

流域水环境承载力预警技术方法体系*

Early-Warning Technology and Method System of Water Environmental Carrying Capacity on Basin

摘要 流域社会经济发展与水环境承载力不匹配是导致我国流域水环境问题的重要原因之一。然而现有流域水环境承载力预警大多只停留在评价层面,预警概念内涵不清,警限与警度划分不科学,重预警轻排警,预警技术方法体系尚处于探索阶段。为解决上述问题,在明确流域水环境承载力预警的内涵与思路的基础上,针对不同的管理需求,构建具有一定科学性、系统性与实用性的流域水环境承载力预警方法体系;进一步结合流域实际情况,从“增容和减压”双向调控的角度制定排警措施,促进流域水系统协调发展,为提升流域可持续发展形势分析能力与流域水系统管理提供技术支撑。

关键词 流域;水环境承载力;预警;技术方法体系

■文/曾维华 解钰茜 王东 张可欣 姚瑞华

DOI:10.14026/j.cnki.0253-9705.2020.19.002

随着我国社会经济的快速发展,人类活动对水环境造成的压力日益增大,超过了流域水环境承载力可支撑的阈值范围;由此导致了流域水质恶化、水资源短缺及水生态系统功能退化等一系列水环境问题,严重危及流域水系统的可持续演替进化。通过流域水环境承载力预警,可以及时对流域水环境承载力承载状态进行预判,提前发出警告;进一步分析导致超载的原因,根据预警警度,提出排警措施;由此避免水环境承载力超载导致的重大损失,确保流域水系统协调持续发展。

我国流域水环境管治已由以末端污染修复治理为主逐步转变为以前瞻性预防为主、防治结合,流域水环境承载力预警显得尤为重要。自党的十八届三中全会提出建立资源环境承载能力监测预警机制以来,国家相关部门不断加强对承载力监测预警的研究,并出台了相应的预警技术方法与预警机制。流域水环境承载力预警已成为我国流域社会、经济与环境协调发展的重要抓手;同时也为流域水环境管治提出了相应的要求。流域水环境承载力预警技术方法、体制机制建立举足轻重。

流域水环境承载力预警研究进展与问题识别研究进展

随着国家一系列指导政策的出台,我国学者

与相关部门对承载力预警高度重视,出现了对承载力监测预警机制研究的热潮^[1]。李海辰等认为承载力监测预警机制应包括监测层、预警层、决策层和反馈层^[2];丁菊莺等认为监测预警机制应包含监测模块、方法体系模块、动态评价模块、预警模块和响应模块^[3];金菊良等将预警过程进一步细分,将其分为影响因素识别及警度划分、警情根源分析、预警指标体系设计、承载力趋势预测评价及警度确定、调控及应对策略5个环节^[4]。上述研究属体制与机制研究范畴,且大多只停留在定性分析上。崔丹等提出流域/区域水环境承载力预警技术方法体系,包括明确警义、识别警源、预测警情、分析警兆、评判警情、界定警度与排除警情7个阶段,并基于系统动力学构建了昆明市水环境承载力中长期预警技术体系^[5]。

预警指标应反映或影响承载力警情的变化,从明确警义到界定警度,都离不开预警指标。随着对环境承载力综合属性的不断认知,预警指标也逐渐从单一指标扩展为涉及社会、经济、资源、环境等多子系统的综合指标体系。刘丹等针对水资源量和水环境容量两方面选取指标,并采用主成分分析确定预警指标^[6];鲁佳慧等根据“压力—状态—响应”的关系,综合多方面因素,选取20个预警指标^[7];史毅超等从水资源支撑、经济负荷、社会负荷和生态保护4个方面选取

*基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项“北运河流域水质目标综合管理示范研究”(2018ZX07111003)

预警指标应反映或影响承载力警情的变化,从明确警义到界定警度,都离不开预警指标。

指标并结合专家打分法,构建了包含15个指标的预警指标体系^[8]。但是,上述大多研究并不明确承载力预警警义,而是以可持续发展状态综合评价指标替代承载力预警指标。承载力预警是承载状态预警,即对人类活动给生态环境系统带来的压力超过环境承载力的程度进行预警。解钰茜等分别从压力和承载力两方面构建中国环境承载力预警指标体系,并采用时差相关分析法筛选出先行于承载状态的指标从而进行预警分析^[9];

