

辽河流域典型控制单元水环境承载力评估与预警

刘岚昕, 朱悦

(辽宁省生态环境保护科技中心, 沈阳 110015)

摘要:新常态下, 亟须开展辽河流域水环境承载力评估, 以满足国家新时期对流域水环境管理工作的要求。针对辽河流域特点, 选取流域内 3 个典型控制单元, 采取目标—准则—指标层级关系框架建立水环境承载力指标体系, 耦合多种数学模型, 对控制单元水环境承载力现状进行评估, 提出不同控制单元分阶段水环境承载力提升方案, 并确定控制单元水环境承载力最佳阈值。结果表明, 3 个控制单元水环境承载力指数介于 0.10~0.55 之间, 总体呈超载状态。3 个控制单元调整方案均可实现水环境承载力的提升, 同时控制单元水环境承载力阈值也可为辽河流域水环境管理提供支撑。

关键词: 水环境承载力; 控制单元; 评估; 预警; 辽河流域

中图分类号: X821

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022010039

Evaluation and early warning of water environment carrying capacity of typical control units in Liao River Basin

LIU Lanxin, ZHU Yue

(Liaoning Science and Technology Center for Ecological and Environmental Protection, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to achieve the new demand of water environmental management in the basin, the evaluation of water environmental carrying capacity is needed urgently. Based on the characteristics of Liao River Basin, taking three control units of Liao River as examples, the water environmental carrying capacity index system is established by three-layer frame designing (goal layer-criterion layer-index layer) and the assessment is carried out to combine with multiple mathematical models. Then the lifting schemes in different stages are designed and the threshold values of control units are obtained. The results show that the water environmental carrying capacity indexes of the control units range from 0.10 to 0.55, indicating an overload situation. The solutions to the control unit can improve the overall level of water environmental carrying capacity. The proposed threshold values of water environmental carrying capacity also support the regional water environment management.

Keywords: water environmental carrying capacity; control unit; assessment; early warning; Liao River Basin

CLC number: X821

“十二五”以来, 我国水环境管理已逐渐从水质目标为主转向水质、水量、水生态的综合管理, 并对水环境承载力提出了更为明确和综合的要求。2020 年生态环境部召开的重点流域水生态保护“十四五”规划编制试点工作启动视频会, 生态环境部总工程师兼水生态环境司司长张波指出:《规划》的创新要通过减排和增容两方面内容统筹好水生态、水环境、水资源, 分别以保障生态流量、维护河流生态功能需要和有针对性的改善水环境质量为重点进行突破。《水污染防治行动计划》(简称“水

十条”)也提出以改善水环境质量为核心, 对江河湖海实施分流域、分区域、分阶段科学治理, 系统推进水污染防治、水生态保护和水资源管理, 建立水环境承载能力监测评价体系, 实行承载能力监测预警的要求。

基于国家水污染防治“三水统筹”新理念, 本研究选取了辽河流域 3 个控制单元作为研究对象, 通过构建“三水统筹”的水环境承载力指标体系、建立基于多数学模型的水环境承载力评估预警模型, 对控制单元的承载力现状与未来进行评估预警, 并针

收稿日期: 2022-01-21

录用日期: 2022-06-28

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07601-002)

作者简介: 刘岚昕(1968-), 女, 正高级工程师。研究方向: 环境工程。E-mail: 502293332@qq.com

通信作者: 朱悦(1981-), 女, 硕士研究生。研究方向: 环境工程。E-mail: zhuyue1981@sina.com

引用格式: 刘岚昕, 朱悦. 辽河流域典型控制单元水环境承载力评估与预警[J]. 环境保护科学, 2023, 49(2): 132-136.

对控制单元提出不同承载状态的提升方案, 划定出控制单元水环境承载力预警阈值, 从而有效提升辽河流域控制单元水环境质量。

1 资料与评价方法

1.1 控制单元概况

依据控制单元划分类型及污染物负荷类型, 考虑辽河流域上下游空间分布, 筛选 3 个典型控制单元对水环境承载力评估预警技术体系进行实证应用。其中, 选取亮子河铁岭段控制单元作为面源污染型河流研究对象、细河于台控制单元作为点源污染型河流研究对象、社河台沟控制单元作为饮用水源地保护区型河流研究对象。

