域南部,低值区主要集中在东部与北部。需求高值区域地形起伏大,土壤易受侵蚀,水土易产生流失,对土壤保持服务需求大。而低值区域地势较为平坦,土壤受侵蚀程度低,因此对土壤保持服务需求相对较小。对于生境质量服务的需求测算,到目前为止未能有过准确的衡量,因此本研究假设生境质量的平均水平代表了对这种生态系统服务的需求^[38]。经过测算得到黄河流域生境质量服务的需求为0.719798,相对较高。

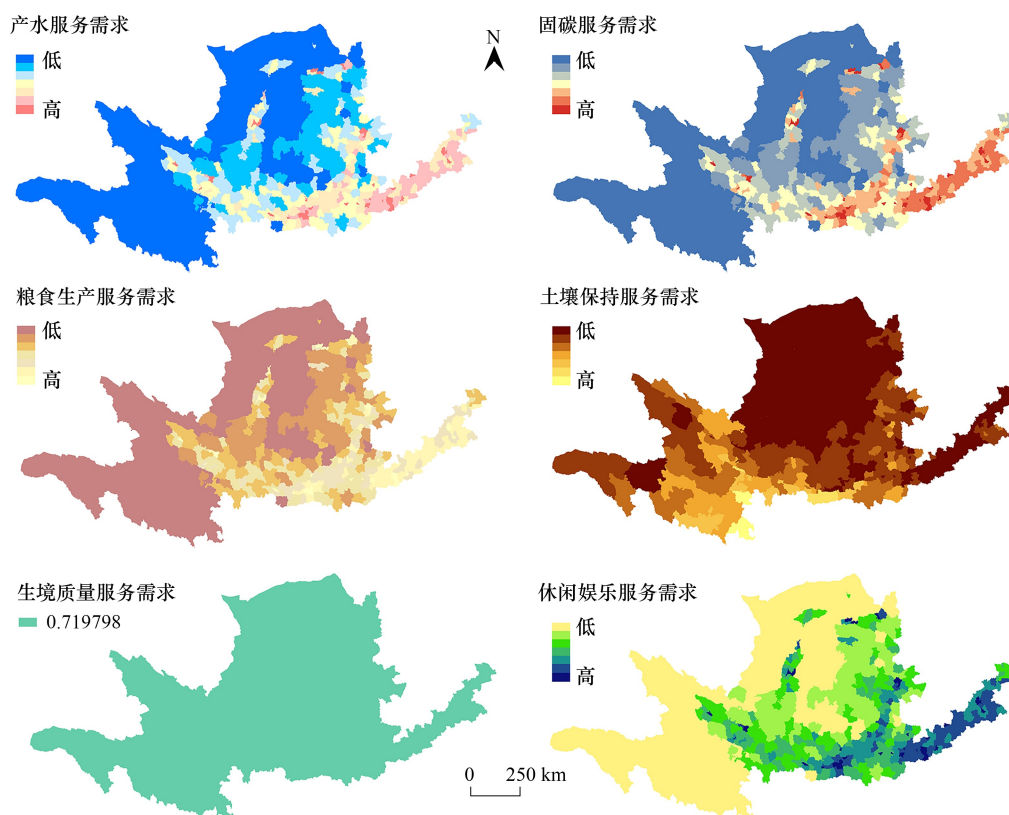


图4 黄河流域生态系统服务需求空间分布

Fig.4 Spatial distribution map of ecosystem service demand in the Yellow River Basin

