

基于DPSR模型的区域水环境承载力评价研究

顾琦玮¹, 赵晓辉², 王洁^{1*}, 张亮¹, 贾学桦¹, 高振¹

¹北京市科学技术研究院资源环境研究所, 北京

²中国水利水电科学研究院水生态环境研究所, 北京

收稿日期: 2022年2月16日; 录用日期: 2022年4月11日; 发布日期: 2022年4月29日

摘要

针对传统PSR模型难以表征水环境承载力评价中存在的驱动力Driving-压力Pressure-状态State-响应Response (DPSR)逻辑关系的问题, 采用水资源驱动、水环境压力、水生态状态和土地生态功能响应的DPSR模型构建区域水环境承载力评价指标体系, 用以评估北京市朝阳区2019年水环境承载力。结果表明: 2019年朝阳区水环境承载力指数达0.64, 属于高承载水平。其中, 三产水污染强度指数、城市面源污染强度指数和万元GDP耗电量的贡献率高达85.51%, 尤其是城镇生活污水排放强度占比46.72%。由此推测出朝阳区的产业结构以第三产业为主, 提高用水效率和加强生活污水处理力度, 可显著提高水环境承载力指数。这也说明朝阳区水环境承载力评价结果与《朝阳区分区规划(2017年~2035年)》相吻合, 可为北京市水污染防治工作提供科学依据。

关键词

DPSR模型, 水环境承载力, 北京市朝阳区

Evaluation of Regional Water Environment Carrying Capacity Based on DPSR Model

Qiwei Gu¹, Xiaohui Zhao², Jie Wang^{1*}, Liang Zhang¹, Xuehua Jia¹, Zhen Gao¹

¹Institute of Resources and Environment, Beijing Academy of Science and Technology, Beijing

²Institute of Water Ecology and Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing

Received: Feb. 16th, 2022; accepted: Apr. 11th, 2022; published: Apr. 29th, 2022

Abstract

For the traditional PSR model, it is difficult to express the logic relationship of Driving-Pressure-State-

作者简介: 顾琦玮(1987-), 副研究员, 主要从事资源环境承载力评价, Email: liepi_guqw@163.com

*通讯作者 Email: liepi_wang@163.com

文章引用: 顾琦玮, 赵晓辉, 王洁, 张亮, 贾学桦, 高振. 基于 DPSR 模型的区域水环境承载力评价研究[J]. 水资源研究, 2022, 11(2): 151-158. DOI: 10.12677/jwrr.2022.112016

Response (DPSR) in the assessment of water environment carrying capacity (WECC). Thus, aiming at evaluating WECC in Chaoyang District of Beijing in 2019, this study established the DPSR model of the evaluation index system on regional WECC, including water resource driving, water environment pressure, water ecological state and land ecological function response. The results showed that Chaoyang District's WECC index reached 0.64 in 2019, which was a high load carrying level. Meanwhile, the contribution rates of water pollution intensity index of industry-agriculture-life, urban non-point source pollution intensity index and water consumption of 10 thousand RMB Gross domestic product (GDP) were as high as 85.51%, especially the urban sewage discharge intensity accounts for 46.72%. It could be inferred that the industrial structure of Chaoyang District was dominated by tertiary industry. Improving water use efficiency and enhancing sewage treatment could significantly improve the WECC index. These results were consistent with the policy called Chaoyang District Planning (2017~2035), which could provide a scientific basis for water pollution prevention and control in Beijing.

Keywords

DPSR Model, Water Environment Carrying Capacity, Chaoyang District of Beijing City

Copyright © 2022 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市存在着不断地交换维持经济社会活动所需的物质能量, 以及排泄废弃物到外部生态环境系统的代谢过程[1]。如何既保障生态安全又维持人类活动, 成为维持城市代谢过程可持续发展的关键所在[2]。尤其面对水资源短缺与城镇化发展矛盾的缺水型城市, 水资源短缺成为城市代谢过程的胁迫因素[3]。因此, 如何在城市代谢过程中协调好水域与陆域关系显得尤为迫切。