预警方法的构建、指标的选择以及警度划分是水环境承载力预警体系构建的关键。在预警方法理论研究方面,中国科学院地理科学与资源研究所樊杰团队基于“短板原理”与“增长极限原则”首次全面构建了国家层面的资源环境承载力监测预警综合评价理论体系与框架,并提出资源环境承载力预警的目标是通过监测和评价各地区资源环境超载状况,诊断和预判各地区可持续发展状态,为限制性措施制定提供依据^[10-11],其核心内容是面向预警的综合评价,这也是目前已开展的预警研究工作中广泛采用的预警思路。但是,承载力评估与预警还是有本质区别的,预警是在对未来超载状态进行预判的基础上,提前提出警告并及时采取排警措施,以避免严重损失,所以基于承载力评价的预警不属于严格意义上的预警。也有学者根据警情的时间序列,采用自回归滑动平均模型^[6]、灰色模型^[7-8, 12]以及神经网络模型^[13-14]对未来趋势进行短期预测,或搭建系统动力学模型,结合经济社会发展的情景设计,进行承载力承载状态的中长期预警^[5, 15]。

警度界定及警限划分是实现及时、有效预警的关键。目前,警限划分的方法有控制图法,根据指标警度的隶属度、偏离度核算的划分方法,以及参考现有科学研究成果、国际/国家/地区管理标准的校标法等。如崔丹、解钰茜等采用环境承载力超载状态临界值和控制图法相结合的方法确定警限,使被考察的指标值服从正态分布^[5, 9];史毅超等通过模糊综合评判指标的预警等级隶属度,从而进行警度划分^[8];杨丽花参考国际小康水平分别对5个预警指标的警限进行划分^[14]。陈晓雨婧在总结现有的研究和文献资料的基础上,依据地方、国家和国际标准或准则对各单项预警

指标进行警限阈值划分^[16]。

2016年前后,我国各相关部委也积极探索建立了各自的监测预警机制,出台了技术指导文件。国家发展改革委等13部委联合下发《关于印发〈资源环境承载能力监测预警技术方法(试行)〉的通知》(发改规划〔2016〕2043号),阐述了资源环境承载能力监测预警的基本概念、技术流程、集成方法与类型划分等技术要点^[17],但其核心是通过资源环境超载状态评价,对区域可持续发展状态进行预判,而不是在未来超载状态预判基础上,提出超载状态警告。水利部办公厅印发了《水利部办公厅关于做好建立全国水资源承载能力监测预警机制工作的通知》(办资源〔2016〕57号)并编制了《全国水资源承载能力监测预警技术大纲(修订稿)》,界定了水资源承载能力、承载负荷(压力)的核算方法及承载状况的评价方法^[18];原国土资源部办公厅印发的《国土资源环境承载力评价技术要求(试行)》(国土资厅函〔2016〕1213号)也提及了承载力预警,但本质是对自然单元地下水的水量(水位与控制水位或历史稳定水位)与水质(劣V类断面占比)的承载本底和承载状态的发展趋势进行分析及评价^[19],也是将评价与预警相混淆。原国家海洋局发布了《海洋资源环境承载能力监测预警指标体系和技术方法指南》,主要包括对现状超载状况的单要素及综合评价,对近五年或五年以上的二级指标评估结果开展趋势分析,并对具有显著恶化趋势的控制性指标进行预警,或采用灰色模型法对下一年度控制性指标的超载风险进行预警;尽管涉及了趋势分析与对显著恶化趋势指标的短期预测,但警义不清,不成体系,存在分析警兆、评判警情、界定警度与排除警情不到位等问题,未能实现系统化的综合预警^[20]。

问题识别

(一) 预警概念内涵不明确,很多“预警”仅停留在评价层面,缺乏对未来承载状态的预判

到目前为止,我国学者及相关部门已广泛开展资源环境承载力预警技术方法与机制研究,但是很多研究并没有从已有预警概念、内涵及其理论方法入手,且受数据资料与技术方法限制,很多预

警工作仍停留在现状评价层面,将预警与警情现状评价概念相混淆,缺乏对未来承载力承载状态的预判,更谈不上提前警告及根据预警结果进行排警措施的制定,没有实现真正意义上的预警。由于承载力预警概念内涵与警义不清,很多研究以及发展改革、自然资源、水利与海洋等相关部门出台的资源环境承载力预警相关指导性政策文件中所构建的承载力“预警”指标体系大多借鉴可持续发展状态综合评价,无法判断是可持续发展状态/能力评价,还是承载力预警。

