

基于遥感技术的水生态空间健康综合评价体系

陶果丰^{1,2,3}, 薛万来³, 袁博^{1,2}, 李添雨³, 李文忠³, 李杰^{1,2},
赵琳琳^{1,2}, 崔宇然^{1,2}, 徐为业^{1,2}, 魏香琴⁴, 贾坤^{1,2}

1. 北京师范大学 地理科学学部 卫星应用前沿交叉研究院 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学 地理科学学部 北京市陆表遥感数据产品工程技术研究中心, 北京 100875;

3. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048;

4. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

摘要: 科学合理地评价水生态空间健康状况, 对于保护水生态系统的核心结构和服务功能具有重要意义。目前, 区域水生态空间的综合性评价研究较少, 且评价指标体系存在指标类型单一、受限于地面观测等问题。因此, 本研究基于遥感视角, 构建了全方位涵盖生态空间物理结构、水文水质要素、陆域岸线植被要素的北京市水生态空间健康评价指标体系。同时, 综合层次分析法与熵权法开展主客观结合的指标赋权, 创建了水生态空间健康遥感评价体系, 并基于综合评价指数将水生态空间分为健康、良好、一般、较差4个等级。本研究以北京市永定河、潮白河、昆明湖、密云水库等10个典型水体为例, 开展了综合性的水生态空间健康评价, 结果表明: (1) 评价体系能够合理评价水生态空间健康状况, 其中水文水质要素对水生态空间健康影响最大, 陆域岸线植被要素次之, 生态空间物理结构影响最小; (2) 北京市10个典型水体中, 永定河、圆明园湖的水生态空间健康评价等级为良好, 其余水体为健康, 建议未来对永定河、圆明园湖开展针对性的生态修复。

关键词: 遥感, 水生态空间, 健康评价, 评价体系, 指标赋权, 北京市, 北京二号, 综合评价指数构建

中图分类号: P2

引用格式: 陶果丰, 薛万来, 袁博, 李添雨, 李文忠, 李杰, 赵琳琳, 崔宇然, 徐为业, 魏香琴, 贾坤. 2025. 基于遥感技术的水生态空间健康综合评价体系. 遥感学报, 29(3): 689–699

Tao G F, Xue W L, Yuan B, Li T Y, Li W Z, Li J, Zhao L L, Cui Y R, Xu W Y, Wei X Q and Jia K. 2025. A comprehensive assessment framework for water ecological space health based on remote sensing technology. National Remote Sensing Bulletin, 29(3): 689–699 [DOI: 10.11834/jrs.20243340]

1 引言

水是生态系统的重要组成部分, 是支撑地球生命系统的基础和决定区域可持续发展的核心要素 (牛最荣和贾玲, 2023; 俞孔坚等, 2019; Rath等, 2021)。随着中国城镇化发展, 水生态问题逐渐凸显, 如水质恶化、水土流失、城市内涝等 (俞孔坚, 2015)。水生态问题的产生除了与水体本身有关外, 还与水生态系统的结构和功能密切相关。因此, 评估与治理水生态问题, 需系统性地考虑水体及其空间载体的健康状况, 从生态系统的整体性角度开展研究。水生态空间是为生态—水文

过程提供场所、维持水生态系统健康稳定、保障水环境安全的各类生态空间, 包括河流湖泊等水域空间、以水陆交错为主的岸线空间、以及与水资源保护密切关联的涉水陆域空间 (杨晴等, 2017), 能够反映水体及其空间载体的整体状况。

目前, 水生态空间研究主要聚焦于3个方面, 包括水生态空间的划定 (周广金等, 2022)、水生态空间的功能分类 (邓伟等, 2004; 唐寅等, 2020)、水生态空间的分布格局与时空变化分析 (薄立明等, 2023a, 2023b)。现有研究在以上3个方面已取得长足进展, 但鲜有研究对水生态空间内部生态环境质量开展综合性评估, 缺乏水生态

收稿日期: 2023-08-07; 预印本: 2024-01-06

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42171318); 北京市科技计划课题 (编号: Z221100005222013); 遥感科学国家重点实验室、北京市陆表遥感数据产品工程技术研究中心开放基金 (编号: OF202207)

第一作者简介: 陶果丰, 研究方向为生态遥感和植被定量遥感。E-mail: tao_gf@mail.bnu.edu.cn

通信作者简介: 贾坤, 研究方向为生态遥感和植被定量遥感。E-mail: jiakun@bnu.edu.cn

空间健康评价研究。科学合理地开展水生态空间健康状况评价,有利于全面掌握水生态系统状态,对保护水生态系统的核心结构和服务功能具有重要意义。

目前,虽然针对水生态空间的综合性健康评价研究较少,但在水安全(Kelly等,2020;李若飏等,2022)、水环境(Gharibi等,2012;Santos等,2021;周博天等,2022)等方面已有较为成熟的评价体系。然而,其评价方案难以应用于水生态空间的综合健康评价。一是受到地面观测数据的限制,评价数据主要来源于地面测量与实验室分析的水文水质信息,有限的观测数据难以覆盖整个水生态空间的评价(Chawla等,2020)。二是现有的评价指标较单一,仅考虑了水体本身的特征,忽略了水体周围区域内的生态环境状况,评价指标难以涵盖水生态空间所涉及的水域、岸线、陆域等多个生态空间类型。

遥感具有快速、动态、大范围的地表监测优势,相比于传统的地面观测更为高效、全面,是评价区域水生态空间健康的有效手段。水的物理、化学、生物特性决定了水体的光谱特征,遥感反射率数据具有反演叶绿素a浓度、浊度等水质参数的潜力。同时,遥感能够直观地获取水生态空间内岸线与陆域空间的植被信息,掌握植被的生态状况。此外,高空间分辨率遥感数据能够精细刻画地表人类活动范围及强度(Zhou等,2021),是研究水生态空间内人类活动影响的有效数据源。综上,遥感数据既能够弥补传统地面调查存在的时间、人力、覆盖范围等问题,也具有综合描述水生态空间水域、岸线、陆域等全方面生态健康水平的潜力。

因此,本研究拟基于遥感视角,构建能够刻画水生态空间各要素生态状态的指标体系,综合利用多源遥感数据,研发一套综合性的北京市水生态空间健康评价方法体系。进而,本研究选取北京市典型水体,包括地表水源地、景观湖泊、流经郊区或城区的河流,开展综合性的水生态空间健康评价,以期北京市可持续发展、水生态管理与改善提供参考。

