

滦河流域水生态承载力评估研究

任晓庆^{1,2}, 杨中文², 张远², 王玉秋¹, 周凯文^{2,3}, 张鲁骏²

(1. 南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 中国环境科学研究院
河流生态保护与修复研究室, 北京 100012; 3. 大连海洋大学 水产与生命学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 滦河流域是我国重要生态保障地区,亟需开展水生态承载力评估,识别承载力限制因素,以指导流域生态文明建设。针对滦河流域水资源矛盾突出、水生态系统服务功能退化等问题,采用 WaREES 框架从“水资源-水环境-水生态-水安全”4个维度构建承载力评估和指标贡献量化方法,对滦河流域进行水生态承载力评估研究。结果表明:滦河流域水生态承载力指数(HECCI)介于43.8~53.8之间,总体呈临界超载状态;水环境呈安全承载状态(均分为61.3),水安全和水生态均为临界超载状态,而水资源呈超载状态(均分为22.9);水资源禀赋弱和开发强度大是限制流域承载力的关键短板,水资源禀赋和水资源利用指数对流域 HECCI 的贡献率分别为6.4%和5.5%;水生生态质量、生物完整性和水文调节功能是水生态和水安全临界承载的主要控制因素。提出的水生态承载力评估技术方法具有科学性和实用性,对流域/区域水生态环境管理具有参考价值。

关键词: 水生态系统服务; 水生态承载力; WaREES 框架; 评估方法; 指标贡献; 滦河

中图分类号:TV213.4; X52 文献标识码:A 文章编号:1672-643X(2019)05-0072-08

Evaluation of hydro-ecological carrying capacity (HECC) in Luanhe River Basin

REN Xiaoqing^{1,2}, YANG Zhongwen², ZHANG Yuan², WANG Yuqiu¹,
ZHOU Kaiwen^{2,3}, ZHANG Lujun²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. Laboratory of Riverine Ecological Conservation and Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: The Luanhe River Basin is an important ecological security area in China. It is urgent to carry out assessment of water ecological carrying capacity and identify the limiting factors of bearing capacity to guide the construction of ecological civilization in the basin. Based on the integrity of water ecosystem service function, this paper constructs the capacity assessment and indicator contribution quantification method from the four dimensions of “water resources – water environment – water ecology – water safety” using the WaREES framework, and carries out the application of Luanhe River Basin assessment based on the survey. The results show that the hydro-ecological carrying capacity index(HECCI) of the Luanhe River Basin is between 43.8 and 53.8, indicating the overall a critical overload situation. The special assessment showed that the water environment was in a safely loaded state (61.3), both water safety and water ecology were critically overloaded, while water resources were overloaded (22.9). The weak endowment of water resources and the high development intensity are the key shortcomings that limit the carrying capacity of the basin. The contribution rates of water resources endowment and water use index to the basin HECCI are 6.4% and 5.5%, respectively. Aquatic habitat quality, biological integrity and hydrological regulation are the main controlling factors for the critical carrying of water ecology and water safety. The proposed water ecological capacity assessment technology method is scientific and practical,

收稿日期:2019-01-08; 修回日期:2019-04-10

基金项目:国家水污染治理与控制重大专项课题(2017ZX07301-001)

作者简介:任晓庆(1993-),女,山东烟台人,硕士研究生,主要研究方向为流域水生态管理与调控。

通讯作者:杨中文(1990-),男,四川内江人,博士,助理研究员,主要从事水生态环境系统模拟与管理研究。

and has reference value for watershed/regional water ecological environment management.

Key words: water ecosystem service; water ecological carrying capacity; WaREES framework; assessment method; indicator contribution; Luanhe River

1 研究背景

滦河流域生态地位至关重要,是我国京津冀地区的重要生态屏障,也是包括天津、保定、承德等北方大中型城市的重要水源区。随着经济社会的快速发展、人口数量急剧增加、城镇化进程逐步加快、水资源情势发生变化,流域内水资源供需矛盾突出、水环境污染加剧,水生态系统逐步退化,各种生态环境问题频繁发生^[1]。

近年来,滦河流域先后成为国家生态文明建设(2014年)、国土江河综合整治(2015年)、山水林田湖生态保护修复(2016年)和生态补偿(2016年)等先行示范区。为促进流域生态环境保护和经济社会发展相协调,亟需以承载力为抓手,系统评估诊断滦河流域水生态环境状况与短板,为改善流域生态环境建设生态文明提供技术支撑。

