

海绵城市中不同类型河流的健康评价及修复策略

王金娥¹, 李 恺²

(1. 无锡市新吴区排水管理中心, 江苏 无锡 214028; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 研究选取无锡市新吴区作为海绵城市模型, 对城市内河—伯渎港、半成市内河—张塘河及自然河道—亲水河3类不同类型的河流, 从河流的形态结构、水动力、水质状况、水生生物、堤防工程状况、岸线利用管理状况、居民满意状况、供水水量状况这8个方面展开分析, 综合计算12项水文、水质、水生态和公众意见的指标系数, 评估河流的健康情况, 为建设“海绵城市”实践中对河湖系统的生态健康开展评估提供了参考依据。

关键词: 河流生态系统; 生态健康评价; 城市河流; 海绵城市

中图分类号: R735.3+5; R363.1+4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7839(2021)09-0035-08

Health assessment and restoration strategies for rivers of different types in sponge cities

WANG Jiné¹, LI Kai²

(1. *Xinwu District Drainage Management Center of Wuxi City, Wuxi 214028, China;*

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Xinwu District of Wuxi City was selected as a sponge city model to analyze three different types of rivers, namely, urban inland river – Bodu Port, semi – urban inland river – Zhangtang river and natural river – hydrophilic river from eight aspects, namely, river morphology, hydrodynamic force, water quality, aquatic organisms, embankment engineering, shoreline utilization and management, residents' satisfaction and water supply. The 12 indicators of hydrology, water quality, aquatic ecology and public opinion were comprehensively calculated to assess the health of rivers, which provided a reference for the ecological health assessment of river – lake system in the construction of "sponge city".

Key words: river ecosystem; ecological health evaluation; urban rivers; sponge city

海绵城市是一种具有防洪防涝并兼有生态环保功能的新型城市模型, 降雨的时候索取水资源、保存水资源、使得水资源充分融合和水资源利用变得灵活, 在必要的时候可以把保存完善的水资源流出并且重新进行使用, 完成降雨在城区中的充分转化^[1]。由于海绵城市建立在城市河流系统之上, 于是对河湖的生态健康评估成为了其极其重要的基

础^[2-3]。我国城区的河流生态状况普遍较差, 因此改进城区的水资源及整体管辖, 加强城区的河湖生态健康保护是当前建设海绵城市的首要任务, 其中对河湖生态健康的科学合理评估是一重要课题。健康的城市河流系统不仅可以调节城市水资源平衡, 还可提供景物的观赏用水以及丰富水资源, 保护城区内的水资源、水质环境和水生态系统, 形成

收稿日期: 2021-01-06

作者简介: 王金娥(1984—), 女, 工程师, 本科, 研究方向为水资源管理。E-mail: njsljwje@163.com

一个生态环境良好的“海绵城市”^[4-5]。

“海绵城市”中河湖生态系统的功能是由生态系统和人类活动交互作用而形成的。河湖在维持水资源条件上起到重要作用,直接影响了城市中的人类生存质量以及其他生物的生存状态^[6]。河湖生态系统是一个繁琐、大范围、始终变化的系统,在研究城区河湖生态系统的健康程度时,需要通过指标体系对其功能及耦合关系做出综合评价^[7-9]。最新指标体系研究突出了城区河湖的生态系统构建与用途的实体模型,针对各种的天然地域的河流和湖泊,通过多个不同时间与空间的动态指标,分析河湖的生态系统变化以及非生命系统变化过程之间的关系^[10]。

