基于耦合协调的哈尔滨市水生态服务供需相关性及分区规划

赵鹤雅，肖 英，薛晰予，洪 丽
（东北农业大学 园艺园林学院，黑龙江 哈尔滨 150030）

摘 要：［目的］探究城市水生态服务供给与需求之间的相关性及匹配程度，并基于耦合协调模型进行生态分区规划，为城市水生态服务供需平衡提供科学参考。［方法］以哈尔滨市为研究对象，运用InVEST模型、GIS空间分析及统计学方法开展研究。［结果］哈尔滨年产水量与水质净化能力呈“中间高，两侧低”的分布；而土壤保持力则与地形陡峭程度成反比，表明水生态服务供给呈现显著的空间异质性；服务需求强度则由主城区向外围呈梯度递减，南岗、香坊等西部中心城区因人口密度、GDP及土地开发强度指数较高而形成需求峰值区。城市水生态服务供给与生态服务需求之间具有较强的相关性。耦合协调模型拟合结果显示哈尔滨市水生态服务耦合协调度取值范围在0～0.8，平均值为0.4左右，呈现轻度失调的状况。协调度空间差异明显，失调区域面积约占总面积的40%。［结论］各功能分区应差异化制定治理方案：生态涵养区推进绿色转型发展，严控过度开发；生态缓冲区实施适度开发，疏解中心城区生态压力；生态改良区落实退耕还林举措，修复受损生态系统；生态保护区严守生态底线，维系原生水环境，并因地制宜发展生态旅游。后续研究需强化水生态供需动态监测，持续优化评价指标体系，进一步提升研究成果的科学性与精准度。

关键词：生态系统服务；供需关系；水生态系统；分区规划；生态修复；哈尔滨市
文献标识码：B **文章编号：**1000-288X(2026)03-0182-12 **中图分类号：**X171.1，Q147

文献参数：赵鹤雅，肖英，薛晰予，等.基于耦合协调的哈尔滨市水生态服务供需相关性及分区规划[J].水土保持通报，2026，46(3)：182-193. Zhao Heya，Xiao Ying，Xue Xiyu，et al. Correlation between supply and demand of water ecosystem services and zoning planning in Harbin City based on coupling coordination [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2026，46(3)：182-193.

DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.031 **CSTR：32312.14.stbctb.2026.03.031**

Correlation between supply and demand of water ecosystem services and zoning planning in Harbin City based on coupling coordination

Zhao Heya，Xiao Ying，Xue Xiyu，Hong Li
（*College of Horticulture and Landscape Architecture*，*Northeast Agricultural University*，*Harbin*，*Heilongjiang* 150030，*China*）

Abstract：［Objective］The correlation and degree of alignment between the supply and demand of urban water ecosystem services were investigated and ecological zoning planning based on a coupled coordination model was conducted in order to provide a scientific reference for balancing the supply and demand of urban water ecosystem services.［Methods］Harbin City was taken as the study subject，and the InVEST model，GIS spatial analysis，and statistical methods were employed.［Results］Harbin’s annual water yield and water purification capacity exhibited a distribution characterized by ‘high in the center and low on both sides’. Meanwhile，soil retention capacity was inversely proportional to the steepness of the terrain，indicating that the supply of water ecosystem services exhibited significant spatial heterogeneity. The intensity of service demand decreased gradually from the central urban area toward the periphery，with western central urban districts such as Nangang and Xiangfang forming peak demand zones due to higher population density，GDP，and land development intensity indices. Analysis of the

收稿日期：2025-09-29 **修回日期：**2025-12-31 **采用日期：**2026-01-02
资助项目：黑龙江省自然科学基金项目“基于GIS的石墨矿山生态恢复与矿区空间景观优化研究”(LH2023C012)
第一作者：赵鹤雅(2001—)，女(汉族)，黑龙江省牡丹江市人，硕士研究生，研究方向为风景园林规划与设计。Email：A02190050lh@163.com。
通信作者：洪丽(1971—)，女(汉族)，黑龙江省哈尔滨市人，博士，副教授，硕士生导师，主要从事风景园林遗产保护与设计研究。Email：yuhongpang@163.com。

above supply and demand calculations indicated a strong correlation between the supply of urban water ecosystem services and the demand for such services. The results of the coupling coordination model showed that the coupling coordination index for Harbin's water ecosystem services ranged from 0 to 0.8, with an average of approximately 0.4, indicating a state of mild imbalance. Spatial variations in coordination were pronounced, with the proportion of imbalance accounting for about 40% of the total area. [Conclusion] Differentiated management strategies should be formulated for each functional zone: in the ecological conservation zone, promoting green and sustainable development while strictly controlling excessive development; in the ecological buffer zone, implementing moderate development to alleviate ecological pressure on the central urban area; in the ecological restoration zone, implementing measures to convert farmland back to forest and restore damaged ecosystems; and in the ecological protection zone, strictly upholding ecological bottom lines, preserving the original aquatic environment, and developing ecotourism tailored to local conditions. It is necessary to strengthen dynamic monitoring of water ecological supply and demand, continuously optimize the evaluation indicator system, and further enhance the scientific precision and accuracy of research findings.

Keywords: ecosystem service; supply and demand relationship; water ecosystems; zoning planning; ecological restoration; Harbin City

生态修复是帮助退化、受损或被破坏的生态系统恢复的过程。它体现了生态系统的固有价值,并为人类提供所需的商品和服务[1-3]。目前中国生态修复工程已从传统单一的生态修复向山水林田湖草沙的全要素协同修复转变,并形成以生态安全、碳中和为目标的全流域系统治理模式。土壤保持[4]、水质净化等[5]环节的开展是生态修复工程中的关键目标之一。其中有关生态系统服务的研究始于20世纪70年代,目前已明确生态系统服务的理念、分类方法及定义[6-8],并被细分为文化生态系统服务、水生态系统服务等多个研究领域。

水生态系统能够提供水源供给、水力发电、生物多样性维持、洪水调蓄、固碳释氧以及休闲娱乐等一系列生态产品,为人类福祉增添价值[9]。2016年,有学者利用DPSIR等模型构建河流生态服务的综合评估框架[10],开辟了对水生态系统的研究方向。随着研究体系与方法的更新与完善,对水生态系统服务的研究逐步从对陆地水生态系统的整体评估[11],转向对河流[12]、湖泊[13]、水库[14]、湿地等[15]不同水系的生态系统的价值评估与核算等研究。现阶段,该领域的研究着重强调生态系统供给与需求具有同等重要性,秉持以人类为中心的核心思想,同时重视其对人类福祉所产生的影响[16-17]。生态系统供给与需求的同步研究中常采用模型计算法[18-19]、匹配分析法[20]、四象限法等[21]研究方法,研究对象主要集中于大尺度区域[22]、城市等[23]。虽有学者开始对水生态系统服务供需进行研究[4],但更多是供给和需求的分别研究,且多数研究针对水生态服务供给价值的评估计算[24-26],供需结合的水生态系统服务方面的研究则较少。水生态系统的研究如果仅考虑生态服务供给,而忽略需求的重要性,则无法实现系统的生态管理。基于此,本文以哈尔滨市为研究对象,从城市水生态服务供给与需求耦合协调角度出发,用InVEST模型、GIS技术分别量化哈尔滨市水生态服务的供给量与需求量,并通过皮尔逊相关性分析等方法验证供需二者的关联特征,据此论证水生态服务供需耦合分析的有效性。通过耦合协调度测算,明确哈尔滨市水生态服务供需协调的整体水平,并根据研究结果进行城市水生态管理规划分区,以期为城市水生态服务供需平衡提供参考。

