

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

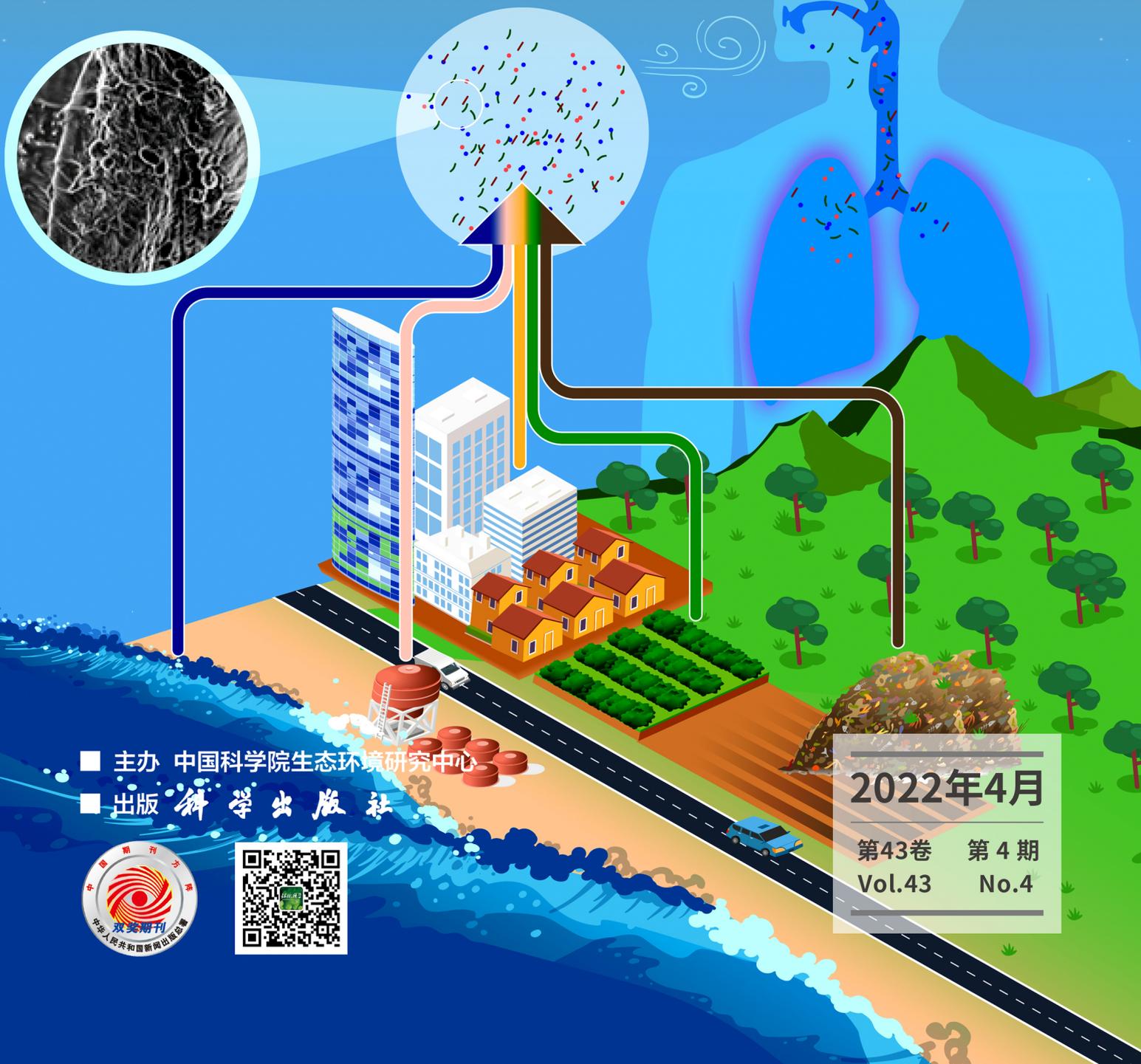
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年4月

第43卷 第4期

Vol.43 No.4

目次

2015~2019年河南省PM<sub>2.5</sub>时空特征与驱动因素分析 ..... 葛岂序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)

郑州市大气PM<sub>2.5</sub>中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据 ..... 曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)

宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析 ..... 杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)

上海城区PM<sub>2.5</sub>中有机组分及硝基芳香化合物分布特征 ..... 庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)

南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源 ..... 陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新锋, 盖鑫磊 (1738)

春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化 ..... 江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)

重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势 ..... 李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)

珠三角某石化园区VOCs排放特征及影响评价 ..... 张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)

基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析 ..... 刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)

基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源 ..... 韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)

基于SOA和O<sub>3</sub>生成潜势的杭州市PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>协同控制 ..... 林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)

超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响 ..... 王鹏程, 袁勃, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)

西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应 ..... 王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性 ..... 涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)

基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征 ..... 高宗源, 徐祀, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)

西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征 ..... 杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)

“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析 ..... 廖雅, 侯晓姝, 任晓红 (1853)

中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重 ..... 秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)

新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系 ..... 雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)

珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素 ..... 涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)

河套灌区浅层地下水NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N时空变化及驱动因素 ..... 袁宏颖, 杨树青, 张万锋, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)

盐城地区地下水溶质来源及其成因分析 ..... 王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)

白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义 ..... 王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)

东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素 ..... 陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)

松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性 ..... 程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)

区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响 ..... 高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)

南水北调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素 ..... 朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)

千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评估 ..... 弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)

蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险 ..... 靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)

基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价 ..... 李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)

小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响 ..... 张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)

不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响 ..... 王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)

南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析 ..... 岳桢钰, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)

老化作用对微塑料吸附镉的影响及其机制 ..... 王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)

碳化泡沫负载Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>活化过硫酸盐降解罗丹明B ..... 王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)

低总氮浓度下Fe<sup>2+</sup>促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮 ..... 郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)

污水管道增强通风作用下氧气的传质特性 ..... 杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)

长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价 ..... 张义, 周心劝, 曾晓辉, 冯娇, 刘玉荣 (2062)

中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义 ..... 王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)

贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评估及控制因素 ..... 张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)

地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征 ..... 王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)

矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价 ..... 王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)

农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评估 ..... 朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)

安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析 ..... 陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)

方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果 ..... 任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)

伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响 ..... 张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)

我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性 ..... 刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)

地膜覆盖和生物炭添加对菜地N<sub>2</sub>O排放的影响 ..... 胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)

化肥运筹对稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响 ..... 郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)

松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性 ..... 王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)

棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响 ..... 周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)

pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响 ..... 马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)

生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响 ..... 张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)

有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响 ..... 林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)

九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征 ..... 黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)

碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望 ..... 刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)

《环境科学》征订启事(1929) 《环境科学》征稿简则(1975) 信息(1996, 2029, 2080)

# “三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析

廖雅<sup>1,2</sup>, 侯晓姝<sup>1\*</sup>, 任晓红<sup>1,2</sup>

(1. 生态环境部环境规划院水生态环境规划研究所, 北京 100012; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

**摘要:** 明确京津冀地区水生态环境保护方向与策略, 对于实现京津冀水生态环境保护和高质量协同发展, 以及 2035 年美丽中国建设目标具有重大意义. 在水资源、水环境、水生态的“三水”统筹视角下, 面向京津冀地区水生态环境管理问题和需求, 以重点城市作为基本分析单元, 从“三水”以及社会经济发展水平、污染物排放量和环境治理力度这 6 个维度研究构建水生态环境保护策略分析体系, 为量化水生态环境保护水平提供逻辑框架. 在设立理想值的基础上应用 PROMETHEE-GAIA 方法分析京津冀各城市水生态环境现状与理想值之间的差距, 因地制宜制定各个城市水生态环境保护策略. 结果显示水生态环境保护综合水平从高到低依次为: 北京市 > 天津市 > 秦皇岛市 > 衡水市 > 张家口市 > 廊坊市 > 净流 (Phi) 均值 > 邯郸市 > 承德市 > 沧州市 > 保定市 > 唐山市 > 石家庄市 > 邢台市, 各城市水生态环境保护水平距离理想值仍有不小的差距; 分别从单维度和单指标层次分析得到各城市水生态环境保护的优势和劣势, 在此基础上, 提出京津冀区域城市未来水生态环境保护策略, 助力京津冀地区水生态环境保护.