亮子河铁岭段控制单元^[1]主要河流亮子河, 属于辽河一级支流, 流域面积 565.80 km², 全长 108.95 km。根据《铁岭市统计年鉴》, 2018 年控制单元总人口 13.54 万人, GDP 21.55 亿元。经对亮子河铁岭段控制单元内主要污染负荷核算, 2018 年亮子河铁岭段控制单元的 COD、氨氮和总磷污染负荷分别为 1 206.10、209.95 和 67.92 t, 控制单元内污染负荷特点以面源为主。

细河于台控制单元^[2]主要河流细河, 属于浑河一级支流, 流域面积 244.80 km², 河流全长 78.20 km。根据《沈阳国民经济和社会发展统计公报》, 2018 年控制单元总人口 167.60 万人, GDP 1 166.14 亿元。经计算, 2018 年细河于台控制单元 COD、氨氮和总

磷污染负荷分别为 23 389.00、5 375.9 和 865.83 t, 控制单元内污染负荷特点以点源为主。

社河台沟控制单元^[3-4]主要河流社河, 属于浑河一级支流, 流域面积 462.42 km², 河流全长 53.95 km。据《抚顺市统计年鉴》, 2018 年控制单元总人口 3.81 万人, GDP 6.90 亿元。经计算, 2018 年社河台沟控制单元总氮、总磷污染负荷分别为 69.45 和 46.14 t, 控制单元内污染负荷特点以面源为主。

1.2 数据来源

本研究涉及数据主要来源于 2013 ~ 2018 年的铁岭市、沈阳市、抚顺市《统计年鉴》《水资源公报》《国民经济与社会发展统计公报》、环境统计数据等文件。

1.3 指标体系的建立

采用“文献调研^[5-12]—实地调查—部门对接”的方式, 通过“目标—准则—指标层”框架筛选, 对收集的指标进行归类, 明确包含水环境、水资源、水生态的目标层, 以及由水环境纳污、水环境净化、水生生态、水生生物、水资源禀赋和水资源利用 6 个方面构成的准则层; 通过频度分析和冗余分析, 将 356 个备选指标, 筛选至 44 个初选指标, 考虑指标的科学性、易量化性和可比性等原则, 经借鉴前期成果、对接相关政策和多领域专家论证, 最终构建出包括 6 个水环境类指标、6 个水生态类指标和 5 个水资源类指标的水环境承载力评估指标体系, 见图 1。

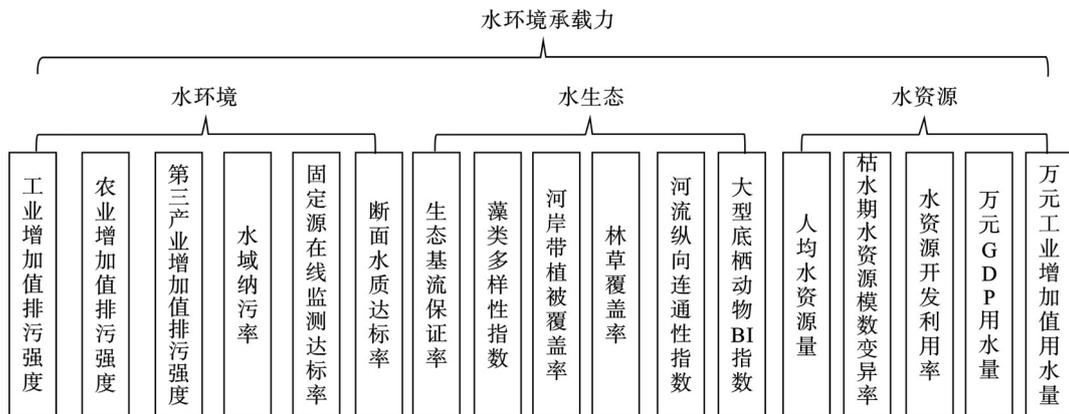


图 1 水环境承载力指标体系

Fig. 1 Index system of the water environmental carrying capacity

1.4 指标权重的确定

本研究在“十一五”“十二五”“十三五”水生态承载力相关研究主观赋权层次分析法确定权重基

础上, 叠加客观赋权熵值法组合计算水环境承载力评估指标权重值^[13], 层次分析法权重和熵值法权重按 1 : 1 的比例结合, 得到组合权重向量, 避免主客

观造成的影响。

1.5 水环境承载力计算方法

本研究采用加权求和的向量模法计算水环境承载力^[14-15], 见式(1):

$$E_j = \sum_{i=1}^n W_i \times \bar{E}_i \quad (1)$$

式中: E_j 为水环境承载力评价价值; \bar{E}_i 为评价对象第 i 个指标的标准值; W_i 为第 i 个指标在系统中层次的权重; n 为指标的个数。