2 研究区及数据源

2.1 研究区概况

本文以北京市6条典型河流、两个重点湖泊、

两个大型水库为例开展水生态空间健康评价研究,所涉及的水生态空间指各河湖库管理保护范围线以内的区域,主要包括水域和岸线空间,其空间分布如图1所示。

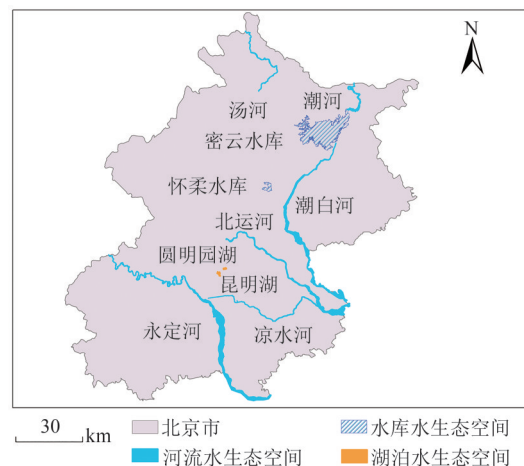


图1 研究区空间分布

Fig.1 The spatial distribution of studied water ecological spaces

6条典型河流分别为永定河、潮白河、北运河、潮河、汤河、凉水河。永定河是海河水系最大的河流,是北京市重要的生态廊道,自20世纪70年代以来,受气候、水资源开发不合理等因素的影响,河道出现断流,恢复与维护永定河健康是目前的研究重点(孙冉等,2021;张镡文等,2023)。潮白河是北京第二大河流,上游为潮河与白河,潮河源于河北省丰宁县,南流经古北口入密云水库,与白河出库后在密云区河槽村汇合为潮白河。与永定河相似,自20世纪80年代以来潮白河经常发生断流,水生态环境面临严峻考验(孙冉等,2021)。北运河位于北京市东部,源于北京市昌平区,沿途有通惠河、凉水河、凤岗减河等平原河流汇入,其流域内人口集中、产业密集。汤河是白河的支流,位于北京市怀柔区,河流两岸较少受人为干扰,自然原始风貌保存较为完整(高宇婷,2014;顾岚等,2012)。凉水河主要位于北京城区南部,发源于北京市石景山区,最终汇入北运河,是北京市重要的排洪河道。

两个重点湖泊分别为昆明湖和圆明园湖,昆明湖是北京市区最大的湖泊,面积1.94 km²,圆明园湖面积1.4 km²,两者均位于公园景区内,属于城市小型浅水湖泊。两个大型水库为密云水库和怀柔水库,两者均为北京市重要的地表饮用水水

源地, 具有防洪、蓄水等功能, 多年来为北京市生态建设发展起到了至关重要的作用 (王友生 等, 2012)。

2.2 数据源

本研究主要采用多源遥感数据、气象数据研发水生态空间健康综合评价方法, 各类型数据信息如表 1 所示。北京二号数据具有 0.8 m 空间分辨

率, 是计算水生态空间健康遥感评价体系中精细化指标的重要数据源; Sentinel-2 数据具有丰富的波段信息, 有利于植被参数估算; ERA5-Land 是由欧洲中期天气预报中心 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 生产的地面再分析气象数据集, 其中温度、降水、辐射等数据可用于评价体系中植被相关指标的计算。

表 1 本研究所使用数据的信息
Table 1 Information of the data used in this study

数据类型	数据名称	时间	空间分辨率	来源
遥感数据	北京二号	2021 年 3—5 月	0.8 m	民用商业卫星
	Sentinel-2	2021 年 6—8 月	10 m	欧洲航天局哥白尼数据中心 (https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home)
气象数据	ERA5-Land	2021 年 6—8 月	0.1°	Climate Data Store (https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land)

3 水生态空间健康遥感评价体系构建

3.1 水生态空间健康评价指标体系

科学合理的评价指标体系是开展水生态空间健康评价的基础。评价指标的选取应符合水生态空间的概念, 能够表征水生态空间的生态环境特征, 具有代表性和典型性。水生态空间是多种土地类型的综合载体空间, 因此水生态空间健康评价指标体系应具备以下 3 要素; (1) 评价指标能够涵盖水、陆、岸 3 类空间; (2) 评价指标能代表性地反映各类空间的生态状况, 满足客观、系统、全面地反映水生态空间健康状况的需求; (3) 评价指标具有敏感性, 能够及时响应水生态空间健康问题。综上, 本研究从生态空间物理结构、水文水质要素、陆域岸线植被要素 3 个方面出发, 遵循数据可获得、可量化、可比较、客观性及典型性的原则, 构建了基于遥感的水生态空间健康评价指标体系 (表 2)。

(1) 生态空间物理结构。生态空间物理结构反映水生态空间的完整性, 包括河湖水系形态、流通性、岸线功能以及人类活动对生态空间的侵占情况等。本研究以蜿蜒度描述河流的形态, 河流蜿蜒程度能够影响河流的生态环境, 蜿蜒度高的河流往往在物种丰富度、完整性和总量上高于顺直河流 (Frothingham 等, 2001; Rhoads 等, 2003), 且具有较好的自净能力、水质状况 (俞孔坚,

2015)。河流的流通性在一定程度上受到闸、坝等拦河构筑物的影响, 长期的闸坝调控会使物质、能量和生物在河流水系中转移扩散的通畅度降低, 可能会导致河流物种多样性贫乏、水质恶化 (左其亭 等, 2016; Duarte 等, 2021), 本研究以单位河长拦河构筑物数量来描述河流纵向连通指数。在岸线功能方面, 本研究以生态岸线比例表征, 根据护岸类型, 水体岸线可分为生态岸线和人工岸线, 生态岸线保有生态功能和自然属性, 人工岸线则是指由混凝土等修筑而形成的硬质岸线, 阻隔了水陆之间的物质能量流动, 丧失了生态功能, 生态岸线占比越高表明河湖岸线自然生态功能保持越好。从整个水生态空间的角度来看, 人类活动会导致水生态空间内原本具有自然属性的地表覆盖类型向与人类活动密切相关的类型 (如不透水面、农田等) 转换, 本研究以人为干扰区域在水生态空间内的占比代表人为干扰指数, 以反映人类活动对水生态空间整体的影响程度。虽然生态岸线比例和纵向连通指数也受到人类行为影响, 但与人为干扰指数相比, 这两个指标反映的是人类对水生态空间线性和点状维度上的改造, 无法概括水生态空间整体状况, 且二者分别在描述岸线功能和河流连通性上具有重要的生态意义。人为干扰指数越高, 并不意味着生态岸线比例越低、纵向连通指数越高。3 个指标各具特色, 在评价生态空间物理结构上均发挥着的重要作用。