城区河湖生态是否健康的评估采用一定的指标群和评价方法,根据实地调查和长期的监测资料,评估河流目前所处的状态,以确定影响该城区河湖生态健康的主要因素,从而为城区河湖管理提供决策依据,帮助各地政府进行河流生态健康管理,使得城区河湖保持良好的生态体系和人类可持续发展的环境^[11]。目前,我国大多数河湖健康评价只关注 DO、pH、NH₃-N、粪便大肠杆菌等几项简单的水质监测指标^[12]。但是,这些较单一的水质评价有着明显的局限性,并不能系统地、动态地评估城区河湖生态系统的完整性^[13-14],所以较为先进的河湖生态健康评估已从物理、化学指标评估发展至生物指标监测,以及多参数的综合评估等方法^[15-16]。英国的淡水生态所的河流研究室研发出 RIVPACS (River Invertebrate Prediction and Classification System) 方法,其在工作原理上属于预测模型方法,是利用区域特征预测河流自然状况下应存在的大型无脊椎动物,并将预测值与实际检测值相比较,从而评价河流健康状况^[17]。澳大利亚在 RIVPACS 基础上发展了适合于本国的、澳大利亚河流评价系统 (AUSRIVAS, Australian River Assessment Scheme), 并利用此方法开展了国家河流健康计划 (NRHP, National River Health Program), 目标对其境内河流的生态健康状况进行有效和长期的监测和评价。其主要评价内容包括:水文地貌(栖息地结构、水流状态、连续性)、物理化学参数、无脊椎动物和鱼类集合体、水质、生态毒理学等方面^[18-19]。

本研究基于国内外先进评估体系,针对无锡市新吴区海绵城市建设中的河湖健康评价问题,选取新吴区不同代表类型的河道——伯渎港、张塘河、亲水河为研究对象,从河流的形态结构、水动力、水

质状况、水生生物、防洪工程状况、岸线利用管理状况、公众满意状况、供水保证状况等 8 个方面展开全方位研究,综合计算了 12 项水文、水质、水生态和公众意见的指标系数,评估了城区河流的生态健康情况,并基于对 3 条河道的生态健康状况的分析,提出建设符合海绵城市要求的健康河流的生态修复策略。

1 研究区域概况

新吴区地处北亚热带湿润区,四季分明,气候温和。雨季较长,雨水充沛,主要集中在夏季,属湿润地区,日照充足,无霜期长,温、光、水资源较丰富,常见的气象灾害有台风、暴风、阴雨、干旱、寒潮、冰雹和大风等。冬季受北方冷空气侵袭,多北风或西北风,干燥寒冷;夏季受海洋季风影响,湿润炎热,多偏南风;春夏之交多梅雨,夏末秋初多台风。

新吴区境内以平原为主,星散分布着低山、残丘,南部为水网平原,北部低地辟成的水网圩田,河道纵横,地势平坦广阔。南北向河道为通江入湖河道,东西向的为横向沟通河道,水系均沟通,形成河网。

2 研究方法和结果

依评价原理,河流健康评价的基本类型可以为 2 种:一种是建立预测模型(predictive models)方法,如 RIVPACS 和 AUSRIVAS 等。此方法可以把某个研究地带真实存在的物种构建出与在理想状态下与此参考点预测可能出现的物种进行对比,从而对某条河流的生态状况进行评估。另一种方法是采用多指标的方法,通过对观测点进行一系列的生物特征检测,以及观测点的对应统计,将总成绩进行健康评估。最具代表性的方法就是生物完整性指数(ABI, Index of Biotic Integrity)^[20-21],随着此种方法的突飞猛进,现在的 ABI 被广泛应用于对一系列的浮游类生物、无脊椎动物和维管束植物等有关探索中,本研究中将这 2 种方法进行整合,构建了指标体系能更全面评估一个生态系统的科学性与完整性。

河流的生态系统健康情况受多种原因影响。当把水流域作为河流生态系统的外因时,其温度天气、地形地貌以及土地的利用状况,都会影响流域内的河流径流长度、河道宽度、以及土地的基本物质类型等众多非化学水资源特征。建立符合海

绵城市体系下的河流生态系统,需要建立一个良性的水资源流域氛围,从流域的尺度上来看,两边河岸的植被带及流域附近的土地使用变化,对河流生态系统的影响较大。因此,本研究的指标体系加入了河岸植被带的指数(reparian vegetation index, RVI),通过在特定的情况下对河段植被带的特征(含有河岸带植被的掠夺、开采、播种、防洪建坝、防腐蚀/沉降作用,以及防止外来物种入侵等等)进行分析。