水环境承载力(Water Environment Carrying Capacity, 以下简称 WECC)用以衡量区域水环境对人口、经济的最大支撑能力, 广泛应用于流域和城市等各个领域[4] [5] [6]。在水环境承载力评价方面, 常用方法有指标体系综合分析法[6] [7]和层次分析法[5]等。这些方法因可操作性强且重现性高而广泛应用。其中, 影响水环境评价结果的可靠性和有效性主要体现在指标体系的构建。目前, PSR (压力-状态-响应)模型是这类代表性的水环境承载力评价模型[7]。由于该模型评价结果局限于某一历史时段的水环境承载力状态, 难以表征区域经济社会活动变化对水环境承载力驱动特征。基于此, DPSR (驱动力(Driving force)-压力(Pressure)-状态(Status)-响应(Response force))模型的应用, 不仅融合了欧洲环境局提出的 DPSIR 模型在揭示环境与人类活动之间因果关系的优势, 还能弥补 PSR 模型统计数据的不足[8]。由此, DPSR 模型能够评估或预测规划实施后的水环境承载力演变趋势, 对指导区域水环境-经济-社会复合系统可持续协调发展具有重要意义。

据此, 本研究选择人类干扰强烈且水资源问题突出的北京市朝阳区作为案例研究区。根据 DPSR 的逻辑关系, 展开 2019 年的北京市朝阳区水环境承载力评价研究, 从水域和陆域的统筹层面揭示朝阳区水环境-经济-社会复合系统特征, 为构建朝阳区水环境承载力指标体系提供有力依据和技术支撑。

2. 研究区概况及数据来源

2.1. 研究区概况

北京市朝阳区位于北京城区东部, 属于北运河水系, 上游包括温榆河和通惠河等支流[9]。其中, 主要河流

总长度为 117.81 km, 沿河植被覆盖岸线总长度为 136.61 km 及其自然岸线总长度 10.17 km, 闸坝 94 个, 水域面积为 8,567,205.46 m², 约占辖区面积(470.8 km²)的 1.82%, 如图 1 所示。