3.2 综合生态系统服务供给和需求

综合生态系统服务供给和需求存在显著的空间负相关性(图5)。综合生态系统服务供给高值区主要分

布在黄河流域南部,尤其是在龙羊峡水库以上涉及青海、四川、甘肃三省的黄河河源谷地地区,这里多系山岭及草地属于青藏高原,植被覆盖率高,生物种类丰富,生态本底好。其次是在太行山脉陕西、山西、河南段,以及秦岭山脉甘肃、陕西段,这里生态本底相对较好,生态系统服务供给能力相对较好。而供给低值区主要分布在黄河流域北部以及黄河流域下游河南、山东段。黄河流域北部内蒙段,地处黄土高原,流经腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、库布齐沙漠、毛乌素沙漠,生态本底薄弱,生态系统服务供给能力低。而黄河流域下游河南、山东段,人口密集,人类活动较为频繁,对生态环境影响较大,生态本底相对较差,生态系统服务供给能力相对较弱。郑州、西安、济南等地区核心城市,人口密度高、经济活动强,是综合需求最高的地区。随着城市的外延,尽管人口密度也随之降低,但广大的平原地区的需求强度也要高于西部的山地和北部的草地、戈壁。综合生态系统服务供给和需求受人口密度、环境条件等因素的直接影响。

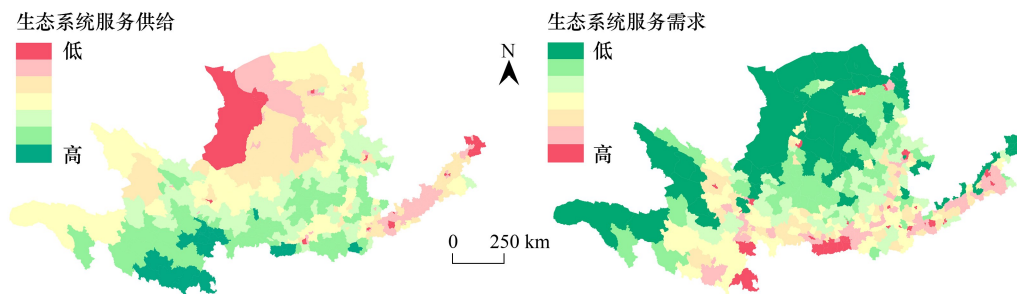


图5 黄河流域生态系统服务综合供需空间分布

Fig.5 Spatial distribution of comprehensive supply and demand of ecosystem services in the Yellow River Basin

不同层级的生态系统服务供需在综合供需结果上表现不尽相同,例如综合生态系统服务供给的高值区集中在黄河流域南部河源谷底地区,但该区域固碳、粮食生产、休闲娱乐供给量并不高,只有产水服务、生境质量服务的供给高值区集中在此区域;同样在综合生态系统服务供给中为中高值区域的泰山地区,固碳服务、土壤保持服务、生境质量服务、休闲娱乐服务供给均为中低值,只有产水服务、粮食生产服务的供给为高值;在综合生态系统服务需求中,青海、四川地区出现了高值区,但在不同类型生态系统服务需求中,只有土壤保持服务需求在此区域出现高值区。究其原因,根据层次需求理论,人类只有在先满足自身最基本的生理需求后才会去渴望实现更高层次的需求。而产水服务和粮食生产服务就是属于最基础的维持人类生存支持人类生理需求的服务,因此对综合生态系统服务供需的影响相对较大,同时不同层级不同类型的生态系统服务供需相互影响,也是导致这种结果的原因。结果更加明显的说明了,根据需求层次理论得到的综合生态系统服务供需,并不是简单叠加不同种类的生态系统服务供需,而是考虑了人类对不同生态系统服务供需有不同层次的需求。从人类需求角度出发,可以使综合生态系统服务供需的结果更加科学有效。

3.3 生态管理分区

基于综合生态系统服务供给和需求,根据需求层次理论,采用四象限法得出黄河流域生态系统服务供需象限图(图6)。根据结果可知,低生态供给-高生态需求(象限I)、高生态供给-高生态需求(象限II)这两类组合关系的区县相对较少。大部分区县都处在低生态供给-低生态需求(象限III)、高生态供给-低生态需求(象限IV)这两类组合区间中。其中处于高生态供给-低生