本研究中,河流的健康检测主要根据河流的相貌与水资源文化、水资源质量、水中的生物基本特点以及河流的防洪建坝、水岸线用途、提供水资源等一系列的社会服务功能方面。通过调查2019—2020年无锡市新吴区伯渎港、张塘河及亲水河的健康状态,并且分析其天然属性和服务的综合能力,列举出来12项指标进行定量普查(表1),最终获得了各项单项指标以及河流“非常健康”“健康”“亚健康”“轻度不健康”“中度不健康”和“重度不健康”的综合评估成果。

表1 河流健康评价指标体系

评价目标	属性分类	评价项目	评价指标
伯渎港、张塘河、亲水河的生态健康度	自然属性	形态结构	河道岸坡稳定性
			河岸植被覆盖度
		水动力	河流流动性指标
			生态水位达标率
		水质化学	水质污染指数
		水生生物	浮游植物丰富度指数
	着生藻类多样性指数		
	服务功能	堤防完整度	堤防工程达标率
		岸线管理保障度	岸线利用管理程度
		居民满意度	居民满意程度
		供水水量状况	供水水量达标率
			水资源功能区的达标率

2.1 河流水文形态

伯渎港大部分岸线为人群密集活动区(居住与码头等),并建有浆砌石挡墙硬质护坡以及少量桩式护岸,少量岸坡因开垦等影响存在侵蚀与不稳定

现象,岸坡稳定性状况总体为“优”;张塘河大部分岸线为自然岸坡,有少量人类活动区,周围存在较多农田,部分岸坡因开垦等影响存在侵蚀沟,岸坡稳定性总体状况为“良”;亲水河大部分岸线为自然岸坡,有少量人类活动区,周围存在较多亲水平台,岸坡稳定性总体状况为“优”。3条河沿河地块大部分为绿化带、农田、民房,部分河道周围存在厂区、工厂等,大部分岸坡为自然形态植被,岸坡多为草坡、乔木以及灌木等自然植被,植被覆盖状况较好,但部分人居密集及厂区河段因建筑物密集,岸坡占用率较高。3条河的岸坡植被完整性总体健康等级为“良”。亲水河、张塘河河水体流动较好,伯渎港河水水体流动性较为一般,根据3条河断面的实测流量、水位与断面数据资料评估河道流速变化特征,确定亲水河、张塘河的河流流动性总体健康等级为“优”,伯渎港河流流动性总体健康等级为“良”。3条河道采用生态水位目标控制法,根据河道逐日水位数据评估,伯渎港、张塘河及亲水河生态水位达标率健康等级为“优”。

2.2 河流水质

参照《地表水环境的质量标准》(GB3838—2002),综合考虑水资源pH值、水资源中DO质量浓度等几项指标,采用多次监测结果的平均值,以各监测断面的代表性河长作为权重,计算各个断面监测结果的加权平均值。由评价时段内最差水质项目的水质类别代表该河流的水质类别,最终计算伯渎港总体水质状况为IV类,水质健康等级为“中”,张塘河总体水质状况为II类,水质健康等级为“优”,伯渎港总体水质状况为II类,水质健康等级为“优”(表2)。

2.3 水生生物

浮游植物与着生藻类采用Shannon-Wiener生物多样性指数计算。新吴区的3条河流共测定5门27种浮游植物,各河流浮游植物种类测定情况分别为:伯渎港共定量测得5门18种浮游植物,分别属于硅藻门、隐藻门、绿藻门、蓝藻门、裸藻门,以蓝藻门种类居多,优势密度种为微囊藻和螺旋浮丝藻;张塘河共定量测得3门12种浮游植物,分别属于硅藻门、蓝藻门、绿藻门,以硅藻门种类居多,优势密度种为小环藻、直链藻;亲水河共定量测得3门13种浮游植物,分别属于硅藻门、蓝藻门、绿藻门,以绿藻门种类居多,优势密度种为平裂藻、泽丝藻。伯渎港丰水期蓝藻门居多,水体多为浅绿色,其他物种生物量较少,枯水期绿藻门,硅藻门增多;张塘