表2 水生态空间健康评价指标体系
Table 2 The assessment index system of water ecological space health

目标层	准则层	指标层	数据源	计算方法
水生态空间健康评价	生态空间物理结构	蜿蜒度*(+)	北京二号	河段两端点之间沿河道弯曲弧线长度/河段两端点之间河流直线长度
		生态岸线比例(+)	北京二号	生态岸线长度/总岸线长度。岸线类型由遥感数据解译得到
		人为干扰指数(-)	北京二号	人为干扰面积(草地、林地、灌丛、水域以外的面积)/水生态空间的总面积。土地覆盖类型由遥感数据解译得到
		纵向连通指数*(-)	北京二号	河流拦河构筑物(闸、坝)总个数/河流总长度。拦河构筑物数量由遥感数据解译得到
	水文水质要素	浊度(-)	北京二号	参考 Dogliotti 等(2015)发展的方法
		叶绿素 a 浓度(-)	北京二号	半经验回归模型(杨一鹏 等, 2006)
		有水河长占河道总长比*(+)	北京二号	有水河道的长度/河道总长。水体区域由遥感数据解译得到
		水面面积占水生态空间面积比(+)	北京二号	水面面积/水生态空间面积。水体区域由遥感数据解译得到
	陆域岸线植被要素	植被覆盖度(+)	Sentinel-2	参考 Jia 等(2016)发展的方法
		叶面积指数(+)	Sentinel-2	参考 Jia 等(2016)发展的方法
		净初级生产力(+)	Sentinel-2 ERA5-Land	CASA 模型(朴世龙 等, 2001)

注: *表示该指标仅适用于河流,不适用于湖泊和水库;+表示正向指标,-表示负向指标。

(2) 水文水质要素。水文水质要素反映水域环境的健康状况, 主要包括河湖库水量与水环境质量两个方面。河湖库水量影响着生态系统结构和功能, 水量的减少会导致河流断流、湖库萎缩, 从而使得水体自净能力降低, 继而影响水生态系统内动植物的生存。受降水、蒸发、地下水位、人类活动等多种因素影响, 河湖库水量变化较大, 基于遥感数据提取的水面面积可直观地反映区域水量状况。由于水面面积这一指标难以在不同规模的水生态空间之间形成可比性, 因此, 本研究选取有水河长占河道总长比、水面面积占水生态空间面积比指示水生态空间的水量。有水河长占河道总长比仅适用于河流, 反映的是河流线性维度上的水量情况, 能够表示河流的断流程度; 有水面积占水生态空间面积比反映的是面状维度上的水量情况, 适用于河湖库。水环境质量反映了水体受污染程度, 本研究以浊度和叶绿素 a 浓度表示。浊度作为重要的水质参数, 可反映水体的泥沙含量、悬浮物浓度等污染情况(冯奇 等, 2017), 浑浊度不同的水体具有不同的光谱衰减特性。叶绿素 a 是浮游植物中最主要的色素, 其浓度能够指示水体中藻类等浮游植物的数量, 水体富营养化可导致浮游植物大量繁殖, 因此叶绿素 a 浓度越高, 往往表明水体富营养化程度越高(郑贵洲和李春燕, 2022; 郑著彬 等, 2022)。

(3) 陆域岸线植被要素。陆域岸线植被要素反映滨水陆域空间的植被生长状况, 植被具有水土保持、水源涵养、气候调节等生态功能, 其生长状况影响着水生态空间的健康水平, 本研究以植被覆盖度 FVC (Fractional Vegetation Cover)、叶面积指数 LAI (Leaf Area Index)、植被净初级生产力 NPP (Net Primary Productivity) 3 个指标表示。相比于 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 等常用的植被指数, FVC、LAI、NPP 具有更丰富的物理意义, 能够从多种维度反映植被的生长状况。FVC 表示单位面积绿色植物在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比(Jia 等, 2016), 是衡量地表植被在水平方向的生长状况的重要指标。LAI 通常定义为单位土地面积上植物叶片总面积占土地面积的倍数, 是重要的植被冠层结构参数(Yan 等, 2019; 江海英 等, 2020), 相比于 FVC, LAI 能够在一定程度上反映植被的垂直结构信息。NPP 是指绿色植被在单位时间、单位面积由光合作用产生的有机物质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分(Cramer 等, 1999)。NPP 不仅直接反映植被在自然环境状况下的生产能力、表征陆地生态系统的质量, 而且是判定生态系统碳源/碳汇及区域生态支持能力的重要因子。FVC、LAI、NPP 数值越大, 表示该区域植被生长状态越好, 对水生态空间的健康发展更具有正向作用。

虽然FVC、LAI与NPP之间存在一定相关性,但这3个指标反映的植被特性不同,其时间变化趋势和空间分布特征可能会存在不一致性(Bai等,2022;李广超等,2021)。因此,相比于采用单一的植被指标,综合利用FVC、LAI、NPP对陆域岸线植被要素进行评价能够更加全面。

3.2 主客观结合的评价指标赋权方法

开展综合的、系统性的水生态空间健康评价,需要将优选的评价指标进行整合,而如何确定各评价指标的权重是评价体系构建的关键。目前,常用的赋权方法包括主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法一般基于行业专家、研究人员的知识经验,通过比较指标之间的相对重要程度确定权重系数,人为主观判断对赋权结果影响较大。客观赋权法则仅依赖于指标体系的数据结构,通过数学分析确定权重大小,但赋权结果有时与事实规律相悖。本研究采用主客观相结合的赋权方法,将主观赋权法中的层次分析法AHP (Analytical Hierarchy Process)与客观赋权法中的熵权法相结合,综合两者优势,对3类11个指标在水生态空间健康评价中的贡献进行权重分配。