(二)尚未形成流域水环境承载力预警技术方法体系,缺乏系统性、综合性的流域水环境承载力预警研究

尽管在中共中央、国务院的倡导下,资源环境承载力预警工作已引起我国各级相关部门的高度重视,发展改革、自然资源、水利与海洋等相关部门都出台了资源环境承载力预警相关指导性政策文件,但是生态环境部尚未出台各要素的环境承载力预警指导政策性文件,流域水环境承载力预警技术方法体系与预警机制也在探讨之中。且现有流域水环境承载力预警研究主要集中在水资源和水环境方面,缺乏对水生态因素的考量,从“三水”角度对流域水环境承载力进行系统性综合预警的研究较少。而流域水系统是一个包括水资源、水环境和水生态三个子系统的复合系统;流域水环境承载力是流域水系统在其结构不受破坏,可为人类生活、生产持续提供服务功能的前提下,所能承受人类活动给其带来压力(包括水资源消耗与排放负荷污水等)的阈值,是水系统的自然属性。流域水环境承载力应包含水资源承载力、水环境容量与水生态承载力三个分量,是一个综合承载力概念。分别将水资源量短缺或水环境质量超标/容量不足超载界定为警情,不能全面客观地反映流域水系统的超载状态。

(三)警限与警度划分的科学性与实用性有待提高,应充分考虑流域水环境承载力阈值与相关规划目标

就目前流域水环境承载力的相关研究成果来看,由于不同研究对于警情指标(承载力的阈值或综合承载指标)构建的不同,警限划分与警度界定往往是基于流域本身水环境承载力预警结果的系统

综合分析,或对标相关规划管理目标,尚未形成一套兼顾普适性和地区差异性的划分方法。

首先,流域水环境承载力预警样本只覆盖研究流域,无法涵盖全国乃至全球其他流域,不同警限和警度划分后的预警结果无法进行横向比较,由此导致预警结果有些偏颇;其次,流域水环境承载力概念内涵的核心是“阈值”,完全脱离这一阈值,得到的超载状态只是相对的,对流域水环境集成规划管理的指导意义将大打折扣;最后,无论是流域水生态功能区与水环境功能区,还是国土空间规划中的主体功能区划,不同功能区水环境承载力约束力度不同,因此,有必要兼顾流域不同功能分区的差异性,结合相应流域规划目标,科学划分警限,确定警区。

(四)流域水环境承载力预警的实际应用价值有待进一步挖掘,要充分重视预警成果,推动其在流域水生态环境管理工作中发挥应有作用

到目前为止,尽管承载力预警研究取得了很大成效,但研究成果实践推广工作有些滞后,在实际规划管理中并没有起到应有的作用。就以承载力评估为例,无论是国土空间规划“双评价”中的资源环境承载力评价,还是面向城市水生态环境考核工作的城市水环境承载力评价,都由于承载力概念内涵混乱,评价指标体系庞杂,评价结果的可解释性与合理性大打折扣,无法起到其在规划管理中的应有作用。流域水环境承载力预警更是如此,短期(年度)预警如何与流域水环境日常管理或应急管理结合起来,通过对承载力超载状态进行预判,提出排警措施,减少由于超载带来的损失?中长期预警如何与流域中长期规划结合,为其提供依据?这些都是摆在我们面前需要解决的问题。由此可见,流域水环境承载力预警的实际应用价值有待进一步挖掘,要充分重视预警成果落地,使其真正在流域水生态环境管理工作中起到应有的作用。

流域水环境承载力预警技术方法体系

针对生态环境管理部门对于流域水环境承载力预警技术方法的需求,在涵盖明确警义、识别警源、预测警情、分析警兆、评判警情、界定警

流域水环境承载力
预警最终目的在于
排除警情。

度与排除警情7个阶段的预警体系框架指导下,构建适用于不同流域水环境规划管理需求的短期(1年)与中长期(5~10年)流域水环境承载力预警方法体系,具体包括:基于景气指数的短期预警、基于机器学习的短期预警及基于系统动力学的中长期预警方法等。最后,基于双向调控策略,提出排警措施(见图1)。

基于景气指数的短期预警技术方法是一种依据经济周期性及其导致的对水环境压力的波动性的原理,在基准警情与影响警情指标体系构建基础上,利用时差相关分析方法,将指标划分为先行、一致与滞后指标;进一步根据景气指数(包括扩散指数与合成指数),对流域水环境承载力超载警情进行分析;最后,利用综合警情指数对警兆进行判别,界定警度并划分警限,进行预警。这种预警方法主要用于流域可持续发展形

势分析,即通过预判流域水环境承载力承载状态(压力超过承载力的程度),对流域可持续发展态势进行系统分析。

基于机器学习的短期预警技术方法是一种利用机器学习方法,在构建流域水环境承载力预警模型输入与输出指标体系及其样本集(训练样本与测试样本)的基础上,通过模型训练、测试与验证,建立流域水环境承载力预警输入与输出指标的非线性多重映射关系,由此构造基于机器学习的流域水环境承载预警黑箱模型。这种预警方法也属于短期预警技术方法,主要用于流域可持续发展形势分析,即通过预判流域水环境承载力承载状态(压力超过承载力的程度),对流域可持续发展态势进行系统分析。