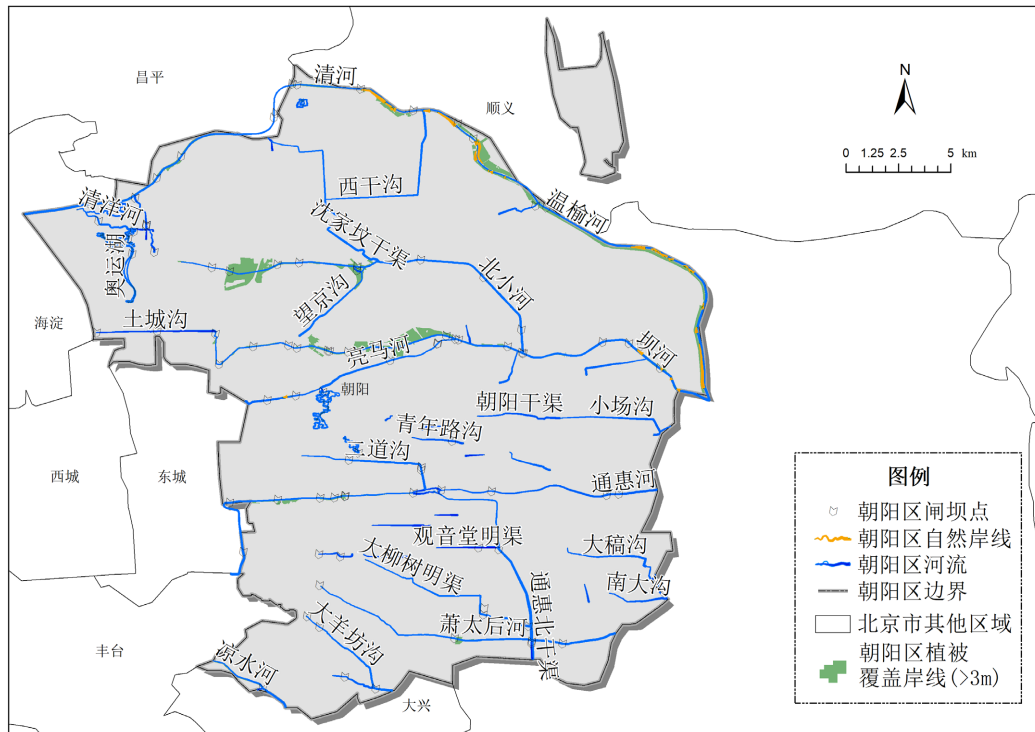


Figure 1. Water system distribution map of Chaoyang District
图 1. 朝阳区水系分布图

朝阳区人均水资源量为 43 m³, 为全国平均水平的 1/49, 属于极度缺水地区[10]。在此情况下, 朝阳区经济结构主要以第三产业为主[11], 用水结构也以占总用水量(5.62 亿 m³, 2019 年) 57.47% 的生活用水量为主。此外, 朝阳区作为中心城区, 常住人口和常住外来人口, 均排北京市前一[11] [12], 导致 2019 年水资源开发率高达 351.5%, 属于资源性缺水地区。此外, 生活污水排放量较其他地区多, 导致大部分地表水处于 V 类水质[13]。朝阳区还有可能还面临着水质性缺水。由此可见, 研究朝阳区水环境承载力迫在眉睫。

2.2. 数据来源

以 2019 年北京市朝阳区相关数据为主。

经济社会数据: 朝阳区 2019 年国民经济和社会发展统计公报; 水文数据: 中国气象数据网、2019 年北京市水务统计年鉴; 水资源数据: 北京市水资源公报; 水环境数据: 2019 年北京市生态环境状况公报; 遥感数据: 高分二号 0.8 米分辨率遥感影像数据解译。

3. 研究方法

3.1. 区域水环境承载力评价指标体系的构建

DPSR 模型是衡量水环境 - 经济 - 社会复合系统可持续性发展的指标体系综合分析法, 诠释水环境与经济社会系统的互动关系。本研究遵循科学性原则、全面性原则和可操作性原则, 根据污染物排放 - 水环境系统净化过程, 采用 DPSR 模型对水域和陆域相关因素进行统筹, 从水资源消耗、水环境污染、水生态功能支撑、土地生态功能净化这四个维度, 通过专家打分构建 DPSR 模型, 构建朝阳区水环境承载力评价体系(如图 2)。

