李大强,张飞云,周红涛,等.基于生态系统服务供需的新疆天山北坡城市群生态安全格局构建 [J]. 中国环境科学, 2025,45(8):4706-4714.
Li D Q, Zhang F Y, Zhou H T, et al. Construction of ecological security pattern of urban agglomeration in the northern slope of Tianshan, Xinjiang based on the supply and demand of ecosystem services [J]. China Environmental Science, 2025,45(8):4706-4714.

基于生态系统服务供需的新疆天山北坡城市群生态安全格局构建

李大强[1],张飞云[1*],周红涛[1],马丽娜[1],李 倩[2,3,4] (1.新疆农业大学公共管理学院,新疆 乌鲁木齐 830052；2.中国科学院新疆生态与地理研究所,新疆 乌鲁木齐 830011；3.新疆干旱区水循环与水利用重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830011；4.天山积雪雪崩新疆野外科学观测研究所,新疆 新源 835800)

摘要：以新疆天山北坡城市群为研究区域,使用 InVEST 模型,ArcGIS 软件和最小阻力(MCR)模型等方法,对该区域生态系统服务供需现状进行分析.依据供需的匹配度和耦合协调度,对生态安全格局进行构建.结果表明:生态系统服务供需呈现显著的空间分布不均,山地和绿洲地带成为生态系统服务的核心输出区,人口高度集中的市中心则成为生态系统服务需求的集中区域.6000m 网格尺度上生态系统服务供需平衡的信息熵和变异系数值分别达到了 1.48 和 0.41;乡镇尺度上分别为 1.44 和 0.43.由综合生态系统服务供需比共同确定 946 个生态源地,面积达 10003.70km^2,在城市群中西部地区分布密集;生态廊道共 2291 条,长约 22191.89km,呈网状分布;生态节点共 151 个,障碍点共 2082km^2,主要分布于各城市中心以外的区域.对该区域内 723 个乡镇及街道依据乡镇尺度的生态系统服务供需关系进行分类,共划分出 24 个生态协调区,55 个生态保育区,48 个生态改良区,176 个生态控制区和 420 个生态修复区.其中,生态修复区需优先缓解生态压力,实施退耕还林和湿地恢复等生态修复工程.

关键词：生态系统服务供给与需求；生态管理分区；生态安全格局；天山北坡城市群
中图分类号：X321 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)08-4706-09

Construction of ecological security pattern of urban agglomeration in the northern slope of Tianshan, Xinjiang based on the supply and demand of ecosystem services. LI Da-qiang[1], ZHANG Fei-yun[1*], ZHOU Hong-tao[1], MA Li-na[1], LI Qian[2,3,4], (1.School of Public Administration, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China；2.Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China；3.Xinjiang Key Laboratory of Water Cycle and Water Utilization in Arid Regions, Urumqi 830011, Xinjiang, China；4.Xinjiang Field Scientific Observation Institute of Tianshan Snow Avalanche, Xinyuan, Xinjiang 835800, China). *China Environmental Science*, 2025,45(8)：4706~4714

Abstract：This study takes the urban agglomeration on the northern slope of the Tianshan in Xinjiang as the research area. The ecosystem service supply and demand were analyzed through the InVEST model, ArcGIS software, and the Minimum Cumulative Resistance (MCR) model. The ecological security pattern were built according to the matching degree and coupling coordination of ecosystem service supply and demand. The results indicated that the ecosystem service supply and demand exhibited significant spatial heterogeneity. The mountainous and oases were the core output areas of ecosystem services, while the downtown areas with a highly concentrated population were the concentrated demand areas of ecosystem services. The information entropy and variation coefficient of ecosystem services were 1.48 and 0.41, respectively in 6,000m grid scale, and 1.44 and 0.43, respectively in town scale. 946 ecological sources with 10,003.70km^2 were confirmed by the comprehensive ecosystem service supply and demand ratio which were distributed in the central and western parts of urban agglomerations. 2,291 ecological corridors with a length of 22,191.89km were distributed as a net. 151 ecological nodes and 2,082km^2 obstacle points were distributed outside the urban center. 24 ecological coordination areas, 55 ecological conservation areas, 48 ecological improvement areas, 176 ecological control areas and 420 ecological restoration areas were classified through the ecosystem service supply and demand relationship in town scale. Ecological restoration projects, such as returning farmland to forests and restoring wetlands, should be prioritized in ecological restoration zones to alleviate ecological pressure.

Key words：ecosystem services supply and demand；ecological management zoning；ecological security pattern；urban agglomeration in the northern slope of the Tianshan

收稿日期：2025-01-02
基金项目：新疆干旱区水循环与水利用重点实验室基金(XJYS0907-2023-06)

* 责任作者, 副教授, feiyun42265@126.com

生态安全格局作为协调区域发展与生态保护的空间解决方案,为维持生态系统稳定性、优化资源配置提供了科学基础[1-2];快速城市化导致生态系统服务供需失衡,而生态安全格局的构建正是缓解此类冲突,实现区域可持续发展的关键途径[3];生态安全格局的构建依赖生态系统服务评估[4-5],需结合多尺度数据与模型进行动态模拟[5].因此,基于生态系统服务的生态安全格局构建成为推动区域可持续发展的核心路径[6].