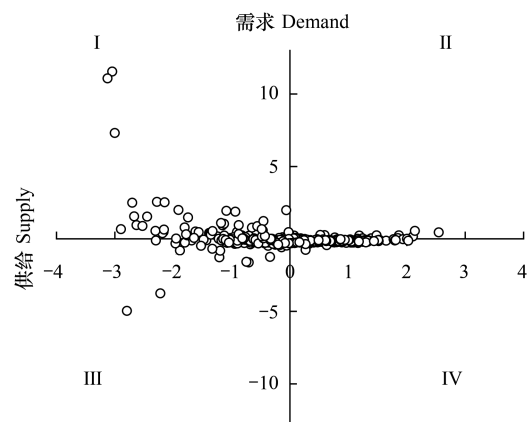


图6 黄河流域生态系统服务供需象限图

Fig.6 Quadrant diagram of ecosystem service supply and demand in the Yellow River Basin

态需求(象限Ⅳ)的区县最多,落在高生态供给-高生态需求(象限Ⅱ)的区县最少。

低生态本底-低生态需求(象限Ⅲ),包含 132 个区县,主要分布在黄河流域北部以及东部,北部整体上是内蒙古、宁夏、陕西北部一些区县组成,东部整体上是黄河流域下游河南、山东大部分区县组成。低生态供给-高生态需求(象限Ⅰ),包含 71 个区县,以点簇状分布,由黄河流域各省省会城市区县以及一些经济水平较高的地级市区县城区组成,土地利用类型多以建设用地为主。高生态供给-低生态需求(象限Ⅳ),包含 205 个区县,所占区县最多,整体上在黄河流域中部连接成片,包括黄河流域的河南西部部分区县,山西、陕西、甘肃、青海大部分区县以及宁夏南部部分区县等。高生态供给-高生态需求(象限Ⅱ),包含 20 个区县,所占区县较少,整体上集中分布在黄河流域南部(图 7)。

基于协调度模型,采用自然断点法将黄河流域生态系统服务供需协调状态分为五类(图 8),黄河流域生态系统服务供需协调关系整体上由南向北呈阶梯状递减。其中重度失调的区县分布在黄河流域北部的黄土高原地区、黄河河源部分地区以及黄河出海口部分地区,共 57 个区县;中度失调的区县大部分分布在陕西、宁夏、甘肃,共 100 个区县;基本协调的区县大都位于山西省境内以及黄河流域下游,共 145 个区县;低度协调的区县主要分布在黄河流域南部,在陕西、甘肃境内分布相对集中,共 108 个区县;中度协调的区县最少,主要分布在黄河流域南部,与低度协调的区县相邻,共 17 个区县。

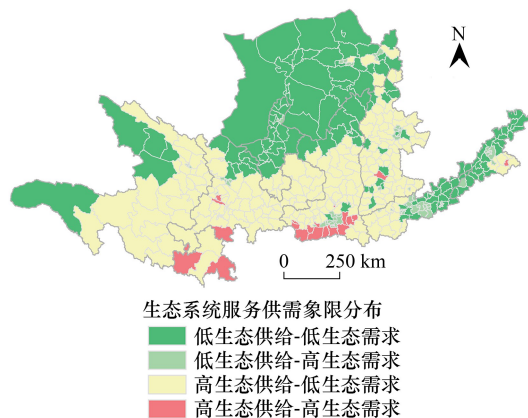


图 7 黄河流域生态系统服务供需象限空间分布图

Fig.7 Spatial distribution map of supply and demand quadrants of ecosystem services in the Yellow River Basin

