

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期
Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析	唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)
珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_3)与 $PM_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素	颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)
广州市臭氧污染溯源:基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析	裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)
运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析	赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘永桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)
降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律	范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)
道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定方法及特征	李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)
铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	高爽, 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 谈默, 屈加豹, 雷团团 (1649)
燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险	倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)
兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性	赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)
大气污染排放格局优化方法及案例	李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)
$PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响	李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)
基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析	金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)
新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素	张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)
漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价	黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)
近20年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化	李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)
汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义	刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)
会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析	李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)
贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算	曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)
辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险	杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)
辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源	韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)
津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析	吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)
环太湖河流及湖体中有机磷酸酯的污染特征和风险评价	张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)
太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价	丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石溪哲, 邹华, 史红星 (1811)
淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价	程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)
三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价	詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)
三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析	李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)
反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估	辛慧敏, 李建伟, 詹艳慧 (1847)
锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体	李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)
太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解	张巧颖, 孙伟, 杜瑛珣, 巩小丽 (1870)
青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析	魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)
基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源	何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)
老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为	范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)
磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮	王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)
城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响	于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)
基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析	王晓瞳, 杨宏 (1930)
ClO_2 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响	程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)
微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响	林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫒, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)
城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价	李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)
气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响	王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)
沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响	王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)
地块尺度城市土地质量地球化学调查方法:以雄安新区起步区为例	周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)
雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析	周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)
地质背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素	代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)
不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响	刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)
影响不同农作物镉富集系数的土壤因素	陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)
Cd胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及Cd吸收积累的影响	张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)
不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响	李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)
铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性	陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)
微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力	张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)
动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播	张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)
区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用	万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)
《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)	

区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用

万炳彤, 鲍学英*, 赵建昌, 李爱春

(兰州交通大学土木工程学院, 兰州 730070)

摘要: 科学评价区域水生态文明建设绩效并明确其障碍因子, 是提升区域水生态文明建设绩效的理论依据。本文应用“驱动力-压力-状态-影响-响应-管理”这一思维逻辑解析了人类与区域水生态间的耦合关系, 建立了基于 DPSIRM 模型的区域水生态文明建设绩效评价指标体系, 结合未确知测度模型与障碍诊断模型, 实证评估了石嘴山市近 10 年的水生态文明建设绩效并对影响当地建设绩效的障碍因子进行了诊断分析。结果表明: ①石嘴山市水生态文明建设绩效逐年升高并呈现差且缓慢提升(2010~2014 年)、中级但快速提升(2015~2017 年)和良好且较快提升(2018~2019 年)这 3 个发展阶段; ②各子系统绩效指数演变趋势各异, 但基本都呈现波动上升态势; ③各子系统障碍度呈阶段性变化特征, 2010~2014 年, 状态子系统、响应子系统和压力子系统其障碍度均值和达到 58.81%, 成为制约当地水生态文明建设绩效的主要障碍因子; 2015~2017 年, 压力障碍度均值达到 21.73%, 是制约当地水生态文明建设绩效的最大障碍因子; 2018~2019 年, 压力障碍度均值达到 24.49%, 仍是制约当地水生态文明建设绩效的最大障碍因子; ④指标层障碍度列在前 5 位的障碍因子主要分布于压力子系统和状态子系统。综合出现频率和障碍度排序来看, 以灌溉水利用系数和万元工业增加值用水量为代表的压力子系统是未来建设中的重点提升方向。本文的研究思路及方法可为类似区域水生态文明建设绩效评价及其障碍因子诊断分析提供理论参考。

关键词: 水生态文明建设; DPSIRM 模型; 未确知测度; 障碍度; 石嘴山市

中图分类号: X826 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-2089-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202008026

Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction

WAN Bing-tong, BAO Xue-ying*, ZHAO Jian-chang, LI Ai-chun

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: A scientific performance evaluation of the regional water ecological civilization construction and clarifying the obstacle factor are key points to improve the performance of regional water ecological civilization construction theory. This study analyzes the coupling relationship between humans and regional water ecology by applying the thinking logic of "driving force-pressure-state-influence-response-management." The regional water ecological civilization construction performance evaluation index system based on the DPSIRM model was established. Combining the unascertained measurement model and obstacle diagnosis model, the water ecological civilization construction performance of Shizuishan City during the past 10 years was empirically evaluated, and the obstacle factors affecting local construction performance were diagnosed and analyzed. The analytical results reveal the following points: First, the performance of the water ecological civilization construction in Shizuishan City gradually increased annually and revealed three development stages: the site visit and slow improvement (2010-2014), intermediate but fast improvement (2015-2017) and good and fast improvement (2018-2019). Second, each subsystem performance index trend varied, but generally, the fluctuations rose. Third, from 2010 to 2014, the average obstacle degree of the subsystem state, subsystem response, and subsystem pressure reached 58.81%, which became the main obstacles restricting the performance of the local water ecological civilization construction. From 2015 to 2017, the average pressure barrier degree reached 21.73%, which was the most significant obstacle to the construction performance. From 2018 to 2019, the average pressure barrier degree remained the largest obstacle by reaching 24.49%. Lastly, the index barrier of the obstacle degree among the top five factors are primarily distributed in the pressure subsystem. A comprehensive frequency ranking of the obstacles, the irrigation water use coefficient, and the pressure of the water consumption per ten thousand yuan of value-added by industry as a representative subsystem are the key directions to future construction. In this paper, the concepts and methods of the research can provide a theoretical reference for the performance evaluation of regional water ecological civilization construction and its obstacle factor diagnosis analysis.

Key words: water ecological civilization construction; DPSIRM model; unascertained measure; obstacle degree; Shizuishan City

水生态文明建设是人类遵循人水和谐理念, 通过科学配置水资源、坚持水资源节约利用、实施水环境综合治理和推进系统修复水生态等措施, 实现“水资源可持续利用、水生态环境优美和水生态系统完整”的一项系统工程^[1,2]。推进水生态文明建设

是区域优化水资源利用模式、完善水生态保护格局

收稿日期: 2020-08-04; 修订日期: 2020-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51768034)

作者简介: 万炳彤(1992~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为区域水生态文明建设绩效评价, E-mail: 959375563@qq.com

* 通信作者, E-mail: 813257032@qq.com

和推动经济社会发展与水资源水环境承载力相协调的首要条件,被纳入国家层面的战略部署^[3].因此,科学评价区域水生态文明建设绩效并明确其障碍因子,为决策者制定区域水生态文明建设规划和政策提供理论依据,已成为水生态文明研究领域的重要课题.

目前,国外关于水生态文明方面的研究鲜有报道,较多的是对水生态系统健康^[4,5]、河流健康^[6,7]和水资源管理^[8,9]等方面的研究.相比国外,国内关于水生态文明方面的研究较多,主要集中在水生态文明概念与内涵^[3,10]、水生态文明评价指标体系探讨^[11,12]、区域水生态文明建设规划^[13]和水环境整治及水生态修复^[14,15]等方面,上述研究与区域水生态文明建设绩效评价及其障碍因子诊断存在一定联系,其中,概念内涵与指标体系探讨是构建表征区域水生态文明建设绩效各方面特性的理论基础,水生态文明建设规划和水生态修复则是障碍因子导向作用的具体体现.专项开展区域水生态文明建设绩效评价及其障碍因子诊断的研究偶有报道,涵盖指标体系、评价方法以及评价内容等方面^[2,16~18].从指标体系来看,多数学者立足于水生态系统保护及修复,主张以生态环境效益作为评价的主要指标,忽略了“人水和谐”是水生态文明建设的主旨,这势必会影响区域建设有序的水生态运行机制,难以实现区域水生态环境的良性循环.随着研究的进一步深入,有学者考虑到了水生态文明建设的主旨所在,提出了由水生态、水经济和水社会三大系统组成的水生态文明评价体系框架^[19],但还是将这3大子系统孤立起来进行评价,忽略了各子系统间的内在联系,无法清晰地反映人类活动与水生态系统间的耦合关系,难以实现经济社会与水生态系统间的协调发展;从评价方法来看,一般多采用模糊综合评价法^[16]、云模型^[17]和熵值法^[2,18]等.以上评价方法在解决水生态文明建设绩效评价时均存在一定局限性,例如模糊综合评价法在对水生态文明建设绩效进行评价时由于其因素集较大,在权向量和为1的条件约束下相对隶属度权系数缩小,权向量与模糊矩阵不匹配,容易出现超模糊现象,导致评价结果分辨率低,难以区分评价对象的隶属度高低.云模型仅能判别出区域水生态文明建设的绩效等级,对于该等级的隶属程度却不得而知,导致评价结果缺乏直观性;从研究内容来看,现有研究更侧重于对区域水生态文明建设绩效及其演变趋势的探索,而对于障碍因子诊断及其归纳分析方面的研究较为薄弱,导致评价结果缺乏针对性和实践性.综上,本文将能够刻画人水关系的 DPSIRM 模型作为构建区域水生态文明