生态安全格局是基于生态系统关键空间单元的优化配置,旨在通过空间管控维持生态稳定性并支撑区域可持续发展[7].现阶段,构建生态安全格局所遵循的典型范式主要包括:确定“源地-阻力面-廊道”的步骤[8-9].其中,源地识别是格局构建的基础,其准确性直接决定生态保护的有效性.传统研究多依据生态系统服务供给能力划定源地[10],但忽略了生态系统服务的需求,可能导致保护与实际需求脱节[11].这种供需错配可能导致生态保护低效.因此,引入需求分析可优化源地选择,确保生态安全格局与区域发展需求协同[12].近年来,生态系统服务供需匹配研究已成为生态安全格局构建的重要方向[13].相关学者通过识别高需求-高供给区域作为生态源地,推动了供需平衡导向的生态安全格局优化研究[14-15].然而,这些研究未能充分考虑行政边界对生态连通性的制约作用;忽视了生态系统服务的动态变化特征,也未能有效考虑当地生态环境特征.在当前研究框架下,针对基于生态系统服务供需构建生态安全格局的方法仍有改进的余地.有些研究仅聚焦于生态系统服务的对应衔接[16-17],却未充分考虑供需之间的互动与协同性.观察不同规模下的效益,大部分研究仅限于在单一维度上分析生态系统服务的供给与需求之间的联系,以确定源地的位置[17-19],对多维度供需关系的空间效能及其对源地定位影响的探讨尚显不足.鉴于此,如何协调生态系统服务的供需关系、明晰协同发展状态以及不同尺度下各服务的空间效能,成为构建生态安全格局的紧迫研究课题.

天山北坡城市群位于新疆天山北部,作为区域经济的重要支柱,存在区域发展与生态保护的双重问题.该城市群位于“三北”生态防护工程的西侧,构成了我国生态修复与保护的“三区四带”战略布局的关键一环.鉴于此,本研究针对新疆地区的特殊地理环境,选取了具有代表性的 4 种生态系统服务类型:产水服务、碳储存服务、粮食生产服务和生境质量服务.通过运用 InVEST 模型、ArcGIS 软件以及最小阻力路径模型等多种方法进行分析.目标是通过全面评估各类生态系统服务的供给与需求状况,探究不同规模下供需之间的动态变化规律,从而确定构筑生态安全格局的的最优尺度,进行生态管理分区,构建该区域的生态安全格局,以期为天山北坡城市群的生态保护与可持续发展提供科学依据,同时也为其他类似地区的生态安全格局研究提供参考.

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

天山北坡城市群是我国西北第二大城市群,包括乌鲁木齐市、昌吉市、石河子市、奎屯市、乌苏市等9个市(县),位于新疆天山北坡中段,南北地势平坦,属于干旱气候,光照充足,雨量稀少;研究区面积共 193990.23km^2,仅占全疆 12.12%,覆盖了新疆 9 个市(州),包括 723 个乡镇与街道.作为新疆政治经济中心,2020 年人口达 891.96 万人,占全疆 33.82%;GDP 达 75.14×10^6 万元,占全疆 50.48%.《新疆维吾尔自治区国土空间规划(2021—2035 年)》明确提出建设新疆生态、经济和社会的更可持续发展目标,缓解天山北坡城市群区域发展对环境资源需求的增长与自然资源保护和可持续发展之间的矛盾迫在眉睫.

1.2　研究思路与数据来源

水资源短缺是天山北坡城市群面临的严峻问题,是区域经济发展的主要限制因素,选择产水量服务评估有助于从生态系统服务供需角度了解城市群水资源状况.研究区是新疆重要的发展经济带,其经济发展所带来的碳排放量较多,导致生态环境质量日益下降,陆地生态系统碳储存是降低大气 CO_2 含量的重要路径,研究碳储存对实现碳平衡发挥着重要作用.粮食供给服务是区域人类生存发展的基础,充足的粮食供给利于维护区域粮食安全,一定程度上还可以改善生态环境.生境质量是衡量区域生态环境状况的评价指标之一,合理确定生境质量可反映区域生态格局.综上,本研究选取产水量服务、碳储存服务、粮食供给服务和生境质量服务,探讨生

态系统服务的供需现状及其效能.通过不同层面的分析,探究生态系统服务供需比与匹配度的动态变化规律,剖析尺度效应在供需关系中的作用,进而确定构建生态安全格局的最优尺度.基于生态系统服务的供需平衡、相互作用与协调程度,划分建立生态“源地-阻力面-廊道-节点-障碍点”以及生态管理分区,建设生态安全格局.

本研究所涉及基础数据年份均为 2020 年,具体包括:土地利用数据、植被归一化指数、年降水量、高程数据、人口密度、国内生产总值、碳排放、潜在蒸散发、道路网络、各标准用水量、以及夜间灯光数据等,其中,除国内生产总值、碳排放和各标准用水量为矢量数据,其余为栅格数据,具体数据信息如表 1 所示.

表 1 研究数据及来源

Table 1 Research data and sources

数据名称	空间分辨率	数据用途	数据来源
土地利用/覆盖数据	30m	生态系统服务供给评估、构建阻力面	资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
归一化植被指数	250m	粮食生产供给评估	资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
年降水量数据	1km	产水量供给评估	国家地球系统科学数据中心(https://www.geodata.cn)
国内生产总值	县级行政区		研究年份新疆各市县统计年鉴
人口密度数据	1km	粮食生产、碳储存、产水量需求量评估	全球人口动态数据(https://landscan.ornl.gov/)
数字高程模型	30m		地理空间数据云(https://www.gscloud.cn)
潜在蒸散发数据	1km	产水量供给评估	国家地球系统科学数据中心(https://www.geodata.cn)
道路网络数据	90m	生境质量供需评估	openstreetmap 平台(https://www.openstreetmap.org/)
二氧化碳排放量数据	县级行政区	碳储存需求评估	多尺度排放清单模型平台(http://meicomdel.org.cn)
夜间灯光数据	1km	构建阻力面	资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
各标准用水量	县级行政区	产水量供给评估	2020 年新疆各市县统计年鉴与水资源公报

1.3 生态系统服务供需评估

在天山北坡的城市群中,针对综合生态系统服务的供需状况,生态系统服务的供需结果评估指标和计算方式参考相关文献[9-12,15],本研究将产水量、碳储存、粮食生产和生境质量四项关键服务按照均等权重进行叠加分析.由于本研究关注四种服务的综合贡献且缺乏明确优先级依据,故采用均等权重进行整合分析.标准化方法采用极差法,以消除量纲差异,确保各服务对综合指标贡献一致.

$$\mathrm{CES}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}S_i \tag{1}$$

$$\mathrm{CED}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}D_i \tag{2}$$

式中: CES 和 CED 分别指代综合生态系统服务的供给量与需求量;在此研究中,服务的种类数 n 被设定为 4;S_i 表示第 i 类生态系统服务供给的标准化数值;而 D_i 代表第 i 类服务的需求标准化数值,对所有服务的供需进行无量纲化操作.