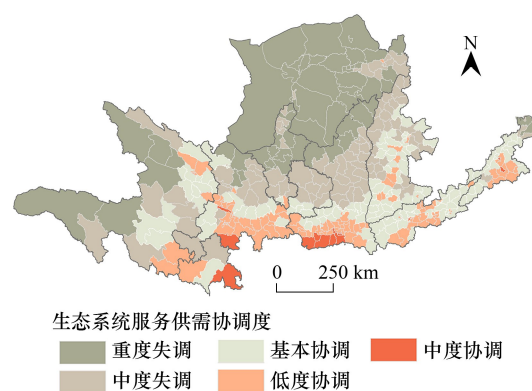


图 8 黄河流域生态系统服务供需协调度分布图

Fig.8 Distribution map of supply and demand coordination of ecosystem services in the Yellow River Basin

通过将黄河流域生态系统服务供需象限结果与生态系统服务供需协调度结果相耦合,可将黄河流域县域分为五种类型的生态管理分区(图 9):(A)生态潜力型分区:需要挖掘生态系统服务潜力,提高生态系统服务利用效率。(B)生态改善型分区:需要提高生态系统服务供给能力,改善生态环境质量。(C)生态保护型分区:需要加强生态保护和恢复,减少外来干扰。(D)生态调节型分区:需要在保护生态的同时促进社会经济发展。(E)生态协调型分区:需要平衡生态系统服务供需关系,协调经济社会发展和生态保护,如表 4 所示。

生态潜力型分区,包含 117 个区县,整体分布在黄河流域下游河南、山东,同时部分分布在关中平原,以及山西省境内。处于生态潜力型分区中的区县多是些以农业为主的区县,土地利用类型以耕地为主,自然资源供给能力有限,生态本底较差,区域内包含城镇较多,人

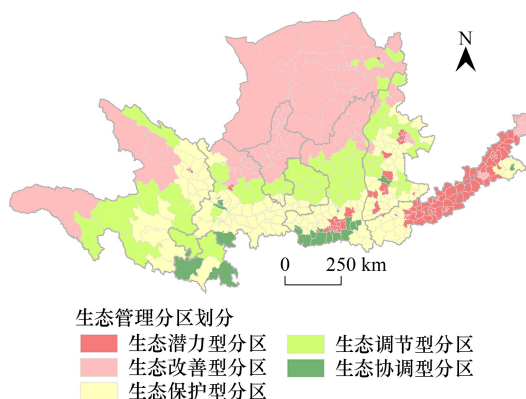


图 9 黄河流域生态系统服务管理分区

Fig.9 Zoning of ecosystem service management in the Yellow River Basin

口密度大,生态系统服务需求相对较高,但供需协调度相对协调。该分区中的区县,存在水污染严重,水环境胁迫性强,地下水资源超采严重,土壤沙化,生产力低,土地重用轻养等问题。因此,生态潜力分区中的区县应控制污染企业的发展,控制农药化肥使用量,适度利用地下水资源,保护农业生态环境。同时更多的考虑生态修复项目,挖掘生态系统服务潜力,提高生态系统服务利用效率,改善生态系统服务供给能力,优化产业结构,采取低影响开发方式,发展绿色农业经济。

表 4 黄河流域生态管理分区

Table 4 Ecological management zoning in the Yellow River Basin

生态管理分区 Ecological management zoning	供需匹配协调关系 Coordination of supply and demand	生态管理分区类型 Ecological management zoning of type
A	(低生态供给-高生态需求+基本协调、低度协调、中度协调)/(低生态供给-低生态需求+基本协调、低度协调)	生态潜力型分区
B	(低生态供给-高生态需求+中度失调、重度失调)/(低生态供给-低生态需求+重度失调、中度失调)	生态改善型分区
C	高生态供给-低生态需求+基本协调、低度协调	生态保护型分区
D	高生态供给-低生态需求+重度失调、中度失调	生态调节型分区
E	高生态供给-高生态需求+低度协调、中度协调	生态协调型分区