1　研究区概况分析

1.1　研究区概况

哈尔滨市地处黑龙江省西南部,是东北地区的经济、政治和文化中心。它坐落于松花江流域,松花江干流横贯市区,是城市内部的主要河流。水资源与自然资源丰富,气候独特,城市发展与水资源关系较为紧密,适合进行水生态服务的研究。研究区包含哈尔滨市下辖9个区以及7个县,两个县级市。

1.2　气候条件分析

哈尔滨市位于中国东北部,属半湿润温带大陆性季风气候,冬季气候寒冷、干燥,夏季降水集中,气候温和湿润。年平均气温3.9 ℃左右,最低可达−38 ℃,且春秋大风天气较多。城市内融雪与降雨时间分布不均匀,导致城市内部河流大部分属于季节性河流,水量集中在主汛期和行洪期,丰枯变化大;而低温对于生态型护坡的伤害也较大,水体景观也很难形成,以上多种原因导致东北地域水生态修复工程进行困难。

1.3 城市河流分析

利用ArcGIS软件对哈尔滨市域内的河流进行总体水文分析，选取流量阈值大于6 000像素数的水系进行河网提取，并将数据进行矢量化计算得出可视性图纸，再综合现有资料得出如下结论（图1）。哈尔滨市内主要以松花江作为最大干流，东西向横穿城区。城市内河多为松花江水系支流，主要包括何家沟、马家沟、信义沟等，总长约78 km，总流域面积约433 km^2，目前均为自然地理条件形成的暴雨行洪通道，由南向北纵贯城市中心区域，流经5个行政区进入松花江。整体水系大致可以分为1干流5支流。支流丰富，覆盖城市各个区域。因此哈尔滨城市内河承担功能较多，除了基本的排洪功能外，还承担着城市生活、工业废水污染排放的功能，部分流域还围绕河流建设公园，同时承担一部分的景观功能。

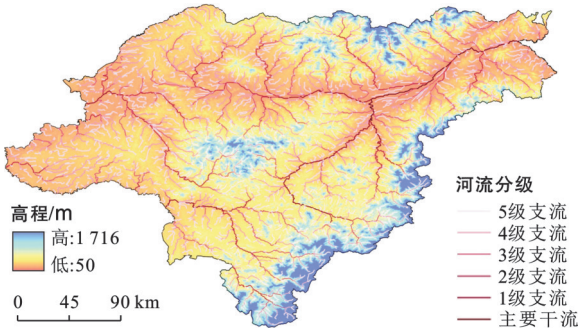


图1 哈尔滨市市域内河流水文图

Fig.1 Hydrological map of rivers in Harbin City

2 数据与方法

2.1 数据来源

研究所用数据包括DEM高程数据、土地利用数据、GDP、人口密度数据、降雨数据、土壤数据等。DEM高程数据来源于地理空间数据云，年降水量[27]、蒸散量[28]数据来源于国家青藏高原数据中心；土地利用数据来源于武汉大学杨杰[29]研究团队；人口密度、GDP数据来源于资源环境科学与数据中心；土壤数据取自世界土壤数据库。

2.2 研究方法

2.2.1 水生态服务供给研究

根据城市内水生态系统常见的服务功能，如提供城市生活用水、泄洪、构建城市自然景观及调节城市小气候等，选取哈尔滨河流年产水量、土壤保持力以及水质净化能力等3个指标作为哈尔滨市河流主要生态服务供给量的评估指标，采用InVEST模型和GIS软件来获得相关结果。模型运行所需的生物物理表进行本地化处理，并根据前人研究结合经验赋值确定物理表所选系数，用于哈尔滨市水生态服务供给计算。

（1）InVEST模型中的年产水量模型。其基于Budyko曲线和年平均降水量来确定每个像素的年产水量[26]。年产水量数据需与《黑龙江省水资源公报》所公开发表的数据进行比对，调整其Z参数，缩小研究数据与实际数据的误差，以确保结果的准确性与科学性。年产水量计算公式为

$$Y_x=\left(1-\frac{\mathrm{AET}_x}{P_x}\right)P_x \tag{1}$$

式中：Y_x表示每个栅格单元x的年产水量；AET_x表示每个栅格单元x的年实际蒸发量（mm）；P_x表示每个栅格单元x的年降水量（mm）。

（2）Sediment delivery ratio（SDR）模块常用于计算土壤侵蚀量数据。其原理是利用修正后的通用土壤流失方程计算年土壤流失量，然后计算沉积物输送比[30]，需分别计算出土壤潜在侵蚀量与实际侵蚀量再进行相减即可得出土壤的实际保持能力。模型仅可计算出土壤潜在侵蚀量与实际侵蚀量，后续需使用GIS软件再进一步计算出哈尔滨市河流的土壤保持力。土壤保持力计算公式为

土壤潜在侵蚀量（RKLS_n）计算：

$$\mathrm{RKLS}_n=R_nS_nL_nK_n \tag{2}$$

土壤实际侵蚀量（USLEn）计算：

$$\mathrm{USLE}_n=R_nK_nL_nS_nC_nP_n \tag{3}$$

土壤保持力（SEDRET_n）计算：

$$\mathrm{SEDRET}_n=\mathrm{RKLS}_n-\mathrm{USLE}_n \tag{4}$$

式中：R_n为降雨侵蚀性因子；K_n为土壤可侵蚀性因子；S_n为坡度因子；C_n为植被覆盖因子；P_n为水土保持因子。

（3）Nutrient delivery ratio（NDR）模块可利用植被与土壤截留径流养分中的污染物机理，分别计算出河流对于N，P两种养分的输出量，从而代表河流的水质净化能力。本文研究主要以地表径流N，P的输出量作为研究结果，地下径流不做研究，其参数输入为0。水质净化能力计算公式

$$X_{\mathrm{exptop}}=\sum_i X_{\mathrm{exp},i} \tag{5}$$

$$\mathrm{NDR}_{\mathrm{surf},i}=\mathrm{NDR}_{0,i}\left[1+\exp\left(\frac{\mathrm{IC}_i-\mathrm{IC}_0}{K_2}\right)\right]^{-1} \tag{6}$$

式中：X_{exptop}表示N，P总输出量；$X_{\mathrm{exp},i}$表示每个栅格单元的N，P输出量；$\mathrm{NDR}_{\mathrm{surf},i}$表示N，P的输送效率。

2.2.2 水生态服务需求研究

生态系统服务需求是人类对生态系统所提供服务的数量及质量的偏好，包括已满足和未满足的部分[31]，主要反映了人类活动干扰以及社会经济发展

对于生态系统服务需求的不同[32]。本研究采取社会经济发展状况来表示生态系统服务需求,通过对土地利用开发程度、人口密度、GDP 等 3 个指标的量化,来表示生态服务需求的高低。土地利用开发程度常用建设用地比例来表示,但由于黑龙江省耕地、林地等土地利用类型比例较大,人类活动干扰程度同样较强,因此采用土地综合利用强度指数代替建设用地比例,指数越高,即表明人类对于生态服务需求越大;人口密度越高,需求同样也越大;GDP 指数受多方面因素的影响(例如人口、地域面积等),同时也在一定程度上反映城市的经济发展水平。GDP 指数相对较高,表明该流域的经济发展程度较高,相应的需求量也越大,因此 3 个指标与需求量均呈正相关的关系,可直接进行耦合。但由于区域经济发展速度不同,人口密度与 GDP 指数波动较大,会降低结果的准确性,因此采用统计学方法对这两个指标进行对数分析。

2.2.3　生态服务供需耦合协调度分析

由于上述所得研究结果的单位各不相同,为消除需求量纲影响,本文首先对生态服务供给的三项指标进行极差标准化处理,然后分别赋予权重进行综合计算,以用于协调度结果的得出。

耦合协调度模型是研究生产-经济发展、生产-社会发展-环境等系统之间关系的重要方法。因此,本文引入协调度模型,以探究哈尔滨市生态服务供给与需求的协调关系。对于水生态供需耦合结果而言,供需结果重要性相同,因此计算过程中二者权重系数均取 0.5,具体计算公式如下。