依据《关于建立资源环境承载能力监测预警长效机制的若干意见》, 将水环境承载能力分为最佳承载、安全承载、临界承载、超载和严重超载 5 个等级, 预警等级从高到低依次为红色、橙色、黄色、蓝色和绿色。分级标准见表 1。

2 结果与分析

2.1 水环境承载力现状评估

根据控制单元相关统计数据, 计算亮子河铁岭

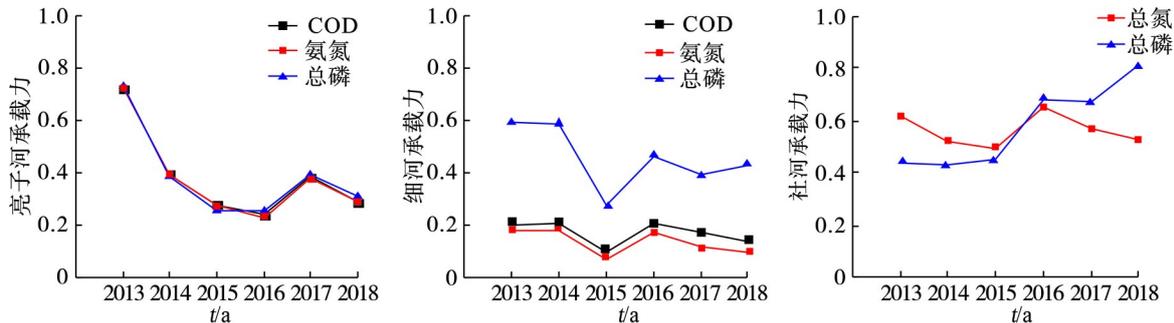


图 2 控制单元 2013—2018 年水环境承载力状态

Fig. 2 Water environmental carrying capacity status of the control units from 2013 to 2018

表 2 各控制单元水环境承载状态

Table 2 Water environmental carrying capacity grades of the control units

控制单元名称	污染物	t/a					
		2013	2014	2015	2016	2017	2018
亮子河铁岭段	COD	蓝色	黄色	橙色	橙色	橙色	橙色
细河于台	氨氮	红色	红色	红色	红色	红色	红色
社河台沟	总氮	蓝色	黄色	黄色	蓝色	黄色	黄色

结果显示: (1)亮子河铁岭段, 作为面源污染型控制单元, 污染物承载力均处于临界超载或超载状态, 水环境承载力较小; 控制单元内 COD 承载力在 2016 年最低, 2018 年 COD 承载力低于其他污染物承载力, 评估值为 0.27, 为超载状态。(2)细河于台, 作为点源污染型控制单元, 水环境承载力均严

重超载状态, 水环境承载力很小; 控制单元内氨氮承载力在 2015 年最低, 2018 年氨氮承载力低于其他污染物承载力, 评估值为 0.10, 为严重超载状态。(3)社河台沟, 作为饮用水源地保护区型控制单元, 其水环境承载力状态相对较好, 基本处于临界超载或安全承载状态; 控制单元内总氮承载力在 2016 年开始变差, 2018 年总氮承载力低于其他污染物承载力, 评估值为 0.55, 为临界超载状态。

表 1 水环境承载预警分级标准

Table 1 Grading standard of water environmental carrying capacity early warning

承载区间	承载状态	预警等级
[0, 0.2]	严重超载	红色
(0.2, 0.4]	超载	橙色
(0.4, 0.6]	临界超载	黄色
(0.6, 0.8]	安全承载	蓝色
(0.8, 1.0]	最佳承载	绿色

重超载状态, 水环境承载力很小; 控制单元内氨氮承载力在 2015 年最低, 2018 年氨氮承载力低于其他污染物承载力, 评估值为 0.10, 为严重超载状态。(3)社河台沟, 作为饮用水源地保护区型控制单元, 其水环境承载力状态相对较好, 基本处于临界超载或安全承载状态; 控制单元内总氮承载力在 2016 年开始变差, 2018 年总氮承载力低于其他污染物承载力, 评估值为 0.55, 为临界超载状态。