生态改善型分区,包含 86 个区县,整体分布在黄河流域北部,部分零星分布在黄河流域上游下游两端。生态改善型分区中的区县生态本底较差,尤其是处于黄土高原区域的区县,土地利用类型多是草地、沙地、戈壁、裸地,且人口密度较小,经济发展水平较低,供需协调度相对较差。该分区的区县,局部地区的草地退化和土地荒漠化现象已较为突出,水土流失加剧,生物多样性减少。因此生态改善型,应以缓解人地矛盾为目标,加快生态修复进程,增加绿化覆盖率,实行适度放牧并集约化经营产业,建立草原生物多样性保护区,保护生物资源和生态系统。严格控制建设用地的开发范围以及开发强度,严禁对生态用地的侵占,调整优化土地利于结构,增加区域的供给能力。同时政策和经济上增加对生态恢复与生态管理的投入,改善区域生态环境与经济发展不平衡问题。

生态保护型分区,包含 134 个区县,整体上这些区县多分布在祁连山脉、太行山脉、秦岭山脉等生态本底较好的区域,区域内土地利用类型多以草地、林地为主,而且建设用地占比较少。这些区域自然生态本底条件优越,有较大资源承载潜力,生态供给能力较高,同时人口压力相对较小,生态需求水平较低,生态系统服务供需相对协调。该区域应以保护生态完整性为主,尽量减小外部的干扰。因此应加强区域内自然保护区以及森林等原生生态系统的保护,实施严格的环境保护政策,提高生态系统的适应能力和恢复能力,加强对生态系统的检测。限制区域内产业活动对生态环境造成的影响,提高生态资源的效益和价值,加大生态补偿。合理利用区域内优渥的生态资源,开展生态农业、旅游业促进经济增长,强化生态资源推动经济发展的能力,推进绿色发展。

生态调节型分区,包含 71 个区县,整体分布在 400mm 等降水量线内,在黄河流域多呈点簇状分布,该分区中的区县,生态本底较好,生态需求较低,但生态系统供需协调度相对较差,供需关系相对紧张。因此,该分区应以保育和维护生态系统服务功能为主,提高森林水源涵养能力,并加强自然保护区建设,保护生物多样性和区域生态系统的稳定性,构建生物廊道加强生境连通性,防止植被退化、生物多样性减少。同时制定区域准入条件,积极发展林下经济与生态旅游业,调整农业产业结构,发展生态农业,积极引导乡村发展与生态旅游良性共生,以实现环境、社会、经济和生态效益的统一。

生态协调型分区,包含 20 个区县,该分区中涵盖区县相对较少,且主要分布在秦岭山脉陕西北域内。生态协调型分区中的区县有一定的林草地等生态用地覆盖,生态本底相对较好,且社会经济基础也较好,基本能满足社会经济发展的生态需求,供需关系相对协调。但需要注重协调生态保护与社会经济发展之间的矛盾,采取适度开发和保护相结合的方式,平衡生态系统服务的供需关系。控制开发强度,建立开发许可制度,对开发

活动的生态影响进行评估,确保不超过生态承载力,实行严格的生态保护措施,维护生态系统服务健康的供给能力。同时需调整产业结构和人口偏好以改变需求结构,促进生态系统服务向周边区域健康流动,加强对居民生态安全教育提高生态保护意识。借助良好的经济基础和技术手段鼓励发展生态友好型的产业,限制高污染高能耗的产业,促进生态环境与经济社会保护协调发展。