**关键词:** “三水”统筹; 水生态环境保护策略; 城市; PROMETHEE-GAIA; 理想值

中图分类号: X321 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-1853-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202107255

## Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from “Three Waters” Overall Planning

LIAO Ya<sup>1,2</sup>, HOU Xiao-shu<sup>1\*</sup>, REN Xiao-hong<sup>1,2</sup>

(1. Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Clarifying the direction and strategy of water eco-environment protection in the Beijing-Tianjin-Hebei region is of great significance for realizing the water eco-environment protection and high-quality, coordinated development of the Beijing-Tianjin-Hebei area, as well as the goal of building a beautiful China by 2035. From the perspective of “Three Waters” overall planning, based on the urban scale of the Beijing-Tianjin-Hebei region, this study constructed six dimensions of water resources, water environment, water ecology (Three Waters), socio-economic development level, pollutant emissions, and environmental governance efforts. The water eco-environment protection strategy analysis system provided a logical framework for quantifying the current status of the water eco-environment. The ideal value was compared in each city, the PROMETHEE method was used to quantify the gap between each city and the ideal value of water eco-environment protection, and the current situation of the water eco-environment in Beijing-Tianjin-Hebei cities was evaluated. Additionally, water eco-environment protection strategies were formulated according to local conditions. The ranking of the comprehensive level of water eco-environment protection from high to low was Beijing > Tianjin > Qinhuangdao > Hengshui > Zhangjiakou > Langfang > the mean value of net flow value (Phi) > Handan > Chengde > Cangzhou > Baoding > Tangshan > Shijiazhuang > Xingtai; a large gap remained between the level and the ideal value. The hierarchical analysis showed that the advantages and disadvantages of each city’s water eco-environment protection were different from dimensions to indicators, and they had the characteristics of local water eco-environment protection. Future efforts should determine the water ecological, environmental protection indicator level of each city in the Beijing-Tianjin-Hebei region, conduct a separate analysis for each city, and propose protection strategies for future development, as well as continue to help the water eco-environmental protection in the Beijing-Tianjin-Hebei region.

**Key words:** “three waters” overall planning; water eco-environment protection strategy; urban scale; PROMETHEE-GAIA; ideal value

京津冀地区人均水资源量仅为 239 m<sup>3</sup>, 是全国平均水平的 1/9, 加上高耗水行业占比大, 高耗水粮食作物广泛种植, 水资源短缺成为制约水生态环境保护和高质量协同发展的关键瓶颈<sup>[1]</sup>. 经过多年治理, 京津冀地区水环境质量显著改善, 但依然是全国水资源最短缺<sup>[2]</sup>、水污染最严重<sup>[3,4]</sup>、水生态问题最突出<sup>[5]</sup>和资源环境与发展矛盾最为尖锐<sup>[6]</sup>的地区. 水环境质量方面, 2019 年一些水体如滦河、滏阳河、北排河、沧浪渠、大清河和独流减河等部分断面水质仍然为劣 V 类<sup>[7]</sup>. 在水污染<sup>[8]</sup>和水资源的复合压力下, 水生态严重受损, 白洋淀和七里海等湿地萎缩<sup>[9]</sup>, 水生生物资源急剧衰退. 党的“十九大”

报告<sup>[10]</sup>提出, 到 2035 年“生态环境根本好转, 美丽中国目标基本实现”的奋斗目标. 因此明确京津冀地区水生态环境保护方向与策略, 对于实现京津冀水生态环境保护和高质量协同发展, 以及 2035 年美丽中国建设目标具有重大意义.

水生态环境保护是一项系统工程, 与水资源、水环境和水生态(“三水”)联系紧密. 统筹考虑“三

收稿日期: 2021-07-31; 修订日期: 2021-09-15

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2018ZX07111001)

作者简介: 廖雅(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为流域水生态环境保护战略规划, E-mail: 934610460@qq.com

\* 通信作者, E-mail: houxs@caep.org.cn

水”成为京津冀地区未来水生态环境保护的现实选择和必要途径。目前国内水环境保护研究大多集中于单个河流<sup>[11,12]</sup>或湖泊<sup>[13]</sup>的水生态环境保护对策,少有研究在区域尺度提出宏观的水环境保护建议<sup>[14]</sup>。在针对京津冀区域进行的水生态环境保护策略研究中,大多仅着眼于单一的水资源指标<sup>[15]</sup>或水资源和水环境<sup>[16]</sup>双指标,缺乏对“三水”统筹考虑。同时,京津冀地区重点城市的社会经济发展水平、污染物排放量和环境治理力度差异明显<sup>[17~20]</sup>,现有研究未能从区域尺度,深入研究各城市水生态环境现状、问题和保护策略。

为了简化复杂的水生态环境问题,深入了解京津冀各城市水环境状况,本文基于京津冀各城市的社会经济发展水平、污染物排放量、“三水”和环境治理力度这6个维度,构建水生态环境保护策略指标体系,以2019年作为现状年,收集统计数据,采用PROMETHEE-GAIA多目标决策分析方法对水生态环境保护水平进行测度排序和优劣势分析,进一步评价京津冀地区城市尺度具体的水生态环境指标,从而因地制宜地制定水生态环境保护策略,助力京津冀地区的水生态环境保护。

## 1 研究区与研究方法

### 1.1 研究区概况

京津冀地区位于华北平原,燕山以南,太行山以东,渤海以西。区域总面积为21.8万km<sup>2</sup>,约占全国总面积的2.3%。京津冀地区属于温带大陆性季风气候,四季分明,年平均气温在4~13℃之间,各地的气温年较差、日较差都较大,全年无霜期110~220d,年日照时数2400~3100h。区域年平均降水量为530mm,由于地形复杂,加上中高纬大气环流系统和海洋气团的共同影响,局地气候变化复杂,降水时空分布不均,一般的年平均降水量在300~800mm之间。

京津冀地区是中国的“首都经济圈”,包括北京市、天津市和河北省,其中河北省有石家庄市、唐山市、廊坊市、保定市、秦皇岛市、张家口市、衡水市、承德市、沧州市、邢台市和邯郸市共11个重点地级市。2019年,区域人口11307.4万人,占全国比重8.1%,城镇化率为66.7%。地区生产总值(GDP)为84580.1亿元,占全国GDP的8.5%。

### 1.2 研究方法

多目标决策分析方法是帮助决策者制定决策的一种科学分析方法,旨在提高决策的科学性<sup>[21]</sup>,包括VIKOR、ANP、MULTIMOORA、TOPSIS、ELECTRE和PROMETHEE等决策方法<sup>[22,23]</sup>。与其

他多目标决策方法相比,PROMETHEE-GAIA方法能够准确有效地识别各指标对象的优势和劣势指标,并且具有可视化软件支持<sup>[24]</sup>,被广泛应用于生态<sup>[25,26]</sup>、农业<sup>[23]</sup>、经济<sup>[27]</sup>、教育<sup>[28]</sup>和计算机科学<sup>[29]</sup>等领域。在水管理领域中,该方法已用于城市水质重金属含量分析<sup>[30,31]</sup>、城市供水方案选择<sup>[32]</sup>和城市雨水污染影响因素排序<sup>[33]</sup>等。因此,本研究选择PROMETHEE-GAIA方法作为京津冀城市水生态环境保护策略分析的主要方法。

PROMETHEE (preference ranking organization method enrichment evaluation)是比利时Brans教授1984提出的一种基于方案的两两比较的多属性决策分析方法,其核心在于级别不低于关系的决策思想<sup>[34,35]</sup>。该方法利用决策者给出的偏好函数、准则值和准则权重,以优序关系确定方案的分类,同时探索指标和方案之间的关系。其计算步骤如下。