2.2 水环境承载力预警

在系统动力学法、层次分析法和熵值法的基础上, 通过模糊综合评价法, 采用最大隶属度原则, 结合指标赋权, 按照当前社会经济环境发展规模和速度对 3 个控制单元水环境承载力状态进行预警, 结果见表 3。

表 3 控制单元 2019~2025 年水环境承载力预警级别
Table 3 Early warning grades of water environmental carrying capacity in the control units from 2019 to 2025

t/a	亮子河铁岭段	细河于台	社河台沟
2019	橙色	红色	黄色
2020	橙色	红色	黄色
2021	橙色	红色	黄色
2022	红色	红色	黄色
2023	红色	红色	黄色
2024	红色	红色	蓝色
2025	红色	红色	蓝色

结果显示：(1)以 COD 为目标污染物，2019~2025 年亮子河铁岭段控制单元水环境承载力以橙色超载、红色严重超载为主，其中水资源子系统承载力为红色超载，水环境和水生态子系统以黄色警情为主。(2)以氨氮为目标污染物，2019~2025 年细河于台控制单元水环境承载力为

红色严重超载，其中水资源、水环境和水生态子系统均为红色严重超载。(3)以总氮为目标污染物，2019~2025 年社河台沟控制单元水环境承载力以黄色临界超载、蓝色安全承载为主，其中除水资源子系统为部分年份橙色超载外，水环境和水生态子系统均为黄色临界超载、蓝色安全承载。

因此，若维持当前发展趋势，对控制单元的水环境治理不加以约束，控制单元的水环境承载状态只能维持现状或恶化，预警等级无法改变。

2.3 水环境承载力调控

根据 2018 年各控制单元水环境承载力状态分级，按照“由差向好”调整原则，逐级将指标向较好状态调节，亮子河铁岭段控制单元提升方案分为黄色、蓝色和绿色 3 个提升方案，细河于台控制单元提升方案分为橙色、黄色、蓝色和绿色 4 个提升方案，社河台沟控制单元提升方案分为蓝色、绿色 2 个提升方案。控制单元水环境承载力不同提升方案下的评估预警指标值，见表 4~表 6。

表 4 亮子河铁岭段控制单元水环境承载力提升方案评估预警指标数值

Table 4 The index values of water environmental carrying capacity promotion scheme in Liangzi River -Tieling control unit

预警等级	增加值排污强度/ kg·万元 ⁻¹			容量利用率/ %	达标率/%		生态基流保证率/%	藻类多样性指数	河岸带植被覆盖率/%	大型底栖动物 BI 指数	人均水资源量/ m ³ ·人 ⁻¹	降水变异性系数/%	水资源开发利用率/%	万元 GDP 用水量/ t·万元 ⁻¹
	工业	农业	第三产业		固定源排放量 允许排放量	断面水质								
黄色	0.38	136.71	3.21	159.40	83.56	60	100	3.01	79.83	7.03	761.42	5.00	98.00	191.78
蓝色	0.38	136.71	3.21	159.40	83.56	60	100	3.01	79.83	7.03	761.42	5.00	98.00	191.78
绿色	0.30	79.14	2.58	80.01	95.00	100	100	3.01	85.00	7.13	1560.00	20.8	46.25	117.55

表 5 细河于台控制单元水环境承载力提升方案评估预警指标数值

Table 5 The index values of water environmental carrying capacity promotion scheme in Xi River -Yutai control unit

预警等级	增加值排污强度/kg·万元 ⁻¹			水域纳污率/%	达标率/%		生态基流保证率/%	藻类多样性指数	河岸带植被覆盖率/%	林草植被覆盖率/%	大型底栖动物 BI 指数	人均水资源量/ m ³ ·人 ⁻¹	枯水期水资源模数变异率	水资源开发利用率/%	万元 GDP 用水量/ t·万元 ⁻¹	万元工业增加值用水量/ t·万元 ⁻¹	河流纵向连通性指数
	工业	农业	第三产业		固定源排放量 允许排放量	断面水质											
橙色	0.54	7.17	2.81	130.0	85	60	100	1	56.09	30	7	60.99	3.5	87.47	17.13	8.99	0
黄色	0.53	6.44	1.88	110.6	90	75	100	2	56.09	40	7	60.78	3.5	87.47	16.31	8.62	0
蓝色	0.54	5.72	1.79	100.0	95	90	100	2	75.00	40	7	60.57	3.5	87.47	15.65	8.62	0
绿色	0.44	5.00	1.47	99.0	95	90	100	2	80.00	40	7	60.37	3.5	75.52	14.84	8.24	0