承载力是衡量人类活动与自然生态环境间相互关系的科学概念^[2-3],近年来与资源、环境、生态等学科相结合,提出众多承载力概念^[4]。基于生态文明发展理念,水生态承载力(Hydro-Ecological Carrying Capacity, HECC)是针对水生态系统健康保障提出的新兴科学概念^[5]。“十一五”以来,国家水体污染控制与治理科技重大专项(水专项)针对水生态承载力开展了大量基础科学研究。在其推动下,水生态承载力研究在概念内涵^[6-7]、评价指标^[8-9]、评价方法^[10-11]等方面均取得了长足进展。张远等^[12]回顾了水生态承载力的发展历程,基于水生态系统功能特性科学辨析了其概念内涵,并提出涵盖“水资源-水环境-水生态-水安全”四维功能要素的承载力指标体系,为水生态承载力系统科学评估和未来流域生态环境综合管理奠定了基础。

当前,滦河流域承载力研究基础薄弱,前人仅针对水资源^[13]和水环境^[14]单方面进行了初步探索,而未从水生态系统功能完整性角度系统解析流域承载力及其限制因素。为全面诊断滦河流域水生态环境状况,本研究拟构建基于水生态系统功能完整性的承载力评估技术方法,从“水资源-水环境-水生态-水安全”四个维度系统评价了滦河流域水生态承载力状态并识别关键影响因素,以期为流域水生态环境与经济社会协调发展提供指导。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

滦河(包括冀东诸河)位于华北平原东北部(东经 $115^{\circ}30'$ ~ $119^{\circ}45'$ 、北纬 $39^{\circ}10'$ ~ $42^{\circ}40'$),是海河流域四大水系之一,发源于河北省巴彦古尔图山北麓,向东南流经内蒙古、河北和辽宁后,于河北乐亭县汇入渤海,全长888 km。滦河流域面积为54 580 km²,北部地势较高,南部地势较低,包括高原、山地和平原地貌,其中高原山脉面积占流域总面积的86%;流域年均降水量为400~700 mm,多年平均径流量为 47.47×10^8 m³。依据《水污染防治行动计划》(国发〔2015〕17号),将滦河流域划分成30个控制单元区。进一步综合考虑滦河流域水系分布、地理位置、功能定位等特点,将地理区位相近、生态环境相似、服务功能相同的控制单元合并,最终形成9个水生态承载力评估基本单元。滦河流域水系概况与评估单元划分见图1。

2.2 数据收集与调查分析

本研究数据来源主要包括历史统计资料和野外水生态调查数据。通过数据收集,获得系列统计资料包括:流域内各县2013-2016年统计年鉴、水资源公报、环境统计数据、近年流域土地利用数据和各类断面水质监测数据、水文站及闸坝信息(包括2007-2016年流量监测数据)等。2016年9月-2017年5月期间,对滦河流域开展了系列生态环境调查。以每300~500 km²设置1个点位,在滦河干流及主要支流布设采样点。其中,滦河干流及主要支流布设点位46个,冀东沿海诸河布设点位26个,引滦线路2个点位,共计74个监测点。监测样品的采集、保存和运输、监测等均按技术规范^[15]进行,并依据文献^[16]测定样品中氨氮、总氮、总磷的浓度;流域内鱼类、藻类和大型底栖动物采集与分析方法参考文献^[17]。

2.3 评价方法

基于滦河流域的生态环境特征,本文从生态系统功能完整性的角度构建水生态承载力评估指标体系,并结合主客观赋权综合法提出水生态承载力评估及指标贡献量化方法。

2.3.1 指标体系构建 基于流域水生态系统服务

功能特性^[18]及其分类体系^[19],考虑水生态系统对人类社会活动的承载关系,围绕“水资源-水环境-水生态-水安全”(Water Resources-Environment-Ecosystem-Security, WaREES)4个服务功能维度,建立 WaREES 水生态承载力指标框架。

基于滦河流域生态环境特征和数据收集调查情况,结合国家“三线一单”管控需求^[20]和专家经验判断,选择18个代表性评估指标,构建滦河流域水生态承载力“专项-分析-评估”3级指标体系,如表1所示。

表1 滦河流域水生态承载力指标体系及其赋权

专项指标	分项指标	权重	评估指标	权重
水资源 (A)	水资源禀赋指数 (A1)	0.500	人均水资源量 ^[21] (A11)	1.000
	水资源利用指数 (A2)	0.500	水资源开发利用 ^[9] (A21)	1.000
水环境 (B)	水环境纳污指数 (B1)	0.400	农业污染强度 指数 ^[22] (B11)	单位耕地面积化肥施用量(B111)* 0.186
			农业污染强度 指数 ^[22] (B11)	单位耕地面积畜禽养殖量 ^[23] (B112)* 0.200
			农业污染强度 指数 ^[22] (B11)	单位耕地面积农药使用量(B113)* 0.220
			城镇污染强度 指数(B12)	单位土地面积 COD 排放量 ^[24] (B121)* 0.197
水生态 (C)	水环境净化指数 (B2)	0.600	水环境质量 指数 ^[9, 25] (B21)	水质综合得分(B211) 1.000
			水生生境指数 (C1)	0.500
水安全 (D)	调蓄安全指数 (D1)	0.400	自然岸线比例(C12)* 0.174	
			湿地面积占总面积比例(C13)* 0.216	
			河流连通性(C14)* 0.167	
水安全 (D)	用水安全指数 (D2)	0.600	年生态基流满足率 ^[26-27] 4-9月/10-3月(C15)* 0.119/0.159	
			鱼类完整性指数 ^[23] (C21)* 0.303	
			浮游藻类完整性指数 ^[23] (C22)* 0.355	
			大型底栖动物完整性指数 ^[23] (C23)* 0.342	
			水文调节功能指数 ^[27] (D11) 1.000	
			集中式饮用水水源地水质达标率 ^[28] (D21) 1.000	