AHP法将与决策有关的元素分解为目标层、准则层等,在该结构基础上量化同层次指标的相对重要性,已被广泛应用于生态环境评价研究(顾岚等,2012;Kumar等,2021)。本研究构建的评价层次结构如表1所示,分为目标层、准则层、指标层。首先,根据专家意见构建各层次的判断矩阵,引用数字1—9及其倒数作为标度衡量两两指标之间的重要程度,形成矩阵:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, n 为同一层次指标个数。设判断矩阵 A 最大特征根为 λ_{\max} ,其相应的特征向量为 W_a ,解判断矩阵 A 的特征根:

$$AW_a = \lambda_{\max} W_a \quad (2)$$

若 A 通过一致性检验,归一化后的 W_a 即为同一层次各因子对于上一层次某一因子的权重,其中第 i 个指标基于AHP法求得的权重表示为 w_i^a 。

熵权法通过指标数据的信息熵量化指标的离散程度,指标离散程度越大,该指标对综合评价结果影响越大,即权重越大。第 i 个指标的信息熵

e_i 通过以下公式计算:

$$e_i = -k \sum_{j=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (3)$$

式中, m 表示指标的观测数量,且 $k = 1/\ln(m)$ 。 p_{ij} 指第 i 个指标的第 j 个观测 Z_{ij} 对该指标的贡献比例,其计算方法如下:

$$p_{ij} = \frac{Z_{ij}}{\sum_{i=1}^m Z_{ij}} \quad (4)$$

基于以上公式,由熵权法求得第 i 个指标的权重 w_i^b :

$$w_i^b = \frac{1 - e_i}{k - \sum_{i=1}^n e_i} \quad (5)$$

最后,对层次分析法得到的权重 w_i^a 、熵权法得到的权重 w_i^b 进行整合,求得第 i 个指标最终权重 $w_i = 0.5 \times w_i^a + 0.5 \times w_i^b$ 。

3.3 水生态空间健康综合评价指数构建

3.3.1 指标预处理

综合评价指数是各评价指标基于权重整合后的最终结果。然而,不同指标具有不同的表现形式,如浊度、叶绿素a浓度、植被覆盖度、叶面积指数、植被净初级生产力等指标的遥感反演结果为空间连续型,而其他指标在一个水生态空间内仅对应一个值。为使所有指标能够放在同一框架下进行组合,本研究以各水生态空间为地理单元,对空间连续型指标进行分区统计,以各指标在水生态空间内的均值表示其数值。同时,不同指标具有不同单位与数值范围,需要将指标数值转换为统一的无量纲数据。因此,本研究采用最大最小值法对各指标因子进行归一化,将所有指标拉伸到 $[0, 1]$ 。由于指标分为正向指标和负向指标,具体的归一化方法如下:

$$x^* = \begin{cases} \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, & x \text{ 为正向指标} \\ 1 - \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, & x \text{ 为负向指标} \end{cases} \quad (6)$$

式中, x_{\max} 和 x_{\min} 分别表示指标 x 的最大值、最小值, x^* 为指标 x 的归一化结果。

3.3.2 综合指数构建

根据指标分级结果和权重系数,水生态空间健康评价指数WESHI (Water Ecological Space

Health Index) 可通过各归一化指标因子的加权求和计算:

WESHI = W_{struct} \sum_{i=1}^r w_i x_i^* + W_{water} \sum_{j=1}^q w_j x_j^* + W_{veg} \sum_{k=1}^l w_k x_k^* (7)

式中, W_{struct}, W_{water}, W_{veg}, r, q, l 分别表示生态空间物理结构、水文水质要素、陆域岸线植被要素的权重和指标个数, x^* 表示各评价指标归一化数值, w 表示各指标权重。WESHI 数值范围为 0—1, WESHI 越大表示水生态空间健康状况越好。本研究基于 WESHI 数值, 将水生态空间健康程度分为 4 类, 分别为: 健康 (0.6<WESHI≤1)、良好 (0.4<WESHI≤0.6)、一般 (0.2<WESHI≤0.4)、较差 (0≤WESHI≤0.2)。

4 结果与分析

4.1 水生态空间健康评价指标权重

生态空间物理结构、水文水质要素、陆域岸线植被要素及其指标层各指标因子的权重如表 3 所示。结果表明, 水文水质要素对水生态空间健康的影响最大, 水体作为水生态空间的构成主体,

是生态空间内能量流动、信息传递的主要介质, 其环境状况直接影响着水生态空间健康, 具有合理性。无论是对于河流还是湖库, 叶绿素 a 浓度都是水文水质因子中权重最大的指标, 其他 3 个指标的权重相似, 表明叶绿素 a 浓度对于水文水质状况的描述贡献更大, 浊度、有水河长占河道总长比、水面面积占水生态空间面积比对于水生态空间健康评价的重要程度相当。

陆域岸线植被要素的权重排名次之, 植被作为水生态空间重要的组成部分, 其生长状况也是指示水生态空间健康的重要因素。植被净初级生产力、叶面积指数、植被覆盖度权重依次递减, 但三者权重差距不大, 均是表征地表植被生长状况的重要因子。植被净初级生产力作为判定生态系统质量状况和碳汇的重要因子, 反映了植被群落的生产能力和生态过程, 因此具有更高的评价权重。植被覆盖度、叶面积指数分别描述植被水平、垂直方向上的生长状况, 由于不同植被类型之间垂直结构差异较大, 相比于植被覆盖度, 叶面积指数对于水生态空间的植被健康状况评价的贡献度更高。

表 3 水生态空间健康评价指标权重

Table 3 The weight of each indicator for water ecological space health assessment

目标层	准则层	指标层	权重(河流)	权重(湖泊、水库)
水生态空间健康评价	生态空间物理结构 (0.2075)	蜿蜒度*(+)	0.1849	—
		生态岸线比例(+)	0.3550	0.6381
		人为干扰指数(-)	0.1746	0.3619
		纵向连通指数*(-)	0.2855	—
	水文水质要素 (0.4267)	浊度(-)	0.2408	0.3110
		叶绿素 a 浓度(-)	0.3188	0.3691
		有水河长占河道总长比*(+)	0.2185	—
		水面面积占水生态空间面积比(+)	0.2219	0.3199
	陆域岸线植被要素 (0.3658)	植被覆盖度(+)	0.2917	0.2917
		叶面积指数(+)	0.3364	0.3364
		植被净初级生产力(+)	0.3719	0.3719

注: *表示该指标仅适用于河流,不适用于湖泊和水库;+表示正向指标,-表示负向指标。

生态空间物理结构对水生态空间健康的影响最小。生态空间物理结构奠定了空间内的生态系统结构, 指标大多反映了人类活动对生态空间的侵占情况, 但整体变化较慢, 往往在各生态过程中逐渐影响着水生态空间健康。生态岸线比例是生态空间物理结构中权重最大的指标, 岸线是陆

地与水生生态系统之间进行物质、能量交换的生态交错带, 是河湖生态系统的核心组成部分, 若生态岸线因人类活动影响而转变为人工岸线则会丧失原有的生态功能, 对水生态空间造成一定的负面影响。纵向连通指数在生态空间物理结构因子中贡献度排名第二, 蜿蜒度与人为干扰指数贡

献度相当。

4.2 北京市典型水体水生态空间健康评价结果

北京市6条典型河流（永定河、潮白河、北运河、潮河、汤河、凉水河）、两个重点湖泊（昆明湖、圆明园湖）、两个大型水库（密云水库、怀柔水库）的水生态空间健康综合评价指数 WESHI 和水生态空间健康等级如表4和图2所示。