表 6 社河台沟控制单元水环境承载力提升方案评估预警指标数值

Table 6 The index values of water environmental carrying capacity promotion scheme in She River -Taigou control unit

预警等级	增加值排污强度/kg·万元 ⁻¹			水域纳污率/%	达标率/%		生态流量保证率/%	藻类多样性指数	河岸带植被覆盖率/%	林草植被覆盖率/%	大型底栖动物 BI 指数	人均水资源量/m ³ ·人 ⁻¹	枯水期水资源模数变异率	水资源开发利用率/%	万元 GDP 用水量/t·万元 ⁻¹	万元工业增加值用水量/t·万元 ⁻¹	河流纵向连通性指数
	工业	农业	第三产业		固定源在断面水质监测	生态流											
蓝色	0.08	1.57	23.04	99.29	100	100	100	4.49	100	100	3.55	1 504.57	18.90	66.46	65.52	49.74	0
绿色	0.07	1.57	20.81	99.29	100	100	100	4.49	100	100	3.55	1 504.57	18.90	66.44	58.72	44.40	0

各控制单元水环境承载力经调整方案后均有不同程度提高,各控制单元最佳提升方案下的阈值结果为:(1)亮子河铁岭段控制单元最佳状态可以承载 GDP 39.63 亿元,总人口 13.66 万人,污染负荷(COD)501.93 t;(2)细河于台控制单元最佳状态可以承载 GDP 1 791.94 亿元,总人口 191.52 万人,污染负荷(氨氮)2 711.1 t;(3)社河台沟控制单元最佳状态 GDP 88.17 亿元,总人口 3.71 万人,污染负荷(总氮)67.52 t。

2.4 建议

通过提升方案的设置,建议控制单元开展以下工作。

亮子河铁岭段控制单元应大力控制面源污染排放、提高纳污能力。推进重点养殖场的畜禽养殖粪便环保治理工程建设,保障庆云堡镇、八宝镇 2 个乡镇污水处理设施稳定运行。加强畜禽散养污染控制,加快完成亮子河铁岭段控制单元铁岭段的禁养区划分工作。控制农业面源污染,规划亮子河下游种植业面源污染阻控项目。

细河于台控制单元应加强点源污染减排。强化工业企业排污治理,推进水质监控手段升级,确保达标排放。加强直排企业监管,确保达标排放,并逐步完善配套市政基础设施,推进工业废水集中收集处理。针对洗浴等服务行业用排水问题,严格实施供水源头管控制度,研究通过经济手段降低源头用水负荷,切实降低城市排水系统压力。

社河台沟控制单元生活污水、农田排水和畜禽养殖业污染是控制的重点。应整治畜禽养殖业污染、种植业化肥及农药污染、农村生活污染,实施畜禽养殖污染治理及村镇生活垃圾治理工程,削减农业面源污染。确保流域农业灌溉、养殖用水水质安全,保证农业清洁生产和农民生活水源。

3 结论

本研究针对亮子河等 3 个控制单元,构建辽河流域水环境、水资源、水生态相互作用的水环境承载力系统,耦合水环境容量作为系统边界约束条件,采用系统动力学、模糊数学、层次分析法和熵值法等多数学方法,模拟分析社会经济发展与水环境、水资源、水生态的相互影响关系,对控制单元水环境承载力现状与未来进行评估预警,提出控制单元社会经济发展的最佳预警阈值。

(1)得到 3 个典型控制单元的水环境承载力指数及评估状态。分别选取 COD、氨氮和总氮污染物作为目标污染物,2018 年亮子河铁岭段控制单元水环境承载力呈橙色超载状态,细河于台控制单元水环境承载力呈红色严重超载状态,社河台沟控制单元水环境承载力呈黄色临界超载状态。

(2)设计不同控制单元分阶段水环境承载力提升方案,并确定控制单元水环境承载力最佳阈值。经模拟预测到 2025 年,亮子河铁岭段控制单元总人口 13.66 万人,GDP 39.63 亿元。细河于台控制单元总人口 191.52 万人,GDP 1 791.94 亿元。社河台沟控制单元总人口 3.71 万人,GDP 88.17 亿元。

本研究以辽河流域典型控制单元为研究单元开展的水环境承载力评估预警决策,可为社会经济发展部门、水环境管理部门提供科技支撑,有力促进辽河流域社会经济与水环境的协调发展,有效提升新常态下辽河流域水环境管理系统化、科学化和精细化水平。

参考文献

- [1] 高殊净. 铁岭市农村典型畜禽散养密集区污染评价研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2019.