4 讨论

对生态系统服务的研究,最终落脚点在于改善人类生活,维护人类福祉。本研究从区域生态系统服务供给和需求关系着手,根据马斯洛需求层次理论,划分不同层次的生态系统服务,将人类对生态系统服务的需求融合进分区体系,为不同的生态系统服务赋予不同的权重测算综合供给与需求,相较之前仅通过简单叠加生态系统服务供需结果而言,结合需求层次理论所得到的综合供给与需求的结果,不再是简单的随单个生态系统服务供需的高低值而产生变化,而是以人类对不同类型生态服务需求的差异性而变化,同时也会受到不同类型生态系统服务所在层级的影响,这样更能体现综合供给和需求的现实性和科学性。以此结果结合利用四象限法与协调度模型划定黄河流域生态管理分区,遵循了人地和谐理念,兼顾了自然资源与人类社会的交互关系,为黄河流域生态管理提供了理论依据。对比以往仅以生态系统服务供给量、退化程度等结果为依据的传统生态分区,这种传统生态分区方式只考虑了自然生态因素,未能体现人类社会系统与自然生态系统的连通。而本研究从人类对生态系统服务需求程度出发,考虑人类对不同类型生态系统服务需求有不同的层次,以此为基础对黄河流域进行生态管理分区划分,这样的结果更加具有科学性和现实意义。

生态系统服务具有明显的尺度效应,不同尺度上有着不同效应,但生态管理的政策实施却都是在行政区内,以黄河流域内区县为基本研究单位,探究县域生态系统服务供需差异,将生态管理分区落到区县级行政区,有利于将后续生态管理责任落实到明确主体。与之前采用类似分区方法的研究相比较,利用四象限法与协调度模型,同时考虑研究区生态系统服务供需格局以及供需协调度对区域进行生态管理分区划分,更能体现分区结果的综合性。结果划定的生态管理分区与《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》中构建黄河流域生态保护“一带五区多点”的战略布局相辅相成,进一步验证了生态管理分区的合理性。同时未来可依据研究结果,对黄河流域不同分区,采取不同的保护管理措施或保护政策,如此更加具有针对性的管理措施或保护政策,也更加利于黄河流域自然资源的有序开发利用以及社会产业发展的合理配置,同时也为黄河流域生态保护及高质量发展提供了一种新的思路。

但由于受限于数据的可获取性,本研究对于表征生态系统服务供给与需求指标选取不够全面,可能无法全面的衡量流域内生态系统服务。同时本研究仅对黄河流域生态系统服务的供需状况进行分析,未能考虑到生态系统服务的流动,忽略了区县之间可能存在的供给与需求流动交互。因此未来可从生态系统服务流的角度进行探索。此外,生态系统服务供需空间上的不平衡会在一定程度上导致一系列环境正义问题,未来可以结合社会和环境不公维度,对生态系统服务供需进行分析评估,更加合理有效的解决自然资源与人类社会的矛盾。

5 结论

(1)2020 年黄河流域生态系统服务供需格局差异明显,其中产水服务供给分布为西南高东北低,粮食生产服务供给分布为东南高西北低,生境质量服务供给分布为由西向东递减,土壤保持服务供给能力由西南向东北递减,而固碳服务与休闲娱乐服务供给则是西北和东南低中部高。黄河流域生态系统服务需求分布则是与人口密度分布密切吻合,产水服务、粮食生产服务、固碳服务、休闲娱乐服务的需求空间格局相似,高值区沿黄河“几”字湾以及流域内平原分布。而土壤保持服务需求与地形关系密切,高值区地形起伏大,低值区地形平坦。

(2)结合需求层次理论,综合生态系统服务供需受到人类对不同类型生态系统服务需求的差异性和层次

性的影响。2020 年黄河流域综合生态系统服务供给和需求存在显著的空间负相关性,综合供给的高值区主要分布在植被覆盖率高,生物种类丰富,生态本底好,人类活动影响少的地区;综合需求的高值区主要集中在人口密度高、经济活动强的城市地区。综合生态系统服务供给和需求受人口密度、环境条件等因素的直接影响。