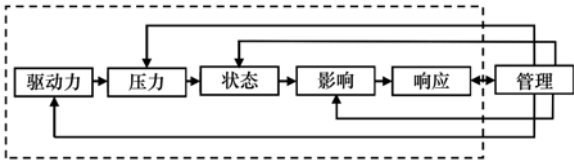
建设绩效评价指标体系的理论框架,考虑到未确知测度模型在评价区域水生态文明建设绩效时能够对样本数据进行充分利用,从而减少信息损失,同时又能实现不同评价对象间的横向(同一年份)对比和同一评价对象的纵向(不同年份)分析,使得评价结果与其他方法相比更具真实性和直观性,故构建基于未确知测度模型的区域水生态文明建设绩效评价方法,并以石嘴山市为研究对象,对其近10年的水生态文明建设绩效进行评价研究,同时引入障碍诊断模型对影响当地建设绩效的障碍因子进行诊断分析,探寻提升石嘴山市水生态文明建设绩效的着力点和整治方向,以期为类似区域水生态文明建设绩效评价研究及其障碍因子诊断分析提供理论参考.

1 材料与方法

1.1 DPSIRM 模型框架

DPSIRM(驱动力-压力-状态-影响-响应-管理)模型^[20,21]是在欧洲环境署(EEA)提出的 DPSIR(驱动力-压力-状态-影响-响应)模型^[22]基础上发展而来的,是一项用于研究可持续发展机制的框架体系,它利用“驱动力-压力-状态-影响-响应-管理”这一思维逻辑解析了人类与生态环境间的耦合关系,从而能够明确针对性地调控方向,确保系统的可持续发展.与 DPSIR 模型相比,DPSIRM 模型在其基础上添加了“管理”因子,管理同响应一样,都是指人类针对生态环境恶化采取的一系列改善措施,区别在于响应因子是指人类为降低生态环境恶化产生的不良影响而采取的被动性补救措施,管理因子是人类遵循发展理念主动采取相应的管理性措施从根源上对生态环境演化的全过程进行控制和调节,并作用于各个影响因素.因此,相比 DPSIR 模型,DPSIRM 模型的优势在于:①考虑到了人类活动对系统各个部分产生的作用和影响,突出强调了人类主观能动性在系统演变过程中的重要作用.②管理因子的加入解决了 DPSIR 模型的单一指向性,提升了各因子间的联动性,构建了一个完整的反馈回路,从而更加利于整个系统趋向可持续发展.目前该模型已应用于区域水环境可持续发展指标体系研究^[20]和生态安全指标体系研究^[21]等领域.在 DPSIRM 模型中,驱动力是指人类活动的发展趋势对系统变化产生了潜在动力;压力是指由于人类活动消耗了资源和产生了污染,进而对生态环境造成了一定影响;状态是指在压力作用下生态环境问题的可测特征;影响是指状态改变后导致生态功能发生变化,进而对人类健康、经济社会和资源环境等造成一定影响;响应是指决策者以状态和影响为依据,采取相应措施应

对产生的影响；管理是指决策者为促进系统可持续发展从宏观上进行调控并作用于整个系统，与响应相比具有主动性和预防性。各子系统间相互影响，相互调节，形成了人类与生态环境间的驱动力-压力-状态-影响-响应-管理关系（图 1）。



虚线框表示 DPSIRM 模型

图 1 DPSIRM 模型框架

Fig. 1 DPSIRM model framework

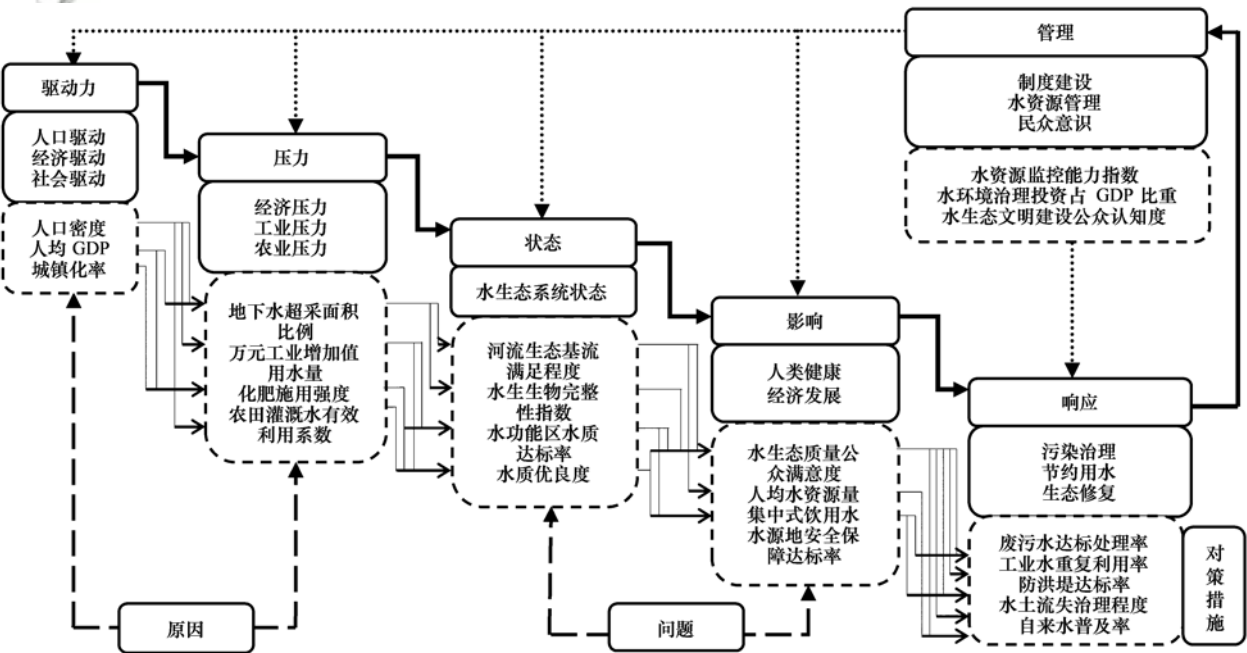
1.2 水生态文明建设绩效 DPSIRM 评价指标体系

区域水生态文明建设作为实现区域经济社会与水生态和谐发展的关键环节，是一个水关系复杂的系统，属于可持续发展的领域，故可将 DPSIRM 模型用于区域水生态文明建设绩效评价指标体系的研究。通过上述对 DPSIRM 模型的内涵解析可知，随着区域人口和社会经济等驱动因素的持续发展使得人类对水资源的需求不断上升，对水环境的污染不断加剧，从而导致出现地下水超采过剩、化肥施用过多等压力，当这些压力超出区域水资源和水环境的承载能力时，随之出现的生态基流状况、水功能区水质状况等构成了水生态系统相对时期的现实状态，新的状态特征反馈到经济社会中，进而对人类的饮水安全、可利用水资源量等造成了一定影响。这些影响

又促使人类做出一定响应，通过水资源节约利用、水环境综合治理和系统修复水生态等措施来消除或降低影响造成的后果。同时，为了系统实现有序运转，呈现强可持续发展态势，政府采取增强民众水生态文明建设意识、增加水环境治理投资和完善水资源管理制度等管理性措施从根源上起到缓解压力、调整状态和降低影响的作用。如此循环往复，构成了区域水生态文明建设的 DPSIRM 模型（图 2），推动区域社会经济和水生态趋向可持续发展。