表4 北京市典型水体水生态空间 WESHI 及健康等级
Table 4 The WESHI and health level of the studied typical water ecological spaces in Beijing

水生态空间类型	名称	WESHI	水生态空间健康等级
河流	永定河	0.5783	良好
	潮白河	0.6667	健康
	北运河	0.7133	健康
	潮河	0.7283	健康
	汤河	0.7659	健康
	凉水河	0.6955	健康
湖泊	昆明湖	0.6182	健康
水生态空间	圆明园湖	0.5813	良好
水库	密云水库	0.7102	健康
水生态空间	怀柔水库	0.6592	健康

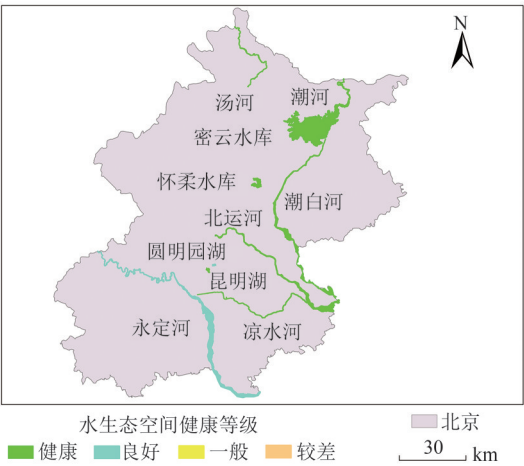


图2 北京市典型水体水生态空间健康等级空间分布图
Fig.2 The health level distribution of the studied typical water ecological spaces in Beijing

4.2.1 河流水生态空间健康评价结果

6条典型河流的水生态空间健康等级均达到良好及以上，其中永定河为良好，其他5条河均为健康。关于综合评价指数 WESHI，汤河的评价得分最高，北运河、潮河、凉水河分数相近，潮白河排名第5，永定河评价得分最低。

在生态空间物理结构方面，汤河在6条河流中评价得分最高，汤河地处郊区，周围的人类活动影响较小，且无人工改造河道，河流特性完整，因此其生态空间具有较好的物理结构形态；永定河的生态空间物理结构评价得分最低，永定河具有较多涵闸枢纽，虽在防洪、灌溉等方面发挥着重要作用，但在一定程度上影响了河流流通性。在水文水质状况方面，汤河和凉水河评分最高，永定河与潮白河评分较低，其中，水质部分的得分排名为：汤河（0.4984）、潮河（0.4829）、凉水河（0.4766）、潮白河（0.4672）、永定河（0.4650）、北运河（0.4643），与北京市生态环境局（<https://sthjj.beijing.gov.cn/> [2023-08-07]）发布的2021年5月北京市地表水水质等级排名类似（汤河与潮河水质等级为Ⅱ级，凉水河、永定河平原段为Ⅲ级，潮白河和北运河为Ⅳ级）。在陆域岸线植被要素方面，潮白河、北运河、潮河、汤河的评价得分相近，略高于凉水河和永定河。凉水河和永定河较靠近北京城市中心，受城区频繁的人类活动影响，其水生态空间内的植被生态状况对比郊区河流表现较差。

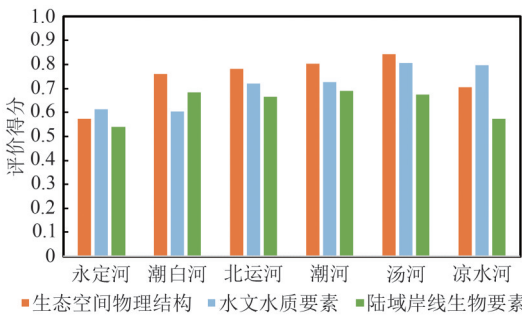


图3 6条典型河流水生态空间各准则层指标的评价结果
Fig.3 Each criterion layer assessment score of the six typical rivers

4.2.2 湖泊、水库水生态空间健康评价结果

两个重点湖泊昆明湖和圆明园湖的水生态空间健康水平分别为健康和良好。由图4可发现，昆明湖和圆明园湖的生态空间物理结构、陆域岸线植被要素状态接近，但昆明湖在水文水质方面的表现高于圆明园湖。两个重点水库的水生态空间健康等级均达到健康水平，其中，密云水库的生态空间物理结构明显优于怀柔水库，水文水质要素和陆域岸线植被要素状态略优于怀柔水库。以上湖泊与水库的水文水质要素的评价结果也与北

京市生态环境局发布的2021年5月北京市地表水质等级情况相当(昆明湖为Ⅱ级,圆明园湖为Ⅲ级,密云水库和怀柔水库为Ⅱ级)。

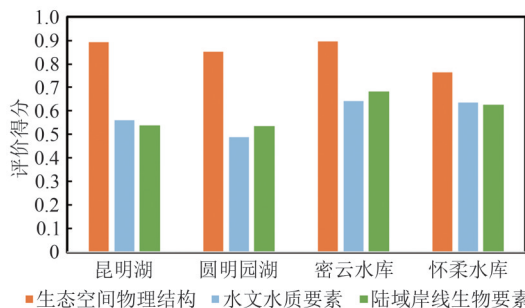


图4 湖泊、水库水生态空间各准则层指标的评价结果
Fig.4 Each criterion layer assessment score of the studied lakes and reservoirs

综合上,相比于河流,湖泊和水库的生态空间物理结构都处于较高水平,可能原因是人类干扰只存在于湖泊和水库的边缘区域,大面积的湖泊和水库仍保持自然状态;然而湖泊和水库水文水质方面相对河流表现较差,可能由于水库和湖泊的流动性相对于河流较低,水体中悬浮物质、营养物质和有机物质的滞留时间增加,导致浊度和叶绿素a浓度升高;河流、湖泊和水库在陆域生态要素方面维持在相近水平,其水生态空间的植被状况均达到较好水平。

5 结 论

本研究从生态空间物理结构、水文水质要素、陆域岸线植被要素3个方面出发,构建了一套基于遥感的综合性水生态空间健康评价体系,并以北京市典型水体的水生态空间为例,基于提出的评价体系开展水生态空间健康评价研究。主要结论如下:

(1) 本研究构建的评价指标体系包括11个:蜿蜒度、生态岸线比例、人为干扰指数、纵向连通指数、浊度、叶绿素a浓度、有水河长占河道总长比、水面面积占水生态空间面积比、植被覆盖度、叶面积指数、净初级生产力。该指标体系符合水生态空间的内涵,能够真实、可靠地反映水生态空间的生态环境特征,具有代表性和典型性。相比于依赖人工调查的传统水生态评估,本研究构建的指标体系均能够基于遥感技术获取,可快速、全面、客观的评估水生态空间健康状况,为