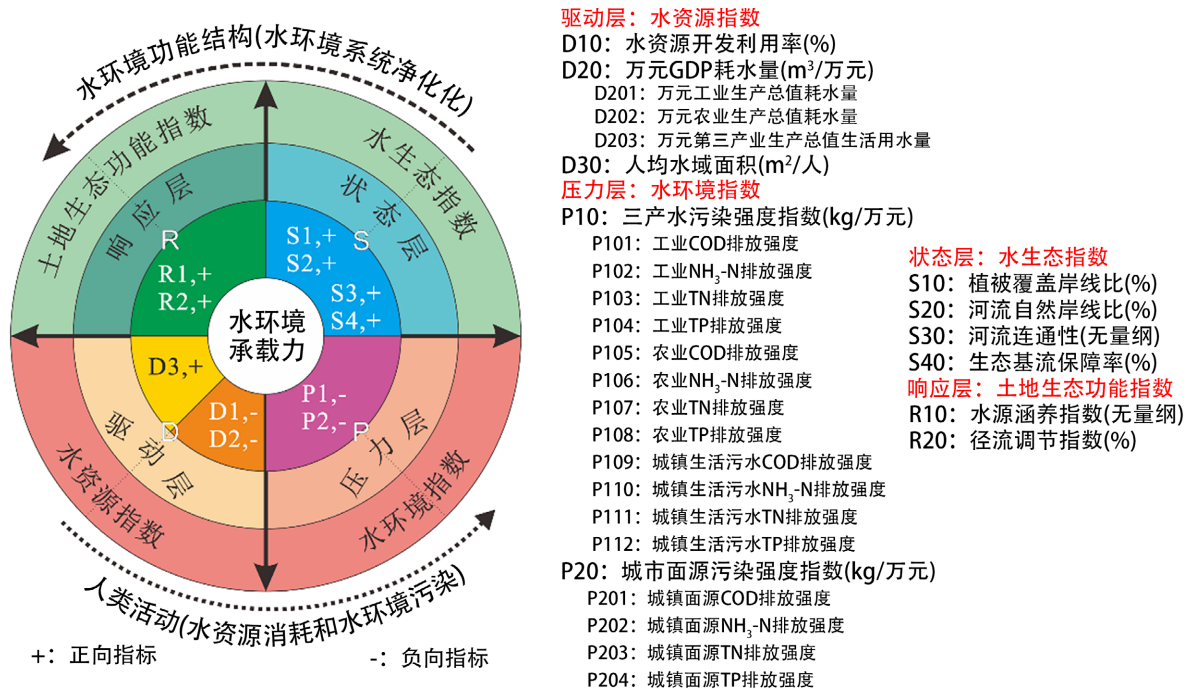


Figure 2. Evaluation index system of WECC based on DPSR model

图 2. 基于 DPSR 模型的水环境承载力评价指标体系

其中，驱动力层(D)指在城镇化进程中水资源消耗会对水生态服务功能和土地生态功能产生胁迫作用，例如水资源指数；压力层(P)代表人类活动对水环境承载力产生的直接压力作用，例如水环境指数；状态层(S)反映水生态功能支撑状态，例如本研究的水生态指数；响应层(R)从陆域层面表征土地生态功能对水环境系统的净化反馈作用，例如土地生态功能指数。

3.2. 区域水环境承载力评价指标等级划分标准

本研究根据高斯分布的四分位法(0.25/0.50/0.75) [14]，将各指标等级的赋予分值分别为低承载(0~0.25 分)、中承载(0.25~0.50 分)、高承载(0.50~0.75 分)和极高承载(0.75~1.00 分)。指数的赋予分值越高，表明该指数对区域水环境-经济-社会复合系统可持续性发展产生越好的影响。反之，则越差，如图 3 所示。

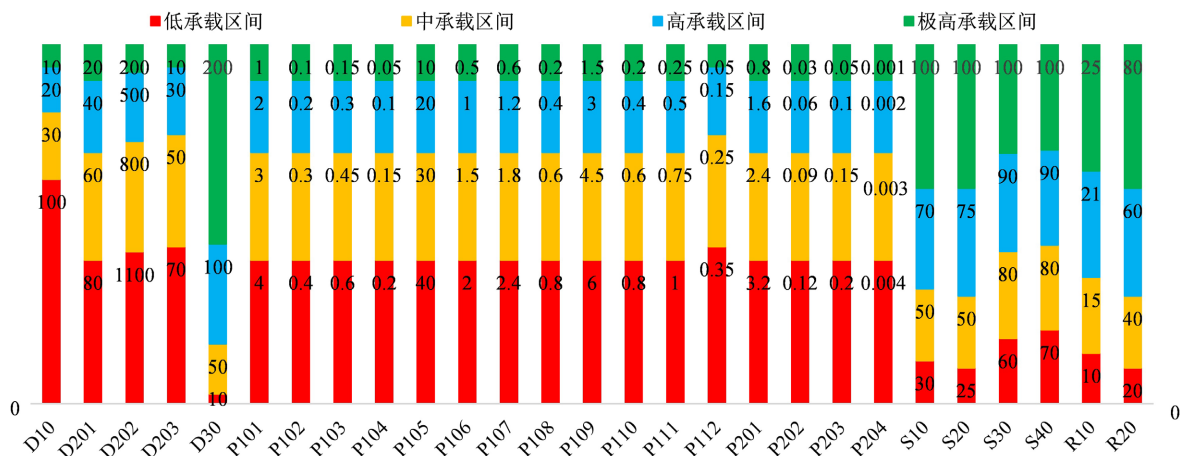


Figure 3. Classification standard of evaluation index of WECC

图 3. 水环境承载力评价指标等级划分标准

3.3. 区域水环境承载力判定研究

3.3.1. 数据预处理

为规避指标量纲和数量级的不同所引起的难以评价问题，对数据归一化的预处理。对正向指标用式(1)进行处理，值越大，影响水环境承载力指数正效应越大；负向指标用式(2)进行处理，值越大，影响水环境承载力负效应越大。

对于正向指标：

$$V_j = \frac{(b_j - B_{j\min}) \times (Q_{j\max} - Q_{j\min})}{B_{j\max} - B_{j\min}} + Q_{j\min} \quad (1)$$

对于负向指标：

$$V_j = \frac{(B_{j\max} - b_j) \times (Q_{j\max} - Q_{j\min})}{B_{j\max} - B_{j\min}} + Q_{j\min} \quad (2)$$

式(1)和式(2)中： V_j 为标准化指标值， $V_j \leq 1$ ； b_j 为第 j 项指标实际值； $B_{j\max}$ 为第 j 项指标实际值对应区间标准值的上限值； $B_{j\min}$ 为第 j 项指标实际值对应区间标准值的下限值； $Q_{j\max}$ 为第 j 项指标实际值对应承载程度的上限值； $Q_{j\min}$ 为第 j 项指标实际值对应承载程度的下限值。其中，上限值和下限值请见图 3。