1.4 生态系统服务供需分析

为深入剖析生态系统服务的供需状况,本研究引入生态系统服务供需比(ESDR)均值作为衡量综合供需匹配度的指标,其具体计算方法阐述如下:

$$\mathrm{ESDR}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\mathrm{ESDR}_i \tag{3}$$

$$\mathrm{ESDR}_i=\frac{S_i-D_i}{\left(S_{i,\max}+D_{i,\max}\right)/2} \tag{4}$$

式中: ESDR 指的是合并后的生态系统服务供需比;而 ESDR_i 则代表第 i 类服务的供需比;S_i 的最大值用 $S_{i,\max}$ 表示;D_i 的最大值则用 $D_{i,\max}$ 来标识.为区分供需赤字和盈余情况,耦合协调度模型(CCD)反映系统协调发展状况,广泛应用于经济、社会、环境和生态等领域以衡量系统间的相互作用[20].本研究使用 CCD 模型来凸显生态系统服务供需系统之间的相互作用与协调发展状况[21],计算方式如下:

$$\mathrm{CCD}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\mathrm{CCD}_i \tag{5}$$

$$\mathrm{CCD}_i=\sqrt{C_i\times Q_i} \tag{6}$$

$$C_i=2\sqrt{(S_i\times D_i)/(S_i+D_i)^2} \tag{7}$$

$$Q_i=\frac{\left(S_i+D_i\right)}{2} \tag{8}$$

式中: CCD 代表多种服务综合协调程度,而 CCD_i 指的是第 i 类服务的供需匹配协调程度,该值介于 0~1

之间;C_i 表示协调系数;Q_i 则是指综合服务的供需评估指标;假设 S_i 和 D_i 的贡献相同,权重系数均为 1/2.

深入揭示生态系统服务供需的尺度效应,对平衡供需具有重要的作用[24-25].基于研究区的行政范围以及不同空间分辨率的计算效率,本项研究对 5 个不同尺寸的格网单元(间隔 2000m,范围介于 2000~10000m)以及三种行政级别尺度(涵盖流域、市县及乡镇层面)的生态系统供需状况进行分析,以寻找最优尺度构建生态安全格局.

1.5　生态安全格局构建

1.5.1　生态源地识别　关键生态斑块的生态功能至关重要,它需要拥有充足的生态支持力,同时也要适应人类多方面的需求[26-27].本项研究将综合生态系统服务的高输出区域与供需平衡富余的区域进行叠加,确定生态源地.

1.5.2　构建阻力面和生态廊道提取　本研究以土地利用分类为基础,借助夜间灯光数据,对阻力系数进行修正.具体的计算方法如下所述:

$$R_i = \frac{NL_i}{NL_a} \tag{9}$$

式中:R_i 代表调整完毕的阻力系数;NL_i 指代栅格单元 i 的夜间灯光数值;而 NL_a 则表示栅格单元 i 所归属的土地利用类型 a 的夜间灯光均值.

生态廊道是生态系统中连接斑块、促物种及物质能量流通以保顺利流通的线性/带状区域,本研究基于最小阻力模型(MCR),运用 Linkage Mapper 3.0 模型工具进行提取.

1.5.3　生态节点与障碍点识别　在生态安全格局中,生态节点是电流密集的核心地带,对保持生态系统的连贯性至关重要,同时在生态防护方面也扮演着不可或缺的角色.本研究采用 Pinchpoint Mapper 方法来定位生态节点,并通过自然断点法分为五个不同的级别,选取高电阻与低电阻通道交界的节点被划为一级节点,而其他的则被归类为二级节点.

生态障碍点阻碍生态源地物质/能量流通、功能及连通性,其效果可由源地状况反映[28]基于电路理论模型,运用 Barrier Mapper 针对 1000~10000m 的范围,通过自然断点法每隔 3000m 进行一次提取分析,通过自然断点法将障碍点结果[2.85~4.55]和[4.55~7.33]的范围分别设置为优先整治的二级和一级障碍点.

1.5.4　生态管理分区　合理的生态管理分区划分对于提升生态安全架构、推动生态文明的构建至关重要[29],它能促进生态系统的精确维护与资源的科学运用[30].生态系统服务的失衡程度与保护的紧迫性存在正相关联系[31],本研究根据生态系统服务供需原理和可持续性理论,针对天山北坡显著的山地-绿洲-荒漠交错带特征,参考《生态功能区划技术规范》(HJ 1133−2020)中“基于生态系统服务供需关系的分区方法”,进行生态管理分区.具体分区见表 2.