(下转第 144 页)

- 2020, 41(6): 11 – 17.
- [20] 王世强, 赵增锋, 邱小琮, 等. 清水河干流水质空间分布特征及季节性变化[J]. 西南农业学报, 2021, 34(2): 386 – 391.
- [21] 周莹, 渠晓东, 赵瑞, 等. 河流健康评价中不同标准化方法的应用与比较[J]. 环境科学研究, 2013, 26(4): 410 – 417.
- [22] KANE D D, GORDON S I. The planktonic index of biotic integrity (P-IBI): An approach for assessing lake ecosystem health[J]. *Ecological Indicators*, 2009, 9(6): 1234 – 1247.
- [23] BLOCKSOM K A, KURTENBACH J P, KLEMM D J, et al. Development and evaluation of the lake macroinvertebrate integrity index (LMII) for New Jersey lakes and reservoirs[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2002, 77(3): 311 – 333.
- [24] 王军, 黄真理, 李海英, 等. 基于大型无脊椎动物完整性的赤水河健康评价体系构建[J]. 中国环境监测, 2018, 34(6): 62 – 72.
- [25] 王硕, 林育青, 陈求稳, 等. 漓江大型底栖动物群落时空分布及水质生物评价[J]. 环境科学学报, 2018, 38(3): 1207 – 1213.
- [26] 沈月含, 丁森, 王慧, 等. 滦河秋季大型底栖动物群落结构空间格局与关键环境影响因子识别[J]. 环境科学研究, 2020, 33(10): 2298 – 2307.
- [27] CAMARGO J A, Ward J V, Martin K L. The relative sensitivity of competing hydropsychid species to fluoride toxicity in the Cache la Poudre River (Colorado)[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1992, 22(1): 107 – 120.

(上接第 136 页)

- [9] 李晓丹. 大伙房水库水环境现状评估与污染原因分析[J]. 科学技术创新, 2017(19): 47 – 48.
- [10] 李如忠. 基于指标体系的区域水环境动态承载力评价研究[J]. 中国农村水利水电, 2006(9): 42 – 46.
- [11] 任晓庆, 杨中文, 张远, 等. 滦河流域水生态承载力评估研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5): 72 – 79.
- [12] 侯晓敏, 岳强, 王彤. 我国水环境承载力研究进展与展望[J]. 环境保护科学, 2014, 41(4): 104 – 108.
- [13] 李磊, 贾磊, 赵晓雪, 等. 层次分析法-熵值定权法在城市水环境承载力评价中的应用[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(4): 456 – 460.
- [14] 曾现进, 李天宏, 温晓玲. 基于 AHP 和向量模法的宜昌市水环境承载力研究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(6): 200 – 205.
- [15] 朱悦. 辽河流域控制单元水环境承载力评估研究——以招苏台河铁岭市控制单元为例[J]. 环境保护与循环经济, 2021, 41(1): 62 – 67.
- [2] 李艳, 范超, 朱悦, 等. 浑河流域细河水环境承载力评估预警研究[J]. 环境保护与循环经济, 2021, 41(6): 51 – 55.
- [3] 关倩, 刘岚昕, 朱悦. 社河流域污染物来源解析及对策研究[J]. 环境保护与循环经济, 2021, 41(4): 53 – 56.
- [4] 孙桂喜. 社河流域健康评价及保护对策探析[J]. 水科学与工程, 2016(1): 57 – 60.
- [5] 王磊. 辽河流域水资源承载能力评价[J]. 水资源管理, 2010(6): 59 – 67.
- [6] 齐士强. 辽河流域水环境承载力及其动态变化特征[J]. 地下水, 2010, 41(5): 150 – 152.
- [7] 柴森瑞. 基于 SD 模型的流域水生态承载力研究: 以铁岭控制单元为例[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- [8] 朱悦. 基于“三水”内涵的水环境承载力指标体系构建——以辽河流域为例[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(6): 1029 – 1035.