(1)对于每一个具体指标需要确定偏好优序的标准(最大为优表示为流入/最小为优表示为流出),根据两两比较确定偏差。

$$d_k(a_i, a_j) = f_k(a_i) - f_k(a_j) \quad (1)$$

式中, $d_k(a_i, a_j)$ 表示 $a_i$ 和 $a_j$ 在指标 $k$ 上的差异, $f_k$ 表示指标 $k$ 对应的准则。

(2)确定偏好函数,通过偏好函数可以将评估值之间的差异转化为0~1之间的偏好程度;PROMETHEE法提供6种偏好函数:常用准则、拟准则、线性优先关系准则、分级准则、具有无差异区间的线性有限关系准则和高斯准则<sup>[35]</sup>。线性优先关系准则和具有无差异区间的线性有限关系准则被认为最为适合于定量数据。两种线性准则的区别在于前者缺乏无差异阈值。而常用准则和分级准则更适合于定性指标。拟准则是分级准则的特殊情况,比较少用到。高斯准则由于参数较难估计,同样较少应用。本研究采用无差异区间的线性优先关系准则作为偏好函数,其定义公式为:

$$P_k(a_i, a_j) = P_i(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q, \\ \frac{d-p}{p-q}, & q < d \leq p, \\ 1, & d > p. \end{cases} \quad (2)$$

式中, $P_k(a_i, a_j)$ 为 $a_i$ 和 $a_j$ 两两比较的偏好函数; $d$ 为不同方案相同参数属性的优劣程度, $q$ 和 $p$ 是相应的无差异和偏好阈值。

(3)结合权重,计算偏好优序指数

$$\pi(a_i, a_j) = \sum_{k=1}^q P_k(a_i, a_j) \times w_k \quad (3)$$

式中, $w_k$ 为指标的权重,在本文中,所有评价指标的权重用熵值法<sup>[36]</sup>确定。

(4) 计算每个城市在确定指标下的“正流值 (Phi<sup>+</sup>)”、“负流值 (Phi<sup>-</sup>)”和“净流值 (Phi)” 以此得到方案间的排名; 其中, Phi<sup>+</sup> 和 Phi<sup>-</sup> 的取值范围为 0~1, Phi 的取值范围为 -1~1.

$$\left. \begin{aligned} \text{Phi}^+ &= \Phi^+(a_i) = \sum_{j=1}^n \pi(a_i, a_j), \\ \text{Phi}^- &= \Phi^-(a_i) = \sum_{j=1}^n \pi(a_j, a_i), \\ \text{Phi} &= \Phi^+(a_i) - \Phi^-(a_i). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中,  $\Phi^+(a_i)$  为方案  $a_i$  优于其他方案的程度;  $\Phi^-(a_i)$  为方案  $a_i$  劣于其他方案的程度. 而 Phi 为综合优序级别值, 决定方案间的优序关系, 根据式 (4) 可以得到方案集的完全排序.

交互辅助几何分析法 (geometrical analysis for interactive assistance, GAIA), 是 PROMETHEE 方法的一种可视化表达. 在 GAIA 平面中, 坐标轴代表判断准则, 待选的方案是坐标点, 指标之间的矛盾与一致性的关系非常直观. 两个指标在方向上一致, 说明

这两个指标具有一致性的关系或者具有正向相关性, 否则就代表这两个指标是矛盾的. GAIA 平面中的 II 线代表决策轴, 它是各个评价准则矢量总体的结果, 与其方向一致的方案相对较优, 反之则相对比较差. 通过改变评价准则的权重, 可以使 II 轴的方向改变, 从而方案的优劣顺序也会随之发生相应的变动.

### 1.3 水生态环境保护测度指标体系构建

以京津冀重点城市作为分析单元, 综合考虑社会经济发展水平、污染物排放量、“三水”和环境治理力度这 6 个维度, 研究构建京津冀水生态环境保护测度指标体系, 包括 21 项二级指标<sup>[17,37-42]</sup>, 见表 1. 面向中长期水生态环境保护需求, 本研究针对每个具体指标设定了理想值, 用以分析现状和目标的差距. 所有指标均为城市尺度. 水环境数据来源于国家国控断面监测数据, 水生态数据来源于各地市河湖生态健康评价结果, 其余数据主要来源于各地市统计年鉴.

表 1 京津冀重点城市水生态环境保护测度指标体系

Table 1 Measurement index system of water ecological environment protection in key cities of the Beijing-Tianjin-Hebei Region

状态层	一级指标	二级指标	缩写	流入(-)/流出(+)	理想值	单位	理想值确定依据
外部因素	社会经济 发展水平	人均 GDP	S1	+	164 242	元·a <sup>-1</sup>	京津冀各城市人均 GDP 的最大值
		第三产业占比	S2	+	83.5	%	京津冀各城市第三产业占比的最大值
		城镇化率	S3	-	90%	%	发达国家城镇化水平
	污染物 排放量	工业源 COD	P1	-	0.095 7	万 t·a <sup>-1</sup>	京津冀各城市污染物排放量的最小值
		工业源氨氮	P2	-	0.004 6	万 t·a <sup>-1</sup>	
		城镇源 COD	P3	-	0.39	万 t·a <sup>-1</sup>	
城镇源氨氮	P4	-	0.08	万 t·a <sup>-1</sup>			
农业源 COD	P5	-	0.01	万 t·a <sup>-1</sup>			
农业源氨氮	P6	-	12.73	万 t·a <sup>-1</sup>			
环保治 理力度	环保投入占 GDP 比例	G1	+	3.50	%	文献[43]提出, 到 2020 年, 我国环保投资占 GDP 的比例不低于 3.5%	
	城市污水处理率	G2	+	100	%	污水全处理最佳状态	
	城市再生水利用率	G3	+	35	%	国家发改委表明, 到 2025 年, 京津冀地区再生水利用率达到 35% 以上	
水资源	人均水资源量	R1	+	3 000	m <sup>3</sup>	国际公认标准, 人均水资源低于 3 000 m <sup>3</sup> 为轻度缺水	
	生态环境用水比例	R2	+	41.70	%	文献[44]表明京津冀生态环境需水量处于 114~121 亿 m <sup>3</sup> 之间, 占据京津冀地区水资源总量的 41.7%~44.3%	
内部因素	水环境 质量	高锰酸盐指数	E1	-	6	mg·L <sup>-1</sup>	Ⅲ类水水质标准
		氨氮浓度	E2	-	1	mg·L <sup>-1</sup>	
		总氮浓度	E3	-	1	mg·L <sup>-1</sup>	
		总磷浓度	E4	-	0.2	mg·L <sup>-1</sup>	
水生态	鱼类 Shannon 多样性指数	C1	+	2.18		文献[45]表明, 鱼类 Shannon 多样性指数 ≥ 2.18 时鱼类种群稳定	
	底栖动物 BMWP 指数	C2	+	>81		BMWP 指数 > 81 时表明生物评价指标处于极好的健康状态[46]	

## 2 结果与讨论

### 2.1 水生态环境保护现状综合评估

图 1 为 PROMETHEE I 部分排名的网络图,

PROMETHEE I 部分排名可以获得既包括 Phi<sup>+</sup> 又包括 Phi<sup>-</sup> 的详细信息, 还可以根据其网络图中的位置接近程度判断各市水生态环境水平的差异. Phi<sup>+</sup> 为水生态环境的优势因素得分, Phi<sup>-</sup> 为水生态环境

的劣势因素得分,  $\Phi^+$  值越高、 $\Phi^-$  值越低的城市水生态环境表现越好.  $\Phi^+$  基本相同的城市有北京市、天津市和秦皇岛市(0.33); 张家口市和廊坊市(0.21); 邯郸市和唐山市(0.17 和 0.18); 承德市、保定市和石家庄市(0.16、0.16 和 0.17), 表明这些城市在水生态环境保护方面优势因素处于相同或相似的水平.  $\Phi^-$  基本相同的城市有廊坊市和邯郸市(0.24); 石家庄市和邢台市(0.38 和 0.37), 表明这些城市在水生态环境保护方面劣势因素处于相同或相似的水平.

平从高到低排序依次为: 北京市 > 天津市 > 秦皇岛市 > 衡水市 > 张家口市 > 廊坊市 >  $\Phi$  均值 > 邯郸市 > 承德市 > 沧州市 > 保定市 > 唐山市 > 石家庄市 > 邢台市. 各城市的  $\Phi$  在  $-0.270 \sim 0.273$  之间, 与理想值的差距在  $0.178 \sim 0.804$  之间. 与理想值相比, 京津冀的水生态环境优势并不明显, 且劣势较为突出, 距理想值水平还有较大的进步空间. 另外,  $\Phi$  的极差为 0.543, 表明各地区的水生态环境保护水平差异较大, 区域发展不均衡的情况较为严重.