表 2　生态管理分区方法

Table 2　Ecological management zoning approach

生态管理分区	生态系统服务供需协调失调状况	生态系统服务供需盈余赤字状况
生态协调区	基本协调、中度协调和高度协调	中度盈余和高度盈余
生态保育区	中度失调和高度失调	
生态改良区	基本协调、中度协调和高度协调	供需平衡
生态控制区	基本协调、中度协调和高度协调	供需赤字
生态修复区	中度失调和高度失调	

2　结果与分析

2.1　生态系统服务供给与需求状况

在天山北坡的城市群中,各类生态系统所提供的服务及其需求之间存在明显的空间分布不均现象(图 1).产水供给服务(SWY)高供给区主要位于海拔 4000m 以上的天山山地区域.碳储存(SCS)主要分布在研究区北部、南部及中心地带,林地、农田和草原是的主要提供者,SCS 空间分布与耕地、草地分布规律基本一.粮食生产(SFD)供给的高值区主要集中在城市周边土地资源丰富、耕作面积辽阔的地带,其空间分布与 SCS 的高供给区分布基本一致,平均粮食产量为 61.91t/km^2.生境质量(SHQ)高值区主要位于研究区中部海拔 3000m 以上的山地区域,主要土地类型为林地和草地.生态系统服务总供给(CES)中,较高及以上服务水平的区域占比达到了 19.14%,主要集中在塔城南端、克拉玛依地区、石河子区域、五家渠地区、昌吉中段及南端,还有乌鲁木齐南部.这些区域为天山北坡城市群的生态安全架构提供了坚实的自然保障.

从生态系统服务需求视角出发,产水量需求(DWR)、碳储存需求(DCS)以及粮食生产需求(DFD)的空间分布模式大体一致(图 1),高需求区主要集中

在人口密集、人类活动频繁的城市中心地带.生境质量需求(DHQ)格局略显不同,高需求区主要集中于各城市中心零星分布,例如乌鲁木齐市和石河子市,平均需求分别为 0.08 和 0.12.综合生态系统服务需求(CED)空间分布与各生态系统服务需求分布基本一致,较高及以上等级需求集中分布于乌鲁木齐、石河子和克拉玛依市等中心城区,平均需求量是其它行政区的 25 倍以上.

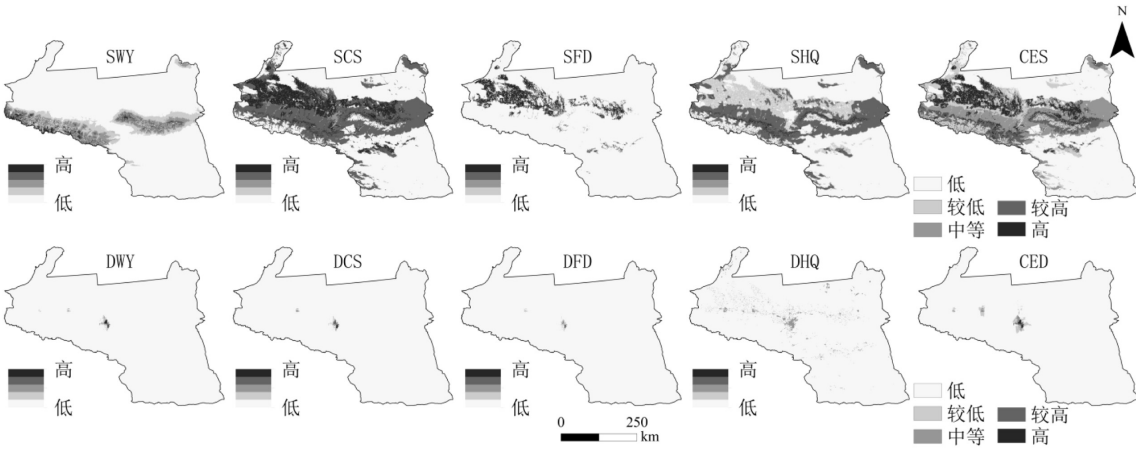


图 1 天山北坡城市群生态系统服务供需空间分布

Fig.1 Spatial distribution of supply and demand of ecosystem services in the urban agglomeration on the northern slopes of Tianshan

2.2 生态系统服务供需关系的尺度响应特征

本研究参照已有学术成果[22-23],将生态系统服务供需匹配协调度(CCD)细分为 5 个不同的状态级别:高度失调[0,0.25);中度失调[0.25,0.35);基本协调[0.35,0.55);中度协调[0.55,0.75)和高度协调[0.75,1].

天山北坡的城市群生态系统服务供需比(ESDR)在空间分布上表现为北部和中南部偏低,而东部和西部偏高.具体来看,ESDR 的高值区域集中在乌苏市、沙湾市、玛纳斯县、呼图壁县以及奇台县等县市的中心地带.当评价的尺度由 2000m 网格上升到县域规模时,ESDR 的数值区间有所缩小,中等和高程度的盈余区域逐步扩大,同时,供需之间的空间异质性呈现逐渐减小的趋势.CCD 在空间分布上呈现出核心区域协调度较高,向外围递减的格局,其中协调度较低的区域主要集中在县域的南部与北部地区.当格网增大时,协调度较高的区域范围显著扩展,高度失调的区域面积持续减少,而在县级行政区域内,中度失调区域消失.

为了挑选最优尺度,本研究采用信息熵和变异系数评估最优尺度,基于 ESDR 的空间分布概率,值越高表明数据分布越复杂;变异系数为 ESDR 标准差与均值之比,值越低表明数据离散性越小.6000m 网格在信息熵(1.48)和变异系数(0.41)上均达最优平衡,能兼顾宏观格局与局部差异(表 3).乡镇尺度虽变异系数(0.43)稍高且信息熵(1.44)略低,但仍是次优选择.综合表明 6000m 网格和乡镇尺度最适合天山北坡生态安全研究.鉴于此,将乡镇级别以及 6000m 网格尺度视为天山北坡城市集群生态安全架构建立的最优参考尺度.

表 3 不同尺度下生态系统服务供需比(ESDR)的信息熵与变异系数对比

Table 3 Comparison of information entropy and coefficient of variation of ESDR under different scales

尺度类型	信息熵	变异系数	尺度类型	信息熵	变异系数
2000m	1.82	0.68	10000m	1.18	0.56
4000m	1.65	0.54	流域级	1.05	0.72
6000m	1.48	0.41	县级	1.26	0.58
8000m	1.32	0.49	乡镇级	1.44	0.43

2.3 生态安全格局构建

本研究在生态系统服务供给(CES)和 6000m 尺度上界定生态源地.在乡镇尺度上构建源地—廊道—节点及障碍点—管理分区的生态安全格局,旨在为天山北坡城市群提供生态安全保障.