基于系统动力学的中长期预警技术方法是以系统分析和因果反馈的理论为基础,根据已知系

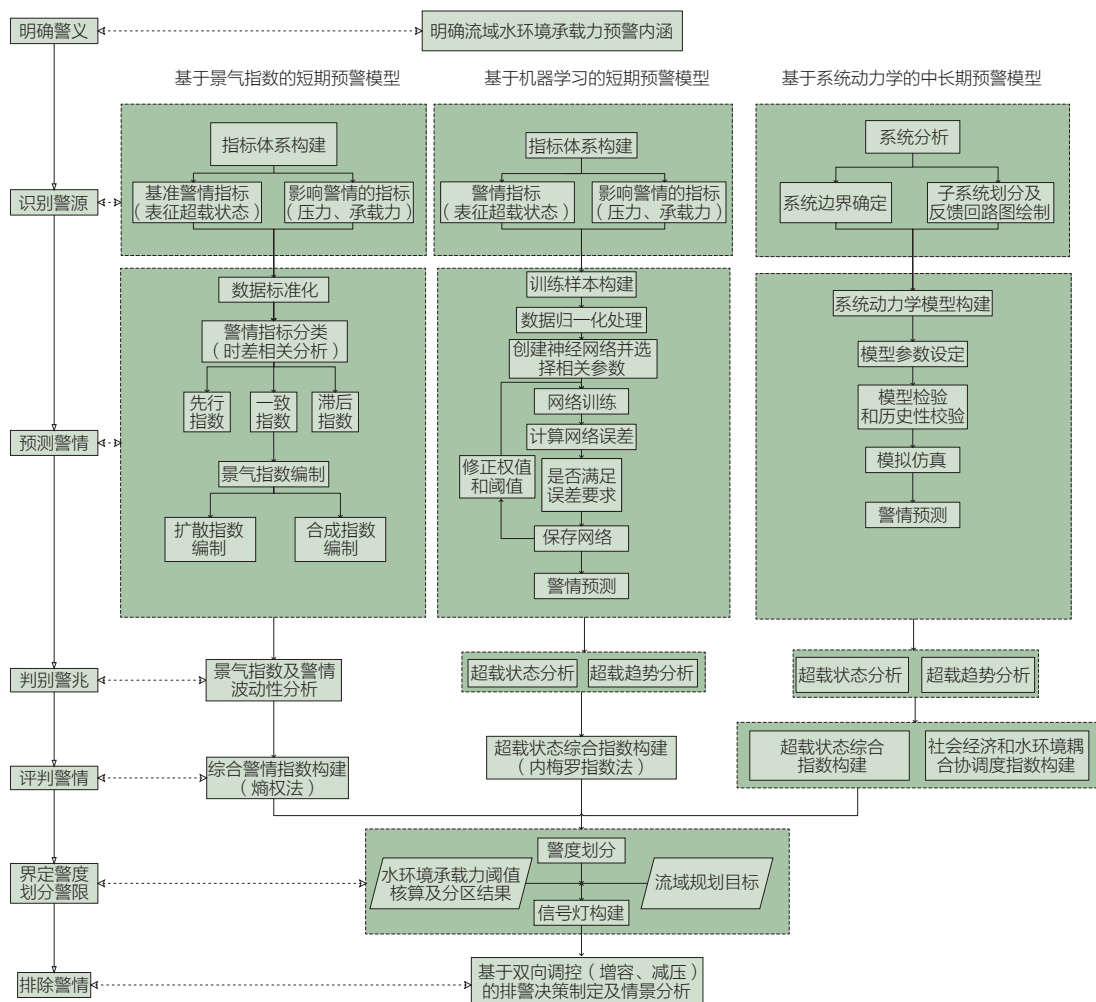


图1 流域水环境承载力预警技术方法体系

统, 结合研究目的、现状和历史数据、系统内要素关系等建立模型, 动态跟踪警兆、警情的发展的预警技术, 可为中长期流域规划情景模拟与方案筛选提供技术支撑。

流域水环境承载力预警最终目的在于排除警情, 根据流域水环境承载力预警结果, 结合流域现状和现有的环保政策, 在“增容与减压”双向调控与“守退补”理念指导下, 根据不同的流域管治需求提出排警策略及分区调控措施: 对于承载状态良好、没有出现警情的地区特别是上游源头水地区与水源地, 需守住流域水生态底线; 对于临近超载的地区, 应尽量腾退生态空间, 留出承载余量, 防止水生态系统健康状态恶化; 对于已严重超载地区, 应从提高水环境承载力与降低人类活动对水系统带来的压力, 即双向调控角度, 采取补救措施, 恢复流域自然水生态系统。