(1) 生态服务需求计算公式为

$$X = \mathrm{LDI} \cdot \ln P \cdot \ln Q \tag{7}$$

$$\mathrm{LDI} = 100 \times \left(\sum_{n=1}^{i} R_i \cdot H_i \right) \tag{8}$$

式中:X 表示生态服务需求程度;LDI 表示土地综合利用强度指数;P 表示人口密度;Q 表示 GDP 指数;R_i 表示第 i 级土地利用强度;H_i 表示第 i 级土地利用类型所占面积;n 表示土地利用分级数。

(2) 极差标准化处理计算公式为

$$X = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \tag{9}$$

$$X_i = \alpha \cdot X_{i1} + \beta \cdot X_{i2} + \gamma \cdot X_{i3} \tag{10}$$

式中:X 表示标准化的供给量;X_i 为第 i 个单元的供给量;X_s 为耦合后的总体生态供给量;α 等为每个指标的权重,由于 3 者重要性相同,因此赋予同等权重。

(3) 耦合协调度模型计算公式为

$$D = \sqrt{C \cdot T} \tag{11}$$

$$C = 2 \times \sqrt{\frac{Y_s \cdot Y_d}{(Y_s + Y_d)^2}} \tag{12}$$

$$T = \delta \cdot Y_s + \varepsilon \cdot Y_d \tag{13}$$

式中:D 为供需耦合协调度;C 为耦合度;Y_s, Y_d 为标准化后的供给量与需求量,需求量标准化公式与上述供给量标准化相同;T 为供需综合指数;δ, ϵ 为权重系数,二者重要性相同,赋予相同比重。

根据上述公式最终得出的 D 指数为生态服务供需协调度指数,$D \in [0,1]$,当 D 值越大时,说明二者协调度越好。根据哈尔滨市内供需计算结果以及实际情况,将供需协调度划分为 4 个区间,$D \in [0.6, 0.8]$ 表明供需协调良好;$D \in (0.4, 0.6)$ 属于基本协调;$D \in [0.2, 0.4]$ 属于轻度失调;$D \in [0, 0.2)$ 则属于重度失调。

表 1　土壤保持生物物理参数赋值

Table 1　Biophysical parameter values for soil conservation

土地利用类型	因子值 C	水土保持措施因子 P
耕 地	0.23	0.60
林 地	0.07	1.00
草 地	0.06	1.00
水 体	0.00	0.00
未利用地	1.00	1.00
建筑用地	0.20	0.00

3　城市水生态服务供需分析

3.1　哈尔滨市水生态服务供给空间特征分析

3.1.1　土壤保持力分析

将哈尔滨市数字高程、降雨可侵蚀性因子、土壤侵蚀力等数据输入 InVEST 软件 SDR 模型中。其中 Borselli K 因子、最大 SDR 值等参数输入默认值,生物物理参数参考前人研究[33]与实地现状赋予经验值,具体情况详见表 1。通过模型运算结果,可得出土壤实际侵蚀量与潜在侵蚀量两组数据,经过处理最终得出哈尔滨市河流土壤保持力分布情况(图 2)。由图 2 可知,哈尔滨市近 3 a 河流土壤保持力均与地势陡峭程度成反比关系,地势越陡峭或高差越大,土壤保持力则越低。整体呈现中间低,两边高的状态,这与降雨冲刷与水土流失等因子有着密切关系。

3.1.2　年产水量分析

将年降水量、根系深度、年蒸散量、土地利用等数据输入 InVEST 软件年产水量模型,其中生物物理表根据前人研究[26]与实地现状进行赋值(表 2)。通

过对该模型进行反复验证，当 Zhang 系数取 2.0 时与《黑龙江省水资源公报》公开发表的数据相比误差较小，可用作进一步研究数据（图 3）。由图 3 可知，哈尔滨市近 3 a 年产水量呈现逐步上升的趋势，但整体趋势与土壤保持力相反，呈现中间高，两边低的趋势。这与哈尔滨市河流分布密切相关，靠近松花江干流的区域水资源丰富，产水能力强；支流较少的地区水资源匮乏，则产水能力弱。

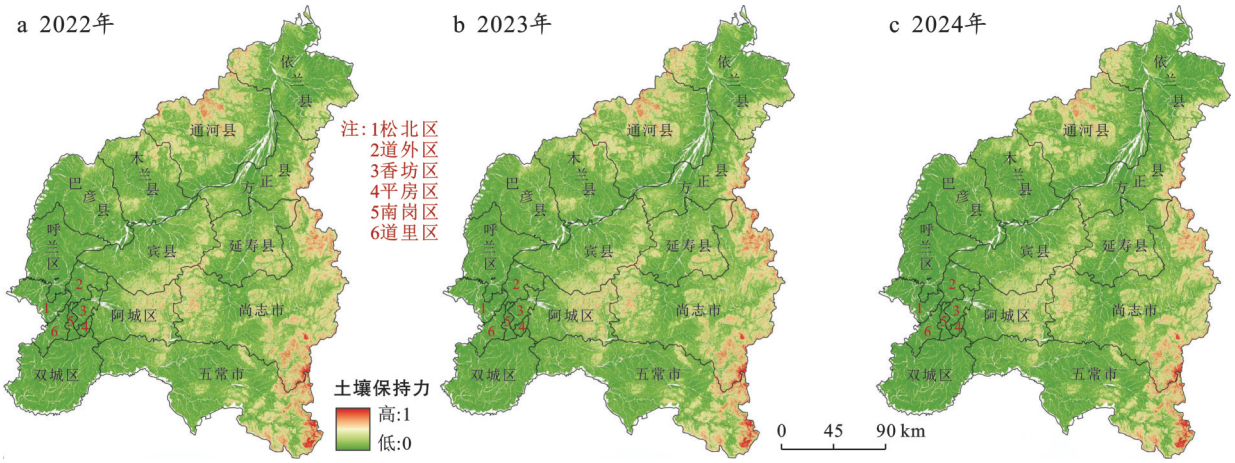


图 2 哈尔滨市土壤保持力分布图

Fig.2 Map of soil retention capacity in Harbin City

表 2 年产水量生物物理参数赋值

Table 2 Biophysical parameter values for annual water yield

土地利用类型	植物最大根系深度/mm	LULC 系数	植被等级
耕 地	2 050	1	0.67
林 地	3 500	1	1.00
灌木地	5 200	1	0.90
草 地	5 200	1	0.93
水 体	100	0	1.00
冰川及永久积雪	100	0	0.50
未利用地	300	0	0.20
建筑用地	300	0	0.20
湿 地	2 300	1	0.65

注：LULC 系数是为不同土地类型设置的一组参数，主要用于 InVEST 模型产水量计算，为不同土地类型设定不同参数，用于量化该类型对产水过程的影响。

3.1.3 水质净化能力分析

将数字高程，土地利用，营养物质径流代理等数据输入 InVEST 软件 NDR 模型中，其中 K 参数采取默认值，生物物理表根据前人研究[34]与实际情况进行赋值（表 3），最终分别得出 N，P 两种元素的输出量。本文仅研究地表径流的水质净化能力，地下径流不作分析（图 4）。

由哈尔滨市水质净化能力分布情况（详见图 4）可以看出，该市的河流水质净化能力近 3 a 未发生明显变化，净化能力几乎持平。与产水量相似，也呈现中间高两边低的趋势。水资源匮乏的区域，其 N，P 输出量较少，相应地截留污染物质的能力越弱，因此水质净化能力就越低。