3.3.2. 水环境承载力指数判定

采用加权求和方法得到表征区域水环境承载力相对大小的综合指数评价模型 S_{WECC} ，即：

$$S_{WECC} = \sum_{i=1}^m S_i \omega_i \quad (3)$$

式(3)中： S_{WECC} 为水环境承载力综合评价指数； S_i 为指标层中第 i 个指标的分数值； ω_i 为指标层中第 i 个指标的权重； m 为指标的个数。其中，权重 ω_i 采用层次分析法确定[15]。

由朝阳区水环境 - 经济 - 社会复合系统特征分析可知，在水资源开发利用情况方面，朝阳区属于资源性缺水地区；在水环境质量方面，2019 年朝阳区地表水大部分处于 V 类水质，水环境质量较差；在生态保护红线区域方面，朝阳区不属于生态保护红线区域。所以，水资源指数和水环境指数较水生态指数来说，显得稍微重要。另外，朝阳区主要以城镇和城乡生活为主。在水环境指数的相对重要性排序中，依次为：城市面源污染强度指数 \approx 城镇生活污染强度指数 $>$ 工业污染强度指数 $>$ 农业污染强度指数。

由式(3)可知，水环境承载力(S_{WECC})的取值范围为[0,1]，值越大说明朝阳区的水环境 - 经济 - 社会复合系统可持续性发展越好，反之，越差。表 1 将水环境承载力的取值划分为不同等级，以此评价水环境承载力的大小程度。

Table 1. Classification of comprehensive evaluation of water environment carrying capacity

表 1. 水环境承载力综合评价等级划分

S_{WECC}	0~0.25	0.25~0.50	0.50~0.75	0.75~1.0
承载等级	低承载	中承载	高承载	极高承载

4. 结果与分析

4.1. 朝阳区水环境承载力评价结果分析

由式(3)计算结果可知，2019 年朝阳区水环境承载力值为 0.64，处于高承载水平，如图 4(a)。这说明朝阳区

水环境-经济-社会复合系统可持续性发展较好。为了更清楚地揭示朝阳区水环境承载力现状的成因, 需要根据 DPSR 的逻辑关系, 进行水环境承载力贡献率分析。其中, 负向指标和正向指标进行预处理, 水环境承载力贡献率越大, 表明该指标对提高水环境承载力指数越大。又由结果可知(如图 4(b)), 水环境承载力贡献率高的指标有: 压力层的三产水污染强度指数(图 4(b)-A)和城市面源污染强度指数(图 4(b)-C), 以及驱动层的万元 GDP 耗水量(图 4(b)-B)。可推测出水资源指数和水环境指数的影响贡献率占主要部分。这两个指数需要进行详细的现状成因解析。