2.3.1 生态源地 研究发现,天山北坡城市群中,生态源地的总数达到 946 处,覆盖的总面积高达 10003.70km^2.这些生态源地主要集中分布在城市群

的西部与中部地带,而其它区域则呈分散状态.生态源地的土地的利用类型以耕地为主,占比为 80.56%,其次是草地和林地,占比分别为 11.51%和 7.93%.在九个行政区域内(表 4),塔城地区源地面积达 4293.50km^2,而后依次为昌吉回族自治州(4038.40km^2)、胡杨河市(592.53km^2)、克拉玛依市(404.38km^2)、奎屯市(239.30km^2)、乌鲁木齐市(171.75km^2)和五家渠市(115.34km^2);石河子市(86.98km^2)和吐鲁番市(61.52km^2)生态源地分布较少.

表 4　天山北坡城市群行政区域的生态源地分布

Table 4　Distribution of ecological sources in the administrative areas of the urban agglomeration on the northern slopes of the Tianshan

行政区划范围	生态源地数量(个)	生态源地面积(km^2)
①塔城地区	313	4293.50
克拉玛依市	20	404.38
奎屯市	12	239.30
胡杨河市	25	592.53
石河子市	4	86.98
②昌吉回族自治州	542	4038.40
五家渠市	12	115.34
乌鲁木齐市	38	171.75
吐鲁番市	13	61.52
总计	979	10003.7

注:①具体包括乌苏市和沙湾县;②具体包括玛纳斯县、呼图壁县、昌吉市、阜康市、吉木萨尔县、奇台县和木垒哈萨克自治县.

2.3.2　生态廊道　天山北坡城市群阻力系数在市中心区域较高,而在周边地带较低.依据生态源地以及阻力面的分析,得出生态廊道共 2291 条,总长度达到 22191.89km^2.阻力系数大于等于 0.3 和小于 0.3 的面积分别达到了 3.76%和 96.24%,城市中心的廊道如密集的网络,短小众多;而城市周边的廊道显得狭长且稀疏,拥有较高的环境质量和较低的连接障碍.市中心内的生态源地则较为零散和易受影响,需要更多的廊道来实现连接.

2.3.3　生态节点及障碍点　研究区内确定了 151 个生态节点,其分布由西向北逐渐递减.东南部行政区域仅有 1 处节点,高昌区和鄯善县完全没有节点.在所有区域中,昌吉回族自治州的节点最多(91 个),其次是塔城区域(37 个).一级节点主要集中在研究区域中西部的城市及其周边地带,在执行生态保护措施时,需要受到首要关注.

生态障碍点总面积达 2082km^2,集中于石河子市、五家渠市和乌鲁木齐市,其它零星分布在其它区域.一级障碍点占地 577km^2,多数在生态廊道的转折或交汇位置.其中,昌吉回族自治州(1408km^2)、乌鲁木齐市(895km^2)、石河子市(380km^2)和五家渠市(157km^2)的障碍点区域面积较大,这些区域工业发展密集,在管理上需给予更多关注.

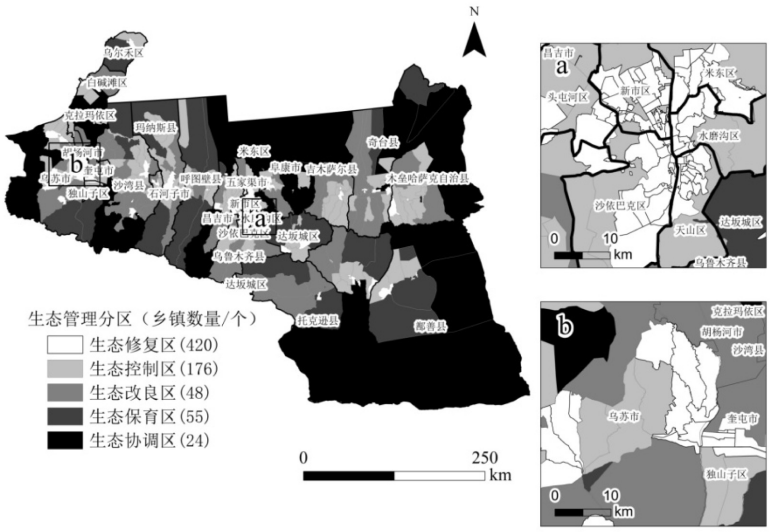


图 2　天山北坡城市群生态管理分区

Fig.2　Ecological management zoning of the urban agglomeration in the northern slope of Tianshan

2.3.4　生态管理分区　依据乡镇层面的生态系统服务供需状况及其耦合协调性,对天山北坡城市群内的 723 个乡镇及街道进行了细致划分,将其归类为五个不同的生态管理区域(图 2).生态协调区(24 个)主要分

布在库米什镇、恰特喀勒乡、南山矿区、七克台镇、火车站镇、柏杨河乡、五彩湾工业园区、大石头乡、五马场乡等地区,这些地区保持了优越的自然生态环境,生态资源能够充分支撑当地的经济社会发展.因此,需要逐渐强化区域协调发展以及生态环境保护的和谐共生,实现区域规划与管理的高度科学化与合理性.生态保育区(55 个)主要位于达坂城区、雀尔沟镇、克尔碱镇、六户地镇等地区,这些地区拥有丰富的自然资源,但当地对生态环境的需求不高.因此,需以维护生态环境为核心,科学地优化这些地方的工业与农业经济布局.生态改良区(48 个)主要分布在五工台镇、托里乡、大河沿镇、萨尔达坂乡和水磨沟乡等地区,该区生态供需水平均处于中等水平,在满足区域社会需求的同时保护了自然资源,应继续在发展的同时完善自然资源保护保护机制,维护生态环境的整体给养根基.生态控制区(176 个)位于城市核心地带,具备较为丰富的生态资源供给,然而,这些资源尚不足以应对社会对生态环境的高需求.因此,必须对人类相关活动实施严格管理,并推进绿色城市建设.生态修复区(420 个)遍布于中心城区,这些区域居住人口众多,人类活动大,生态供给有限,“供需矛盾”突出,应着力建设生态修复工程,缓解生态压力,以提高生态供给能力为导向.