基于区域水生态文明建设的 DPSIRM 模型，秉持科学性、独立性和完整性等原则对国家水利部颁布的《水生态文明城市建设评价导则》（SL/Z-738-2016）^[23]及相关文献[2, 16 ~ 18]中现有的水生态文明评价指标体系进行分析和整理：首先对共性指标进行合并或剔除，其次查找统计年鉴、统计公报和水资源公报等资料，按照可得性原则，去掉指标值无法获得的指标，然后根据 DPSIRM 模型中各因子的内涵解析将剩余指标进行梳理分类，将其归类为 D（驱动力）、P（压力）、S（状态）、I（影响）、R（响应）和 M（管理）这 6 个类别，构建较为完善的指标体系，具体如下。

（1）驱动力指标 驱动力定义为引发水生态环境变化的原始动力，主要包括人口指标与经济指标。人类是水生态环境中的主导者，人口的增减以及社会经济的发展趋势必然会对水生态环境的演变起到驱动性作用。因此选取人口密度、人均 GDP 和城镇



长划线箭头表示水生态文明演化的起因和产生的问题，粗实线箭头表示 DPSIRM 模型作用过程，

细实线表示对应指标间相互关系，圆点线箭头表示管理性措施作用过程

图 2 基于 DPSIRM 模型的区域水生态文明演化机制

Fig. 2 Evolution mechanism of regional water ecological civilization based on DPSIRM model

化率作为驱动力指标. 其中, 人口密度反映区域人口的承载状态, 人均 GDP 反映区域的经济状况, 城镇化率反映区域发展对水生态的压力.

(2) 压力指标 人类经济活动产生一定影响并直接作用于水生态系统, 所以压力指标可通过人类经济活动产生的影响来表征, 主要包括水资源压力和水环境压力. 因此本文选取万元工业增加值用水量、灌溉水利用系数、化肥施用强度和地下水超采面积比例作为压力类指标, 其中, 万元工业增加值用水量反映区域工业发展对水资源产生的压力及工业用水效率, 灌溉水利用系数反映农业发展对水资源产生的压力及农业用水效率, 化肥施用强度反映化肥中氮、五氧化二磷和氧化钾对水环境造成的压力, 地下水超采面积比例反映地下水开发利用对水资源和地下水水质造成的压力.

(3) 状态指标 状态指标是指在驱动力和压力共同作用下水生态的实际状况, 包含水环境、水资源和水生态等方面的物理或化学可测特征. 所以选用河流生态基流满足程度、水生生物完整性指数和水功能区水质达标率作为状态类指标, 其中, 河流生态基流满足程度反映河流和河口生态系统的健康状况, 水生生物完整性指数反映区域水生生物的完整度及河流的健康状况, 水功能区水质达标率反映区域水功能区的水环境质量状况.

(4) 影响指标 影响指标是指状态改变后对人类发展和健康生存等造成的不利影响, 是对状态效应的一种具体度量. 因此本文选用水生态质量公众满意度、集中式饮用水水源安全达标率和人均水资源量作为影响类指标, 其中, 水生态质量公众满意度反映人民群众对于水生态系统健康状况的直接感受, 人均水资源量反映对区域水资源充足程度的影响, 集中式饮用水水源安全达标率反映对人民群众用水安全的影响.

(5) 响应指标 为了改善水生态系统状态改变后对经济社会造成的影响, 人类采取一系列响应措施对水生态系统进行修复, 从而提升水生态文明水平. 响应指标应该从水资源节约、水环境治理和水生态修复等方面来考虑. 因此, 本文选用防洪堤达标率、废污水达标处理率、水土流失治理比例和工业用水重复利用率作为响应类指标. 其中水土流失治理比例反映对区域水生态系统的修复强度, 防洪堤达标率反映区域防止洪水灾害的安全保障程度, 废污水达标处理率反映对区域污染控制采取的实际行动力度, 工业用水重复利用率反映区域工业发展对水资源的节约程度.

(6) 管理指标 管理指标是指政府部门为提升

水生态文明水平主动实施的管理性措施, 包含制度建设、水资源管理和民众参与度等方面. 因此本文选用水资源监控能力指数、水环境治理投资占 GDP 比重和水生态文明建设公众认知度作为管理类指标, 其中水资源监控能力指数反映对区域水资源的监管管理力度, 水环境治理投资占 GDP 比重反映政府部门对水生态文明建设的重视程度, 水生态文明建设公众认知度反映对人民群众关于水生态文明意识的普及情况.

基于以上分析, 按照层次分析法的思想构建以区域水生态文明建设绩效评价为目标层, 以驱动力、压力、状态、影响、响应和管理为准则层, 包含 20 项具体指标的 3 层结构评价指标体系, 如表 1 所示.

1.3 评价方法

1.3.1 区域水生态文明建设绩效未确知测度评价法

设有评价对象集 $O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}$, $O_i \in O$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 表示某区域第 i 个评价年份的水生态文明建设绩效. 若存在 m 个具体属性 $S_1, S_2, \dots, S_m$ 影响着第 i 个评价年份的水生态文明建设绩效, 则将集合 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ 称作属性空间. 评价对象 O_i 关于第 j 个属性的属性值记作 x_{ij} ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$), 从而评价对象 $O_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$. 若任意 x_{ij} 都具有 q 个绩效等级 $C_1, C_2, \dots, C_q$, 则绩效等级空间 E 记作 $E = \{C_1, C_2, \dots, C_q\}$, 其中 C_k 是第 k 个绩效等级, 且 k 级绩效高于 $k+1$ 级, 即 $C_k > C_{k+1}$ [24, 25].

(1) 单指标未确知测度

设 $\mu_{ijk} = \mu(x_{ij} \in C_k)$ 表示属性值 x_{ij} 属于绩效等级 C_k 的程度, 并满足以下条件:

$$0 \leq \mu(x_{ij} \in C_k) \leq 1 \quad (1)$$

$$\mu(x_{ij} \in E) = 1 \quad (2)$$

$$\mu\left[x_{ij} \in \bigcup_{l=1}^k C_l\right] = \sum_{l=1}^k \mu(x_{ij} \in C_l) \quad (3)$$

则 μ 称作未确知测度, 简称测度, $(\mu_{ijk})_{m \times q}$ 称作评价对象 O_i 的单指标测度评价矩阵, 表示为:

$$(\mu_{ijk})_{m \times q} = \begin{bmatrix} \mu_{i11} & \mu_{i12} & \cdots & \mu_{i1q} \\ \mu_{i21} & \mu_{i22} & \cdots & \mu_{i2q} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mu_{im1} & \mu_{im2} & \cdots & \mu_{imq} \end{bmatrix} \quad (4)$$

上述的 μ 可利用测度函数获得, 测度函数的构建原理为: 如果绩效等级空间 E 具有 q 种绩效等级, 则在评价对象 O_i 属性值的分布区间上安插 $q-1$ 个值, 表示为 $d_1, d_2, \dots, d_{q-1}$. 若在 d_k 左侧的值处于 C_k 等级, 当属性值从 d_k 往 d_{k+1} 提升时, 属性值处于 C_k 等级的程度持续减小, 至 d_{k+1} 时属性值处于 C_k 等级的程度低至 0. 相应地, 属