注:标“★”的评估指标采用主成分分析法赋权,其他指标采用主观赋权。

2.3.2 指标赋分赋权 通过针对待评估区域调查、历史数据收集和指标分析计算(参见表1中参考文献),获得各评估指标值。各评估指标的赋分标准主要依据国家标准、相关技术指南、参考文献和专家经验^[29-30]。

采用“主成分分析+专家打分”主客观结合赋权方式,对“专项-分项-评估”3级指标分别确定

权重,以综合体现决策人员主观意志与决策问题客观实际。其中,对于顶层专项指标(4个)与分项指标(8个),均采用专家主观赋权方式确定其权重;考虑评估指标对上级分项指标的独立贡献关系,对指标分散、不确定性较高的相关评估指标(表1中以★标注)采用基于主成分分析(PCA)的客观赋权方法^[31]确定其权重,其他独立评估指标则均主观赋权

为 1(表 1)。

2.3.3 综合评估分级 基于各指标赋分和权重值,开展评估指标-分项指标-专项指标自下而上逐层综合评估,步骤如下:

(1)根据评估指标赋分值,分别加权求和计算相应分项指标值,如下式:

$$F_{ij} = \sum_{k=1}^n (W_{ijk} \cdot P_{ijk}) \quad (1)$$

式中: F_{ij} 为第 i 个专项指标中第 j 个分项指标值的分值; P_{ijk} 为第 i 个专项指标的第 j 个分项指标中第 k 个评估指标的分值; W_{ijk} 为第 i 个专项指标的第 j 个分项指标中第 k 个评估指标的权重; n 为第 j 个分项指标中包含评估指标的个数。

(2)进一步加权求和计算各专项指标分值:

$$Z_i = \sum_{j=1}^m (W_{ij} \cdot F_{ij}) \quad (2)$$

式中: Z_i 为第 i 个专项指标的分值; W_{ij} 为第 i 个专项指标的第 j 个分项指标的权重; m 为第 i 个专项指标下包含分项指标个数。

(3)计算水生态承载力指数(HECCI)值:

$$HECCI = \sum_{i=1}^4 (W_i \cdot Z_i) \quad (3)$$

式中: W_i 为第 i 个专项指标的权重。

(4)等级评判。将水生态承载力状态分为 5 级:最佳承载、安全承载、临界承载、超载和严重超载,相应分级标准如表 2 所示。据表 2,分别评判各

专项指标和 HECCI 分值对应的承载力状态等级。

表 2 承载状态分级标准

[0, 20]	(20, 40]	(40, 60]	(60, 80]	(80, 100]
严重超载	超载	临界超载	安全承载	最佳承载

2.3.4 指标贡献量化 为明确各评估指标对 HECCI 的贡献,进一步提出指标贡献定量计算方法,如下式所示:

$$CP_{ijk} = P_{ijk} \cdot W_{ijk} \cdot W_{ij} \cdot W_i \quad (4)$$

式中: CP_{ijk} 为第 i 个专项指标的第 j 个分项指标中第 k 个评估指标对 HECCI 的贡献值。

3 结果与分析

3.1 滦河流域总体承载状态

滦河流域 9 个评估单元 HECCI 分值介于 43 ~ 54 之间,平均值为 48.1 分,总体上呈临界超载状态(表 3、图 2)。从空间分布看(图 2),处于中游山区的滦河潘大水库上游评估单元、引滦入津评估单元和辽宁省青龙河评估单元(编号 7 ~ 9)承载状态较好,HECCI 均值为 52.0;下游平原区的天津市于桥水库评估单元、滦河大黑汀下游评估单元、青龙河秦皇岛评估单元、冀东沿海唐山评估单元和冀东沿海秦皇岛评估单元(编号 1 ~ 5)承载力偏弱,HECCI 均值为 46.6;上游内蒙古自治区滦河评估单元(编号 6)承载力状态最差。