表2 新吴区3条河2019年8月至2020年7月水质情况

河流名称	$\rho(\text{DO})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	水质类别	水质健康等级
伯渎港	6.41	4.87	1.20	22.46	0.19	IV	中
张塘河	6.87	4.45	0.73	17.07	0.14	II	优
亲水河	7.77	4.65	0.31	19.88	0.08	II	优

河丰水期、枯水期情况较相似,硅藻门生物量最多,其次为绿藻门;亲水河枯水期绿藻门蓝藻门生物量较多,枯水期硅藻门生物量较多。见图1~3。

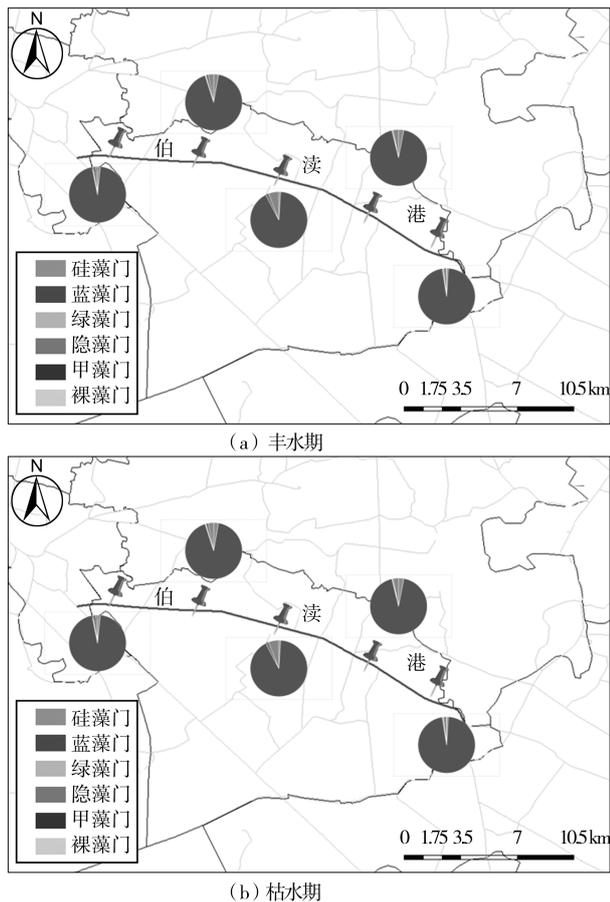


图1 伯渎港浮游植物丰水期及枯水期物种分布

通过 Shannon - Wiener 指数对评价河流的浮游植物多样性情况作出评价,通过计算可知,伯渎港浮游植物 Shannon - Wiener 指数为1.832,浮游植物多样性评价为“良”,张塘河浮游植物 Shannon - Wiener 指数为 1.856,浮游植物多样性评价为“良”,亲水河浮游植物 Shannon - Wiener 指数为 1.749,浮游植物多样性评价为“良”。