表 1 区域水生态文明建设绩效评价指标体系

Table 1 Regional water ecological civilization construction performance evaluation index system				
目标	准则	指标	计算方法	属性
区域水生态文明建设绩效	驱动力	S_1 城镇化率/%	城镇人口/区域总人口	负向
		S_2 人口密度/人·km ⁻²	区域承载人口/区域总面积	负向
		S_3 人均 GDP/元	区域 GDP/区域人口	正向
	压力	S_4 地下水超采面积比例/%	地下水超采区面积/区域平原区总面积	负向
		S_5 万元工业增加值用水量/m ³ ·(万元) ⁻¹	工业用水量/工业增加值	负向
		S_6 灌溉水利用系数	田间实际净灌溉用水量/毛灌溉用水量	正向
		S_7 化肥施用强度/kg·hm ⁻²	化肥使用总量/耕地面积	负向
	状态	S_8 河流生态基流满足程度/%	主要河流断面生态基流满足率的平均值	正向
		S_9 水生生物完整性指数/%	水生生物种类数量与基准年种类数量比值的算术平均值	正向
		S_{10} 水功能区水质达标率/%	水质达标水功能区数量/水功能区总数	正向
	影响	S_{11} 水生态质量公众满意度/%	对水生态环境质量满意的受访者比例	正向
		S_{12} 集中式饮用水水源安全达标率/%	水质达标水源地/集中式饮水水源地总数	正向
		S_{13} 人均水资源量/m ³	区域水资源总量/区域常住人口	正向
	响应	S_{14} 防洪堤达标率/%	达标堤防长度/区域堤防总长度	正向
		S_{15} 废污水达标处理率/%	居民生活污水和工业废水达标处理量/废污水排放总量	正向
		S_{16} 工业用水重复利用率/%	工业重复用水量/工业总用水量	正向
		S_{17} 水土流失治理比例/%	水土流失治理面积/区域总面积	正向
	管理	S_{18} 水环境治理投资占 GDP 比重/%	水环境治理投资/区域 GDP	正向
		S_{19} 水资源监控能力指数/%	用水计量率、水功能区水质监测率和入河排污口监测率均值	正向
		S_{20} 水生态文明建设公众认知度/%	水生态文明宣传活动参与人次/常住人口	正向

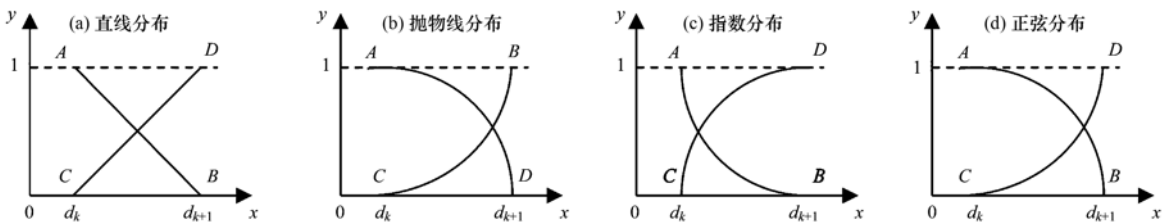


图 3 常见的测度函数

Fig. 3 Common measure function

性值处于 C_{k+1} 等级的程度则持续增大,至 d_{k+1} 时属性值处于 C_{k+1} 等级的程度升高至 1. 依据上述安插点附近所处等级的变化特点,可选用图 3 中的曲线构建测度函数的表达式.

(2)多指标未确知测度

设 $\mu_{ik} = \mu(O_i \in C_k)$ 表示评价对象 O_i 属于绩效等级 C_k 的程度,此时:

$$\mu_{ik} = \sum_{j=1}^m w_j \mu_{ijk} \quad (5)$$

($i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, q$)

式中, w_j 为第 j 项评价指标权重,本研究通过熵权法^[26,27]确定. 称 $\{\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{iq}\}$ 是评价对象 O_i 的多指标综合测度评价向量.

(3)置信度识别

因为 $C_1 > C_2 > \dots > C_q$, 此时称 $\{C_1, C_2, \dots, C_q\}$ 是绩效等级空间 E 上的一个有序分割类,则可应用置信度识别准则:

$$r = \min \left\{ k: \sum_{i=1}^k \mu_{i1} \geq \lambda \right\}, (k = 1, 2, \dots, q) \quad (6)$$

式中, λ 是置信度 ($\lambda \geq 0.5$, 一般取 0.6), 此时可识别评价对象 O_i 处于绩效等级 C_r .

(4)排序

已知 $C_1 > C_2 > \dots > C_q$, 对 $C_k (k = 1, 2, \dots, q)$ 进行赋值, 令 $C_k = I_k$, 且 $I_k > I_{k+1}$, 此时:

$$d_{O_i} = \sum_{k=1}^q I_k \mu_{ik} \quad (7)$$

式中, d_{O_i} 是评价对象 O_i 的未确知绩效指数, d_{O_i} 越大, 区域第 i 个评价年份的水生态文明建设绩效就越高.

1.3.2 区域水生态文明建设绩效障碍诊断模型

为明确影响区域水生态文明建设绩效的障碍因子,进而介入针对性的调控措施,引入“因子偏离度 I_j ”、“因子贡献度 F_j ”和“障碍度 B_j ”3 个变量^[28,29], 建立区域水生态文明建设绩效的障碍诊断模型如下:

$$B_j = \frac{I_j \cdot F_j}{\sum_{j=1}^m (I_j \cdot F_j)} \times 100\% \quad (8)$$

$$I_j = d - d_s \quad (9)$$

式中, I_j 是指各因子的绩效指数 d_s 与最优绩效指数 d 之间的差值, 故 I_j 可以表示为 d 与 d_s 的差; F_j 是指各因子对总目标的重要程度, 可以用各因子的权重 w_j 表示; B_j 是指各因子对区域水生态文明建设绩效的影响程度, 根据各因子 B_j 的大小排序即可获知区域水生态文明建设绩效障碍因子的主次关系。

2 案例分析——以石嘴山市为例

石嘴山市为宁夏回族自治区辖地级市, 位居黄河中游上段、宁夏回族自治区最北端(图4), 北邻内蒙古鄂托克后旗, 南连宁夏银川, 西依贺兰山, 东接内蒙古鄂尔多斯市, 地势西高东低, 海拔在1 081.95~3 388.84 m之间, 总面积5 310 km², 占宁夏自治区总面积的8.01%, 是典型的温带大陆性气候, 处于干旱半干旱地区。石嘴山市境内地表水系主要由河流、湖泊和黄河引水排水渠系等构成, 绝大多数水量属于黄河过境水, 其中河流有黄河干流和黄河一级支流都斯图河, 主要湖泊有沙湖、星海湖和镇朔湖等, 主要排水沟有第三排水沟和第五排水沟。由于石嘴山市常年降水少, 蒸发强, 地表水资源稀缺, 市居民生活用水和工业企业用水主要依靠开采地下水。“十二五”期间, 随着全市经济社会快速发展、城市

程不断推进, 导致地下水超采严重, 2014 年时超采量已高达2 796万 m³, 超采区漏斗中心水位不断下降, 城市发展与水生态系统健康矛盾日益突出。2014 年5 月, 石嘴山市被列入全国水生态文明城市建设试点市, 借此契机, 石嘴山市通过推进节水型社会建设、落实最严格水资源管理制度和加强水生态修复与保护等措施, 致力打造与水资源相匹配的区域发展体系。石嘴山市境内水资源匮乏, 是典型的西北干旱地区城市, 研究其水生态文明建设状况对其它类似地区具有借鉴意义。

2.1 各指标分级标准

根据未确知测度模型计算原理, 把区域水生态文明建设绩效划分为5 个等级, 此时评价空间 $E = \{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5\}$, 其中 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 和 C_5 , 依次代表: 优(I)、良(II)、中(III)、差(IV)和极差(V)。各项评价指标具体的量化标准主要依据文献[2, 16~18, 23]来获取。因受经济结构、气候因素及水资源条件等多种因素的影响, 少部分评价指标如人均GDP、人均水资源量等各区域差异较大, 故此指标的分级标准需要因地制宜和综合考量, 各项指标的分级标准如表2 所示。

2.2 数据来源及权重确定

为全面了解试点期间的建设成效, 以石嘴山市2010~2019 年的指标值为依据, 对其水生态文明状况的演化趋势进行评价分析。本研究所采用的数据主要来自文献[30]、石嘴山市国民经济和社会发展统计公报(2010~2019 年)、宁夏回族自治区水资源公报(2010~2019 年)、宁夏回族自治区水利厅网站、石嘴山市统计局网站以及新闻报道等, 其它数据依据以上资料计算合成。基于各年份的指标值, 利用熵权法得到各项指标的权重, 如表2 所示。

2.3 结果与分析

2.3.1 水生态文明建设绩效评价结果

根据指标值的分布特点和变化程度, 采用直线型测度函数:

$$\begin{cases} \mu_{ijk} = \mu_k(x_{ij}) = \begin{cases} \frac{-x_{ij}}{d_{k+1} - d_k} + \frac{d_{k+1}}{d_{k+1} - d_k}, & d_k < x_{ij} < d_{k+1} \\ 0, & x_{ij} > d_{k+1} \\ 0, & x_{ij} < d_k \end{cases} \\ \mu_{ij(k+1)} = \mu_{k+1}(x_{ij}) = \begin{cases} \frac{x_{ij}}{d_{k+1} - d_k} + \frac{d_k}{d_{k+1} - d_k}, & d_k < x_{ij} < d_{k+1} \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