水生态治理与修复工作提供参考。

(2) 本研究采用层次分析法与熵权法相结合的主客观综合赋权法确定评价指标权重,指标权重既具有合理的科学经验,又具有一定的客观性。赋权结果表明,水文水质要素对水生态空间健康状况影响最大,陆域岸线植被要素次之,生态空间物理结构影响最小。

(3) 北京市10个典型水体的水生态空间健康均处于良好水平及以上,其中永定河、圆明园湖的评价等级为良好,其余水体评价等级为健康。6条河流中,汤河水生态空间的健康状况最好,而永定河的综合评价得分较低,建议后续对其展开针对性的水生态保护与治理工作。湖库中,昆明湖水生态空间状况略优于圆明园湖,密云水库的水生态空间状况略优于怀柔水库。

(4) 本研究构建的北京市水生态空间健康评价体系有潜力应用于其他区域。体系选取的评价指标具有综合性,考虑了水生态空间涉及的水域、岸线、植被等多个关键因素,多样的水生态空间状况能够在本研究选取的11个指标中得到体现,多维度的指标选取也有助于指标体系适应不同的情境。同时,本研究选取的评价案例,涉及了北京市的山区与平原、城区与郊区,地形丰富多样,人类活动强度不同,结果表明本研究发展的水生态空间健康评价体系在不同类型、不同特征的水生态空间中能够得到较好应用。

参考文献(References)

- Bai Y, Li S G, Liu M H and Guo Q. 2022. Assessment of vegetation change on the Mongolian Plateau over three decades using different remote sensing products. *Journal of Environmental Management*, 317: 115509 [DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115509]
- Bo L M, Wei W, Yin L, Zhao L and Xia J N. 2023a. Evolution characteristics and influencing factors of hydro-ecological space pattern in the Yangtze River Economic Belt from 2000 to 2020. *China Environmental Science*, 43(2): 874-885 (薄立明, 魏伟, 尹力, 赵浪, 夏俊楠. 2023a. 2000~2020年长江经济带水生态空间格局变化及其影响因素. *中国环境科学*, 43(2): 874-885) [DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20220915.010]
- Bo L M, Wei W, Zhao L, Yin L and Xia J N. 2023b. Spatial and temporal evolution characteristics and the driving mechanism of water eco-space in the Tibetan Plateau. *Advances in Earth Science*, 38(4): 401-413 (薄立明, 魏伟, 赵浪, 尹力, 夏俊楠. 2023b. 青藏高原水生态空间格局时空演化特征及驱动机制. *地球科学进展*,

- 38(4): 401-413 [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2023.014]
- Chawla I, Karthikeyan L and Mishra A K. 2020. A review of remote sensing applications for water security: quantity, quality, and extremes. *Journal of Hydrology*, 585: 124826 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124826]
- Cramer W, Kicklighter D W, Bondeau A, Moore III B, Churkina G, Nemry B, Ruimy A, Schloss A L and ThE. Participants OF. ThE. Potsdam NpP. Model Intercomparison. 1999. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results. *Global Change Biology*, 5(S1): 1-15 [DOI: 10.1046/j.1365-2486.1999.00009.x]
- Deng W, Yan D H, He Y and Zhang G X. 2004. Study on ecological storeroom of water in the watershed. *Advances in Water Science*, 15(3): 341-345 (邓伟, 严登华, 何岩, 章光新. 2004. 流域水生态空间研究. *水科学进展*, 15(3): 341-345)
- Dogliotti A I, Ruddick K G, Nechad B, Doxaran D and Knaeps E. 2015. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters. *Remote Sensing of Environment*, 156: 157-168 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.09.020]
- Duarte G, Segurado P, Haidvogel G, Pont D, Ferreira M T and Branco P. 2021. Damn those damn dams: fluvial longitudinal connectivity impairment for European diadromous fish throughout the 20th century. *Science of the Total Environment*, 761: 143293 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143293]
- Feng Q, Cheng X J, Shen X, Xiao X, Wang L H and Zhang W. 2017. Inland riverine turbidity estimation for Hanjiang river with Landsat-8 OLI imager. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 42(5): 643-647 (冯奇, 程学军, 沈欣, 肖潇, 王立辉, 张文. 2017. 利用 Landsat-8 OLI 进行汉江下游水体浊度反演. *武汉大学学报(信息科学版)*, 42(5): 643-647) [DOI: 10.13203/j.whugis.20141002]
- Frothingham K M, Rhoads B L and Herricks E E. 2001. Stream geomorphology and fish community structure in channelized and meandering reaches of an agricultural stream//Dorava J M, Montgomery D R, Palcsak B B and Fitzpatrick F A, eds. *Geomorphic Processes and Riverine Habitat*. Washington: American Geophysical Union: 105-117 [doi: 10.1029/WS004p0105]
- Gao Y T. 2014. Typical River Characterization Index Analysis and Health Assessment in Beijing. Beijing: Beijing Forestry University (高宇婷. 2014. 北京郊区典型河流表征指标分析及其生态健康评价. 北京: 北京林业大学)
- Gharibi H, Mahvi A H, Nabizadeh R, Arabalibeik H, Yunesian M and Sowlat M H. 2012. A novel approach in water quality assessment based on fuzzy logic. *Journal of Environmental Management*, 112: 87-95 [DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.07.007]
- Gu L, Gao J R, Liu Y, Gao Y T, Qian B T and Wang Y. 2012. Assessment of river naturalness in Beijing suburb-taking Tanghe river as an example. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 32(1): 165-170 (顾岚, 高甲荣, 刘瑛, 高宇婷, 钱斌天, 王越. 2012. 北京郊区河流自然性评价——以汤河为例. *水土保持通报*, 32(1): 165-170) [DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2012.01.011]
- Jia K, Liang S L, Gu X F, Baret F, Wei X Q, Wang X X, Yao Y J, Yang L Q and Li Y W. 2016. Fractional vegetation cover estimation algorithm for Chinese GF-1 wide field view data. *Remote Sensing of Environment*, 177: 184-191 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.019]
- Jiang H Y, Jia K, Zhao X, Wei X Q, Wang B, Yao Y J, Zhang X T and Jiang B. 2020. Review on the theory, method, and research progress of leaf area index estimation in mountainous areas. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 24(12): 1433-1449 (江海英, 贾坤, 赵祥, 魏香琴, 王冰, 姚云军, 张晓通, 江波. 2020. 山地叶面积指数反演理论、方法与研究进展. *遥感学报*, 24(12): 1433-1449) [DOI: 10.11834/jrs.20200229]
- Kelly E R, Cronk R, Kumpel E, Howard G and Bartram J. 2020. How we assess water safety: a critical review of sanitary inspection and water quality analysis. *Science of the Total Environment*, 718: 137237 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137237]
- Kumar M, Kalra N, Singh H, Sharma S, Rawat P S, Singh R K, Gupta A K, Kumar P and Ravindranath N H. 2021. Indicator-based vulnerability assessment of forest ecosystem in the Indian Western Himalayas: an analytical hierarchy process integrated approach. *Ecological Indicators*, 125: 107568 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107568]
- Li G C, Zhao H M, Wu Y, Yang B, Li L H, Zhang H, Yang Q G and Chen W. 2021. Spatiotemporal changes of key ecological and environmental parameters of Fangcheng Golden Camellia Nature Reserve in Guangxi from 2000 to 2016. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (2): 13-17 (李广超, 赵海盟, 伍毅, 杨彬, 李丽和, 张洪, 杨泉光, 陈伟. 2021. 2000—2016年广西防城金花茶自然保护区关键生态环境参数时空变化. *测绘通报*, (2): 13-17) [DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2021.0035]
- Li R Y, Xin C L, Chen N, Xiao K W and Xin S J. 2022. Evaluation and prediction of water ecological security in Daxia River Basin on the perspective of Production-Living-Ecological Space. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 53(7): 82-93 (李若颀, 辛存林, 陈宁, 肖凯文, 辛顺杰. 2022. 三生空间视角下大夏河流域水生态安全评价与预测. *水利水电技术(中英文)*, 53(7): 82-93) [DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.07.008]
- Niu Z R and Jia L. 2023. Water ecological security evaluation and diagnosis of obstacles in the Yangtze River Basin of Gansu Province from the perspective of Ecology-Life-Production space. *Journal of Hydroecology*, 44(2): 19-25 (牛最荣, 贾玲. 2023. 三生空间角度的甘肃长江流域水生态安全评价及障碍诊断. *水生态学杂志*, 44(2): 19-25) [DOI: 10.15928/j.1674-3075.202210110405]
- Piao S L, Fang J Y and Guo Q H. 2001. Application of CASA model to the estimation of Chinese terrestrial net primary productivity. *Acta Phytocologica Sinica*, 25(5): 603-608 (朴世龙, 方精云, 郭庆华. 2001. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力. *植物生态学报*, 25(5): 603-608)
- Rathi B S, Kumar P S and Vo D V N. 2021. Critical review on hazardous pollutants in water environment: occurrence, monitoring, fate,