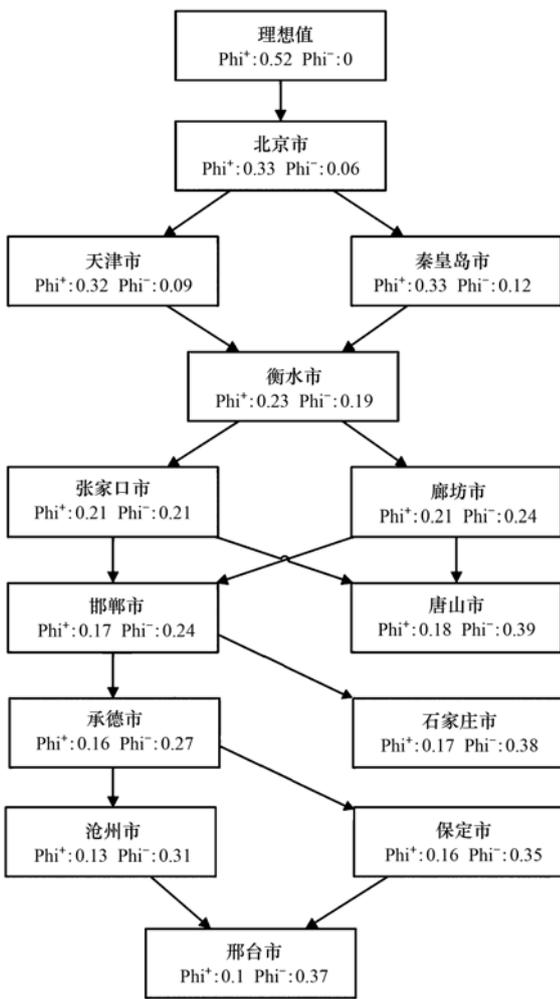


图1 水生态环境保护 PROMETHEE I 部分排名  
Fig. 1 Part of PROMETHEE I ranking of water ecological environment protection

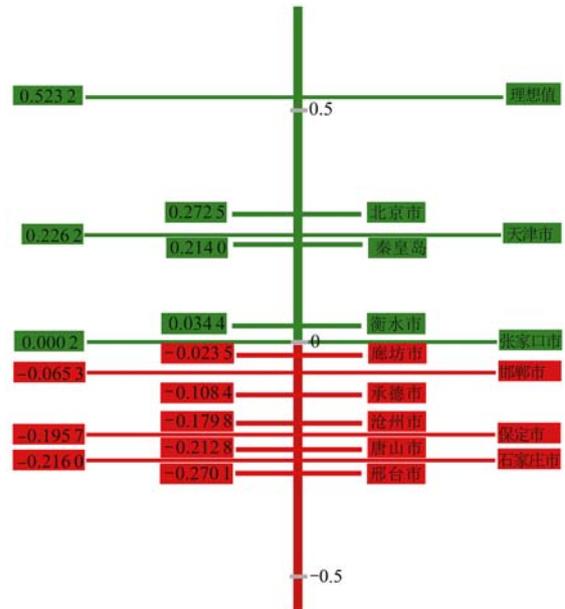


图2 水生态环境保护 PROMETHEE II 完全排名  
Fig. 2 Complete ranking of PROMETHEE II in water ecological environment protection

2.2 水生态环境保护影响因素多层次分析

图2是水生态环境保护水平的 PROMETHEE II 完全排名, 是根据各地区水生态环境保护水平的净流值( $\Phi$ )来排名, 其排名具有唯一确定性. 分为上下两段, 上段用绿色表示向好趋势,  $\Phi$  越大表示水生态环境保护水平越高. 下端用红色表示向劣趋势,  $\Phi$  越小代表水生态环境保护水平越低. 与 PROMETHEE I 相比较, 完全排名和部分排名结果统一且相互印证. 13 个城市的水生态环境保护水

从社会经济发展水平、污染物排放量、“三水”和环境治理力度这 6 个维度分析城市单维度表现, 结果如表 2 所示. 在社会经济发展水平维度, 北京市的表现最好, 其  $\Phi$  值为 0.135, 其次是天津市, 为 0.092, 较落后的是承德市和邢台市, 承德市的社会经济发展水平最低. 在污染物排放量维度, 北京市、衡水市和秦皇岛市排放量处于相对较低水平, 污染物排放量较大的是唐山市、石家庄市和保定市. 水资源状况最好的是秦皇岛市, 最差的是邯郸市. 水环境质量和污染物排放水平在各市的表现具有一定的协同性, 表现为污染物排放量大的城市水环境质量都不太好. 水环境质量总体最好的城市是承德市, 最差为邢台市. 在水生态维度, 秦皇岛市水生态健康情况相对最好, 邢台市最差, 其他各地市相差不大. 而在环境治理力度方面, 天津市环境治理力度最大, 承德市和唐山市等地市需加大环境治理力度.

从城市尺度来看,位于第一的北京市在社会经济发展水平和“三水”方面占据优势地位,但环境治理力度不足.天津市和秦皇岛市水生态环境保护水平总体位于第二和第三,但两城市在各个方面的表现都较普通,缺乏突出优势.张家口市、廊坊市和邯郸市三市既有突出的优势,又包含明显的劣势,总体来看水生态环境保护水平并不高.承德市、沧州市、保定市和唐山市的水生态环境保护水平在各方面的表现较为落后;承德市在水环境质量方面表现出较明显优势,其他 5 个方面均

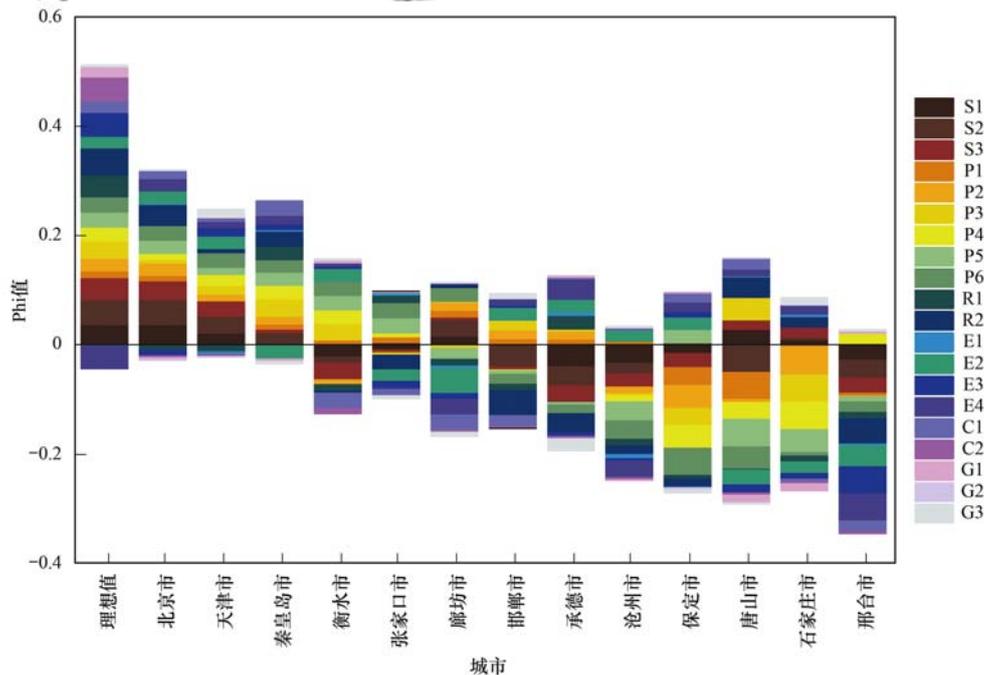
优势不明显或较为落后;沧州市在 6 个方向均表现为优势不明显或较为落后;保定市在水环境质量和水生态方面表现出相对优势,唐山市在水资源和水生态方面表现出相对优势,其他 4 个方面都较为落后.石家庄市和邢台市的总体水生态环境状况相对其他 11 个城市的水平来说最低,水环境提升进程也非常缓慢,两市在水生态环境保护的道路上还有很长的路要走.