基于各项指标的分级标准(表2), 根据2.1 节测度函数的构建原理, 建立各项指标的直线型测度函数。由于篇幅限制, 仅以指标 S_1 为例, 其测度函数

如图5 所示。依据各项指标的测度函数, 利用式(4)、式(5)和式(10)求出2010~2019 年的多指标综合测度评价向量。然后, 令 $\lambda = 0.6$, 利用式(6)便

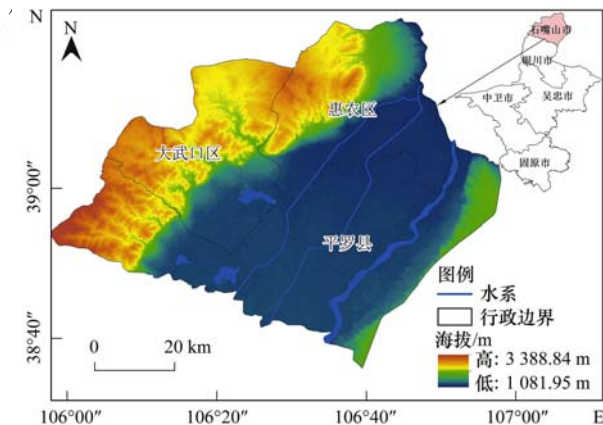


图4 石嘴山市位置示意及水系分布

Fig. 4 Location map and water distribution of Shizuishan City

表 2 水生态文明建设绩效评价等级和指标权重

指标	分级标准					熵	权重
	I (优)	II (良)	III (中)	IV (差)	V (极差)		
$S_1/\%$	≤ 40	40 ~ 55	55 ~ 70	70 ~ 85	85	0.221	0.047
$S_2/\text{人}\cdot\text{km}^{-2}$	≤ 85	85 ~ 255	255 ~ 425	425 ~ 595	≤ 595	0.222	0.047
$S_3/\text{元}$	$\leq 79\ 500$	57 500 ~ 79 500	35 500 ~ 57 500	13 500 ~ 35 500	$\leq 13\ 500$	0.210	0.048
$S_4/\%$	≤ 5	5 ~ 15	10 ~ 25	25 ~ 35	≥ 35	0.182	0.049
$S_5/\text{m}^3\cdot(\text{万元})^{-1}$	≤ 35	35 ~ 45	45 ~ 55	55 ~ 65	≥ 65	0.108	0.056
S_6	≥ 0.75	0.65 ~ 0.75	0.55 ~ 0.65	0.45 ~ 0.55	≤ 0.45	0.180	0.050
$S_7/\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	≤ 200	200 ~ 225	225 ~ 250	250 ~ 275	≥ 275	0.150	0.053
$S_8/\%$	≥ 97	90 ~ 97	85 ~ 90	65 ~ 85	≤ 65	0.218	0.045
$S_9/\%$	≥ 85	75 ~ 85	55 ~ 75	35 ~ 55	≤ 35	0.216	0.048
$S_{10}/\%$	≥ 90	80 ~ 90	65 ~ 80	45 ~ 65	≤ 45	0.185	0.049
$S_{11}/\%$	≥ 95	85 ~ 95	65 ~ 85	55 ~ 65	≤ 55	0.061	0.059
$S_{12}/\%$	≥ 98	95 ~ 98	85 ~ 95	75 ~ 85	≤ 75	0.207	0.048
S_{13}/m^3	$\geq 1\ 000$	500 ~ 1 000	250 ~ 500	150 ~ 250	≤ 150	0.085	0.058
$S_{14}/\%$	≥ 90	80 ~ 90	65 ~ 80	45 ~ 65	≤ 45	0.176	0.050
$S_{15}/\%$	≥ 98	95 ~ 98	85 ~ 95	75 ~ 85	≤ 75	0.210	0.047
$S_{16}/\%$	≥ 90	85 ~ 90	75 ~ 85	65 ~ 75	≤ 65	0.186	0.049
$S_{17}/\%$	≥ 90	75 ~ 90	60 ~ 75	50 ~ 60	≤ 50	0.212	0.047
$S_{18}/\%$	≥ 1.2	0.8 ~ 1.2	0.5 ~ 0.8	0.2 ~ 0.5	≤ 0.2	0.206	0.048
$S_{19}/\%$	≥ 90	80 ~ 90	65 ~ 80	45 ~ 65	≤ 45	0.158	0.053
$S_{20}/\%$	≥ 25	20 ~ 25	15 ~ 20	5 ~ 15	≤ 5	0.191	0.049

可获得 2010 ~ 2019 年的绩效等级,为直观对比各年份的绩效水平,深入了解近 10 年的演化趋势,再令 $C_1=5,C_2=4,C_3=3,C_4=2$ 和 $C_5=1$,利用式(7)求出 2010 ~ 2019 年的绩效指数,如表 3 所示。

2.3.2 综合绩效分析

由表 3 得知,石嘴山市水生态文明建设绩效指

数在研究期内呈持续升高态势,截至 2019 年,其绩效指数已提升至 4.144,相比研究初期增加了 1.72 倍,年均增长率为 6.18%。从绝对层面来看,立足于各年份的绩效等级,石嘴山市水生态文明建设绩效绝对水平持续趋好,完成了由差到中再到良的等级转变。从相对层面来看,立足于各年份的绩效指数,

表 3 水生态文明建设绩效评价结果

年份	多指标未确知测度					等级	绩效指数
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5		
2010	0.069	0.156	0.185	0.301	0.298	IV	2.415
2011	0.135	0.096	0.132	0.349	0.288	IV	2.441
2012	0.142	0.125	0.178	0.393	0.162	IV	2.692
2013	0.121	0.139	0.243	0.374	0.123	IV	2.761
2014	0.146	0.207	0.225	0.283	0.139	IV	2.938
2015	0.157	0.256	0.271	0.214	0.102	III	3.152
2016	0.189	0.298	0.324	0.125	0.064	III	3.423
2017	0.296	0.302	0.337	0.043	0.022	III	3.807
2018	0.335	0.375	0.261	0.022	0.007	II	4.009
2019	0.391	0.461	0.139	0.009	0.000	II	4.144

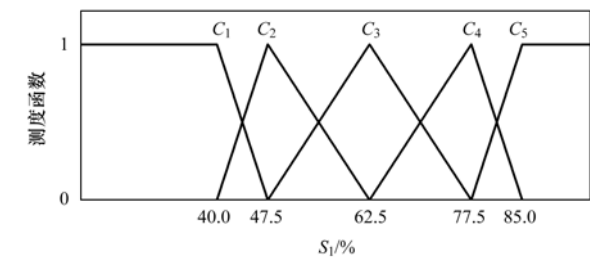


图 5 指标 S_1 的测度函数

Fig. 5 Measure function of index S_1

石嘴山市水生态文明建设绩效提升速度经过了缓慢提升,快速提升和较快提升 3 个状态.依据绝对层面和相对层面的变化情况,将石嘴山市水生态文明建设绩效演变过程划分成 3 个时间段来进行研究分析:

第 1 阶段(2010 ~ 2014 年),石嘴山市水生态文明建设绩效指数波动上升,由 2010 年的 2.415 增加至 2014 年的 2.938,年均增长率为 5.02%,增速最慢,绩效等级为 IV 级(差).“十二五”期间,该市致力