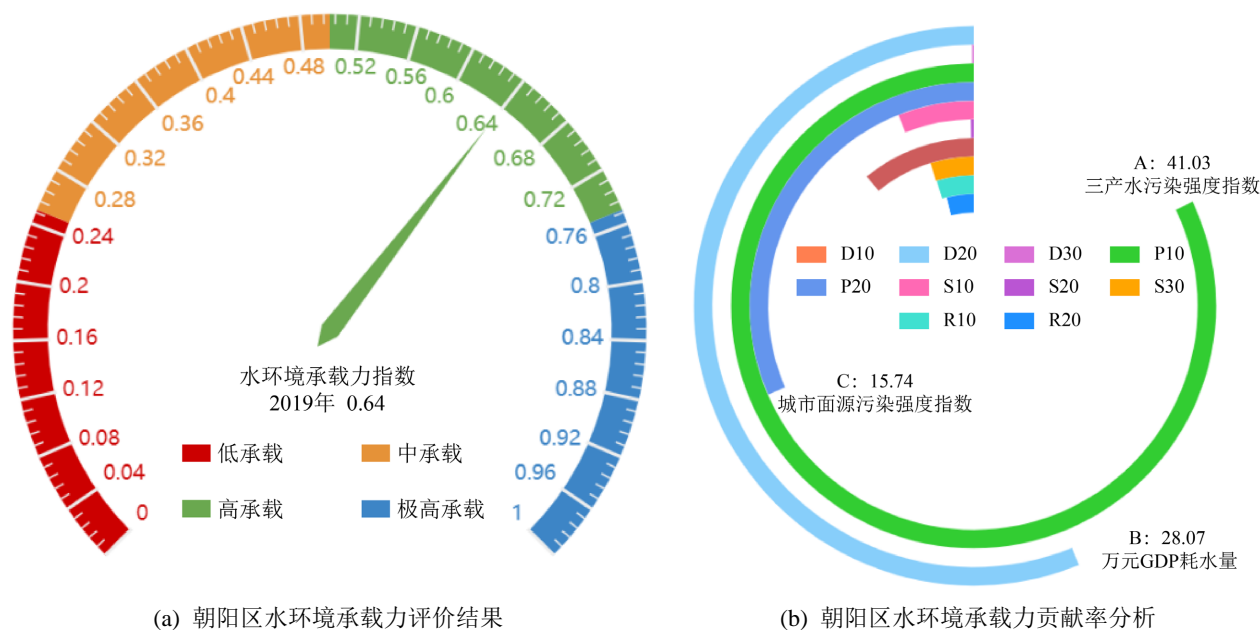


Figure 4. Analysis of evaluation results of WECC in Chaoyang District
图 4. 朝阳区水环境承载力评价结果分析图

4.2. 朝阳区水环境承载现状成因解析

4.2.1. 水资源指数影响分析

如图 4(b)所示, 严重超载的水资源开发利用率和低承载状态的人均水域面积对水环境承载力贡献率极低。显现出朝阳区水资源极为短缺, 水资源量是水环境承载力的重要胁迫因子。而处于极高承载水平的万元 GDP 耗水量指标对水环境承载力贡献率占 28.11%, 说明朝阳区用水效率较高, 节水较为明显, 对水环境承载力提高有影响作用。例如, 2019 年朝阳区的万元 GDP 耗水量, 相较于 2015 年和 2018 年, 分别下降了 23.69% 和 9.10%。这是因为 2015 年朝阳区出台了《关于实施综合治理加快推进水生态文明的意见》, 对节水型区建设进行了部署, 并于 2017 年启动和实施了节水区的创建工作。其中, 2017 年创建节水型单位、社区 200 家, 推广高效节水器具 5 万套(件), 完成崔各庄雨水再生水利用工程等 8 项雨水利用工程, 严格地超计划累进加价水费征收[16]。到 2018 年, 完成节水型区创建工作, 建立了健全城市节水管理制度和长效机制。由此可推测, 2019 年以后, 北京市朝阳区的万元 GDP 耗水量降低速率开始缓慢, 若仅靠用水效率来提高水环境承载力, 该方式有待商榷。

4.2.2. 水环境指数影响分析

因为朝阳区水污染主要以生活污水为主, 所以城镇生活污水对水环境承载力贡献率最大, 其次是城市面源污染强度指数(如图 5)。在水污染防治工作上, 2015 年朝阳区根据《北京市水污染防治工作方案实施情况考核办

法(试行)》，大力加强了生活污水处理力度。到了 2019 年，通惠河下段新八里桥东、坝河下段沙窝、清河下段沙子营、亮马河南岗子七棵树、通惠河上段高碑店 5 个国考、市考断面平均水质全部实现达标。其中，通惠河下段新八里桥东和清河下段沙子营断面平均水质达到 III 类。因此，水环境指数各分项指标处于极高承载或高承载状态。然而，朝阳区水功能区划基本上处于 IV 类或者 V 类水平[17]，即使地表水水质基本上达标也大部分处于 V 类水平。不仅如此，朝阳区城镇生活用水量较大。其中，外来常住人口占全区常住人口的 42.93% [12]，许多外来务工人员加剧城镇生活建设用水量的同时，也增加了生活污水处理难度。由此可见，朝阳区水环境质量还有很大的上升空间，还需改善区域水生态环境，从而提高朝阳区水环境承载力。