进一步分析城市在单个指标层次的表现,结果如图3所示.可直观分辨各城市水生态环境保护的

表 2 水生态环境保护的单维度 Phi 值

Table 2 Phi of water ecological environment protection

城市	社会经济发展水平	污染物排放量	水资源	水环境质量	水生态	环境治理力度
北京市	0.135	0.102	0.026	0.038	0.011	-0.003
天津市	0.092	0.089	-0.009	0.046	0.003	0.015
保定市	-0.048	-0.173	-0.023	0.049	0.016	-0.008
沧州市	-0.091	-0.089	-0.032	-0.021	0.000	0.001
承德市	-0.123	0.008	-0.004	0.060	-0.001	-0.020
邯郸市	-0.048	0.019	-0.061	0.039	-0.023	0.010
衡水市	-0.077	0.108	-0.019	0.033	-0.038	0.008
廊坊市	0.056	0.028	-0.008	-0.090	-0.031	-0.007
秦皇岛市	0.031	0.128	0.058	0.004	0.026	-0.009
石家庄市	0.039	-0.204	0.006	-0.010	-0.008	-0.001
唐山市	0.007	-0.137	0.036	-0.027	0.015	-0.016
邢台市	-0.102	-0.014	-0.061	-0.141	-0.023	0.007
张家口市	-0.014	0.069	-0.010	-0.031	-0.012	-0.003
理想值	0.142	0.148	0.100	0.022	0.065	0.021



各市按 PROMETHEE II 完全排名从左到右依次排列; Phi 值 0 以上的指标为优势指标, 0 以下的指标为劣势指标, 色块越大表示影响越大; 图例具体含义见表 1

图 3 PROMETHEE 彩虹图

Fig. 3 PROMETHEE rainbow

优劣势指标,有助于判别各城市的水生态环境保护水平是否处于均衡发展的状态.从具体指标来看,各城市的优势和劣势都具有当地水生态环境保护的特点.如水生态环境保护水平最高的北京市在环保投入占 GDP 比例(G1)、城市污水处理率(G2)还有待提高,且仍存在部分亟待解决的水环境问题如总氮(E3)浓度过高,其他方面都优于其他地区.秦皇岛市、衡水市、石家庄市、张家口市和邯郸市各方面优劣势的发展相对均衡.而天津市在水资源状况整体劣势影响明显.沧州市和邢台市的水资源状况和社会经济发展水平两方面的劣势影响较严重.承德市和保定市的水资源状况、污染物排放情况均处于劣势.唐山市和石家庄市的污染物排放情况以及水环境质量的劣势属性也尤为突出.从具体指标来看,京津冀各城市的水生态环境指标与理想值仍有较大差距.

### 2.3 水生态环境保护的 GAIA 分析

GAIA 分析是对 PROMETHEE 法的补充,GAIA 分析的质量由  $\delta$  参数判断,根据经验, $\delta$  值大于 60% 认为 GAIA 分析的信息几乎没有丢失,分析结果可靠,本文  $\delta$  值为 65.8%. 13 个重点城市在 GAIA 中相互距离越近表示具有越相似的水生态环境保护特征[图 4(a)],由中心向四周发出的各个轴为指标轴[图 4(b)],指标轴的长短表示在计算 Phi 值中的判别程度,指标轴越长判别程度越高,在京津冀水生态环境保护中重要性越高,其中较粗的红轴为决策轴,决策轴越长表示 GAIA 分析越可靠.城镇 COD(P3)、城镇源氨氮(P4)、农业源 COD(P5)、农业源氨氮(P6)、第三产业占比(S2)、城镇化率(S3)、人均 GDP(S1)和生态环境用水比例(R2)这 8 个指标轴在 GAIA 中长度较为突出,表明这 8 个指标在京津冀地区水生态环境保护中具有重要地位,而由于城镇化率(S3)、生态环境用水比例(R2)和人均 GDP(S1)位置相近,表明这 3 个指标在各个地区之间具有非常强的相似性,可辨别性较弱. GAIA 还能通过距离和方向来判断各城市之间的相似性和互补性,如秦皇岛市和天津市位置接近,表明这两个市的水生态环境保护策略在指标上都具有相似性,水环境状况的基础条件基本相同,两地在进行水生态环境保护过程中可以协同前进.而北京和沧州几乎位于相反的方向,表明两地水生态环境保护指标具有互补性,可以在水生态环境保护过程中相互帮扶,互补发展.

### 2.4 水生态环境保护策略

对各地具体指标进行详细地分析,提出各城市

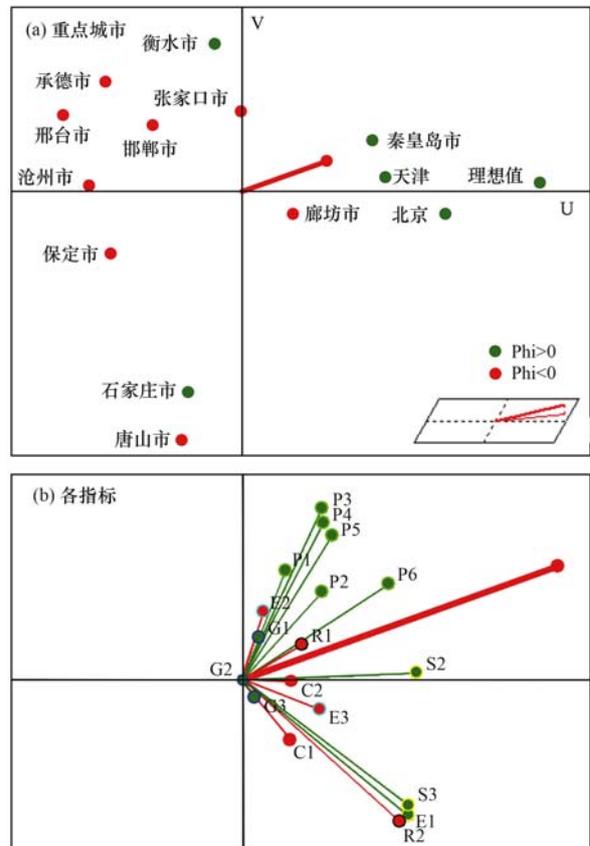


图 4 GAIA 平面

Fig. 4 GAIA plan

水生态环境保护的策略选择,见图 5 和表 3. 现阶段,北京市、天津市和秦皇岛市这 3 个城市的水生态环境保护处于优势地位;衡水市和张家口市水生态环境保护中优势和劣势处于相互制衡状态;河北省其他 8 个重点城市的水生态环境保护处于劣势地位.针对具体问题,分别提出相应的水生态环境保护策略,如持续推进京津冀都市圈协同发展、稳步推进社会经济高速发展、加大环保投入、完善污水管网布置等,持续助力京津冀地区水生态环境保护.

### 3 结论

(1)应用 PROMETHEE 方法分析京津冀 13 个城市的水生态环境保护水平,从高到低排序依次为:北京市 > 天津市 > 秦皇岛市 > 衡水市 > 张家口市 > 廊坊市 > Phi 均值 > 邯郸市 > 承德市 > 沧州市 > 保定市 > 唐山市 > 石家庄市 > 邢台市,与理想值相比存在较大差距.

(2)从单维度分析,水环境质量和污染物排放水平在各市的表现具有很大的协同性,与实际情况相印证;各城市水生态环境保护的优势维度和劣势维度都有所不同,根据各地的特点提出相应的改进