新吴区3条河流共测定3门22种着生藻类,各河流着生藻类种类测定情况分别为:伯渎港共定量测得3门11种着生藻类,分别属于硅藻门、绿藻门、

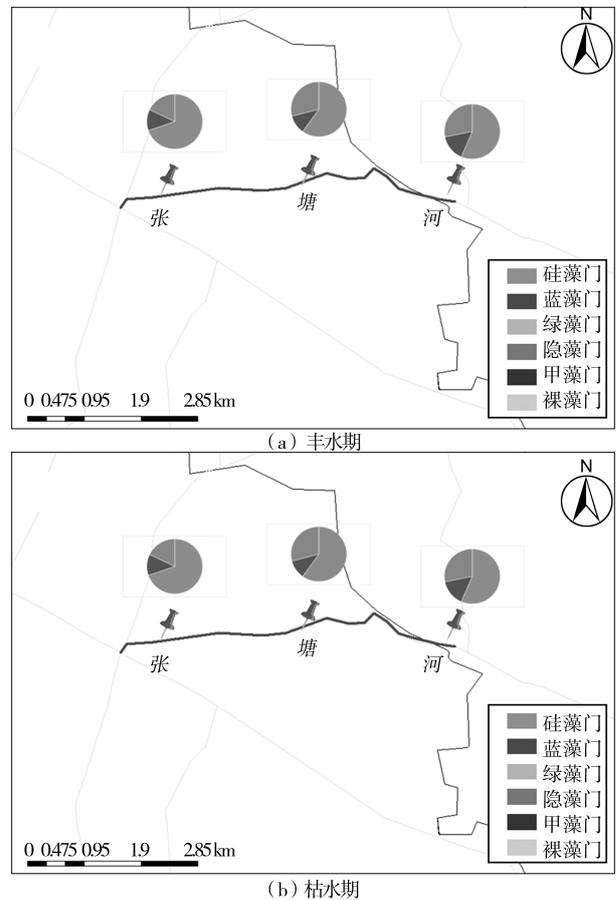
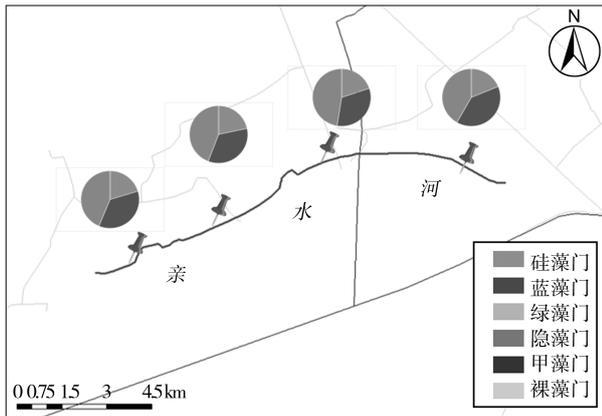


图2 张塘河浮游植物丰水期及枯水期物种分布

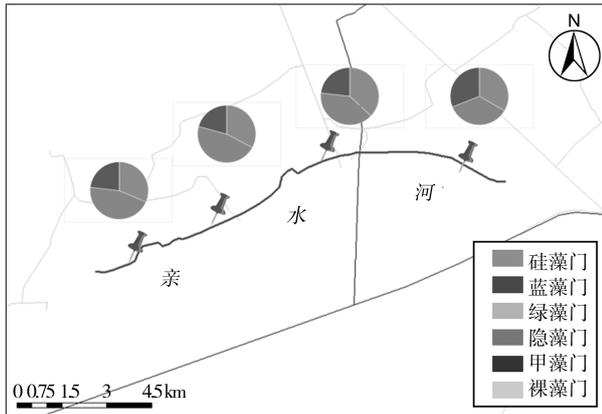
蓝藻门,以硅藻门种类居多,优势密度种为微小异极藻;张塘河共定量测得3门12种着生藻类,分别属于硅藻门、蓝藻门、绿藻门,以硅藻门种类居多,优势密度种为鱼腥藻、泽丝藻、隐头舟形藻;亲水河共定量测得3门10种浮游植物,分别属于硅藻门、绿藻门、蓝藻门,以蓝藻门种类居多,优势密度种为颤藻、空球藻。

伯渎港丰水期着生藻类硅藻门居多,其次为蓝藻门,枯水期绿藻门含量增长,高于蓝藻门;张塘河丰水期硅藻门居多,枯水期蓝藻门生物量增加,超过硅藻门生物量;亲水河枯水期及丰水期着生藻类种类生物量较为平均,见图4~6。