北运河流域水环境承载力预警实证案例研究

基于景气指数的北运河流域水环境承载力短期预警

北运河流域预警结果显示 (见图2), 在时间尺度上, 2015—2018年北运河流域各区的承载状况有转好趋势; 但在空间分布上, 还存在着重

显的差异化, 尤其是人口密集、生活用水消耗大但区域面积小的中心城区承载状态较差, 如北京地区的东城、西城区以及天津的北辰、红桥、河北区的超载严重, 综合警情指数均超过2, 即社会经济压力指数是水环境承载指数的两倍以上。北京市的海淀区、石景山区、朝阳区和大兴区由于人口、生活及工业用水和排污量较多等原因, 水环境承载力承载状况不容乐观; 河北省的广阳区和香河区也因污水处理设施不足, 导致水环境承载能力较低, 超载状况较严重。此外, 林草覆盖较高、水资源丰富的北运河上游北京市昌平区及人为活动影响程度较小的河北省安次区的水环境承载力承载情况较好, 基本保持在适载或弱载的程度, 但随着区域经济的发展, 安次区的承载状况在近几年出现了变差的趋势, 需要尽快采取措施减小水环境超载风险。

基于机器学习的北运河流域水环境承载力短期预警

北运河流域水承载力预警结果表明 (见图3、图4), 总体上北运河流域中心城区及下游地区的超载情况较为严重。从COD承载力超载情况来看, 北京市朝阳区、海淀区、丰台区、西城区和红桥区等城市化水平较高的地区, 水环境质量受社会活动影响较大, 超载较严重, 亮起了红灯; 从氨氮承载力超载情况来看, 朝阳区、海淀区、丰台区和大兴区发出了重警的信号, 其中, 朝阳区、海淀区和丰台区的城镇生活污水氨氮排放较多, 大兴区的氨氮则来源于城镇生活、农业污水和污水处理厂的排放; 从总磷承载力超载情况来看, 朝阳区、海淀区、大兴区、广阳区和红桥区都属于红色预警区, 尤其是大兴区和广阳区的畜禽养殖和种植业面源污染比较严重; 从水资源承载力超载情况来看, 东城区、西城区、大兴区、红桥区 and 河北区发出了重警的信号, 这些中心城区的水资源紧缺, 同时人口密度较高, 生活用水量大, 水资源短缺情况比较危急。此外, 用内梅罗指数法及短板效应计算得到的水环境承载力综合预警结果显示, 北运河流域上游地区水环境承载力承载状态较好, 中下游地区相对较差, 朝阳区、海淀区、东城区、西城区、丰台区、大兴区、河北区和红桥区落在了红色重警区域。