3 讨论

低格网尺度揭示了供需之间的微观机制,而较大范围的县域及乡镇尺度则展现了供需关联的宏观态势.在执行区域生态系统的治理工作时,只关注单一尺度上的供需状况,可能产生误判.因此,分析不同尺度间生态系统服务从供给到需求的稳定性,对于确定区域可持续发展的最佳尺度至关重要[32].本研究通过综合生态系统服务供给(CES)和 6000m 尺度的供需比(ESDR)确定了 946 个生态源地,总面积达 10003.70km².与 2024 年 9 月 4 日发布的《新疆维吾尔自治区关于加强生态环境分区管控的实施意见》对比,所划分的生态核心区域大体涵盖政策文件中列举的国家级公园及自然保护区域.生态源地作为生态安全格局的关键组成部分,对维持区域生态系统稳定和生态功能发挥具有重要意义[33].其分布与土地利用类型密切相关,耕地占比较大(80.56%),草地和林地次之.这反映了区域生态系统的现状和功能特点,为后续生态保护与修复工作奠定基石.本研究通过对 2291 条生态廊道进行分析,发现其总长度达到 22191.89km,形成了类似网状的布局特征,在市中心区域这些廊道短小且密集,而在市中心外围则表现为狭长且稀疏.生态廊道在连接生态源地、促进物种迁移和能量流动方面发挥着重要作用[34].低阻力廊道(5950.89km)和高阻力廊道(6808.26km)反映了区域内生态阻力的差异,对生态保护和修复工作具有指导意义.在实际规划中应关注高阻力廊道区域的生态改善,降低生态阻力,增强生态系统的连通性.但目前生态廊道的规划和建设面临诸多挑战,如城市扩张对生态廊道的侵占和破坏等[35].因此,需要加强生态廊道的保护和管理,确保其生态功能得以充分发挥.

本研究识别出 151 个生态节点和 2082km^2 的生态障碍点,生态节点数量在区域内分布不均,昌吉回族自治州节点数量最多,东南行政区最少.生态节点和障碍点的存在对生态系统的稳定性和生态供需过程的流畅性产生影响[36],进而影响生态系统服务功能的发挥.因此,应制定专门的修复和优化策略,提高生态系统服务供给能力.依据乡镇尺度的生态系统服务供需和耦合协调关系,天山北坡城市群乡镇分为 5 类生态管理分区.根据不同区域的生态特点制定差异化的管理优化策略,有利于实现区域生态系统的可持续管理,具体优化策略如下:①生态协调区:生态系统自我维持能力强,需以“保护优先”为原则,禁止大规模开发,强化生态保护与经济发展的协同.②生态保育区:生态系统供给能力较强但存在潜在压力,需限制工业扩张,优化农业布局,优先保护自然植被.③生态改良区:生态系统供需关系较为稳定,可适度开发,完善生态补偿机制,提升资源利用效率.④生态控制区:表明人类活动强度较高但系统协调性尚可,需严格控制开发强度,推进绿色建设.⑤生态修复区:表明生态系统严重超载,需优先实施退耕还林、湿地恢复等生态修复工程,缓解生态压力.该分区方案参考《生态功能区划技术规范》(HJ 1133-2020)中“因地制宜、分类施策”的要求,为天山北坡城市群提供了差异化管理路径.

然而,本研究还存在可改进的地方:①仅考虑了两个因素确定源地,可能忽略了其他影响生态源地功能的因素,如生态系统的连通性和生物多样性

等[37].未来研究可进一步完善生态源地确定的指标体系,综合更多生态要素,以提高生态源地识别的准确性和科学性.②采用空间叠加来确定综合生态系统服务供需的方式,可能会忽略各地主导的生态系统服务功能存在的差异性.均等权重假设可能忽略服务间的重要性差异,未来研究可通过专家打分或主成分分析等方法优化权重分配,今后的研究应当针对不同类型的生态系统服务赋予适当的权重进行区分.

4　结论

4.1　生态系统服务供需在空间分布上表现出显著差异,供给较高的区域主要集中在自然资源较为富饶的高山与绿洲地区,而需求较大的区域则集中在人口密集的城市中心.

4.2　生态服务供需平衡对空间分辨率的变化反应较敏感,体现出“精细度随尺度减小而提升,宏观性随尺度增大而增强”的规律,6000m 的网格和乡镇级别尺度是进行生态保护格局构建的关键尺度.

4.3　研究区中西部地区,生态源地的聚集现象明显,而生态廊道则呈现出类似渔网的格局,遍布各地.生态节点与障碍点散布在各城市核心区域之外.

4.4　经过生态安全格局构建,天山北坡城市群乡镇街道可被划分为生态协调区、生态保育区、生态改良区、生态控制区以及生态修复区五个区域.

参考文献：

[1] 刘瑞宽,杨林朋,李同昇,等.基于 ERA 和 MCR 模型的生态安全格局构建——以陕西沿黄地区为例 [J]. 中国环境科学, 2024,44(2):1053-1063.
Liu R K, Yang L P, Li T S, et al. Construction of ecological security pattern based on ERA and MCR models: A case study of the Yellow River-bordering areas in Shaanxi Province [J]. China Environmental Science, 2024,44(2):1053-1063.