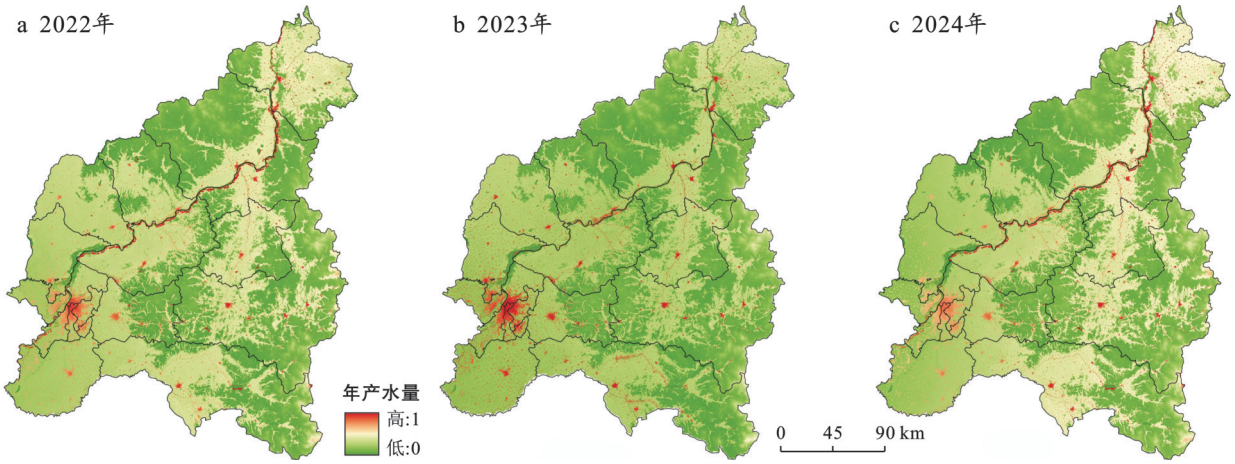


图 3 哈尔滨市年产水量分布图

Fig.3 Map of annual water yield in Harbin City

表 3　水质净化生物理化赋值

Table 3　Biophysical parameter values for water purification

土地利用类型	最大养分保留效率(P)	营养负荷(P)	最大养分保留效率(N)	营养负荷(N)
耕 地	0.48	3.57	0.25	25.00
林 地	0.60	0.80	0.35	2.30
灌木地	0.64	1.30	0.40	3.30
草 地	0.64	0.83	0.37	3.56
水 体	0.40	0.00	0.03	0.00
冰川及永久积雪	0.40	0.00	0.03	0.00
未利用地	0.26	0.75	0.06	6.30
建筑用地	0.26	2.60	0.06	7.20
湿 地	0.52	2.48	0.30	15.20

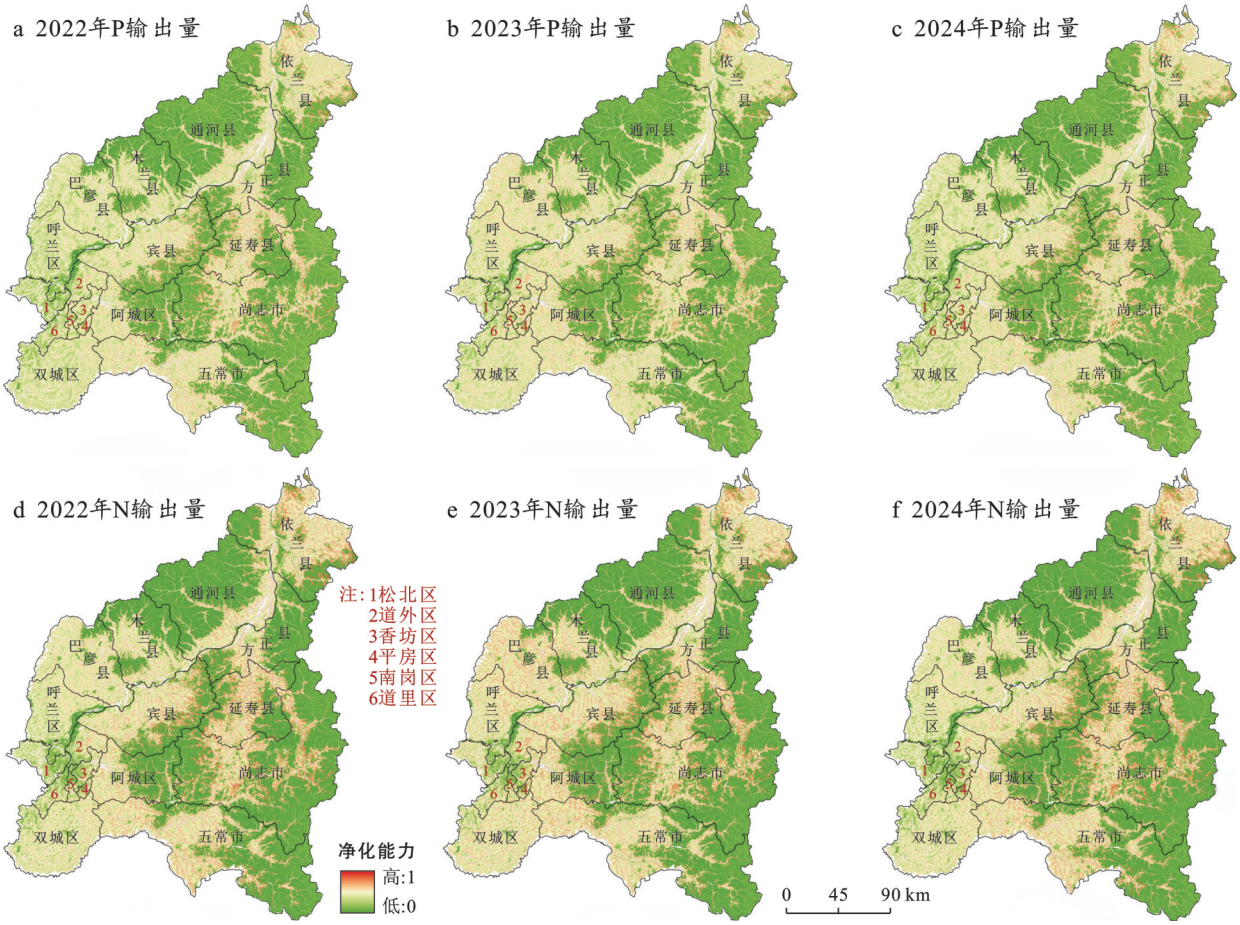


图 4　哈尔滨市水质净化能力分布图

Fig.4　Distribution map of water purification capacity in Harbin City

3.2　哈尔滨市水生态服务需求空间特征分析

生态服务需求主要是由土地综合利用强度指数、GDP、人口空间密度 3 个指标来表示(图 5—6)。由图 5—6 可知,哈尔滨市生态服务需求 3 项指标均呈现由主城区向周边逐步降低的趋势。南岗区、香坊区、平房区 3 项指标均为最高。由此可见,这 3 个区域经济发展速度较快,社会发展良好,人类活动干扰强度较大,对于生态服务的需求较高。从具体指标来看,人口空间密度与 GDP 指数类似,呈现西高东低,由周边县城向城区倾斜的趋势。受城市规划,人员流动等的影响,哈尔滨市新城区与周边县城从目前数据来看经济发展速度较低,生态服务需求较低;西部主城区经济发展速度较快,靠近松花江干流部分旅游业发达,建设用地比例高,人类活动干扰程度强,对生态服务需求也较高。土地利用强度方面,近 3 a 内的指标未发生过大变化,呈现持平状态。与其他两项指标一样,呈现西高东低的现象,城市主城区的开发程度强,建设用地比例最大,因此土地综合指数最高。