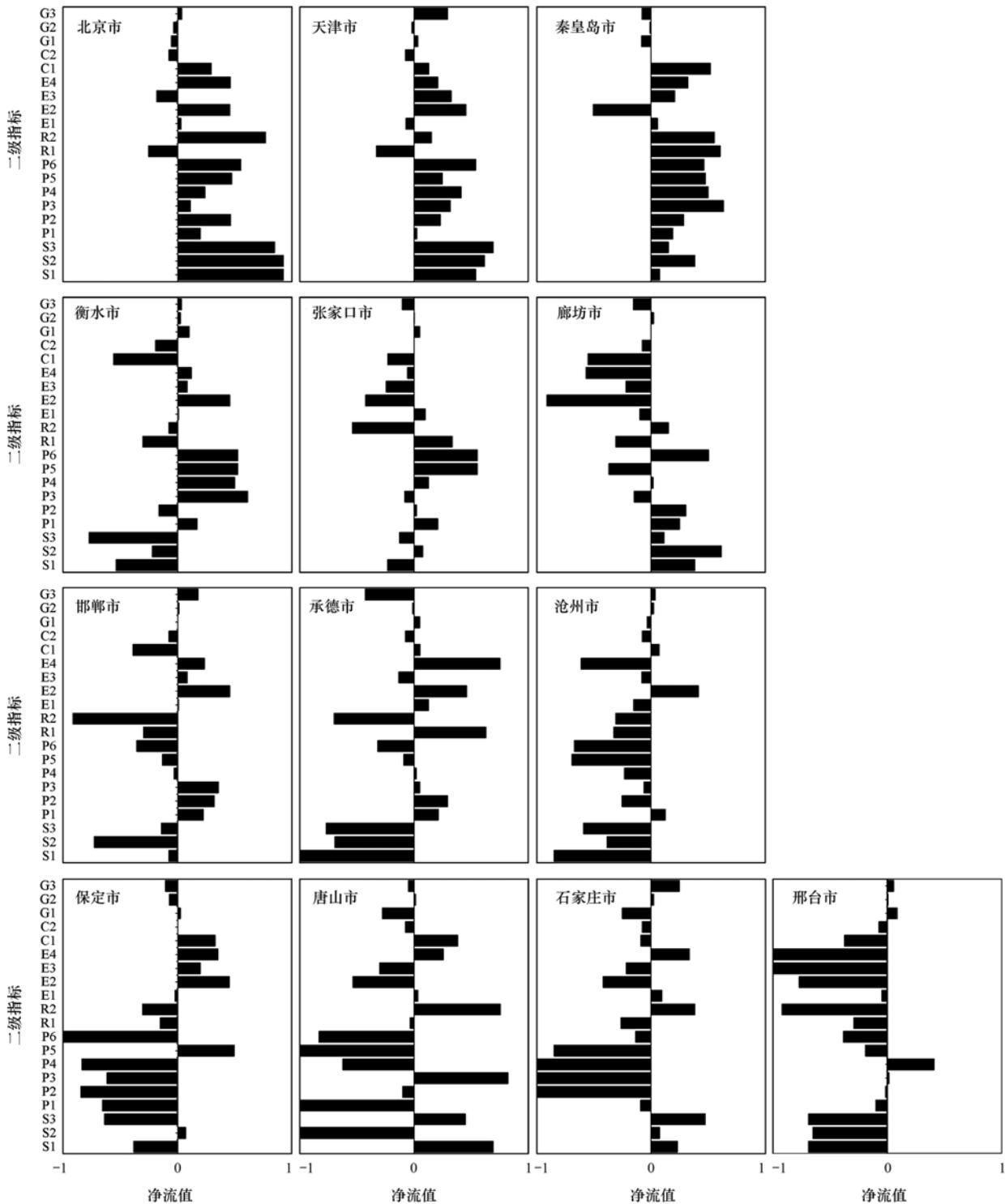


图5 京津冀重点城市水生态环境保护策略指标条形

Fig. 5 Bar chart of water ecological environment protection strategy

方向；分析具体优劣势指标,直观判别各城市的水生态环境保护水平的发展状态。

(3)城镇 COD、城镇源氨氮、农业源 COD、农业源氨氮、第三产业占比、城镇化率、人均 GDP 和生态环境用水比例这 8 个指标在京津冀地区水生态环境保护中具有重要地位；对于水生态环境保护指标存在的相似性的城市,未来的水生态环境保护过

程中可协同前进；对于水生态环境保护指标存在的互补性的城市,未来的水生态环境保护过程中可帮扶发展。

(4)对各个城市水生态环境保护的具体指标进行单独分析,确定了各城市水生态环境保护的主导优劣因素,据此提出未来发展的保护策略,持续助力京津冀地区水生态环境保护。

表3 京津冀重点城市水生态环境保护策略选择

Table 3 Selection of water ecological environment protection strategies for key cities in Beijing-Tianjin-Hebei region

城市	主导	优劣势分析	策略
北京市		优势:社会经济发展水平(S1~S3)和污染物排放量指标(P1~P6)具有显著优势,其中城镇化率高(S3)有利于污水集中处理排放,市内的重污染企业持续稳步调整,鱼类 Shannon 多样性指数(C1)、总磷浓度(E4)和氨氮(E2)浓度占据相对优势地位,城市再生水利用率(G3)和高锰酸盐指数(E1)优势并不明显,有进一步提升的空间 劣势:人均水资源量(R1)不足,底栖动物 BMWP 指数(C2)、环保投入占 GDP 比例(G1)和城市污水处理率(G2)仍处于劣势	未来需要加大环保投入,进一步完善污水管网布置,提高水资源利用率,保障南水北调中线工程调水,持续关注水生生态恢复问题
天津市	优势	优势:社会经济发展水平(S1~S3)和污染物排放量指标(P1~P6)优势突出,水环境质量除高锰酸钾指数(E1)总体较好,城市再生水利用率(G3)、鱼类 Shannon 多样性指数(C1)和生态环境用水比例(R2)处于相对优势 劣势:人均水资源量占有率(R1)、城市污水处理率(G2)、底栖动物 BMWP 指数(C2)较低	未来需要持续推进京津冀都市圈协同发展,继续提升污水处理率,提高水资源保障,持续关注水生生态恢复问题
秦皇岛		优势:社会经济发展水平(S1~S3)和污染物排放量指标(P1~P6)、水资源状态(R1~R2)表现较好,水环境质量除氨氮含量(E1,E3~E4)总体较好,城市再生水利用率(G3)、鱼类 Shannon 多样性指数(C1)处于相对优势 劣势:氨氮含量(E2)超标,底栖动物 BMWP 指数(C2)较低、环保治理力度不足(G1~G3)	未来需重点加大环保投入,完善污水管网布置,提高再生水利用率,持续关注河流氨氮污染问题
衡水市		优势:污染物排放量指标除工业源氨氮(P1,P3~P6)、水环境质量(E1~E4)总体较好,水资源状态(R1~R2)表现较好,环保治理力度(G1~G3)趋于优势但并不明显,有继续提升的空间 劣势:社会经济发展水平(S1~S3)较差,水资源(R1~R2)、水生态状况(C1~C2)不容乐观	未来需稳步推进社会经济中高速发展,完善污水管网布置,提高再生水利用率,提高水资源利用率;严格限制工业污染排放
张家口市	劣势制约	优势:污染物排放量指标除城镇源氨氮(P1~P2,P4~P6)总体较好,第三产业占比(S2)、人均水资源量(R1)、高锰酸钾指数(E1)、环保投入占 GDP 比例(G1)趋于优势但并不明显,有继续提升的空间 劣势:水环境质量除高锰酸钾指数外(E2~E4)总体较差,人均 GDP(S1)、城镇化率(S3)、生态环境用水比例(R2)和城市再生水利用率(G3)处于较低水平,水生态状况(C1~C2)不容乐观	未来需稳步推进社会经济中高速发展,完善污水管网布置,提高再生水利用率,提高水资源利用率,严格限制工业污染排放
廊坊市		优势:社会经济发展水平(S1~S3)较高,污染物总体排放量(P1~P6)总体趋于优势,生态环境用水比例(R2)和城市污水处理率(G2)趋于优势但并不明显,有继续提升的空间 劣势:廊坊市面临着鱼类和底栖动物多样性弱等水生态问题(C1~C2),水环境(E1~E4)状况不容乐观,城市再生水利用率(G3)也亟待加强	未来需提高环保治理力度,提升生态环境用水比例和城市再生水利用率,保障底栖动物和鱼类的生存环境
邯郸市		优势:工业源污染物排放量(P1~P2)、城镇源 COD 排放量(P3)、城市再生水利用率(G3)和水环境质量(E1~E4)趋于优势但整体并不明显,有继续提升的空间 劣势分析:社会经济发展水平(S1~S3)、农业源污染物排放量(P5~P6)、水生态状况处于劣势	未来需稳步推进社会经济中高速发展,完善污水管网布置,提高再生水利用率,提高水资源利用率,严格控制工业排污
承德市	劣势	优势:水环境质量除总氮浓度(E1~E2,E4)和人均水资源量(R1)整体表现较好,工业源、城镇源污染物排放量(P1~P4)、鱼类 Shannon 多样性指数(C1)和环保投入占 GDP 比例(G1)趋于优势但整体并不明显,有继续提升的空间 劣势:社会经济发展水平(S1~S3)处于较明显劣势,农业源污染物排放量(P5~P6)、生态环境用水比例和城市再生水利用率(G3)处于劣势	未来需稳步推进社会经济中高速发展,完善污水管网布置,提高再生水回用率,提高生态环境用水比例,保障良好的水生态环境,严格限制农业污染排放和化肥施用
沧州市		优势:水环境质量指标中仅氨氮浓度(E2)处于优势,污染物排放量指标中仅工业源 COD 排放量(P1)处于优势,水生态状况(C1~C2)和环保治理力度(G1~G3)处于劣势均衡,有较大的提升空间 劣势:社会经济发展水平(S1~S3)未达到京津冀地区平均水平,污染物排放量(P1~P6)处于较明显的劣势,水环境质量(E1~E4)整体较差	未来重点稳步推进社会经济中高速发展,重点推进高新技术产业发展;完善污水管网布置,提高再生水利用率,提高生态环境用水比例,提高水资源利用率和水生态环境状况,严格限制工业、城镇和农业污染排放
保定市		优势:水环境质量指标(E1~E4)整体处于优势,第三产业占比(S2)和环保投入占 GDP 比例(G1)处于优势但整体并不明显,有继续提升的空间 劣势:人均 GDP(S1)、城镇化率(S3)和污染物排放量除农业源 COD(P1~P4,P6)处于较明显劣势;水资源(R1~R2)和环保治理力度(G1~G3)都处于劣势	未来需稳步推进社会经济中高速发展,完善污水管网布置,提高再生水利用率,提高水资源利用率,严格限制工业、城镇和农业污染排放