(3) 基于生态系统服务供给与需求,融入层次需求理论,利用四象限法与耦合协调度模型以黄河流域县域为基本研究单元,划定黄河流域生态管理分区。结果分为五大类型:A 生态潜力型分区,生态系统服务供需匹配关系与供需协调度的组合为:低供给高需求+基本协调、低度协调、中度协调;低供给低需求+基本协调、低度协调的区县,共 117 个区县,需要挖掘生态系统服务潜力,提高生态系统服务利用效率。B 生态改善型分区,生态系统服务供需匹配关系与供需协调度的组合为:低供给-高需求+中度失调、重度失调;低供给低需求+重度失调、中度失调的区县,共 86 个区县,生态环境质量有待改善,需要提高生态系统服务供给能力,改善生态环境质量。C 生态保护型分区,生态系统服务供需匹配关系与供需协调度的组合为:高供给低需求+基本协调、低度协调的区县,共 134 个区县,需要加强生态保护和恢复,减少外来干扰。D 生态调节型分区,生态系统服务供需匹配关系与供需协调度的组合为:高供给低需求+重度失调、中度失调的区县,共 71 个区县,需要维护生态环境,调整农业产业结构以实现环境、社会、经济和生态效益的统一。E 生态协调型分区,高供给高需求+低度协调、中度协调的区县,共 20 个区县,需要平衡生态系统服务供需关系,协调经济社会发展和生态保护。

参考文献 (References):

- [1] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: synthesis. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [2] 翟天林,王静,金志丰,祁元. 长江经济带生态系统服务供需格局变化与关联性分析. 生态学报, 2019, 39(15): 5414-5424.
- [3] 郑华,李屹峰,欧阳志云,罗跃初. 生态系统服务功能管理研究进展. 生态学报, 2013, 33(3): 702-710.
- [4] 熊昕莹,孟梅. 基于生态系统服务供需关系及空间流动的新疆生态管理分区与优化策略. 应用生态学报, 2023, 34(8): 2237-2248.
- [5] 傅伯杰,陈利顶,刘国华. 中国生态区划的目的、任务及特点. 生态学报, 1999, 19(5): 591-595.
- [6] 刘焯序,傅伯杰,王帅,赵文武. 从生物地理区划到生态功能区划——全球生态区划研究进展. 生态学报, 2017, 37(23): 7761-7768.
- [7] 彭建,杨旻,谢盼,刘焯序. 基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区. 生态学报, 2017, 37(13): 4562-4572.
- [8] 朱金峰,周艺,王世新,王丽涛,刘文亮,李海涛,梅军军. 白洋淀湿地生态功能评价及分区. 生态学报, 2020, 40(2): 459-472.
- [9] 管青春,郝晋珉,许月卿,任国平,康蕾. 基于生态系统服务供需关系的农业生态管理分区. 资源科学, 2019, 41(7): 1359-1373.
- [10] 刘春芳,乌亚汗,王川. 基于生态服务功能提升的高标准农田建设的分区方法. 农业工程学报, 2018, 34(15): 264-272, 313.
- [11] 李慧蕾,彭建,胡熠娜,武文欢. 基于生态系统服务簇的内蒙古自治区生态功能分区. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2657-2666.
- [12] Hou W Y, Hu T Z, Yang L P, Liu X C, Zheng X Y, Pan H Y, Zhang X H, Xiao S J, Deng S H. Matching ecosystem services supply and demand in China's urban agglomerations for multiple-scale management. Journal of Cleaner Production, 2023, 420: 138351.
- [13] 彭建,胡熠娜,吕慧玲,酆天昶,陈昕. 基于要素-结构-功能的生态功能分区——以大理白族自治州为例. 生态学杂志, 2016, 35(8): 2251-2259.
- [14] Zeng J, Cui X Y, Chen W X, Yao X W. Ecological management zoning based on the supply-demand relationship of ecosystem services in China. Applied Geography, 2023, 155: 102959.
- [15] 马世发,劳春华,江海燕. 基于生态安全格局理论的国土空间生态修复分区模拟——以粤港澳大湾区为例. 生态学报, 2021, 41(9): 3441-3448.
- [16] 谢丽霞,白永平,车磊,乔富伟,孙帅帅,杨雪获. 基于价值—风险的黄河上游生态功能区生态分区建设. 自然资源学报, 2021, 36(1): 196-207.
- [17] 朱月华,侯宗东,徐彩仙,巩杰. 基于生态系统服务供需关系的甘肃白龙江流域生态风险识别与管理. 地理科学, 2023, 43(3): 423-433.
- [18] 岳文泽,侯丽,夏皓轩,韦静娴,卢有朋. 基于生态系统服务供需平衡的宁夏固原生态修复分区与优化策略. 应用生态学报, 2022, 33(1): 149-158.
- [19] 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.
- [20] 吴蒙,车越,杨凯. 基于生态系统服务价值的城市土地空间分区优化研究——以上海市宝山区为例. 资源科学, 2013, 35(12):