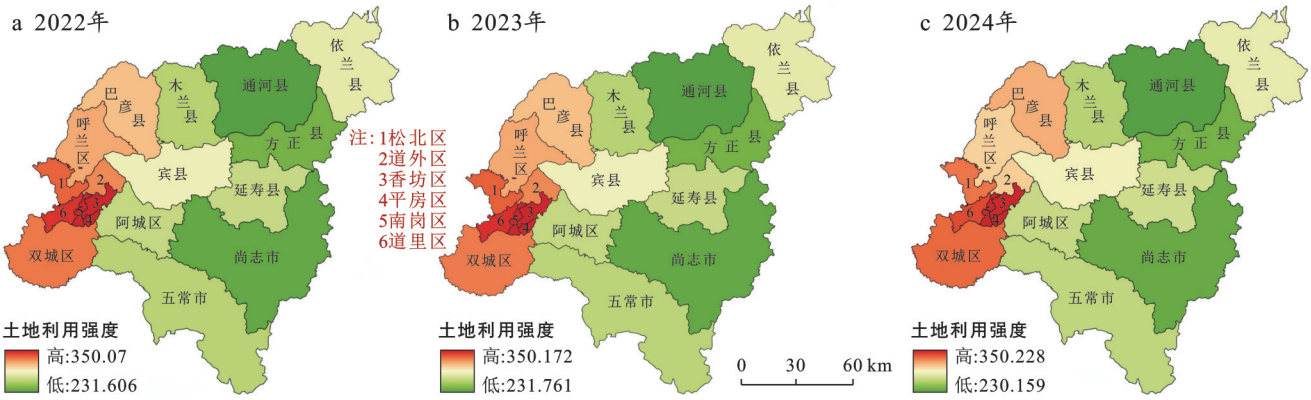


图 5 哈尔滨市土地利用强度分布图

Fig.5 Map of land use intensity in Harbin City

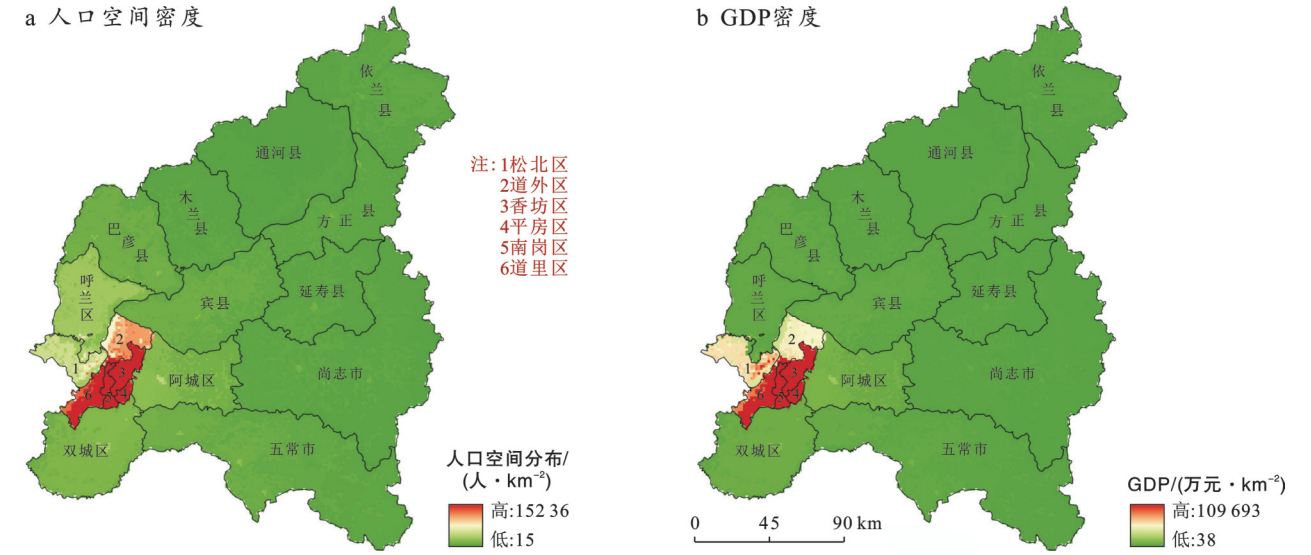


图 6 哈尔滨市人口空间密度及 GDP 指数

Fig.6 Spatial density of population and GDP index in Harbin City

3.3 哈尔滨市水生态服务供需结果与分析

运用以上方法所得到的生态服务需求与供给在单位、图纸表达上具有一定的差异,无法直接用于哈尔滨市水生态服务供需的研究。为消除表达差异及需求量纲的影响,本研究引入极差标准化模型,将生态供给量与需求量分别进行量化处理,得出哈尔滨市水生态服务供给的结果。根据以上计算结果可知,哈尔滨市内呈现出以松花江为中心,向周边逐步降低的明显趋势。可见松花江作为城市主要河流,是城市生态环境建设的重要部分,应充分利用其资源,构建城市良好的生态环境(图 7)。而生态服务需求方面,则是与城市经济发展速度、社会建设、城市规划等方面相匹配,呈现由主城区向周边县城逐步降低的趋势。其指数越高,说明其人类活动干扰程度越大,对生态服务要求也越高,而相应的生态环境遭受破坏的可能性也越高,因此需优先修复,以满足周边市民对水生态服务的需求(图 8)。

3.4 哈尔滨市水生态服务供给与服务需求相关性验证及协调度分析

相关性分析的目的是通过分析变量之间变化趋势的互动关系,推断一个变量对另一个变量的影响程度,相关性分析结果利用相关系数和显著性程度表示[35]。本文首先采用相关性验证中最常用的皮尔逊相关性验证模型,来探究哈尔滨市水生态系统服务供给与服务需求之间的相关性。从表 4 可知,近 3 a 内水生态供需均通过了相关显著性检验,且具有显著的正相关性。

本研究同时引入一元线性回归分析,来分析水生态服务供给与需求间的关系。表 5 的结果显示,近 3 a 内显著性指数 p 均小于 0.05,表明水生态服务供给能够显著影响生态服务需求的变化,二者呈现正相关关系。以上结果表明水生态服务供给与需求之间具有较大的关联性,对其进行耦合协调度研究具有一定的意义。