表 3 各评估单元专项与 HECCI 评分值及总体承载状态

编号	评估单元	水资源	水环境	水生态	水安全	HECCI	承载状态
1	冀东沿海秦皇岛评估单元	8.0	60.2	41.6	69.1	44.7	临界超载
2	天津市于桥水库评估单元	70.5	48.5	54.4	22.2	48.9	临界超载
3	冀东沿海唐山评估单元	8.0	65.3	37.8	66.2	44.3	临界超载
4	滦河大黑汀下游评估单元	8.5	63.6	44.6	67.5	46.0	临界超载
5	青龙河秦皇岛评估单元	5.5	63.1	52.2	74.2	48.7	临界超载
6	内蒙古自治区滦河评估单元	26.5	62.0	50.3	36.4	43.8	临界超载
7	辽宁省青龙河评估单元	55.5	44.9	58.1	39.0	49.4	临界超载
8	滦河潘大水库上游评估单元	12.0	66.5	56.4	80.2	53.8	临界超载
9	引滦入津评估单元	11.5	77.3	47.2	75.5	52.9	临界超载
	平均	22.9	61.3	49.2	58.9	48.1	临界超载

3.2 滦河流域专项承载状态

分析专项得分知,总体上滦河各评估单元水环境专项评估得分最高,为安全承载状态(平均分为 61.3);水安全和水生态均为临界超载状态,平均评分为 58.9 和 49.2;水资源呈超载状态,平均评分仅

22.9(表 2、3)。各专项评估结果如下:

(1)水资源。如图 3 和表 3 所示,水资源专项在滦河流域大部分评估单元中呈现超载甚至严重超载状态。其中,呈水资源严重超载的区域包括下游平原区的冀东沿海唐山评估单元、青龙河秦皇岛评

估单元、冀东沿海秦皇岛评估单元和滦河大黑汀下游评估单元(专项评分均 <10),以及中游山区的引滦入津评估单元和滦河潘大水库上游评估单元(专项评分仅为11.5和12.0)。上述结果表明,从水资源禀赋和水资源利用角度看,滦河全流域承载状态极差,严重影响流域水生态系统整体承载能力。

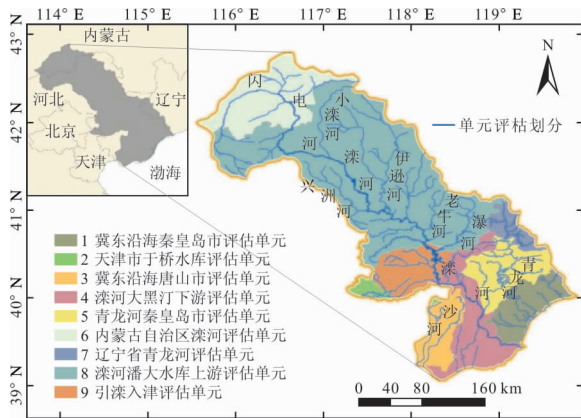


图1 滦河流域水系概况与评估单元划分图

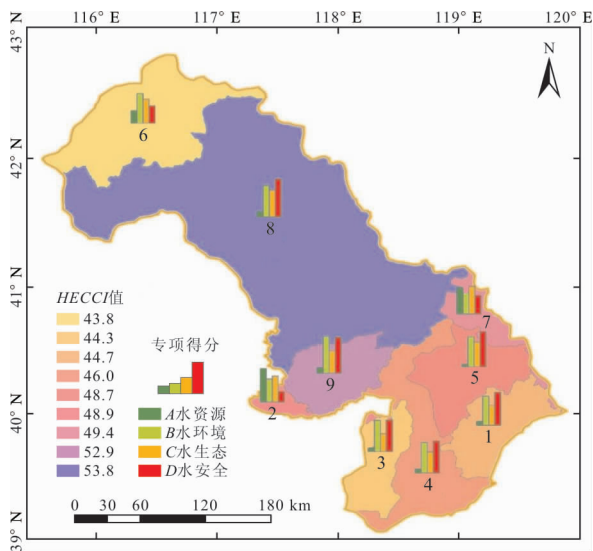


图2 滦河流域各评估单元 HECCI 和专项指标得分

(2)水环境。滦河流域各评估单元水环境专项得分介于44.9~77.3分之间,中游的辽宁省青龙河评估单元和天津市于桥水库评估单元水环境承载状态相对较差,处于临界超载状态,专项得分均小于50。说明从水环境纳污和水环境净化服务角度看,滦河流域水环境专项承载状况总体较好,但在局部地区不容乐观,处于临界超载状态。

(3)水生态。滦河流域各评估单元水生态专项得分介于37.8~58.1之间,其中冀东沿海唐山评估单元被评为超载状态,水生态专项得分仅为37.8。表明滦河流域水生生态维持和水生生物保育状况不

佳,使得流域水生态专项承载力濒临超载的边缘。

(4)水安全。滦河流域各评估单元水安全专项得分介于22.2~80.2之间,大部分单元为安全承载等级以上,无严重超载区域。其中,滦河潘大水库上游评估单元为最佳承载状态,引滦入津评估单元、青龙河秦皇岛评估单元、滦河大黑汀下游评估单元等5个中下游评估单元水安全承载等级相对较好(安全承载,专项得分 >60)。表明从调蓄安全和用水安全角度看,滦河流域总体水安全状况较好,但在中上游局部地区水安全保障不力。