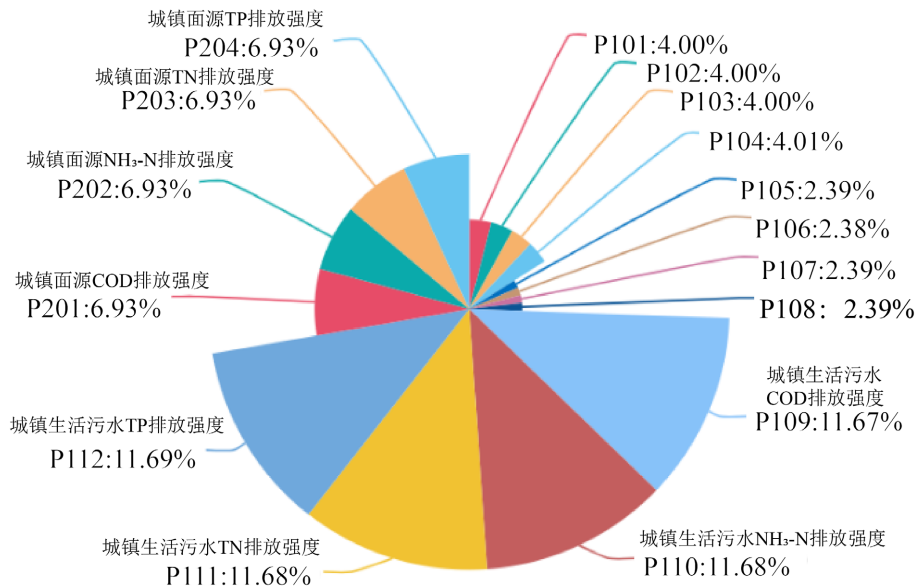


Figure 5. Analytical diagram of contribution rate of water environment index in pressure layer
图 5. 压力层水环境指数贡献率解析图

5. 结论

本研究采用 DPSR 模型研究区域水环境承载力评价，解决了传统 PSR 模型难以反映区域经济社会活动变化对水环境承载力驱动特征的问题。通过北京市朝阳区案例研究分析可知，2019 年朝阳区水环境指数达 0.64。其中，驱动层的水资源指数和压力层的水环境指数对水环境承载力贡献率高达 84.89%。这是因为朝阳区的产业结构以第三产业为主，所以第三产业用水量和城镇生活污水排放对水环境承载力影响最大。由于朝阳区用水效率较高以及加强生活污水处理力度，提高了驱动层和压力层的相关指标承载水平，从而 2019 年朝阳区属于高承载水平。这与《朝阳区分区规划(2017 年~2035 年)》相吻合，说明基于 DPSR 模型的区域水环境承载力评价研究具有可行性，可为区域水环境 - 经济 - 社会复合系统可持续性发展提供决策依据。

致 谢

感谢国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)和国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn>)提供数据支撑。

基金项目

北京市自然科学基金青年项目(8214057); 北京市公益性科研院所改革与发展专项项目资助(2021G-15); 国家自然科学基金青年项目(52000181); 中国水科院基本科研业务费项目(WE110145B0062021)。