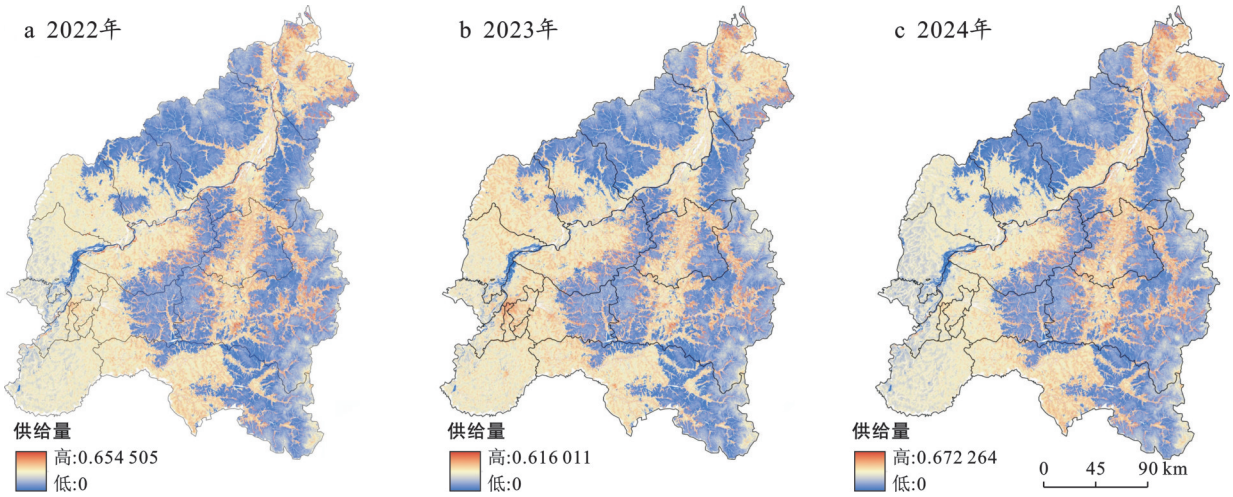


图 7　哈尔滨市水生态服务供给量

Fig.7　Supply of water ecosystem services in Harbin City

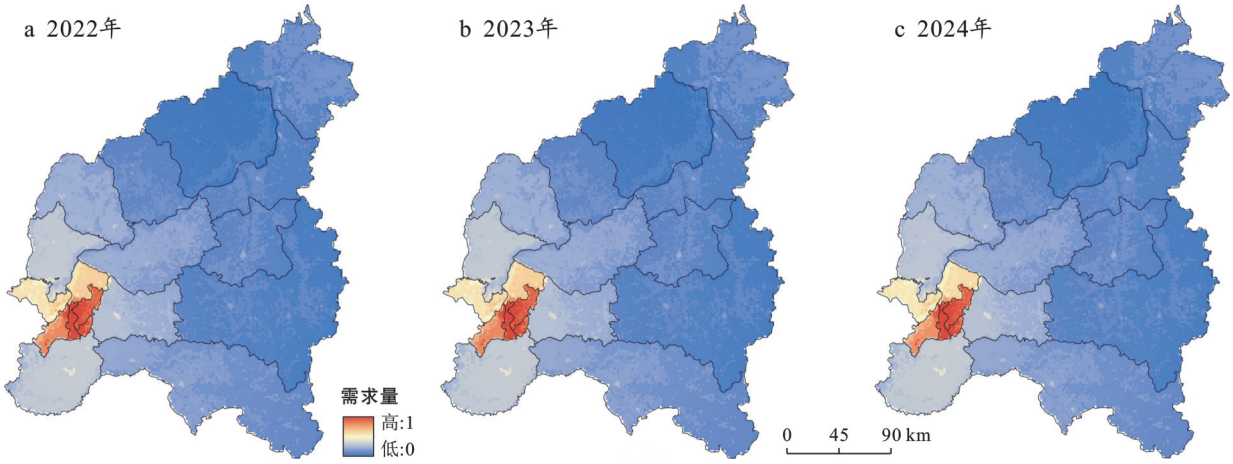


图 8　哈尔滨市生态服务需求量

Fig.8　Demand for ecosystem services in Harbin City

表 4　哈尔滨市水生态服务供需相关性分析

Table 4　Correlation analysis of water ecosystem services supply and demand in Harbin City

年份	皮尔逊相关系数	显著性
2022	0.700**	$p<0.01$
2023	0.807**	$p<0.01$
2024	0.616**	$p<0.01$

注:**表示在$p<0.01$水平非常显著。

根据上述分析结果,引入耦合协调度模型来探究哈尔滨市供需之间的协调程度。从哈尔滨市水生态服务协调度结果来看,近 3 a哈尔滨市水生态服务耦合协调度取值范围均在0~0.8,平均值为0.4左右,表现为轻度失调状态。相较来看,基本协调区域呈现逐年递增的状态,但整体变化不大,轻度失调区域仍占据很大部分。从空间分布来看,协调度的空间差异明显(图9),呈现周边高,中间低的趋势。其中,失调部分主要集中在周边县城距离松花江干流较远的部分,约占城市面积的40%左右。而协调度良好的区域比例则较少,只在部分主城区呈现良好的状态。哈尔滨市耦合协调度结果的空间分异除了自然因素影响外,也与多个社会因素有关。从哈尔滨城市空间结构来看,老城区香坊、南岗等区域为哈尔滨市经济建设中心,发展较快;地理位置所在区域水资源丰富,因此供需发展协调良好。松北区、呼兰区以及距离主城区较近的县城在城市发展中作为经济新区规划,经济发展呈现逐步上升状态;同时区域内有湿地公园等众多自然资源,供需程度基本协调。距离主城区较远的县域经济发展较为缓慢且距离松花江干流较远,居民的需求较高,但水供给能力较弱,因此呈现轻度失调的状态。哈尔滨市域内水生态供需重度失调区域较少,主要集中在干流附近,这可能是由于干流附近常用于建设重大水利工程,用于城市防洪与水资源供给;但人类活动较少,导致水生态服务供需结果呈现重度失调的状态。综上所述,哈尔滨市水生态服务供需耦合协调结果呈现失调状态,因此在哈尔滨开展水体生态修复工作具有重要意义。

表 5 哈尔滨市水生态服务供需线性回归分析

Table 5 Linear regression analysis of water ecosystem services supply and demand in Harbin City

变 量	2022 年	2023 年	2024 年
标准化系数 β	0.700	0.807	0.616
显著性指数 p	0.001***	<0.001***	0.007**
决定系数 R^2	0.490	0.650	0.379
调整后 R^2	0.458	0.629	0.340
方差分析 F	$F(1,16)=15.390$	$F(1,16)=29.774$	$F(1,16)=9.763$
显著性指数 $p(F)$	0.001***	<0.001***	0.007**

注:**表示非常显著, ***表示极显著。

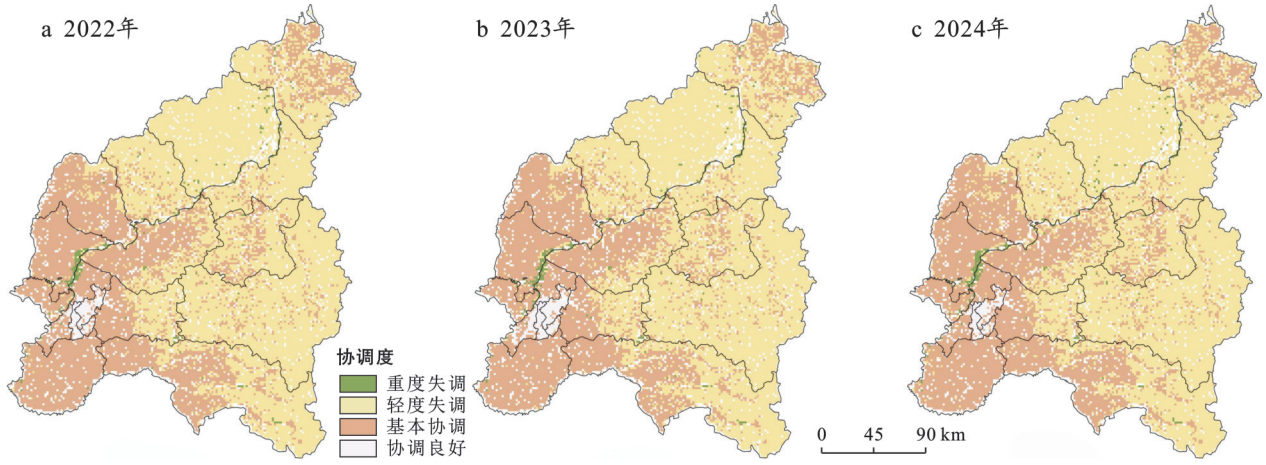


图 9 哈尔滨市生态服务供需耦合协调分布

Fig.9 Coupling coordination distribution of supply and demand of ecosystem services in Harbin City

4 结果与分析

4.1 水生态修复分区规划理念的提出

根据以上对哈尔滨市内河流生态服务的分析与研究,哈尔滨市城市水生态服务供需在空间上存在明显差异。根据城市经济发展要求以及社会发展等指标的要求,结合《哈尔滨市国民经济和社会发展第14个五年规划和2035年远景目标纲要》,综合考虑城市内自然水资源分布、经济发展现状以及城市地理条件,提出城市整体的河流生态修复分区规划理念——“一干流,五支流,四区域生态协同管理”。