续表 3

城市	主导	优劣势分析	策略
唐山市		优势:人均 GDP(S2)、城镇化率(S3)、城镇源 COD 排放量(P3)和生态环境用水比例(R2)处于优势,总磷浓度(E4)和鱼类 Shannon 多样性指数(C1)趋于优势但整体并不明显,有继续提升的空间 劣势:第三产业占比(S2)、工业源 COD(P1)和农业源 COD(P5)处于极端劣势水平,其他污染物排放量指标(P2, P4, P6)和环保治理力度(G1~G3)整体处于劣势水平,重污染企业亟待调整,氨氮(E2)、总氮浓度(E3)和底栖动物 BMWP 指数(C1)较弱	未来需稳步调整重污染企业,重点推进高新技术产业发展,完善污水管网布置,提高再生水利用率,提高水资源利用率,严格限制工业、城镇和农业污染排放
石家庄市	劣势	优势:社会经济发展水平(S1~S3)、生态环境用水比例(R2)、高锰酸钾指数(E1)、总磷浓度(E4)和城市再生水利用率(G3)整体向好但并不明显,有继续提升的空间 劣势:污染物排放量尤其是城镇源和农业源(P2~P5)处于极端劣势,水生态状况(C1~C2)亟待改善,环保投入占 GDP 比例(G1)不高,水生态环境比较恶劣	未来需继续稳步推进社会经济中高速发展,完善污水管网布置,适度提高生态环境用水比例和再生水利用率,加大环保投入,保障水生态环境,严格限制工业、城镇和农业污染排放
邢台市		优势:环保治理力度(G1~G3)趋于优势但极不显著,有待继续提升 劣势:水环境质量(E1~E4)处于极端劣势,社会经济发展水平(S1~S3)、水资源(R1~R2)和水生态(C1~C2)状况处于明显劣势,污染物排放量(P1~P6)处于劣势	未来需稳步推进社会经济中高速发展,稳步调整重污染企业,重点推进高新技术产业发展,加大环境保护治理力度,强化水生态、水资源和水环境的保护与治理,完善污水管网布置,提高污水回用量,加强再生水利用率,提高水资源利用率,严格限制工业、城镇和农业污染排放

## 参考文献:

- [1] 孟丽红,丁之勇,李成阳,等. 区域水资源代谢效率时空变化及驱动因素[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(3): 20-26.  
Meng L H, Ding Z Y, Li C Y, et al. Spatiotemporal variation and driving factors of regional water resources metabolism efficiency[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(3): 20-26.
- [2] 鲍超,贺东梅. 京津冀城市群水资源开发利用的时空特征与政策启示[J]. 地理科学进展, 2017, 36(1): 58-67.  
Bao C, He D M. Spatiotemporal characteristics of water resources exploitation and policy implications in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. Progress in Geography, 2017, 36(1): 58-67.
- [3] 张丽丽. 京津冀协同发展中水污染治理现状及对策研究[J]. 中国市场, 2017, (14): 249-250.
- [4] 杨志,牛桂敏. 流域视角下京津冀水污染协同治理路径探析[J]. 人民长江, 2019, 50(9): 6-12.  
Yang Z, Niu G M. Analysis on coordinated governance of water pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region from basin perspective[J]. Yangtze River, 2019, 50(9): 6-12.
- [5] 迟妍妍,许开鹏,王晶晶,等. 京津冀地区水生态风险及对策建议[J]. 环境影响评价, 2019, 41(2): 32-35.  
Chi Y Y, Xu K P, Wang J J, et al. The water ecological risk and its control in Beijing, Tianjin and Hebei[J]. Environmental Impact Assessment, 2019, 41(2): 32-35.
- [6] Li C. Study on environmental equity in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 621, doi: 10.1088/1755-1315/621/1/012142.
- [7] 林海,王源,李冰. 北京市妫水河浮游动物群落结构与水质评价[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7583-7591.  
Lin H, Wang Y, Li B. Evaluation of zooplankton community structure and water quality of Guishui River, Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7583-7591.
- [8] 宋佳宁,王耀华. 京津冀区域水污染立法协同治理机制探析[J]. 渤海大学学报(哲学社会科学版), 2021, 43(1): 45-51.
- [9] Li B L, Hu Y M, Chang Y, et al. Analysis of the factors affecting the long-term distribution changes of wetlands in the Jing-Jin-Ji region, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 124, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107413.
- [10] 习近平. 决胜全面建成小康社会 夺取新时代中国特色社会主义伟大胜利——在中国共产党第十九次全国代表大会上的报告[EB/OL]. [http://news.cnr.cn/native/gd/20171027/t20171027\\_524003098.shtml](http://news.cnr.cn/native/gd/20171027/t20171027_524003098.shtml), 2017-10-18.
- [11] 吉利娜,刘泽娟. 北运河水生态环境保护和修复的实践历程[J]. 北京水务, 2021, (3): 17-21.
- [12] 李永刚. 浅析河道水环境保护策略[J]. 农业科技与信息, 2021, (13): 13, 20.
- [13] 海拉提·阿力地阿尔汗,彭小武,刘晓伟,等. 新疆乌伦古湖水生态环境保护对策研究[J]. 新疆环境保护, 2021, 43(2): 15-21.  
Alydianhan H, Peng X W, Liu X W, et al. Study on the countermeasures of water ecological environment Protection of Ulungur lake in Xinjiang[J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2021, 43(2): 15-21.
- [14] 王金南,孙宏亮,续衍雪,等. 关于“十四五”长江流域水生态环境保护的思考[J]. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1075-1080.  
Wang J N, Sun H L, Xu Y X, et al. Water eco-environment protection framework in the Yangtze River basin during the 14th Five-Year Plan period[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(5): 1075-1080.
- [15] 常焱,贾玉成. 京津冀水资源与经济社会协调度分析[J]. 人民长江, 2020, 51(2): 91-96.  
Chang T, Jia Y C. Analysis on coordination degree of water resources-economy-society in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Yangtze River, 2020, 51(2): 91-96.
- [16] 卢熠蕾,孙傅,曾思育,等. 基于适水发展分区的京津冀精细化水管理对策[J]. 环境影响评价, 2018, 40(5): 34-38.  
Lu Y L, Sun F, Zeng S Y, et al. Differentiated water environmental protection strategy based on partition management for water-friendly development of Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Environmental Impact Assessment, 2018, 40(5): 34-38.
- [17] Tang Y, Zhao W N, Gu C L. Urbanization and rural development in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region: Coupling-degree model[J]. Journal of Urban Planning and Development, 2017, 143(1), doi: 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000357.
- [18] Ye C, Zhu J J, Li S M, et al. Assessment and analysis of