参考文献

- [1] CHEN, I. C., WANG, Y. H., LIN, W., et al. Assessing the risk of the food-energy-water nexus of urban metabolism: A case study of Kinmen Island, Taiwan. *Ecological Indicators*, 2020, 110: 105861. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105861>
- [2] FAN, J. L., KONG, L. S., WANG, H., et al. A water-energy nexus review from the perspective of urban metabolism. *Ecological Modelling*, 2019, 392: 128-136. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.11.019>
- [3] SERRAO NEUMANN, S., RENOUF, M. A., MORGAN, E., et al. Urban water metabolism information for planning water sensitive city-regions. *Land Use Policy*, 2019, 88: 104144. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104144>
- [4] ZHOU, X. Y., ZHENG, B. H. and KHU, S. T. Validation of the hypothesis on carrying capacity limits using the water environment carrying capacity. *Science of the Total Environment*, 2019, 665: 774-784. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.146>
- [5] WANG, Y. M., ZHOU, X. D. and ENGEL, B. Water environment carrying capacity in Bosten Lake basin. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 199: 574-583. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.202>
- [6] 梁静, 吕晓燕, 于鲁冀, 等. 基于环境容量的水环境承载力评价与预测以郑州市为例[J]. *环境工程*, 2017, 35(11): 159-162, 167. LIANG Jing, LV Xiaoyan, YU Lujie, et al. Evaluation and prediction of water environment carrying capacity based on environmental capacity: A case study in Zhengzhou. *Environment Engineering*, 2017, 35(11): 159-162, 167. (in Chinese)
- [7] WANG, T. X., XU, S. G. Dynamic successive assessment method of water environment carrying capacity and its application. *Ecological Indicators*, 2015, 52: 134-146. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.12.002>
- [8] WEI, J. Y., ZHAO, X. Y. and SUN, X. S. The evaluation model of the enterprise energy efficiency based on DPSR. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(17): 16835-16846. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9096-0>
- [9] 王成志, 韩玉国, 杨林林. 北京市朝阳区地表水水质现状评价[J]. *北京农业*, 2016(3): 125-127. WANG Chengzhi, HAN Yuguo and YANG Linlin. Evaluation of surface water quality in Chaoyang district, Beijing. *Beijing Agriculture*, 2016(3): 125-127. (in Chinese)
- [10] 王成志, 杨林林, 廖人宽. 朝阳区水生态文明建设的思考[J]. *北京水务*, 2016(2): 9-11. WANG Chengzhi, YANG Linlin and LIAO Renkuan. Thinking of construction for the water ecological civilization in Chaoyang district. *Beijing Water*, 2016(2): 9-11. (in Chinese)
- [11] 北京市朝阳区统计局. 朝阳区 2019 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. <http://www.bjchy.gov.cn/affair/tjgb/8a24fe837431ef8901743281b51d000d.html>, 2020-08-28. Beijing Chaoyang District Municipal Bureau Statistics. Statistical bulletin of national economic and social development of Chaoyang district in 2019. <http://www.bjchy.gov.cn/affair/tjgb/8a24fe837431ef8901743281b51d000d.html>, 2020-08-28. (in Chinese)
- [12] 北京市统计局. 北京市 2019 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. http://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefaqu/202003/t20200302_1673464.html, 2020-03-02. Beijing Municipal Bureau Statistics. Statistical bulletin of Beijing on national economic and social development in 2019. http://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefaqu/202003/t20200302_1673464.html, 2020-03-02. (in Chinese)
- [13] 北京市生态环境局. 2019 年北京市生态环境状况公报[EB/OL]. <http://sthjj.beijing.gov.cn/bjhrb/index/xxgk69/sthjlyzgw/1718880/1718881/1718882/1791057/index.html>, 2020-04-27. Beijing Municipal Ecology and Environment Bureau. 2019 Beijing ecology and environment statement. <http://sthjj.beijing.gov.cn/bjhrb/index/xxgk69/sthjlyzgw/1718880/1718881/1718882/1791057/index.html>, 2020-04-27. (in Chinese)
- [14] 顾琦玮, 张亮, 赵晓辉, 等. 基于 ANP-正态云模型的区域水环境承载力评价[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2021, 19(5): 506-515. GU Qiwei, ZHANG Liang, ZHAO Xiaohui, et al. Evaluation of regional water environment carrying capacity based on ANP-Normal cloud model. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2021, 19(5): 506-515. (in Chinese)
- [15] ZHENG, Z. H., YU, Y. X. Improvement of the vertical "scatter degree" method and its application in evaluating water environmental carrying capacity. *Tecnologia Y Ciencias Del Agua*, 2017, 8(2): 71-76.
- [16] 北京市朝阳区人民政府. 朝阳区 2017 年市政府绩效任务四季度进展情况[EB/OL]. <http://www.bjchy.gov.cn/affair/gjih/jxgz/8a24fe8361401a2e0161415ddbd700b8.html>, 2018-01-19. Chaoyang District People's Government of Beijing Municipality. Progress of performance tasks of Chaoyang district municipal government in the fourth quarter of 2017. <http://www.bjchy.gov.cn/affair/gjih/jxgz/8a24fe8361401a2e0161415ddbd700b8.html>, 2018-01-19. (in Chinese)
- [17] 北京市生态环境局. 北京市地面水水域功能分类图[EB/OL]. <http://sthjj.beijing.gov.cn/bjhrb/index/xxgk69/sthjlyzgw/1718880/1718884/hjgnqh/307579/index.html>, 2014-10-29. Beijing Municipal Ecology and Environment Bureau. Functional classification map of surface water area in Beijing. <http://sthjj.beijing.gov.cn/bjhrb/index/xxgk69/sthjlyzgw/1718880/1718884/hjgnqh/307579/index.html>, 2014-10-29. (in Chinese)