4.2 哈尔滨市水生态修复分区规划

以哈尔滨市生态服务供需协调度研究结果为基础,从生态修复与可持续发展的角度出发,将哈尔滨市城市水生态管理区划分为4个区域,即生态改良区、生态涵养区、生态缓冲区以及生态保护区(图10)。将主城区中道里、香坊、南岗等中心城区划分为生态涵养区,因为中心城区生态服务供需较为协调,经济发达,社会发展快速,区域内各类公园、湿地以及水库等资源丰富,属于城市内生态服务主要的供给区域。此区域服务类型丰富,周边市民对于生态服务需求也较高,极大程度促进了区域生态协调发展。但由于主城区经济发展过快,以及人口过于密集等问题,很容易对水生态环境造成污染,从而出现供需失调的状况。因此,要大力发展绿色经济,保护城区自然环境,及时处理水体污染,保证主城区生态良好发展。

生态缓冲区包含松北区、阿城区等哈尔滨新城区及相距主城较近的县城。此区域生态服务供需呈现基本协调的状态,自然资源与水资源丰富。区域内湿地、自然保护区及森林公园居多,环境良好。该区域为哈尔滨新开发区域,相较主城区来说人类活动干扰不大,生态服务需求较低,适合建设缓冲区。缓冲区的意义在于生态服务供给良好,且距主城区较近,可将主城区的部分产业迁移至此,实现部分经济中心的转移。既可以缓解主城区的人地压力,又可以促进缓冲区经济发展,提高其生态服务供给的协调度,这与哈尔滨市社会发展远景目标也相一致。但在发展过程中,切忌过度开发,避免对缓冲区本身自然环境造成破坏。

生态改良区包含木兰县等距离主城区较远,生态服务供给严重失调的区域。该区域土地利用以耕

地为主,农产品经济为主要经济产业,城镇人口密度较低,经济发展较为缓慢。对于该区域首先要进行生态环境改良,一方面要在保证粮食食品安全的前提下,适当退耕还林,恢复生态环境。另一方面要提升农牧业生产技术,提高作物产量,加速当地经济发展。根据哈尔滨市总体规划目标,此区域可大力发展生态农业,建设农产品产业园、农家乐等休闲娱乐设施,既可以提高该地社会发展,又可以增强居民的生态保护意识,促进区域生态服务供需朝良好协调发展。

生态保护区主要包括松花江汇水口及干流部分,该区域人类活动干扰较少,生态环境良好,距离松花江干流较近,水资源及自然资源丰富。因此,应着重对此区域的自然环境进行保护,避免人为破坏。在保护过程中,可以通过建设自然保护区、湿地公园等形式,刺激当地旅游业的发展,提高其经济效能,促进生态服务供需协调发展。

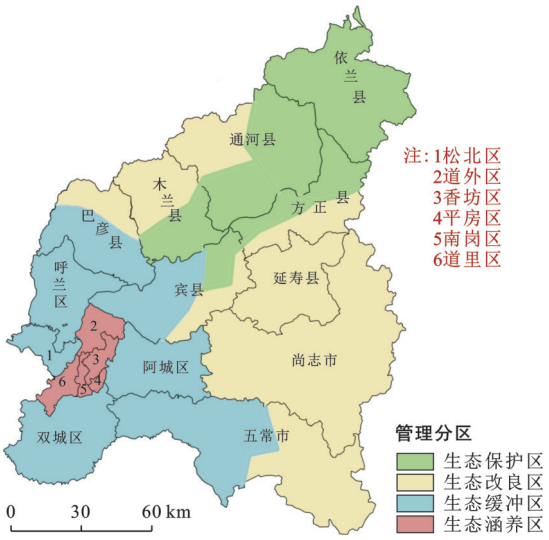


图 10　哈尔滨市水生态服务管理分区

Fig.10　Zoning of water ecosystem service management in Harbin City

5　结 论

(1) 2023年,哈尔滨市水生态服务供给能力良好,水资源丰富,主要集中在松花江干流及其主要支流。可见,松花江是哈尔滨市主要的水资源供给河流,对其的开发要采取适度原则,避免水资源遭到破坏。

(2) 2023年,哈尔滨市水生态服务需求水平良好,主要集中在主城区,周边县城以耕地为主,人类活动干扰不大,需求较低,呈现西高东低的状况。

(3) 城市水生态服务供给与生态服务需求之间具有较强的相关性。根据一元回归分析数据来看,生态服务需求的变化有46.8%来自水生态服务供给的变化,影响较大,因此将水生态服务供给与需求结合研究具有一定的理论意义。

(4) 哈尔滨市水生态服务供需协调度平均值为0.4,总体呈现轻度失调的状况,轻度失调区域占整体面积40%左右。可见,哈尔滨市内的水生态修复仍需加强。

(5) 主城区作为生态涵养区要加强生态保护,对于部分失调区域要及时修复,开展绿色经济,保护环境。缓冲区主要用于缓解涵养区生态压力,可适当进行产业重心的迁移,但要避免环境破坏。保护区则以生态保护为主,在此基础上适当开展旅游等生态产业。改良区以生态修复为主要目的,适当退耕还林,并大力发展生态农业等绿色经济产业。

(6) 本文在供需指标的选择上具有一定的局限性,研究结论属于静态分析结果,而水生态服务供需为动态过程,对其动态结果的反映不够全面。且研究以哈尔滨市单一城市为研究对象,未来可以补充与同类城市(如长春、沈阳)水生态协调度的横向对比,凸显哈尔滨的典型性或特殊性或扩充为寒地城市的水生态服务供需耦合研究,并根据研究城市的特点进一步选取供需指标,以增强研究结果的科学性与准确性。

参考文献(References)

[1] Martin D M. Ecological restoration should be redefined for the twenty-first century [J]. Restoration Ecology, 2017,25(5):668-673.

[2] 陈龙,徐丽,于名召,等.水生态系统服务流研究进展[J].生态学报,2025,45(2):1000-1012.
Chen Long, Xu Li, Yu Mingzhao, et al. Research progress of water ecosystem service flows [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(2):1000-1012.

[3] 唐霜,朱崇京,高洁,等.复杂地形下西南地区水生态系统服务时空变化与影响因素分析[J].水土保持学报,2024,38(6):244-252.
Tang Shuang, Zhu Chongjing, Gao Jie, et al. Spatial-temporal variations and influencing factors of water-related ecosystem services in southwest China under complex terrain [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(6):244-252.

[4] 韩宇,刘焱序,王晨旭.基于水生态系统服务的黄河流域生态修复投资优先区识别[J].生态学报,2024,44(18):8126-8137.
Han Yu, Liu Yanxu, Wang Chenxu. Identification of priority areas for ecological restoration supported by investment based on water ecosystem services in the Yellow River basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(18):

8126-8137.

[5] 梅怡明,江立芸,孙浩翔,等.基于InVEST模型的梁子湖流域水生态系统服务价值评估[J].环境科学与技术,2024,47(11):57-66.
Mei Yiming, Jiang Liyun, Sun Haoxiang, et al. Service value of water ecosystem in Liangzi Lake basin: Evaluation based on InVEST model [J]. Environmental Science & Technology, 2024,47(11):57-66.

[6] Study of Critical Environmental Problems. Man's Impact on the Global Environment: Study of Critical Environmental Problems [M]. Cambridge, Massachussetts: MIT press, 1970.

[7] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Ecological Economics, 1998,25(1):3-15.

[8] Millennium Ecosystem Assessment Program. Ecosystems and Human Wellbeing [M]. Washington, D C: Island Press, 2005.

[9] Flávio H M, Ferreira P, Formigo N, et al. Reconciling agriculture and stream restoration in Europe: A review relating to the EU water framework directive [J]. Science of the Total Environment, 2017,596:378-395.

[10] Grizzetti B, Lanzanova D, Liquete C, et al. Assessing water ecosystem services for water resource management [J]. Environmental Science & Policy, 2016,61:194-203.