通过 Shannon - Wiener 指数对评价河流的浮游



(a) 丰水期



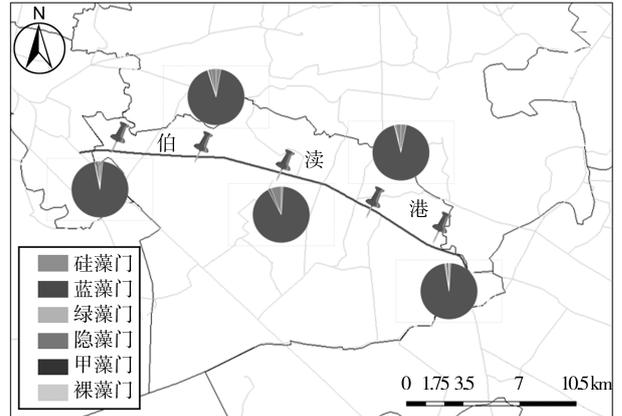
(b) 枯水期

图3 亲水河浮游植物丰水期及枯水期物种分布

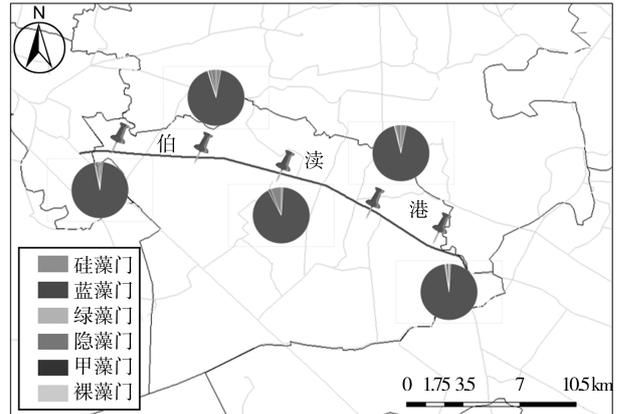
植物多样性情况作出评价,分析计算可知,伯渎港河着生藻类 Shannon - Wiener 指数为 1.429,着生藻类多样性评价为“中”,张塘河着生藻类 Shannon - Wiener 指数为 1.358,生藻类多样性评价为“中”,亲水河 Shannon - Wiener 指数为 1.833,生藻类多样性评价为“良”。

2.4 河流社会服务功能

伯渎港为城市内河,是新吴区境内引排干河之一。其现状是大部分的河道岸坡建有护岸部分镇区段为天然土坡,自然边坡多在 1:1.5 左右,稳定性较好。伯渎港枢纽以西为 200 年一遇设计标准,伯渎港枢纽以东为 100 年一遇设计标准,堤防工程达标率评价结果为“优”;张塘河为半城市内河,主要功能为供水、排涝,其现状大部分河道为天然土坡,部分镇区段建有护岸,自然边坡多在 1:1.5 左右,稳定性较好,堤防工程达标率评价结果为“优”;亲水河是各水域水体进入太湖前的缓冲河流,拦截地表径流及各类污染物质进入贡湖水域,在改善太湖水环境中发挥着重要的作用,现状主要为自然岸坡,稳定性较好,堤防工程达标率评价结果为“优”。