[2] Wang J, Li Y, Zhang Y, et al. Identifying ecological security patterns to prioritize conservation and restoration: A case study in Xishuangbanna Tropical Region, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2023,405:136974.

[3] 陈　昕,彭　建.基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮市生态安全格局构建 [J]. 地理科学, 2017,37(3):471-480.
Chen X, Peng J. Construction of ecological security pattern in Yunfu City based on the "importance-sensitivity-connectivity" framework [J]. Scientia Geographica Sinica, 2017,37(3):471-480.

[4] Peng J, Wang Y, Zhao J, et al. Construction and optimization of regional ecological security patterns: A review [J]. Journal of Cleaner Production, 2023,384:135427.

[5] 赵晓冏,苏军德,王　建,等.甘肃省生态服务供需关系及影响因子研究 [J]. 中国环境科学, 2021,41(10):4926-4941.
Zhao X J, Su J D, Wang J, et al. Research on supply-demand relationship and influencing factors of ecological services in Gansu Province [J]. China Environmental Science, 2021,41(10):4926-4941.

[6] Ding H H, Sun R H. Supply-demand analysis of ecosystem services based on socioeconomic and climate scenarios in North China [J]. Ecological Indicators, 2023,146:109906.

[7] 王　琦,付梦娣,魏　来,等.基于源-汇理论和最小累积阻力模型的城市生态安全格局构建——以安徽省宁国市为例 [J]. 环境科学学报, 2016,36(12):4546-4554.
Wang Q, Fu M D, Wei L, et al. Construction of urban ecological security pattern based on source-sink theory and minimum cumulative resistance model: A case study of Ningguo City, Anhui Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016,36(12):4546-4554.

[8] Zhang Y Y, Yang R J, Sun M Y, et al. Identification of spatial protection and restoration priorities for ecological security pattern in a rapidly urbanized region: A case study in the Chengdu-Chongqing economic Circle, China [J]. Journal of Environmental Management, 2024,366:0301-4797.

[9] 邱大鹅,张军以,杨晓雪.基于不同需求层次生态服务供需的四川盆地生态安全格局构建 [J/OL]. 中国环境科学, 1-18[2024-12-31].https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20241217.003.
Qiu D E, Zhang J Y, Yang X X. Construction of ecological security pattern in Sichuan Basin based on hierarchical demand of ecological service supply and demand [J/OL]. China Environmental Science, 1-18 [2024-12-31]. https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20241217.003.

[10] 黄　强,陈田田,王　强,等.喀斯特山区生态系统服务权衡关系分异特征及生态安全格局识别——以贵州省为例 [J]. 地理科学, 2024,44(6):1080-1091.
Huang Q, Chen T T, Wang Q, et al. Differentiation characteristics of ecosystem service trade-offs and ecological security pattern identification in karst mountainous areas: A case study of Guizhou Province [J]. Scientia Geographica Sinica, 2024,44(6):1080-1091.

[11] 胡西武,贾天朝.基于生态敏感性与景观连通性的三江源国家公园生态安全格局构建与优化 [J]. 长江流域资源与环境, 2023,32(8):1724-1735.
Hu X W, Jia T C. Construction and optimization of ecological security pattern for Sanjiangyuan National Park based on ecological sensitivity and landscape connectivity [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023,32(8):1724-1735.

[12] 孙梓渊,王赛鸽,陈　彬.基于生态系统服务的生态安全格局构建与生态韧性评估——以长株潭城市群为例 [J]. 生态学报, 2024,44(11):4650-4661.
Sun Z Y, Wang S G, Chen B. Ecological security pattern construction and ecological resilience evaluation based on ecosystem services: A case study of Chang-Zhu-Tan urban agglomeration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(11):4650-4661.

[13] Yang X, Wei G, Liang C, et al. Construction of ecological security pattern based on ecosystem service evaluation and minimal cumulative resistance model: A case study of Hefei City, China [J]. Environ Dev Sustain, 2024,26:10681-10700.

[14] Liu M L, Peng J, Dong J Q, et al. Trade-offs of landscape connectivity between regional and interregional ecological security patterns in a junction area of Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Applied Geography, 2024,167:0143-6228.

[15] Tian H Z, Wang H, Xin L, et al. Construction and optimization of ecological security patterns in Dryland watersheds considering

ecosystem services flows [J]. Ecological Indicators, 2024,159:1470-160X.

[16] 杨帅琦,何 文,王金叶,等.基于MCR模型的漓江流域生态安全格局构建 [J]. 中国环境科学, 2023,43(4):1824-1833.
Yang S Q, He W, Wang J Y, et al. Construction of ecological security pattern in Lijiang River Basin based on MCR model [J]. China Environmental Science, 2023,43(4):1824-1833.

[17] Zhou G J, Huan Y Z, Wang L Q, et al. Linking ecosystem services and circuit theory to identify priority conservation and restoration areas from an ecological network perspective [J]. Science of the Total Environment, 2023,873:0048-9697.

[18] 邓莹佳,侯兰功,刘 涛,等.基于生态系统服务价值的成德绵城市带生态安全格局研究 [J]. 环境工程技术学报, 2023,13(5):1910-1920.
Deng Y J, Hou L G, Liu T, et al. Research on ecological security pattern of Chengdu-Deyang-Mianyang urban belt based on ecosystem service value [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023,13(5):1910-1920.

[19] 耿润哲,殷培红,马 茜.以环境质量改善为目标的贵安新区生态安全格局构建虚拟 [J]. 中国环境科学, 2018,38(5):1990-2000.
Geng R Z, Yin P H, Ma Q. Virtual construction of ecological security pattern in Gui'an New Area aiming at environmental quality improvement [J]. China Environmental Science, 2018,38(5):1990-2000.

[20] Xu X, Chen X, Wang Y. The Coupling coordination degree of economic, social and ecological resilience of urban agglomerations in China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023,20(1):413.