- removal technologies and risk assessment. *Science of the Total Environment*, 797: 149134 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149134]
- Rhoads B L, Schwartz J S and Porter S. 2003. Stream geomorphology, bank vegetation, and three-dimensional habitat hydraulics for fish in midwestern agricultural streams. *Water Resources Research*, 39(8): 1218 [DOI: 10.1029/2003WR002294]
- Santos J I, Vidal T, Gonçalves F J M, Castro B B and Pereira J L. 2021. Challenges to water quality assessment in Europe – is there scope for improvement of the current Water Framework Directive bioassessment scheme in rivers?. *Ecological Indicators*, 121: 107030 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.107030]
- Sun R, Pan X Y, Wang J W, Ren Y, Du P, Ma Y and Xing Y. 2021. An analysis and evaluation of ecological water replenishment benefit of Yongding River (Beijing section). *China Rural Water and Hydropower*, (6): 19-24 (孙冉, 潘兴瑶, 王俊文, 任宇, 杜鹏, 马尧, 邢渊. 2021. 永定河(北京段)河道生态补水效益分析与方案评估. *中国农村水利水电*, (6): 19-24) [doi: 10.3969/j.issn.1007-2284.2021.06.004]
- Tang Y, Wang Z G, Wang W Q, Huang H J and Yuan Y. 2020. Multi-functional classification of aquatic habitats for remote sensing data. *Progress in Geography*, 39(3): 454-460 (唐寅, 王中根, 王婉清, 黄火键, 袁勇. 2020. 适用于遥感影像的水生态空间多功能分类体系研究. *地理科学进展*, 39(3): 454-460) [DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.03.010]
- Wang Y S, Yu X X, He K N, Song S M, Jia G D and Huang Z Y. 2012. Ecosystem services value based on land use change in Huairou reservoir watershed. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 28(5): 246-251 (王友生, 余新晓, 贺康宁, 宋思铭, 贾国栋, 黄枝英. 2012. 基于土地利用变化的怀柔水库流域生态服务价值研究. *农业工程学报*, 28(5): 246-251) [doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.05.041]
- Yan G J, Hu R H, Luo J H, Marie W, Jiang H L, Mu X H, Xie D H and Zhang W M. 2019. Review of indirect optical measurements of leaf area index: recent advances, challenges, and perspectives. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265: 390-411 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.11.033]
- Yang Q, Wang X H, Zhang J Y and Zhao W. 2017. Planning based on spatial pattern of water ecology. *China Water Resources*, (3): 6-9 (杨晴, 王晓红, 张建永, 赵伟. 2017. 水生态空间管控规划的探索. *中国水利*, (3): 6-9) [doi: 10.3969/j.issn.1000-1123.2017.03.003]
- Yang Y P, Wang Q, Xiao Q and Wen J G. 2006. Quantitative remote sensing inversion methods of chlorophyll-a concentration in Taihu Lake based on TM data. *Geography and Geo-Information Science*, 22(2): 5-8 (杨一鹏, 王桥, 肖青, 闻建光. 2006. 基于TM数据的太湖叶绿素a浓度定量遥感反演方法研究. *地理与地理信息科学*, 22(2): 5-8) [doi: 10.3969/j.issn.1672-0504.2006.02.002]
- Yu K J. 2015. Aquatic ecological infrastructure of wild China: the theory and practice. *Journal of Poyang Lake*, (1): 5-18 (俞孔坚. 2015. 美丽中国的水生态基础设施: 理论与实践. *鄱阳湖学刊*, (1): 5-18) [doi: 10.3969/j.issn.1674-6848.2015.01.002]
- Yu K J, Wang C L, Li D H, Yuan H, Li W H and Hong M. 2019. The concept, methodology and a case study in defining the ecological redline for the hydro-ecological space. *Acta Ecologica Sinica*, 39(16): 5911-5921 (俞孔坚, 王春连, 李迪华, 袁弘, 李文豪, 洪敏. 2019. 水生态空间红线概念、划定方法及实证研究. *生态学报*, 39(16): 5911-5921) [doi: 10.5846/stxb201812052663]
- Zhang S W, Yang R, Hou W X, Wang L L, Liu S, Song H Y, Zhao W J and Li L J. 2023. Analysis of fractional vegetation cover changes and driving forces on both banks of Yongding River before and after ecological water replenishment. *Ecology and Environmental Sciences*, 32(2): 264-273 (张镭文, 杨冉, 侯文星, 王丽丽, 刘爽, 宋汉扬, 赵文吉, 李令军. 2023. 生态补水前后永定河两岸植被覆盖度变化及驱动力分析. *生态环境学报*, 32(2): 264-273) [DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2023.02.006]
- Zheng G Z and Li C Y. 2022. An empirical algorithm for retrieving chlorophyll-a concentration in the sea area near Palawan Island. *Science of Surveying and Mapping*, 47(5): 168-176 (郑贵洲, 李春燕. 2022. 巴拉望岛附近海域叶绿素a浓度反演经验算法. *测绘科学*, 47(5): 168-176) [DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2022.05.021]
- Zheng Z B, Zhang R F, Li J Z, Lin L and Yang H. 2022. Remote sensing retrieval of chlorophyll-a concentration in Dianchi lake based on orbita hyperspectral imagery. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(11): 2162-2173 (郑著彬, 张润飞, 李建忠, 林琳, 杨虹. 2022. 基于欧比特高光谱影像的滇池叶绿素a浓度遥感反演研究. *遥感学报*, 26(11): 2162-2173) [DOI: 10.11834/jrs.20211264]
- Zhou B T, Zhang Y Y and Shi K. 2022. Research progress on remote sensing assessment of lake nutrient status and retrieval algorithms of characteristic parameters. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(1): 77-91 (周博天, 张雅燕, 施坤. 2022. 湖泊营养状态遥感评价及其表征参数反演算法研究进展. *遥感学报*, 26(1): 77-91) [DOI: 10.11834/jrs.20221232]
- Zhou D J, Wang G Z, He G J, Yin R Y, Long T F, Zhang Z M, Chen S B and Luo B. 2021. A large-scale mapping scheme for urban building from Gaofen-2 images using deep learning and hierarchical approach. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14: 11530-11545 [DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3123398]
- Zhou G J, Tong Y L, Wang L Q, Chi H L, Zhu X H and Liang T. 2022. Multi-dimensional identification technology and application of water ecological space and protection line in the territorial spatial planning. *Journal of Natural Resources*, 37(12): 3102-3117 (周广金, 童亚莉, 王凌青, 迟海龙, 朱昕虹, 梁涛. 2022. 国土空间规划中水生态空间及保护线的多维识别技术与应用. *自然资源学报*, 37(12): 3102-3117) [DOI: 10.31497/zrzyxb.20221206]
- Zuo Q T, Liu J and Dou M. 2016. Analysis of the impact of dam operations on the river water ecological environment. *Advances in Water Science*, 27(3): 439-447 (左其亭, 刘静, 窦明. 2016. 坝闸调控对河流水生态环境影响特征分析. *水科学进展*, 27(3): 439-447) [DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2016.03.012]