于以冶金产业和煤炭产业等高耗能、高污染项目为主的重工业发展,导致境内水体污染严重,化学需氧量和氨氮等污染物浓度严重超标,第三排水沟和第五排水沟排入黄河断面的水质常年处于劣 V 类标准,致使黄河石嘴山段水污染负荷持续增加。同时,随着全市经济社会快速发展、城市化进程不断推进,地下水开采量持续加大,工业耗水量不断增加,致使此阶段地下水超采面积比例和万元工业增加值用水量等指标值偏高。其中以 2010 年最为严重,万元工业增加值用水量达到了 69m^3 ,地下水超采面积比例达到了 36.71%,水生态系统面临巨大压力,而工业用水重复率、水土流失治理比例和水环境治理投资占 GDP 比重等措施性指标值过小,导致其综合绩效指数仅为 2.415,成为研究期内绩效指数最低值。在此期间,虽然政府部门采取了一些应对措施,如加大环境治理投资和增设污水处理厂等,但结构性污染难以根本改变,水生态文明水平在短时期内难有较大提高,致使该阶段绩效指数增长缓慢。

第 2 阶段(2015~2017 年),石嘴山市水生态文明建设绩效指数呈逐年快速上升态势,由 2015 年的 3.152 增加至 2017 年的 3.807,年均增长率为 9.90%,增速最快,绩效等级处于Ⅲ级(中级)。2015 年初,石嘴山市水生态文明建设工作全面开启,建设期间,该市持续强化水生态保护综合治理工程建设,通过开展星海湖水系连通综合整治工程和北武当河综合整治工程,有效提升了生态水量,缓解了地下水超采问题,截至 2017 年,该市超采区超采量已降至 154 万 m^3 ,与 2014 年相比压减开采量达 2 642 万 m^3 。同时,该市着力改善水环境质量,通过污水处理厂改造、饮用水水源地保护和重点湖泊水生态修复等措施,有效提升了当地水环境质量,2017 年时黄河石嘴山出入境断面(麻黄沟)全年水质类别已提升至Ⅱ类、沙湖平均水质类别提升至 V 类。在此阶段,由于该市多措并举,有效改善了水资源短缺、水生态退化和水环境污染等问题,致使该阶段绩效指数呈现快速上升趋势。

第 3 阶段(2018~2019 年),石嘴山市水生态文明建设绩效指数呈持续较快上升态势,由 2018 年的 4.009 增加至 2019 年的 4.234,年均增长率为 56.10%,增速较快,绩效等级处于Ⅱ级(良好)。在此期间,该市严格落实水资源管理制度,全面推进节水型社会建设,通过加强高效节水灌溉项目建设、关停供水范围内自备水源井、提升公众节水意识和制定取水计划方案等措施,实现了农业、工业和生活全方面节水,2019 年,该市工业用水重复率已达到 86.70%,农田高效节水灌溉面积达到 16.67 km^2 。同

时,为提升排水沟水质类别,该市持续加强排水沟整治,开展了多个生态湿地建设项目,排水沟水质得到了有效进化,截至 2019 年,第三、第五排水沟水质类别均已提升至Ⅳ类,水生态质量公众满意度达到 96.10%。2017 年时石嘴山市水生态文明建设绩效已接近良好等级,此时绩效指数基数略大,绩效指数难以大幅提升,导致绩效指数提升速度较第二阶段略有放缓。

根据水生态文明建设绩效评价结果并结合以上分析得知,石嘴山市在各阶段的水生态文明建设政策落实到位,治理措施科学有效,近 10 年该市水生态文明建设水平得到了较大提升,可作为水生态文明建设的典范之城。

2.3.3 子系统绩效分析

根据综合绩效计算过程,同理可分别求出各子系统近 10 年的绩效指数,从而建立 6 个子系统的绩效变化趋势(图 6)。由图 6 得知,各子系统绩效指数演变趋势各异,但基本都呈现波动上升态势,其中,从各子系统绩效指数大小来看,截至 2019 年,响应子系统绩效指数最大,达到 4.790,管理子系统和驱动力子系统次之,分别是 4.710 和 4.150,压力子系统最小,仅为 3.790。说明压力子系统、影响子系统和状态子系统仍具有较大提升空间,尤其是压力子系统,虽然近年来随着响应子系统和驱动力子系统绩效指数的增长呈现正相关性,但仍处于较低水平,因此,在未来的水生态文明建设中石嘴山市应持续加强治理力度,进一步减少人类活动对水生态环境施加的压力;从各子系统绩效指数提升速度来看,管理子系统绩效指数提升最快,年均增长达到了 9.86%,响应子系统和状态子系统次之,分别是 9.14% 和 8.40%,影响子系统最慢,仅为 3.38%,表明近 10 年来石嘴山市对于水生态文明建设的治理力度持续加大,响应力度持续加强,水生态系统状态得到了较大改善,在未来的水生态文明建设中应更加注重影响子系统绩效指数的提升速度。

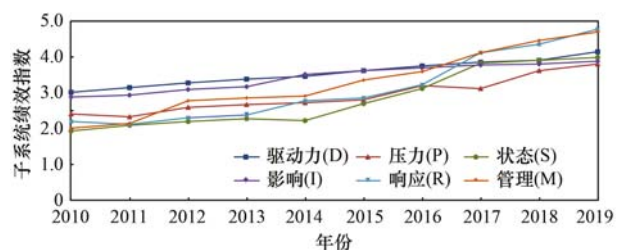


图 6 子系统绩效指数变化趋势

Fig. 6 Change trend of subsystem performance index

2.3.4 障碍因子诊断分析

依据式(8)~(9)对准则层各子系统障碍度及

指标层各指标障碍度进行测算,其中,由于等级空间 E 划分为 5 个等级,故依据 2.2 节原理最优绩效指数 d 的取值为 5. 根据各子系统和各指标障碍度的大小,进行深入的障碍因子诊断分析(限于篇幅,指标层只对障碍度列在前 5 位的主要障碍因子进行探讨).

(1) 准则层障碍因子诊断分析 由测算结果可知,准则层各子系统障碍度呈阶段性变化特征,2010 ~ 2014 年[图 7(a)],各子系统障碍度演变情况各异,其中,驱动力障碍度表现为先下降后上升态势,由 2010 年的 12.77% 下降至 2014 年的 12.42%,压力障碍度表现为逐年递增态势,由 2010 年的 16.62% 提升至 2014 年的 18.31%,状态障碍度表现为波动上升态势,由 2010 年的 19.70% 提升至 2014 年的 22.51%,影响子系统表现为波动下降趋势,由 2010 年的 13.67% 下降至 2014 年的 11.94%,响应障碍度基本保持稳定,在 17.98% ~ 19.68% 之间浮动,管理障碍度表现为波动下降态势,由 2010 年的 19.13% 下降至 2014 年的 16.85%. 由各子系统障碍度的变化情况可知,2010 ~ 2014 年间,障碍度均

值排序前 3 的依次是状态子系统、响应子系统和压力子系统,其障碍度均值和达到 58.81%,说明此阶段状态子系统、响应子系统和压力子系统是制约当地水生态文明建设绩效的主要障碍因子;2015 ~ 2017 年[图 7(b)],响应、管理和状态障碍度基本表现为逐年递减态势,压力、影响和驱动力障碍度基本表现为逐年递增态势,其中压力障碍度均值达到 21.73%,明显高于其它子系统障碍度,说明 2015 ~ 2017 年间响应子系统、管理子系统和状态子系统对当地水生态文明绩效的影响程度持续减小,压力子系统是制约当地水生态文明建设绩效的最大障碍因子;2018 ~ 2019 年[图 7(c)],驱动力障碍度保持稳定,响应障碍度和管理障碍度逐年递减,截至 2019 年均低至 10% 以下,压力、影响、状态障碍度逐年上升,其中压力障碍度均值最大,达到 24.49%,说明此阶段响应子系统和状态子系统对当地水生态文明建设绩效影响微弱,压力子系统仍是制约当地水生态文明建设绩效的最大障碍因子,未来建设应重点关注压力子系统,从而进一步提升水生态文明建设绩效.