3.3 指标贡献定量分析

如图4所示,滦河流域水生态承载力各评估指标对 HECCI 的平均贡献量为22.8分;其中贡献量最大的评估指标为 D21 集中式饮用水源地水质达标率(累计贡献104.8分),其次是 B211 水质综合得分(累计贡献77.3分);其他评估指标贡献量明显偏低。综合计算各分项指标贡献率得出,用水安全指数贡献率最高,为24.2%;其次是水环境净化指数,贡献率为17.9%;水环境纳污指数、水生生物指数和水生生态指数对流域 HECCI 的贡献率相对较低,分别为14.0%、13.2%和12.4%;水资源禀赋指数、调蓄安全指数和水资源利用指数对 HECCI 的贡献率明显低于分项指标平均水平(12.5%),分别仅为6.4%、6.4%和5.5%。各专项指标的 HECCI 综合贡献率排序为:水环境(31.9%) $>$ 水安全(30.6%) $>$ 水生态(25.6%) $>$ 水资源(11.9%)。总之表明,滦河流域水环境净化和水安全保障功能较好,维持了流域水生态承载力;而水资源禀赋、水资源开发和利用是制约该流域水生态承载力的关键因素;同时,水环境纳污(农业生产、城镇排污)、水生生态条件(河岸带林草覆盖率、水域面积、河流连通性等)、水生生物完整性、水文调节功能等表现不佳,限制了滦河水生态承载力的提升。

4 讨论

依据承载力评估结果(表3、图2、3),水资源是限制滦河流域承载力的关键短板,相应的水资源禀赋和水资源利用分项指标对 HECCI 的贡献率极低(图4)。这与滦河流域水资源实际状况相符。在水资源禀赋方面,滦河流域处于半湿润半干旱大陆性气候区,水资源禀赋条件差,所涉9个评估单元中有8个评估单元处于国际重度缺水等级(人均水资源量低于 1000 m^3),其中冀东沿海唐山评估单元、青龙河秦皇岛评估单元、滦河大黑汀下游评估单元和冀东沿海秦皇岛评估单元人均水资源量更是低于国际极度缺水

的警戒线(500 m³)。在水资源开发利用方面,自 20 世纪 70 年代起,滦河干流和一级支流青龙河上陆续修建了潘家口、大黑汀等大型控制性骨干水利工程,建成引滦入津、引滦入唐、引青济秦等工程体系^[32];同时,在滦河下游平原区农业生产对水资源的开发活动较剧烈^[33]。当前,滦河中下游地区水资源开发率已超过 90%,冀东沿海唐山评估单元、冀东沿海秦皇岛评估单元、青龙河秦皇岛评估单元和滦河大黑汀下游评估单元的水资源开发利用甚至接近或达到 100%,远超国际公认的 40% 水资源开发生态警戒线。

在水资源禀赋条件薄弱和开发利用强度大的双重压力下,水资源成为制约滦河流域水生态系统承载能力的关键。在气候变化(降水减少、蒸发增强)影响^[32, 34]和京津冀协同发展驱动下,滦河流域未来势必面临更加严峻的水资源短缺问题。为提高流域水资源供给服务能力,使水资源开发与经济社会发展相协调,急需深入推进流域中上游水源涵养功能区建设,提升水源涵养能力;同时加强节水型社会建设,全面优化用水结构,特别需针对下游平原区开展农业结构调整,推广绿色节水农业技术。