- regional economic collaborative development within an urban agglomeration: Yangtze River Delta as a case study[J]. *Habitat International*, 2019, **83**: 20-29.
- [19] Leng S Y, Zhai Y Z, Jiang S J, *et al.* Water-environmental risk assessment of the Beijing-Tianjin-Hebei collaborative development region in China[J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2017, **23**(1): 141-171.
- [20] 马宇博. 京津冀与河北重点城市 PRED 系统综合评价[J]. *中国流通经济*, 2018, **32**(11): 112-121.
- Ma Y B. The comprehensive evaluation of PRED system in Beijing-Tianjin-Hebei region and the key cities of Hebei[J]. *China Business and Market*, 2018, **32**(11): 112-121.
- [21] 杨保安, 张科静. 多目标决策分析: 理论、方法与应用研究[M]. 上海: 东华大学出版社, 2008.
- [22] Zlaugotne B, Zihare L, Balode L, *et al.* Multi-criteria decision analysis methods comparison [J]. *Environmental and Climate Technologies*, 2020, **24**(1): 454-471.
- [23] Anwar M. Biodiesel feedstocks selection strategies based on economic, technical, and sustainable aspects[J]. *Fuel*, 2021, **283**, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119204.
- [24] Boujelben M A. A unicriterion analysis based on the PROMETHEE principles for multicriteria ordered clustering[J]. *Omega*, 2017, **69**: 126-140.
- [25] Gayathri M, Shunmugam S, Thajuddin N, *et al.* Phytohormones and free volatile fatty acids from cyanobacterial biomass wet extract (BWE) elicit plant growth promotion [J]. *Algal Research*, 2017, **26**: 56-64.
- [26] Yu Z, Song M M, Pei H Y, *et al.* The growth characteristics and biodiesel production of ten algae strains cultivated in anaerobically digested effluent from kitchen waste [J]. *Algal Research*, 2017, **24**: 265-275.
- [27] Khalid M A, Ali Y. Economic impact assessment of natural disaster with multi-criteria decision making for interdependent infrastructures [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2020, **22**(8): 7287-7311.
- [28] Živković Ž, Nikolić D, Savić M, *et al.* Prioritizing strategic goals in higher education organizations by using a SWOT-PROMETHEE/GAIA-GDSS model [J]. *Group Decision and Negotiation*, 2017, **26**(4): 829-846.
- [29] Arsić S, Nikolic D, Jevtic M. An investigation of the usability of image-based CAPTCHAs using PROMETHEE-GAIA method[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, **80**(6): 9393-9409.
- [30] Mladenović-Ranisavljević I I, Takić L, Nikolić Đ. Water quality assessment based on combined multi-criteria decision-making method with index method[J]. *Water Resources Management*, 2018, **32**(7): 2261-2276.
- [31] Elevli B, Ozturk H. *Multi-criteria Assessment of Heavy Metals Contaminations in waters and ranking the sites by using PROMETHEE/GAIA method* [J]. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 2019, **17**(1): 75-84.
- [32] Savun-Hekimoğlu B, Erbay B, Hekimoğlu M, *et al.* Evaluation of water supply alternatives for Istanbul using forecasting and multi-criteria decision making methods [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **287**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125080.
- [33] Hou X S, Chen L, Wei G Y, *et al.* Factors affecting microbial and physico-chemical pollutants in stormwater in a typical Chinese urban catchment[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2018, **20**(12): 1697-1707.
- [34] Behzadian M, Kazemzadeh R B, Albadvi A, *et al.* PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications [J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, **200**(1): 198-215.
- [35] Brans J P, Vincke P H. A preference ranking organization method (the promethee method for multiple criteria decision making) [J]. *Management Science*, 1985, **31**(6): 647-656.
- [36] Su H Q, Zhu C R. Application of entropy weight coefficient method in evaluation of soil fertility[A]. In: Qian Z, Cao L, Su W, *et al.* (Eds.). *Recent Advances in Computer Science and Information Engineering*[M]. Berlin: Springer, 2012.
- [37] 顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 等. 北京北运河河流生态系统健康评价[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2576-2587.
- Gu X Y, XU Z X, Liu L F, *et al.* Health assessment of the stream ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2576-2587.
- [38] 李靖, 李森, 曾思育, 等. 雄安新区城市水环境指标体系构建初探[J]. *给水排水*, 2021, **47**(12): 60-64.
- Li J, Li M, Zeng S Y, *et al.* Preliminary study on the construction of urban water environment index system in Xiong'an New Area [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, **47**(12): 60-64.
- [39] 郝利霞, 孙然好, 陈利顶. 海河流域河流生态系统健康评价[J]. *环境科学*, 2014, **35**(10): 3692-3701.
- Hao L X, Sun R H, Chen L D. Health assessment of river ecosystem in Haihe river basin, China [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(10): 3692-3701.
- [40] Wang X K, Dong Z C, Xu W, *et al.* Study on spatial and temporal distribution characteristics of coordinated development degree among regional water resources, social economy, and ecological environment systems [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, **16**(21), doi: 10.3390/ijerph16214213.
- [41] Baudoin L, Arenas D. From raindrops to a common stream: using the social-ecological systems framework for research on sustainable water management[J]. *Organization & Environment*, 2020, **33**(1): 126-148.
- [42] 焦士兴, 王腊春, 霍雨, 等. 基于水环境分析的南方典型中小城市类型划分及水污染驱动力研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(7): 1888-1892.
- Jiao S X, Wang L C, Huo Y, *et al.* Study on the types and water pollution driving forces of the typical and medium-small-sized cities in the southern China based on the analysis of water environment[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(7): 1888-1892.
- [43] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国环境保护部. 住房和城乡建设部, 环境保护部关于印发全国城市生态保护与建设规划(2015-2020年)的通知[EB/OL]. [http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201612/t20161222\\_230049.html](http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201612/t20161222_230049.html), 2016-12-08.
- [44] 范威威. 京津冀水循环健康评价与水资源配置研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2018.
- [45] 耿世伟, 渠晓东, 张远, 等. 大型底栖动物生物评价指数比较与应用[J]. *环境科学*, 2012, **33**(7): 2281-2287.
- Geng S W, Qu X D, Zhang Y, *et al.* Comparison and application of biological indices of macroinvertebrates in river health assessment [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(7): 2281-2287.
- [46] 司马文卉, 胡小凤, 沈占峰, 等. 大清河流域生态安全评价指标体系构建[J]. *给水排水*, 2021, **47**(1): 90-95, 102.
- Sima W H, Hu X F, Shen Z F, *et al.* Water ecological safety evaluation index system of Daqing River basin [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, **47**(1): 90-95, 102.

## CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM <sub>2.5</sub> in Henan Province from 2015 to 2019	GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>	(1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data	QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo	YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>	(1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM <sub>2.5</sub> in Urban Area of Shanghai	ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>	(1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing	CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>	(1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta	JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>	(1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>	(1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region	ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>	(1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study	LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System	WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>	(1788)
Coordinated Control of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> in Hangzhou Based on SOA and O <sub>3</sub> Formation Potential	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants	WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>	(1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an	WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>	(1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn	TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors	GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City	YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>	(1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning	LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong	(1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight	QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>	(1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang	LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River	TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>	(1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District	YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake	WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>	(1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China	CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>	(1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment	CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>	(1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source	GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors	ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China	MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>	(1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria	JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>	(1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity	LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>	(1988)
Effects of Pollution Control of Xiaqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay	ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>	(1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands	WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-ni, <i>et al.</i>	(2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City	YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>	(2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms	WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>	(2030)
Carbonized Foam Supported Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation	WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>	(2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe <sup>2+</sup> Under Low Nitrogen Concentration	ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation	YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>	(2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt	ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xiao-min, <i>et al.</i>	(2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China	WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>	(2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>	(2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background	WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>	(2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment	WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>	(2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment	ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui	(2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City	CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long	(2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize	REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(2133)
Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings	ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China	LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>	(2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N <sub>2</sub> O Emission from a Vegetable Field	HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>	(2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Emissions in Paddy Field	ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>	(2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River	WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue	(2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation	ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>	(2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils	MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>	(2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area	ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>	(2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil	LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>	(2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Julong River Estuary	HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>	(2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy	LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2237)