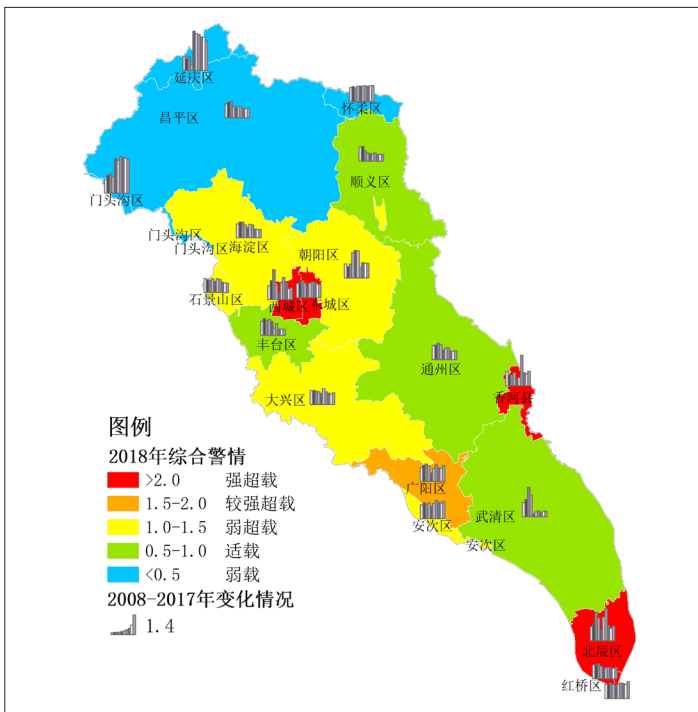


图2 北运河流域水环境承载力警情变化趋势及2018年预警结果

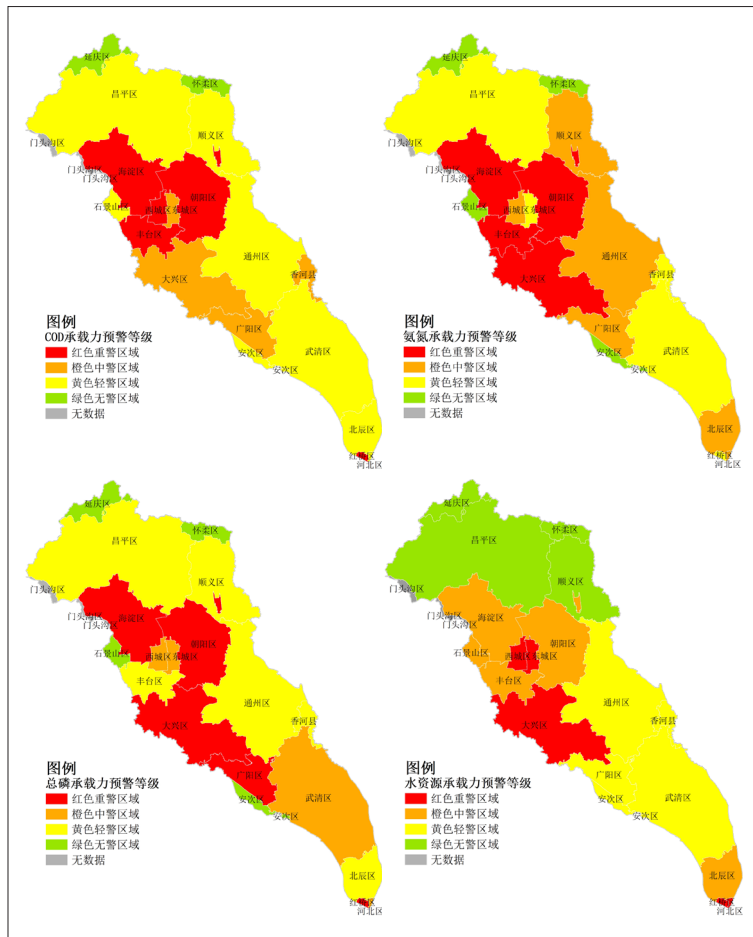


图3 2018年各分要素水环境承载力预警结果

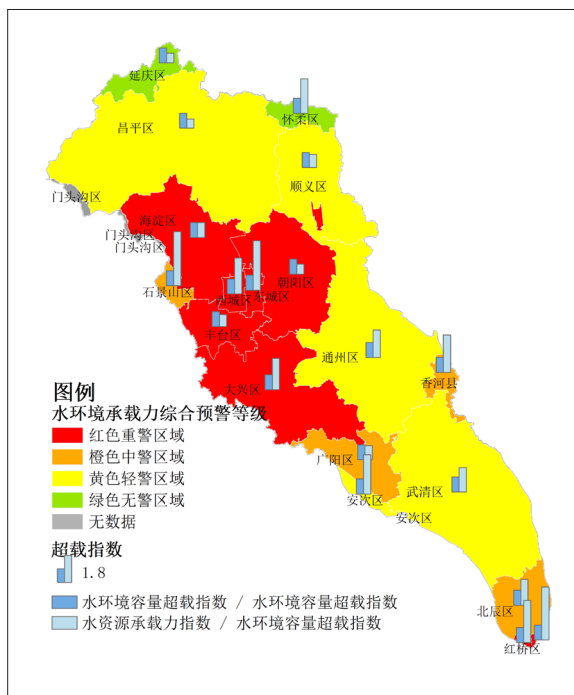


图4 2018年水环境承载力综合预警结果

“增容—减压”双向调控排警措施

根据预警结果,从“双向调控”即提高水环境承载力和降低社会经济活动对水环境的压力两个方面入手,进一步从流域的水环境全过程控制角度将措施细分为前端、过程和末端三个方面考虑调控措施(如表1所示)。在此基础上,结合北运河流域各区的现状分析,明确不同区域间水环境承载力的差距,比较优势和缺陷不足,遵循“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的新时期治水方针,找出提升各区水环境承载力的准确途径。北运河流域水环境承载力超载地区的具体分区管制措施及建议如下:

北京市朝阳区、海淀区区域经济发展速度快,人口稠密,产业密集,区域三产占比已经达到较高水平,流域内水环境承载力常年超载严重,主要问题在于区域城镇生活污水、污水处理厂污染物排放量大。需减少生活污水直排,积极开展水污染防治工作;同时开展追根溯源、排污口摸排工作,加强执法和监管力度。

北京市西城区、东城区、丰台区水环境承载力超载的主要原因在于水资源短缺,区域内人口多,生活用水量大,供需矛盾较突出。应加强区域水资源的高效利用,严格落实区域用水总量控制和行业用水效率控制,进一步强化计划用水和定额管理,提高水资源回用率。