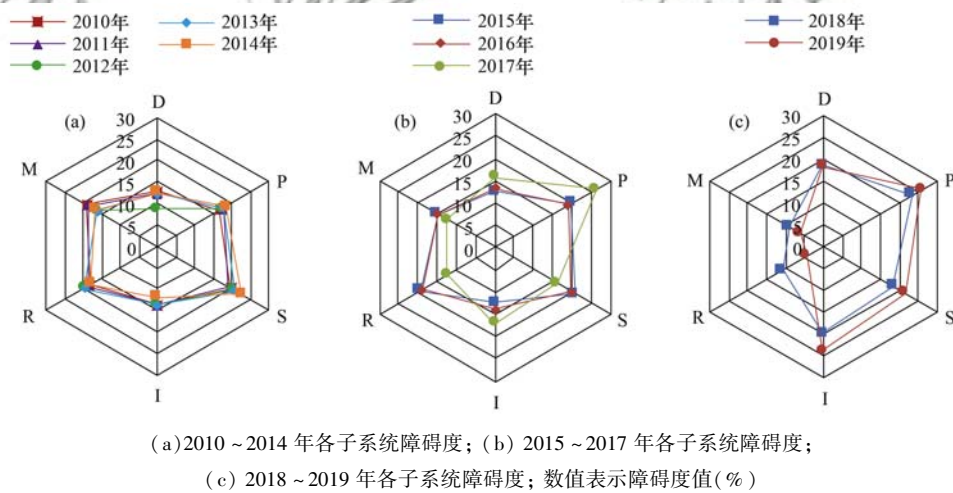


图 7 水生态文明建设绩效准则层各子系统障碍度

Fig. 7 Obstacle degree of each subsystem in the performance criterion layer of water ecological civilization construction

(2) 指标层障碍因子诊断分析 由表 4 得知,障碍度列在前 5 位的障碍因子主要分布于压力子系统和状态子系统. 2010 ~ 2014 年灌溉水利用系数(S_6)、水功能区水质达标率(S_{10})、工业用水重复利用率(S_{16})和万元工业增加值用水量(S_5)始终是影响石嘴山市水生态文明建设绩效的主要障碍因子,2012 年时河流生态基流满足程度(S_8)替换了水环境治理投资占 GDP 比重(S_{18})排在了第 5 位直到 2014 年,说明此阶段当地对水环境治理的投资不断加大,管理子系统的阻碍程度不断降低,状态子系统的阻碍程度不断上升,这与准则层的障碍因子诊断结

果基本一致;2015 ~ 2017 年,前 5 位主要障碍因子发生了较大改变,综合出现频率和障碍排序来看,此阶段影响当地水生态文明建设绩效的主要障碍因子依次是灌溉水利用系数(S_6)、万元工业增加值用水量(S_5)和工业用水重复利用率(S_{16}),说明此阶段工农节水绩效并未随总体绩效呈现正相关性,加强工农节水效率是以后建设期间的重点整治方向. 在此阶段,水功能区水质达标率(S_{10})的障碍度不断降低,截至 2017 年时已不在前 5 位之列,说明此阶段采取的水环境治理措施科学有效,当地水环境质量持续改善,状态子系统的阻碍程度不断降低;2018 ~ 2019

年,相比上一阶段,工业用水重复利用率(S_{16})已不在前 5 位之列,说明此阶段当地的工业节水效率得到了较大提升,但以灌溉水利用系数(S_6)和万元工业增加值

值用水量(S_5)为代表的压力子系统对石嘴山市水生态文明建设绩效的推进效果尚显不足,仍是未来建设中的重点提升方向.

表 4 2010~2019 年石嘴山市水生态文明建设绩效指标层主要障碍因子障碍度

Table 4 Obstacle degree of major obstacle factors in the performance indicator layer of water ecological civilization construction from 2010 to 2019										
障碍排序	2010 年		2011 年		2012 年		2013 年		2014 年	
	障碍因子	障碍度/%	障碍因子	障碍度/%	障碍因子	障碍度/%	障碍因子	障碍度/%	障碍因子	障碍度/%
1	S_{10}	7.75	S_{10}	7.82	S_{10}	8.45	S_{10}	8.71	S_6	9.21
2	S_6	7.54	S_6	7.42	S_6	8.23	S_6	8.49	S_{10}	8.97
3	S_{16}	7.35	S_{16}	7.23	S_{16}	8.02	S_{16}	8.26	S_{16}	8.73
4	S_5	7.16	S_5	7.03	S_5	8.01	S_5	8.04	S_5	8.49
5	S_{18}	6.96	S_{18}	6.84	S_8	7.58	S_8	7.82	S_8	8.24
障碍排序	2015 年		2016 年		2017 年		2018 年		2019 年	
	障碍因子	障碍度/%	障碍因子	障碍度/%	障碍因子	障碍度/%	障碍因子	障碍度/%	障碍因子	障碍度/%
1	S_6	10.01	S_6	10.46	S_6	12.15	S_5	12.61	S_5	13.05
2	S_{16}	9.74	S_{16}	10.15	S_5	11.31	S_6	11.60	S_6	11.74
3	S_{10}	9.47	S_5	9.83	S_8	10.47	S_8	10.59	S_4	10.44
4	S_5	9.19	S_8	9.51	S_4	9.64	S_4	9.59	S_8	9.14
5	S_8	8.93	S_{10}	9.19	S_{16}	8.80	S_{13}	8.57	S_{13}	7.83

3 结论

(1)本文基于 DPSIRM 模型刻画了区域经济社会与水生态趋向可持续发展的作用机制,从驱动力、压力、状态、影响、响应和管理这 6 个准则出发构建了区域水生态文明建设绩效评价指标体系,应用未确知测度模型和障碍因子诊断模型,实证评估了石嘴山市近十年的水生态文明建设绩效并对影响当地建设绩效的障碍因子进行了诊断分析.结果表明:石嘴山市水生态文明建设绩效指数近 10 年呈持续升高态势,截至 2019 年,其绩效指数已提升至 4.144,相比研究初期增加了 1.72 倍,年均增长率为 6.18%.

(2)各子系统绩效指数演变趋势各异,但基本都呈现波动上升态势,从其数值大小来看,研究末期响应子系统绩效指数最大,达到 4.790,管理子系统和驱动力子系统次之,分别是 4.710 和 4.150,压力子系统最小,仅为 3.790.因此,在未来的水生态文明建设中石嘴山市应持续加强治理力度,进一步减少人类活动对水生态环境施加的压力;从其年均增长率来看,管理子系统绩效指数提升最快,年均增长率达到了 9.86%,响应子系统和状态子系统次之,分别是 9.14% 和 8.40%,影响子系统最慢,仅为 3.38%,在未来的水生态文明建设中应更加注重影响子系统绩效指数的提升速度.

(3)准则层各子系统障碍度呈阶段性变化特征,2010~2014 年,障碍度均值排序前 3 的依次是状态子系统、响应子系统和压力子系统,其障碍度均值和达到 58.81%,成为制约当地水生态文明建设绩效的主要障碍因子;2015~2017 年,压力障碍度均

值达到 21.73%,明显高于其它子系统障碍度,是制约当地水生态文明建设绩效的最大障碍因子;2018~2019 年,压力、影响和状态障碍度逐年上升,其中压力障碍度均值最大,达到 24.49%,压力子系统仍是制约当地水生态文明建设绩效的最大障碍因子.

(4)指标层障碍度列在前 5 位的障碍因子主要分布于压力子系统和状态子系统.2010~2014 年间灌溉水利用系数(S_6)、水功能区水质达标率(S_{10})、工业用水重复利用率(S_{16})和万元工业增加值用水量(S_5)始终是影响石嘴山市水生态文明建设绩效的主要障碍因子;2015~2017 年,综合出现频率和障碍排序来看,此阶段影响当地水生态文明建设绩效的主要障碍因子依次是灌溉水利用系数(S_6)、万元工业增加值用水量(S_5)和工业用水重复利用率(S_{16}),说明此阶段工农业节水绩效并未随总体绩效呈现正相关性,加强工农业节水效率是以后建设期间的重点整治方向.2018~2019 年,以灌溉水利用系数(S_6)和万元工业增加值用水量(S_5)为代表的压力子系统仍是未来建设中的重点提升方向.

参考文献:

[1] 林玉茹,陈进,许继军.长江流域水生态文明城市试点建设浅析[J].长江科学院院报,2020,37(6):8-14.
Lin Y R, Chen J, Xu J J. Pilot hydro-ecological civilization construction in cities of Yangtze River Basin [J]. Journal of Yangtze Scientific Research Institute, 2020, 37(6): 8-14.
[2] 张雯婕,岳启蒙,温河青,等.水生态文明城市建设评价方法及其应用研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2020,56(2):315-323.
Zhang W J, Yue Q M, Wen H Q, et al. Evaluation of water ecologically civilized city construction [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2020, 56(2): 315-323.
[3] 赵钟楠,张越,黄火键,等.基于问题导向的水生态文明概念与内涵[J].水资源保护,2019,35(3):84-88.