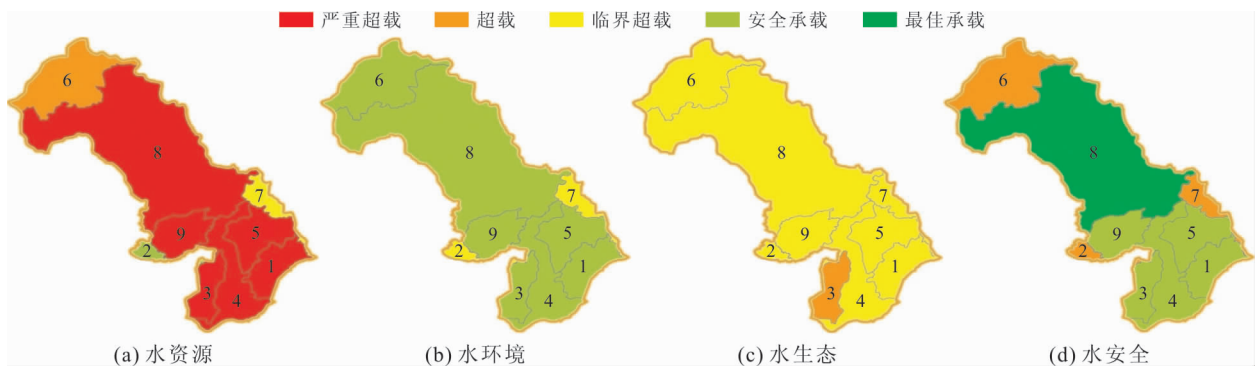


图 3 滦河流域水生态承载力专项评估结果

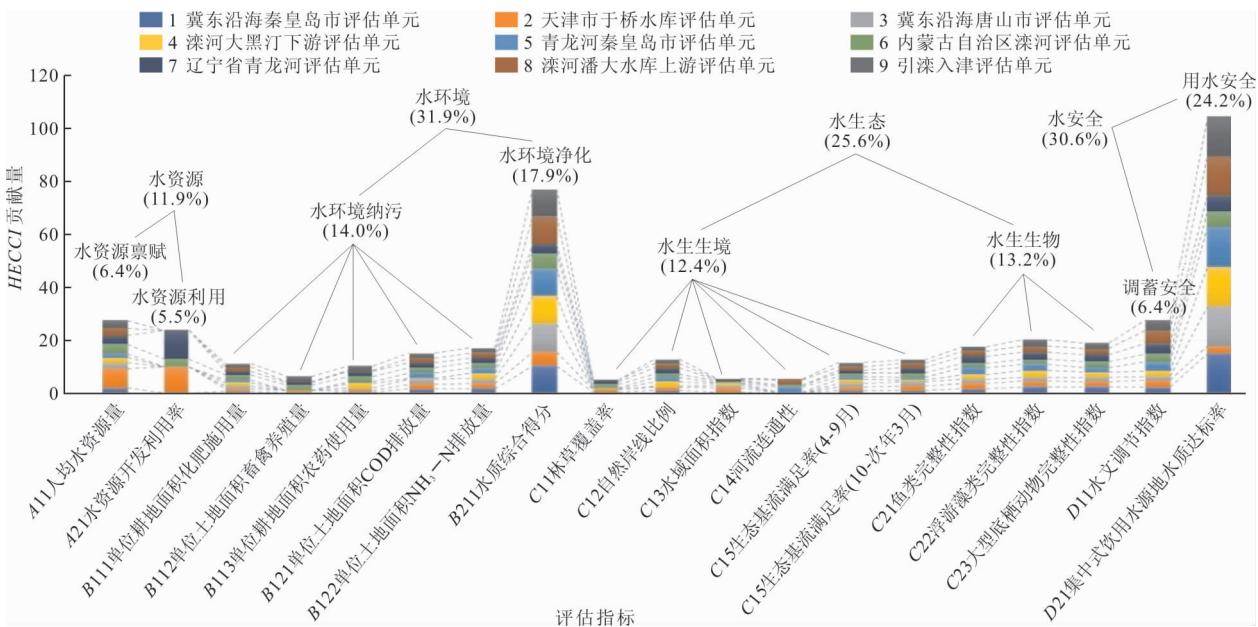


图 4 滦河流域水生态承载力指标贡献定量分析结果

水生生境质量、生物完整性和水文调节功能不佳是导致滦河流域水生态和水安全专项临界超载的主要因素(表 3、图 2~4)。分析基础数据表明滦河流域河岸带植被覆盖度较低,各控制单元均值为 27.6%;特别在流域中下游的冀东沿海唐山评估单元、滦河大黑汀下游评估单元、引滦入津评估单元、

冀东沿海秦皇岛评估单元和青龙河秦皇岛评估单元,平均河岸带林草覆盖率为 11.5%。流域水域面积占比低,各评估单元水域面积比例均值为 6.7%;同时,调查发现流域内闸坝群对河流连通性影响较大,除滦河潘大水库上游评估单元和青龙河秦皇岛评估单元外,各评估单元内每 100 km 河段平

均闸坝数达到3.7座,闸坝对河道水量的拦截和水资源开发利用又难以保证生态流量。究其原因,人类社会生产活动是破坏流域水生生态的主因。前人研究指出,农业耕作、超载放牧、毁林开荒等造成滦河流域天然植被破坏,使得流域内植被覆盖度降低和水生态空间被挤占^[35],进一步造成流域土壤沙化、水土流失,破坏流域水文调节功能^[36]。水生生态的破坏,进一步影响着水生生物群落生存和繁衍,降低流域水生态系统生物完整性^[36-37]。内蒙古自治区滦河评估单元水安全专项指标得分最低,拉低了整体承载力分值,水安全专项指标中集中式饮用水水源地水质达标率评估指标得分偏低,调查研究显示,此评估单元内的锡林郭勒盟控制区域内有多伦县、正蓝旗两个集中式饮用水水源地,2012年水质监测结果表明,正蓝旗集中式饮用水水源地水质类别达到《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)的Ⅲ类标准,多伦县集中式饮用水水源地水质类别达Ⅳ类,氨氮超标^[38],所以相对于其他评估单元水安全得分较低。为保障滦河流域水生态健康和调蓄安全,提升流域水生态和水安全专项承载能力,须全面加强流域生态系统保护和修复工作。一方面,须加强水生态系统修复和生物多样性保护,通过制定和完善自然保护区科学管理体系,明确河滨湿地岸线空间管控要求,落实流域生态脆弱区水土保持、退耕还林还草和禁牧等治理措施,限制人类对水生生态系统的破坏活动,同时可提升流域水文调节、水土保持服务功能。另一方面,对水生生态破坏严重河段,应开展水生态系统修复,促进水生动植物群落完整性恢复与可持续繁衍,实现流域水生态系统健康稳定发展。