[21] Lei X Q, Liu H H, Li S D, et al. Coupling coordination analysis of urbanization and ecological environment in Chengdu-Chongqing urban agglomeration [J]. Ecological Indicators, 2024,161:1470-160X.

[22] 赵筱青,谭 琨,易 琦,等.典型高原湖泊流域生态安全格局构建——以杞麓湖流域为例 [J]. 中国环境科学, 2019,39(2):768-777.
Zhao X Q, Tan K, Yi Q, et al. Ecological security pattern construction in typical plateau lake basin: A case study of Qilu Lake Basin [J]. China Environmental Science, 2019,39(2):768-777.

[23] 赵 伟,邹欣怡,蒲海霞.成渝地区双城经济圈生态安全格局构建 [J]. 中国环境科学, 2021,41(5):2423-2433.
Zhao W, Zou X Y, Pu H X. Construction of ecological security pattern in Chengdu-Chongqing Twin-City Economic Circle [J]. China Environmental Science, 2021,41(5):2423-2433.

[24] Zhang Z, Wang Q, Feng Y, et al. The spatio-temporal evolution of spatial structure and supply-demand relationships of the ecological network in the Yellow River Delta region of China [J]. Journal of Cleaner Production, 2024,471:143388.

[25] Lin Y, et al. Multi-scalar assessment of ecosystem-services supply and demand for establishing ecological management zoning [J]. Applied Geography, 2024,172:0143-6228.

[26] Liu J, Chen J, Han X W. Construction and optimization of an ecological network in the Yellow River source region based on MSPA and MCR modelling [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023,20(4):3724.

[27] 周 亮,车 磊,周成虎.中国城市绿色发展效率时空演变特征及影响因素 [J]. 地理学报, 2019,74(8):1555-1569.
Zhou L, Che L, Zhou C H. Spatio-temporal evolution characteristics and influencing factors of urban green development efficiency in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2019,74(8):1555-1569.

[28] 刘金花,杨 朔,吕永强.基于生态安全格局与生态脆弱性评价的生态修复关键区域识别与诊断——以汶上县为例 [J]. 中国环境科学, 2022,42(7):3343-3352.
Liu J H, Yang S, Lyu Y Q. Identification and diagnosis of ecological restoration key areas based on ecological security pattern and ecological vulnerability evaluation: A case study of Wenshang County [J]. China Environmental Science, 2022,42(7):3343-3352.

[29] 孙 枫,章锦河,王培家,等.城市生态安全格局构建与评价研究:以苏州市区为例 [J]. 地理研究, 2021,40(9):2476-2493.
Sun F, Zhang J H, Wang P J, et al. Construction and evaluation of urban ecological security pattern: A case study of Suzhou Urban Area [J]. Geographical Research, 2021,40(9):2476-2493.

[30] 向爱盟,岳启发,赵筱青,等.国土空间生态修复关键区识别及修复分区——以西南喀斯特山区开远市为例 [J]. 中国环境科学, 2023,43(12):6571-6582.
Xiang A M, Yue Q F, Zhao X Q, et al. Identification of key areas for territorial space ecological restoration and restoration zoning: A case study of Kaiyuan City in southwest karst mountainous area [J]. China Environmental Science, 2023,43(12):6571-6582.

[31] 黄培真,赵华甫,吴克宁,等.基于地球关键带类型的国土空间生态修复分区研究——以河南省西峡县为例 [J]. 地质通报, 2024,(8):1325-1335.
Huang P Z, Zhao H F, Wu K N, et al. Territorial space ecological restoration zoning based on Earth's critical zones: A case study of Xixia County, Henan Province [J]. Geological Bulletin of China, 2024,(8):1325-1335.

[32] 曹秀凤,刘兆顺,李淑杰,等.基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别——以吉林省松原市为例 [J]. 中国环境科学, 2022,42(6):2779-2787.
Cao X F, Liu Z S, Li S J, et al. Identification of key areas for territorial space ecological restoration based on ecological security patterns: A case study of Songyuan City, Jilin Province [J]. China Environmental Science, 2022,42(6):2779-2787.

[33] 祁强强,徐占军.生态安全格局时空演变分析——以太原城市群为例 [J]. 中国环境科学, 2023,43(11):5987-5997.
Qi Q Q, Xu Z J. Analysis on spatio-temporal evolution of ecological security patterns: A case study of Taiyuan Urban Agglomeration [J]. China Environmental Science, 2023,43(11):5987-5997.

[34] 蒋 榕,张 鑫,李冠衡,等.西双版纳州生态廊道构建 [J]. 北京林业大学学报, 2024,46(11):113-123.
Jiang R, Zhang X, Li G H, et al. Construction of ecological corridors in Xishuangbanna Prefecture [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024,46(11):113-123.

[35] 邓金杰,陈柳新,杨成韫,等.高度城市化地区生态廊道重要性评价探索——以深圳为例 [J]. 地理研究, 2017,36(3):573-582.
Deng J J, Chen L X, Yang C Y, et al. Importance evaluation of ecological corridors in highly urbanized areas: A case study of Shenzhen [J]. Geographical Research, 2017,36(3):573-582.

[36] 金银丽,周冬梅,周 凡,等.疏勒河流域生态安全网络构建及优化 [J]. 应用生态学报, 2023,(4):1063-1072.
Jin Y L, Zhou D M, Zhou F, et al. Construction and optimization of ecological security network in the Shule River Basin, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology. 2023,34(4):1063-1072.

[37] Bracco A, Novi L B, et al. Machine learning prediction of connectivity, biodiversity and resilience in the Coral Triangle [J]. Communications Biology, 2022,5(1):1-12.

作者简介: 李大强(2001-),男,四川资阳人,硕士研究生,主要从事区域生态安全与国土空间生态修复研究.lidaq011006@163.com.