- 2390-2396.
- [21] 毛祺, 彭建, 刘焱序, 武文欢, 赵明月, 王仰麟. 耦合 SOFM 与 SVM 的生态功能分区方法——以鄂尔多斯市为例. 地理学报, 2019, 74(3): 460-474.
- [22] 高俊刚, 吴雪, 张懿锂, 刘林山, 王兆锋, 姚治君. 基于等级层次分析法的金沙江下游地区生态功能分区. 生态学报, 2016, 36(1): 134-147.
- [23] Yin D Y, Yu H C, Shi Y Y, Zhao M Y, Zhang J, Li X S. Matching supply and demand for ecosystem services in the Yellow River Basin, China: a perspective of the water-energy-food nexus. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 384: 135469.
- [24] 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.
- [25] Burkhard B, Kandziora M, Hou Y, Müller F. Ecosystem service potentials, flows and demands-concepts for spatial localisation, indication and quantification. *Landscape Online*, 2014, 34: 1-32.
- [26] 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.
- [27] 肖玉, 谢高地, 鲁春霞, 徐洁. 基于供需关系的生态系统服务空间流动研究进展. 生态学报, 2016, 36(10): 3096-3102.
- [28] 马琳, 刘浩, 彭建, 吴健生. 生态系统服务供给和需求研究进展. 地理学报, 2017, 72(7): 1277-1289.
- [29] 曹继, 王丽, 曹卫东. 基于生态系统服务供需格局的生态管理分区研究——以南京都市圈为例. 资源开发与市场, 2022, 38(5): 520-528.
- [30] 刘琳轲, 梁流涛, 高攀, 范昌盛, 王宏豪, 王瀚. 黄河流域生态保护与高质量发展的耦合关系及交互响应. 自然资源学报, 2021, 36(1): 176-195.
- [31] 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.
- [32] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于 InVEST 模型的黄河流域产水量时空变化及其对降水和土地利用变化的响应. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2731-2739.
- [33] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于 InVEST 和 CA-Markov 模型的黄河流域碳储量时空变化研究. 中国生态农业学报: 中英文, 2021, 29(6): 1018-1029.
- [34] 邓元杰, 姚顺波, 侯孟阳, 张童越, 鲁亚楠, 龚直文, 王怡菲. 退耕还林还草工程对生态系统碳储存服务的影响——以黄土高原丘陵沟壑区子长县为例. 自然资源学报, 2020, 35(4): 826-844.
- [35] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 黄河流域生境质量时空演变及其影响因素. 中国沙漠, 2021, 41(4): 12-22.
- [36] 包玉斌, 刘康, 李婷, 胡胜. 基于 InVEST 模型的土地利用变化对生境的影响——以陕西省黄河湿地自然保护区为例. 干旱区研究, 2015, 32(3): 622-629.
- [37] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17-29.
- [38] Shi Y S, Shi D H, Zhou L L, Fang R. Identification of ecosystem services supply and demand areas and simulation of ecosystem service flows in Shanghai. *Ecological Indicators*, 2020, 115: 106418.
- [39] 陶芹, 陶宇, 欧维新. 长三角地区休闲游憩服务供需关系研究. 生态学报, 2021, 41(5): 1777-1785.