- Zhao Z N, Zhang Y, Huang H J, *et al.* Concept and connotation of aquatic ecological civilization based on problem orientation [J]. *Water Resources Protection*, 2019, **35**(3): 84-88.
- [4] Larbi L, Nukpezah D, Mensah A, *et al.* An integrated assessment of the ecological health status of coastal aquatic ecosystems of Ada in Ghana[J]. *West African Journal of Applied Ecology*, 2018, **26**(1): 89-107.
- [5] Woo S Y, Jung C G, Lee J W, *et al.* Evaluation of watershed scale aquatic ecosystem health by SWAT modeling and random forest technique [J]. *Sustainability*, 2019, **11** (12), doi: 10.3390/su11123397.
- [6] Pinter N, Brasington J, Gurnell A, *et al.* River research and applications across borders [J]. *River Research and Applications*, 2019, **35**(6): 768-775.
- [7] Sánchez-Mateos S, Pérez L V, Suárez M A C, *et al.* Heavy metal contamination in the Cotopaxi and tungurahua rivers: a health risk[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, **79**(6), doi: 10.1007/s12665-020-8869-9.
- [8] Gondo R, Kolawole O D. Sustainable water resources management: issues and principles of water governance in the Okavango delta, Botswana[J]. *International Journal of Rural Management*, 2019, **15**(2): 198-217.
- [9] Pahl-Wostl C. Adaptive and sustainable water management: from improved conceptual foundations to transformative change [J]. *International Journal of Water Resources Development*, 2020, **36** (2-3): 397-415.
- [10] 姜明栋, 杨晓卉. 农村水生态文明建设研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2019, **41**(10): 1239-1244.
- Jiang M D, Yang X H. Advances on rural water ecological civilization construction [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2019, **41**(10): 1239-1244.
- [11] 胡庆芳, 霍军军, 李伶杰, 等. 水生态文明城市指标体系的若干思考与建议[J]. *长江科学院院报*, 2018, **35**(8): 22-26.
- Hu Q F, Huo J J, Li L J, *et al.* Index system of water ecological civilization city: perspectives and suggestions [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, **35**(8): 22-26.
- [12] 向婧怡, 张红举, 陈力, 等. 基于内容分析法的水生态文明概念及评价指标探讨[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, **28**(S1): 169-175.
- Xiang J Y, Zhang H J, Chen L, *et al.* Conceptualization and evaluation indicators of aquatic ecological civilization based on content analysis [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2018, **28**(S1): 169-175.
- [13] 王春红, 王治国, 樊华. 水土保持与水生态文明的关系及其规划问题[J]. *中国水土保持科学*, 2017, **15**(6): 134-139.
- Wang C H, Wang Z G, Fan H. Relationship and several planning issues between soil and water conservation and water ecological civilization [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, **15**(6): 134-139.
- [14] 田伟, 杨周生, 邵克强, 等. 城市湖泊水环境整治对改善水质的影响: 以蠡湖近 30 年水质变化为例[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 183-193.
- Tian W, Yang Z S, Shao K Q, *et al.* Effect of a comprehensive improvement project on water quality in urban lakes: a case study of water quality variation in Lihu Lake over the past 30 years[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 183-193.
- [15] 苏瑶, 许育新, 安文浩, 等. 基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1270-1279.
- Su Y, Xu Y X, An W H, *et al.* Assessment of ecosystem health of an urban river based on the microbe index of biotic integrity (M-IBI) [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1270-1279.
- [16] 张翔宇, 宋瑞明, 刘姝芳, 等. 模糊综合评价模型在水生态文明评价中的应用[J]. *水力发电*, 2019, **45**(2): 39-42, 114.
- Zhang X Y, Song R M, Liu S F, *et al.* Application of fuzzy comprehensive evaluation model in water eco-civilization evaluation[J]. *Water Power*, 2019, **45**(2): 39-42, 114.
- [17] 季晓翠, 王建群, 傅杰民. 基于云模型的滨海小流域水生态文明评价[J]. *水资源保护*, 2019, **35**(2): 74-79.
- Ji X C, Wang J Q, Fu J M. Evaluation of water ecological civilization in small coastal watershed based on cloud model[J]. *Water Resources Protection*, 2019, **35**(2): 74-79.
- [18] 邓宗兵, 苏聪文, 宗树伟, 等. 中国水生态文明建设水平测度与分析[J]. *中国软科学*, 2019, (9): 82-92.
- Deng Z B, Su C W, Zong S W, *et al.* Measurement and analysis of China's water ecological civilization construction index [J]. *China Soft Science*, 2019, (9): 82-92.
- [19] 任俊霖, 李浩, 伍新木, 等. 基于主成分分析法的长江经济带省会城市水生态文明评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, **25**(10): 1537-1544.
- Ren J L, Li H, Wu X M, *et al.* Assessment of 11 provincial capitals' water ecological civilization of the Yangtze River economic belt on the principal component [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, **25**(10): 1537-1544.
- [20] 汪嘉杨, 翟庆伟, 郭倩, 等. 太湖流域水环境承载力评价研究[J]. *中国环境科学*, 2017, **35**(7): 1979-1987.
- Wang J Y, Zhai Q W, Guo Q, *et al.* Study on water environmental carrying capacity evaluation in Taihu lake Basin [J]. *China Environmental Science*, 2017, **35**(7): 1979-1987.
- [21] 董媛媛. 基于“生态要素-DPSIRM”生态安全评价体系的构建[J]. *水土保持研究*, 2020, **27**(5): 333-339.
- Dong Y Y. Construction of ecological safety evaluation system based on 'Ecological Elements-DPSIRM' [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, **27**(5): 333-339.
- [22] 王亮, 刘慧. 基于 PS-DR-DP 理论模型的区域资源环境承载力综合评价[J]. *地理学报*, 2019, **74**(2): 340-352.
- Wang L, Liu H. The comprehensive evaluation of regional resources and environmental carrying capacity based on PS-DR-DP theoretical model [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, **74** (2): 340-352.
- [23] SL/Z 738-2016, 水生态文明城市建设评价导则[S].
- [24] 王卫东, 颜文, 高华. 基于未知测度的车辆基地选址规划评价[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2020, **51**(5): 1431-1440.
- Wang W D, Yan W, Gao H. Evaluation of vehicle base location planning based on unascertained measure[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2020, **51**(5): 1431-1440.
- [25] 李辉, 易富, 郑学欣, 等. 因素空间-未知测度多重识别模型的构建及应用[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2020, **28** (5): 1134-1144.
- Li H, Yi F, Zheng X X, *et al.* Construction and application of multiple recognition model of factor space-unascertained measure [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2020, **28**(5): 1134-1144.
- [26] 李笑诺, 丁寿康, 陈卫平, 等. 土壤环境承载力评价体系构建与应用[J]. *环境科学*, 2020, **41**(5): 2373-2380.
- Li X N, Ding S K, Chen W P, *et al.* Construction and

- application of an evaluation system for soil environmental carrying capacity [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (5): 2373-2380.
- [27] 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.
- [28] 金慧芳, 史东梅, 钟义军, 等. 红壤坡耕地耕层土壤质量退化特征及障碍因子诊断[J]. *农业工程学报*, 2019, **35** (20): 84-93.
Jin H F, Shi D M, Zhong Y J, *et al.* Diagnosis of obstacle factors and degradation characteristics of cultivated-layer quality for red soil sloping farmland [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, **35** (20): 84-93.
- [29] 雷勋平, Qiu R B, 刘晨. 土地集约利用与城镇化协调发展评价及障碍因子诊断[J]. *农业机械学报*, 2020, **51** (6): 138-151.
Lei X P, Qiu R B, Liu C. Evaluation of coordinated development between land intensive use and urbanization and diagnosis of obstacle factors [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, **51** (6): 138-151.
- [30] 石嘴山市统计局. 石嘴山统计年鉴[Z]. 北京: 中国统计出版社, 2010-2019.

环境科学

CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Huai-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds	DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)