北京市石景山区整体水质较好,但水资源较为短缺,工业用水和生活用水量较大,区域第三产业占比约为70%,存在一定的提升空间。可以进一步加快产业经济结构转型升级,对工业结构和布局进行调整,并加强工业节水技术改造。

北京市大兴区区域内水体污染严重,且由于其位于凉水河下游,水体水质较差;而且,随着疏解整治力度的不断加大以及回迁房、保障房的建设,人口快速由城区向郊区聚集,由建成区向非建成区转移,导致污水产生量大大超过规划预期;此外,区域内“散乱污”企业、畜禽养殖等污水直接入河的现象还时有发生,尚未得到全面的控制,面源污染较为严重。今后可将工作重心放在调控经济发展方式、加快产业经济结构转型升级、调整人口规模上;加快推进农村治污工作,解决好农村地区污染收集和处理问题,并在

表1 北运河流域水环境承载力超载状态双向调控措施

原则	分类	按生命周期细分	具体措施
双向调控	提高水环境承载力	前端	从外区域调水
		过程	通过水利设施蓄水
		末端	雨水回用
			提高污水处理量
	降低社会经济活动对水环境造成的压力	前端	完善截污管网,提高污水再生回用率
			调整经济增速
			调整人口规模
			产业经济结构转型升级
			加大环保投入
		过程	推进生产生活节水、提高水回用率
			推行清洁生产,减少生产污染物排放
		末端	提高污水收集处理率
			节水回用,减少生活污染物排放

区域内推行工业清洁生产，减少生产时污染物的排放，解决区域性工业环境污染问题。

天津市河北区、北辰区和红桥区位于北运河水系的下游，区域来水水质较差，污染物排放主要来自城镇面源，存在雨污合流及部分排污口治理效果反复的现象，造成超设计负荷，污水直接溢流至河道的情况经常发生。应加强雨污混接点排查改造力度，严防生活污水通过雨水口门向河道排放的现象发生；做好雨水管道和雨污合流管道的精细化管理工作。

河北省广阳区、安次区和香河县污染物排放主要来自生活面源与农业面源，且区域内农业面源污染较为严重，农业用水量较大。应加快农业高效节水建设，加强农业面源污染治理，推进水肥一体及测土配方，鼓励使用低污染化肥，加强农用排水沟渠的生态恢复，提高农业排涝水的自净能力。

结论与建议

当前，我国水环境承载力预警的相关研究及技术标准制定仍以承载力评价为核心内容，将预警与评价的概念相混淆，未能实现真正意义上的预警，且警限与警度的界定和划分不科学，缺乏系统性、综合性的流域水环境承载力预警技术体系。

针对不同层面流域水环境规划管理需求，构建适用于流域水环境绩效考核的短期水环境承载力预警，以及服务于流域水系统规划的中长期水环境承载力预警；由此构成具有一定针对性、可

推广、可复制的流域水环境承载力预警技术方法体系。

北运河流域水环境承载力预警实证研究结果表明：所建立的流域水环境承载力预警方法体系具有一定针对性与实用性，北运河流域水环境承载力承载状况逐年向好，但各地区的承载状况呈现明显的空间差异性，体现为上游地区承载状态较好，中心城区及下游农业面源污染严重地区的水环境承载状态较差；下一步应根据不同区域的预警结果，制定有针对性、差异化的排警措施，以确保北运河流域可持续发展。

基于上述研究结论，对我国流域水环境承载力预警工作提出如下建议：

明确流域水环境承载力预警内涵与警义，构建科学合理的流域水环境承载力预警指标体系

针对水环境承载力预警内涵与警义不明确，所构建预警指标体系无法客观表征水环境承载力预警警义与警情的问题，在明确水环境承载力预警概念内涵与警义的基础上，从水环境承载力承载状态（人类活动给水系统带来的压力超过水系统自身承载力的程度）角度出发，兼顾组成水系统的水资源、水环境、水生态三个子系统，构建科学合理的、可以客观表征水环境承载力预警警义与警情的水环境承载力预警指标体系。

明确水环境承载力评价与预警的区别，强化警情预测、警兆预判及排警措施制定

目前实施的承载力预警多基于现状评价，即使融入趋势分析与恶化指标预测，也缺乏全面的警情预测、警兆判别及警度界定与警限划分，更谈不上排警措施了。水环境承载力预警不同于现状或回顾性评价，是在未来超载警情预测与警兆预判基础上，界定警度，划分警限，提出排警措施，以避免由于超载而导致严重损失。由此可见，警情预测、警兆预判与排警措施是流域水环境承载预警的核心环节，也是目前我国承载力预警体制机制建设的薄弱环节，有必要加强相关技术方法研究。