(a) 丰水期



(b) 枯水期

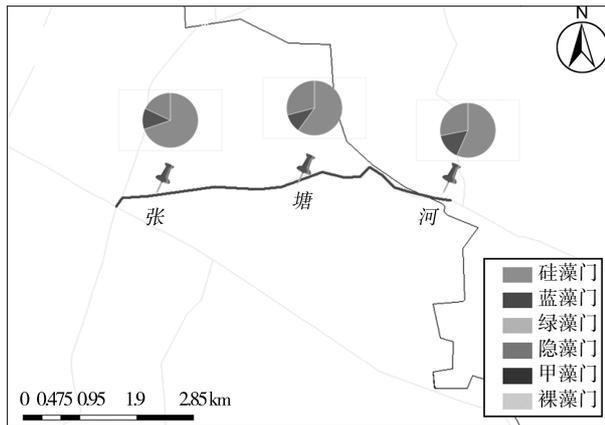
图4 伯渎港着生藻类丰水期及枯水期物种分布

伯渎港流经城区和郊区,岸坡占用因素主要为民居、厂房以及桥梁等建筑物,镇区段岸线占用比例较高,根据河道两岸踏勘调查结果统计,河流岸线利用管理状况评价结果为“良”;张塘河主要流经郊区,岸坡占用因素主要为农业居民区以及桥梁等建筑物,根据河道两岸踏勘调查结果统计,河流岸线利用管理状况评价结果为“优”;亲水河不流经人类生活区,岸坡占用因素主要为少量桥梁等建筑物,根据河道两岸踏勘调查结果统计,河流岸线利用管理状况评价结果为“优”。

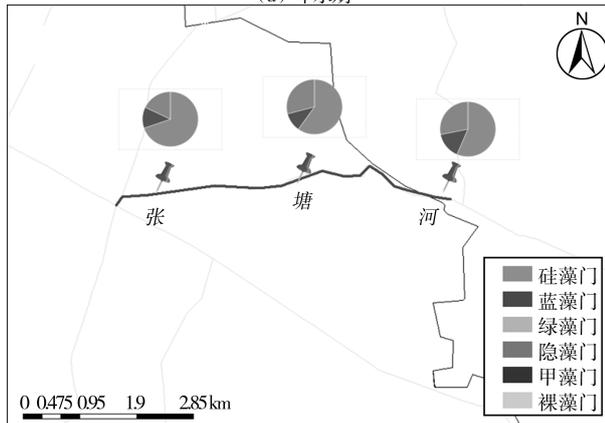
针对河流的美景、美学价值,以及其他综合性服务功能满意程度的调查系列,经对伯渎港、张塘河、亲水河两岸居民及当地相关管理部门发放公众参与调查问卷统计分析,河流公众满意程度评价结果全部为“优”。

按照河道内逐日水位统计,全年河道内水位在 2.9 ~ 4.6 m,河道内水位均能满足河道供水需求。伯渎港、张塘河及亲水河的供水水量达标率评价结果全部为“优”。

依照严格的水资源管理制度的相关要求(既水功能区的评价需要参照《地表水环境质量标准》



(a) 丰水期



(b) 枯水期

图5 张塘河着生藻类丰水期及枯水期物种分布

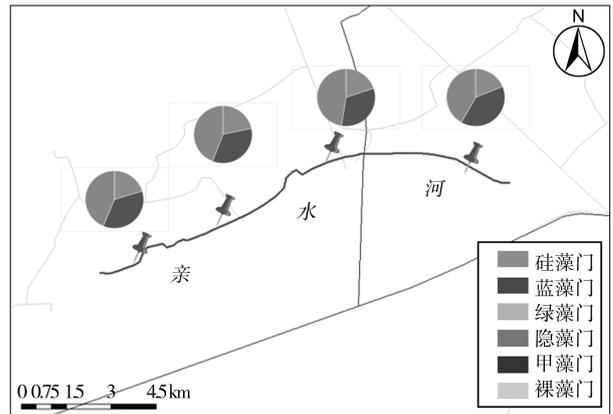
(GB3838—2002)),且全面综合 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 2 项指标,结果表明,2019年8月至2020年7月内新吴区3条河道的引水保护、工业与农业用水区所有检测点的监测结果都符合地表水环境质量要求,总指标评价结果全部为“优”。