滦河流域水环境专项处于安全承载状态,但总体 *HECCI* 值并不高(61.3分),局部地区仍然存在超载风险(表3、图2~4)。从指标贡献看,这主要与滦河流域水环境纳污强度大有关(图4)。首先,滦河流域农业生产活动剧烈,耕地面积比例可达30%,各评估单元平均单位耕地面积化肥施用量和农药施用量分别达到428.1和10.3 kg/hm²,远超过国际化肥和农药施用安全上限(分别约为225和7 kg/hm²)。同时,流域单位土地面积畜禽养殖量超过480头/hm²,特别在下游各评估单元可达850头/hm²,远超发达国家规定的载畜阈值上限^[39],使得畜禽粪污对地区水环境造成巨大压力。另一方面,在京津冀协调发展背景下,流域经济社会规模不断增加,城镇污染强度加大,导致滦河流域单位面积

COD排放量平均达到36.9 kg/(hm²·a),特别在滦河大黑汀下游评估单元因人口产业密集,单位面积COD排放量甚至接近250 kg/(hm²·a)。在农业与城镇强污染压力下,流域仍表现出较强的水环境净化服务功能(图4)。然而,在城镇化和经济快速发展的驱动下,滦河流域仍然面临着水环境超载的潜在风险。有必要持续推进滦河流域水污染防治工作,重点针对农业生产活动以承载力为硬约束管控化肥农药施用量和载畜量,促进农业向生态化转型;同时需加强水污染控制力度,通过产业结构调整、污水处理升级等,大力削减城镇污染负荷对流域水环境的影响。

5 结 论

(1) 滦河流域水生态系统总体呈临界超载状态,流域9个评估单元 *HECCI* 值介于43.8~53.8之间,专项评估中仅水环境呈安全承载状态(平均评分为61.3),水安全和水生态均为临界超载状态(平均评分分别为58.9和49.2),而水资源在多数评估单元严重超载(平均评分仅为22.9)。

(2) 水资源禀赋和强开发利用是限制滦河流域承载力的关键短板。水资源禀赋指数和水资源利用指数对流域 *HECCI* 的贡献率明显低于分项指标平均水平(12.5%),分别仅为6.4%和5.5%。

(3) 导致滦河流域水生态和水安全专项临界超载的主要控制要素是水生生态质量、水生生物完整性和水文调节功能。水生生态指数、水生生物指数和水文调节指数对流域 *HECCI* 的贡献率分别为13.2%、12.4%和6.4%。

(4) 滦河流域水环境专项处于安全承载状态,但局部区域仍然存在超载风险。在流域农业生产和城镇化发展影响下,污染排放强度较大,水环境纳污指数对流域 *HECCI* 的贡献率偏低(14%)。

(5) 所提出的水生态承载力评估技术具有科学性与实用性。基于水生态系统功能完整性,以Wa-REES框架科学建立了水生态承载力指标体系和综合评估方法,从“水资源-水环境-水生态-水安全”4个维度8个方面系统诊断承载力状态,并可量化识别影响承载状态的关键因素,可为流域或区域水生态环境管理提供指导。

参考文献:

- [1] 王洪翠,戴乙,罗阳. 滦河流域国土江河综合整治总体方案[J]. 水资源开发与管理,2017(12):67-70.