针对不同层面流域水环境规划与管理需求，构建具有针对性、可推广、可复制的水环境承载力预警技术方法体系


如何将流域水环境承载力预警研究成果应

用于流域水环境规划管理工作,是摆在我们面前无法回避的问题。流域水环境承载力预警警情是以压力超过承载力的程度,即承载状态指数表征的。针对不同流域水环境规划管理需求,具体的数据收集与警情指数构建方式也有所不同。

针对一般的年度考核需求与宏观形势分析工作,可基于水资源公报、环境质量年报与统计年鉴等统计数据,构造相应的水环境容量指数与超载指数表征警情,利用基于景气指数或基于机器学习等预警方法进行警情预测,以行政单元为预警单元进行预警。这种短期(年度)预警用于流域可持续发展形势分析,即通过预判流域水环境承载力承载状态(压力超过承载力的程度),对流域可持续发展态势进行系统分析。

针对流域水环境中长期规划,基于行政单元统计数据的水环境相对容量指数不能满足精细度要求;需要基于水污染控制单元,利用分布式水文模型与水环境质量模型,对水环境承载力各分量阈值进行定量核算,构造绝对的警情指数,分析流域水环境承载力超载警情暴发的先兆,利用系统动力学等手段对其承载状态及其趋势进行预测,并判别警兆,界定警度,划分警限。服务于流域水环境中长期规划的水环境承载力预警,可为中长期流域规划情景模拟与方案筛选提供技术支撑。

科学界定警情指数,合理划分警限与界定警度

警度界定与警限划分是实现及时、有效预警的关键。对于相对警情指数,为解决流域横向预警对标问题,在界定警度、划分警限的过程中,首先,需要扩大样本的覆盖范围,将全国最好水平样本与最差样本纳入预警样本;其次,在扩大样本的基础上,基于统计学的样本分布进行划分,或者以全国或全流域最差、最好或平均水平为依据,进行警限划分。对于绝对警情指数,可以根据水环境承载力的“阈值”核算结果,并兼顾流域相关规划、功能分区及规划目标的差异性,科学划分警限、确定警区。

参考文献

[1]段雪琴,赖旭,韩振超,等.资源环境承载力监测预警长效机制制度化研究[J].资源节约与环保,2019(11):

140-141.

[2]李海辰,王志强,廖卫红,等.中国水资源承载力监测预警机制设计[J].中国人口·资源与环境,2016(S1):316-319.

[3]丁菊莺,宋秋波.水资源承载力监测预警机制建设初探:以海河流域为例[J].海河水利,2019(3):1-5.

[4]金菊良,陈梦璐,郦建强,等.水资源承载力预警研究进展[J].水科学进展,2018,29(4):131-144.

[5]崔丹,陈馨,曾维华.水环境承载力中长期预警研究:以昆明市为例[J].中国环境科学,2018,38(3):1174-1184.

[6]刘丹,王烜,曾维华,等.基于ARMA模型的水环境承载力超载预警研究[J].水资源保护,2019,35(1):52-55,69.

[7]鲁佳慧,唐德善.基于PSR和物元可拓模型的水资源承载力预警研究[J].水利水电技术,2019,50(1):62-68.

[8]史毅超,唐德善,孟令爽,等.基于改进可变模糊方法的区域水资源承载力预警模型[J].水电能源科学,2018,36(1):36-39.

[9]解钰茜,吴昊,崔丹,等.基于景气指数法的环境承载力预警[J].中国环境科学,2019,39(1):442-450.

[10]樊杰,王亚飞,汤青,等.全国资源环境承载力监测预警(2014版)学术思路与总体技术流程[J].地理科学,2015,35(1):1-10.

[11]樊杰,周侃,等.全国资源环境承载力预警(2016版)的基点和技术方法进展[J].地理科学进展,2017(3):266-276.

[12]张国庆.辽宁省水资源承载力预警模型研究[J].水利规划与设计,2018(8):75-78,130.

[13]胡荣祥,徐海波,任小松,等.BP神经网络在城市水环境承载力预测中的应用[J].人民黄河,2012(8):79-81.

[14]杨丽花,佟连军.基于BP神经网络模型的松花江流域(吉林省段)水环境承载力研究[J].干旱区资源与环境,2013(9):138-143.

[15]高伟,刘永,和树庄.基于SD模型的流域分质水资源承载力预警研究[J].北京大学学报(自然科学版),2018,54(3):673-679.

[16]陈晓雨婧.甘肃省资源环境承载力评估预警研究[D].北京:中央民族大学,2019.

(曾维华系北京师范大学环境学院教授;解钰茜系北京师范大学环境学院博士生;王东系生态环境部环境规划院研究员、所长;张可欣系北京师范大学环境学院硕士生;姚瑞华系生态环境部环境规划院研究员)