A comprehensive assessment framework for water ecological space health based on remote sensing technology

TAO Guofeng^{1,2,3}, XUE Wanlai³, YUAN Bo^{1,2}, LI Tianyu³, LI Wenzhong³, LI Jie^{1,2}, ZHAO Linlin^{1,2},
CUI Yuran^{1,2}, XU Weiye^{1,2}, WEI Xiangqin⁴, JIA Kun^{1,2}

1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Advanced Interdisciplinary Institute of Satellite Applications, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Beijing Engineering Research Center for Global Land Remote Sensing Products, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China;

4. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract: Water is the source of life, and its ecological problems elicit extensive concern. The emergence of water ecological problems is related to the water body itself and to the structure and function of the ecosystem. The status of the ecological storeroom of water from the perspective of the whole ecosystem needs to be systematically considered to evaluate and alleviate water ecological problems. Water ecological space comprises various ecological spaces, including water spaces, such as rivers and lakes, shoreline space connecting water and land, and land space closely related to water resource protection. It can reflect the overall situation of the ecosystem related to water. Assessing the health condition of water ecological space is crucial for preserving the core structure and functions of the water ecosystem. However, studies on the comprehensive assessment of water ecological space are lacking, and the related assessment index systems are subject to ground observations and limited indicator categories. The objective of this study is to develop a comprehensive water ecological space health assessment framework on the basis of remote sensing for Beijing.

The proposed framework consists of 11 assessment indicators covering the physical structure of ecological space, hydrology and water quality, and vegetation factors on land extracted from remote sensing data with a high spatial resolution. A water ecological space health index (WESHI) is established by integrating the 11 indicators with weights assigned by the combination of the analytical hierarchy process (subjectivity) and entropy weighting method (objectivity). The states of water ecological spaces are divided into four levels (healthy, good, moderate, and poor) on the basis of WESHI. Then, 10 typical water bodies in Beijing, including sources of surface water, landscape lakes, and rivers flowing through suburbs or urban areas, are selected as examples to apply the proposed comprehensive water ecological space health assessment framework.

The weights of the assessment indicators demonstrate that hydrology and water quality are the dominant drivers for the health of water ecological space, followed by vegetation factors on land. The physical structure of ecological space has the least effect. The assessment results of the 10 selected water ecological spaces in Beijing reveal several important points. Tang River and Yongding River have the highest and lowest WESHI among all rivers respectively. The WESHI of Kunming Lake is slightly better than that of Yuanmingyuan Lake. Miyun Reservoir has a higher WESHI than Huairou Reservoir. Among the 10 typical water bodies in Beijing, Yongding River and Yuanmingyuan Lake have a good water ecological spaces, and the water ecological spaces of the other water bodies are at the healthy level. These results are consistent with actual situations.

The proposed assessment framework can reasonably evaluate the health status of water ecological space in Beijing. Compared with traditional methods that rely on manual investigation, the proposed assessment framework that is based on remote sensing can assess the health status of water ecological space more quickly, comprehensively, and objectively. Moreover, on the basis of the assessment results, targeted ecological restoration is recommended for Yongding River and Yuanmingyuan Lake.

Key words: remote sensing, water ecological space, health assessment, assessment framework, index weighting, Beijing, BJ-2 Satellite, comprehensive assessment index construction

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.42171318); Beijing Municipal Science and Technology Project (No. Z221100005222013); Open Fund of State Key Laboratory of Remote Sensing Science and Beijing Engineering Research Center for Global Land Remote Sensing Products (No.OF202207)