- [2] WANG Jian, SUN Tiheng, LI Peijun, et al. Research progress on environmental carrying capacity [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(4): 768-772.
- [3] STEVE W. Harvest pressure and environmental carrying capacity: An ordinal - scale model of effects on ungulate prey [J]. American Antiquity, 2008, 73(2): 179-199.
- [4] 高吉喜. 可持续发展理论探索: 生态承载力理论、方法与应用 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- [5] 李靖, 周孝德. 叶尔羌河流域水生态承载力研究 [J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(3): 249-255.
- [6] 李林子, 傅泽强, 沈鹏, 等. 基于复合生态系统原理的流域水生态承载力内涵解析 [J]. 生态经济, 2016, 32(2): 147-151.
- [7] 彭文启. 流域水生态承载力理论与优化调控模型方法 [J]. 中国工程科学, 2013, 15(3): 33-43.
- [8] 刘子刚, 蔡飞. 区域水生态承载力评价指标体系研究 [J]. 环境污染与防治, 2012, 34(9): 73-77.
- [9] 杨俊峰, 乔飞, 韩雪梅, 等. 流域水生态承载力评价指标体系研究 [C]// 2013 中国环境科学学会学术年会. 2013.
- [10] 危文广, 黎良辉, 赖敬飞, 等. 基于理想点法的江西省水资源承载力评价 [J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(6): 25-30.
- [11] 孙佳乐, 王颖, 辛晋峰. 汉江流域(陕西段)水生态承载力评估 [J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(3): 80-86.
- [12] 张远, 周凯文, 杨中文, 等. 水生态承载力概念辨析与指标体系构建研究 [J]. 西北大学学报(自然科学版), 2019, 49(1): 42-53.
- [13] 冯耀龙, 练继建, 王宏江, 等. 用水资源承载力分析跨流域调水的合理性 [J]. 天津大学学报, 2004, 37(7): 595-599.
- [14] 张秀兰, 赵彦红. 河北省水环境承载力区域空间差异分析 [J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(S1): 34-35+77.
- [15] 国家环境保护总局. 地表水和污水监测技术规范: HJ/T 91-2002 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [16] 国家环保局本书编委会. 水和废水监测分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [17] DING Sen, ZHANG Yuan, LIU Bin, et al. Effects of riparian land use on water quality and fish communities in the headwater stream of the Taizi River in China [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2013, 7(5): 699-708.
- [18] 欧阳志云, 赵同谦, 王效科, 等. 水生态服务功能分析及其间接价值评价 [J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2091-2099.
- [19] 李芬, 孙然好, 杨丽蓉, 等. 基于供需平衡的北京地区水生态服务功能评价 [J]. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1146-1152.
- [20] 王兴杰, 王占朝, 陈凤先, 等. 环评改革要落实“三线一单”硬约束 [N]. 中国环境报, 2016-11-15(003).
- [21] 张星标, 邓群钊. 江西省水生态承载力分析 [J]. 南昌大学学报(理科版), 2011, 35(6): 607-612.
- [22] 翁异静, 邓群钊, 杜磊, 等. 基于系统仿真的提升赣江流域水生态承载力的方案设计 [J]. 环境科学学报, 2015, 35(10): 3353-3366.
- [23] 王双玲. 基于流域水生态承载力的污染物总量控制技术 [D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [24] 马涵玉, 黄川友, 殷彤, 等. 系统动力学模型在成都市水生态承载力评估方面的应用 [J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 101-110.
- [25] 刘保强, 熊理然, 蒋梅英, 等. 滇池流域生态承载力及系统耦合效应剖析 [J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5): 868-875.
- [26] 刘晓波, 彭文启, 董飞, 等. 流域水生态承载力与总量控制技术集成系统研究 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2011, 9(1): 16-28.
- [27] 焦露慧, 吴巍, 周孝德, 等. 资源性缺水地区流域水环境承载力评价模型及其应用 [J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(6): 77-82.
- [28] 张盛, 王铁宇, 张红, 等. 多元驱动下水生态承载力评价方法与应用——以京津冀地区为例 [J]. 生态学报, 2017, 37(12): 4159-4168.
- [29] 中华人民共和国环境保护部办公厅. 流域生态健康评估技术指南(试行) [S]. 环境保护部自然生态保护司, 北京: 2013.
- [30] 中华人民共和国环境保护部办公厅. 湖泊生态安全调查与评估技术指南(试行) [S]. 环境保护部污染防治司、规划财务司, 北京: 2014.
- [31] 李燕, 张兴奇. 基于主成分分析的长江经济带水资源承载力评价 [J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 172-178.
- [32] 路献品, 王刚, 陈宁, 等. 滦河流域水资源开发的水文效应及其生态环境响应 [J]. 环境保护科学, 2014, 40(1): 18-21.
- [33] 张金堂, 王秀兰. 滦河流域水资源配置与合理利用 [J]. 水科学与工程技术, 2009(3): 4-6.
- [34] 王刚, 严登华, 黄站峰, 等. 滦河流域径流的长期演变规律及其驱动因子 [J]. 干旱区研究, 2011, 28(6): 998-1004.
- [35] 王少明. 滦河上游地区水土流失与面污染源的治理 [J]. 水利水电科技进展, 1997, 17(3): 52-53.
- [36] 龙笛, 张思聪. 滦河流域生态系统健康评价研究 [J]. 中国水土保持, 2006(3): 14-16.
- [37] 马凯, 张海萍, 渠晓东, 等. 滦河流域土地利用对大型底栖动物生物指数的路径分析 [J]. 中国环境科学, 2017, 37(7): 2674-2683.
- [38] 刘秀芳, 张丽英, 孙海林. 滦河锡林郭勒盟控制单元水污染防治对策建议 [J]. 环境与发展, 2014, 26(6): 54-56.
- [39] 嘉慧. 发达国家养殖污染的防治对策 [J]. 山西农业(畜牧兽医), 2007(7): 53-54.