[11] 赵同谦,欧阳志云,王效科,等.中国陆地地表水生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J].自然资源学报,2003,18(4):443-452.
Zhao Tongqian, Ouyang Zhiyun, Wang Xiaoke, et al. Ecosystem services and their valuation of terrestrial surface water system in China [J]. Journal of Natural Resources, 2003,18(4):443-452.

[12] 宋福强,李卓卿,肖俞,等.西藏朋曲河流域淡水生态系统服务价值评估[J].西南大学学报(自然科学版),2018,40(9):142-149.
Song Fuqiang, Li Zhuoqing, Xiao Yu, et al. A value assessment of freshwater ecosystem services in the Pumqu River basin, Tibet [J]. Journal of Southwest University (Natural Science), 2018,40(9):142-149.

[13] 陈明叶,刘素红,于连海,等.大清河阜平流域生态系统结构变化的服务价值响应研究[J].自然资源学报,2018,33(8):1376-1389.
Chen Mingye, Liu Suhong, Yu Lianhai, et al. Response of ecosystem service value to ecosystem structure change in Fuping basin of the Daqinghe River [J]. Journal of Natural Resources, 2018,33(8):1376-1389.

[14] 文一惠,马良,谢婧,等.生态服务功能空间转移定量化研究:以官厅水库流域为例[J].环境保护科学,2018,44(1):95-102.
Wen Yihui, Ma Liang, Xie Jing, et al. Quantitative research of ecosystem service function space transfer: A case of Guanting Reservoir watershed region [J]. Environmental Protection Science, 2018,44(1):95-102.

[15] 杨青,刘耕源.湿地生态系统服务价值能值评估:以珠江三角洲城市群为例[J].环境科学学报,2018,38(11):4527-4538.
Yang Qing, Liu Gengyuan. Wetland ecosystem services assessment based on emergy: A case of Pearl River delta urban agglomeration [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018,38(11):4527-4538.

[16] 翟天林,王静,金志丰,等.长江经济带生态系统服务供需格局变化与关联性分析[J].生态学报,2019,39(15):5414-5424.
Zhai Tianlin, Wang Jing, Jin Zhifeng, et al. Change and correlation analysis of the supply-demand pattern of ecosystem services in the Yangtze River economic belt [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(15):5414-5424.

[17] 彭建,胡晓旭,赵明月,等.生态系统服务权衡研究进展:从认知到决策[J].地理学报,2017,72(6):960-973.
Peng Jian, Hu Xiaoxu, Zhao Mingyue, et al. Research progress on ecosystem service trade-offs: From cognition to decision-making [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(6):960-973.

[18] 陈小平,邓亚宇,徐若凡,等.基于生态系统服务供需的太原市生态管理分区[J].应用生态学报,2024,35(7):1925-1934.
Chen Xiaoping, Deng Yayu, Xu Ruofan, et al. Ecological management zone of Taiyuan City based on the supply and demand of ecosystem services [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024,35(7):1925-1934.

[19] 王浩,吴吉林,龚磊,等.武陵山片区生态系统服务供需耦合协调评价及其驱动因素分析[J].长江流域资源与环境,2024,33(1):114-125.
Wang Hao, Wu Jilin, Gong Lei, et al. Coupling coordination development and driving factors of ecosystem service supply and demand in Wuling Mountains area [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024,33(1):114-125.

[20] 岳文泽,侯丽,夏皓轩,等.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[J].应用生态学报,2022,33(1):149-158.
Yue Wenze, Hou Li, Xia Haoxuan, et al. Territorially ecological restoration zoning and optimization strategy in Guyuan City of Ningxia, China: Based on the balance of ecosystem service supply and demand [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022,33(1):149-158.

[21] 屠文竹,赵文武,刘月,等.基于生态系统服务供需关系的黄土高原生态修复分区[J].生态学报,2024,44(21):9695-9707.

Tu Wenzhu, Zhao Wenwu, Liu Yue, et al. Ecological restoration zoning on the Loess Plateau based on the supply and demand of ecosystem services [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(21):9695-9707.

[22] 姚松,李咏华,许吉仁.基于静态与动态生态系统服务供需匹配的生态管理分区:以浙江省为例[J].生态学报,2025,45(22):10910-10928.
Yao Song, Li Yonghua, Xu Jiren. Ecological management zoning based on static and dynamic ecosystem service supply-demand: A case study of Zhejiang Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(22): 10910-10928.

[23] 李炳坤,张晓克,骆占斌,等."基于水-能源-粮食"关系的生态系统服务供需匹配研究:以天山北坡城市群为例[J].干旱区地理,2025,48(4):571-585.
Li Bingkun, Zhang Xiaoke, Luo Zhanbin, et al. Matching between supply and demand of ecosystem services based on the "water-energy-food" nexus: A case of the urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountains [J]. Arid Land Geography, 2025, 48(4): 571-585.

[24] Zhang Qiongrui, Sun Xuechao, Ma Jiaojiao, et al. Scale effects on the relationships of water-related ecosystem services in Guangdong Province, China [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 44: 101278.

[25] Chaikumbung M, Doucouliagos H, Scarborough H. The economic value of wetlands in developing countries: A meta-regression analysis [J]. Ecological Economics, 2016,124:164-174.

[26] 吕凯,司振江,李铁男,等.松花江流域水生态系统服务价值评估[J].中国农村水利水电,2024(12):108-116.
Lü Kai, Si Zhenjiang, Li Tienan, et al. Valuation of water ecosystem services in the Songhua River basin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(12): 108-116.

[27] Ding Yongxia, Peng Shouzhang. Spatiotemporal trends and attribution of drought across China from 1901—2100 [J]. Sustainability, 2020,12(2):477.

[28] Peng Shouzhang, Ding Yongxia, Liu Wenzhao, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017 [J]. Earth System Science Data, 2019,11(4):1931-1946.

[29] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021,13(8):3907-3925.

[30] Liu Xiaoping, Liang Xun, Li Xia, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects [J]. Landscape and Urban Planning, 2017,168:94-116.

[31] Villamagna A M, Angermeier P L, Bennett E M. Capacity, pressure, demand, and flow: A conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery [J]. Ecological Complexity, 2013, 15: 114-121.

[32] 韩增林,刘澄浩,闫晓露,等.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[J].生态学报,2021,41(22):9064-9075.
Han Zenglin, Liu Chenghao, Yan Xiaolu, et al. Coupling coordination and matches in ecosystem services supply-demand for ecological zoning management: A case study of Dalian [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(22):9064-9075.

[33] 孟祥嵩,杨新兵,赵迎雪,等.基于InVEST模型的白洋淀上游大清河流域土壤侵蚀和土壤保持功能时空变化规律[J].林业与生态科学,2025,40(1):41-50.
Meng Xiangsong, Yang Xinbing, Zhao Yingxue, et al. Temporal and spatial patterns of soil erosion and soil conservation functions in the upper Baiyangdian Daqing River basin based on the InVEST model [J]. Forestry and Ecological Sciences, 2025,40(1):41-50.

[34] 刘沛显,刘莹,李铁男,等.黑龙江省牡丹江市水土保持生态服务功能时空分异[J].水土保持通报,2025,45(1):357-369.
Liu Peixian, Liu Ying, Li Tienan, et al. Spatiotemporal differentiation of soil and water conservation ecological service function in Mudanjiang City, Heilongjiang Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(1):357-369.

[35] 王磊,蔡运龙.人口密度的空间降尺度分析与模拟:以贵州猫跳河流域为例[J].地理科学进展,2011,30(5):635-640.
Wang Lei, Cai Yunlong. Spatial down-scaling analysis and simulation of population density in Maotiaohe basin, Guizhou Province [J]. Progress in Geography, 2011,30(5):635-640.