2.5 综合评价指标调查结果

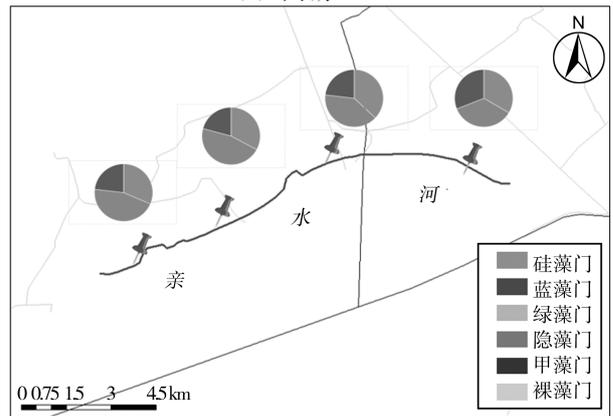
新吴区伯渎港12项评价指标中,河流水质、浮游植物、底栖动物和岸线利用管理指标健康状况一般,处于“中”状态;植被结构完整性、河流流动性和居民满意度指标健康状况偏好,健康程度为“良”;岸坡稳定性、生态水位达标率、堤防工程达标率、水资源功能区达标显示结果和供水保证率指标健康状况均为“优”(表3)。

3 河流健康的修复策略

根据调查和指标评估结果,新吴区以伯渎港为代表的城市内河健康问题主要在于河内生物多样性偏低和河流水质较差;以张塘河为代表的半城市内河健康问题主要在于河内生物多样性偏低和河流稳定性较差;以亲水河为代表的自然河流健康情况较好,基本不具有问题。



(a) 丰水期



(b) 枯水期

图6 亲水河着生藻类丰水期及枯水期物种分布

3.1 主要问题及原因

对海绵城市城区河湖的正确利用和维护是城市的水资源得以平衡、持续,且走向更完善的首要任务。河道的治安工程,只是对河岸的硬化覆盖情况加以重视,仅考虑了河流的防洪特征,却忽视了河流的资源特征以及生态功能。不合理地硬化河道,会损害河湖生态健康体系。另外,不断地使得城区河湖硬化与渠化,使得众多居民与水资源的天然亲密度大大降低。河道具有自我净化能力,并且还存在很多水生生物、水生植物和各种各样的微生物,都可以起到降解河流污染的作用。同时,合理地改善和修复河道的衬底和护衬,也可以对水污染问题进行部分治理^[22]。况且,河湖经过硬化衬底和护衬的处理,还可以阻止外来生物的危害,以防止河湖通道的水资源质量恶性发展^[23]。

另外一个造成城市河流问题的原因是忽视河道的存在法则。城市里面的河道大多数都需要具有排除内涝、防止洪水突袭、成为完善生态环境的景观观点等综合功能^[24]。不过随着城市开发力度加大,不断开采、扩建河道两岸地域,破坏了城市河道排污的管理防护功能,众多工厂的废物、废水

表3 新吴区3条河12项指标评估结果

评价指标	伯渎港		张塘河		亲水河	
	指标值	评价结果	指标值	评价结果	指标值	评价结果
河湖岸坡的稳定性	97.65	优	85.33	良	87.62	优
河湖岸坡植被覆盖度/%	74.42	良	74.63	良	96.36	良
河流的流动性情况	0.33	良	0.75	优	0.88	优
生态水位的达标率/%	1	优	1	优	1	优
河湖的水质情况	Ⅳ类	中	Ⅱ类	优	Ⅱ类	优
河湖浮游植物的丰富度	1.832	良	1.856	良	1.749	良
河湖着生藻类的多样性	1.429	中	1.358	中	1.833	优
附近堤防工程的达标率/%	100	优	100	优	100	优
附近岸线的利用管理率/%	85.53	良	95.09	优	98.17	优
居民的满意程度/%	93.07	优	93.85	优	95.48	优
供水水总量的达标率/%	100	优	100	优	100	优
水资源功能区的达标率/%	100	优	100	优	100	优

和大量的居民生活污水不经过处理就直接排入河道,从而使得河湖水质受到了不可逆的严重损害,水质逐渐恶化,河道的健康生态环境也遭受到了毁灭性破坏。

3.2 修复策略

建设海绵城市,将生态文明建设与城市发展相融合,这在无锡市城市发展中体现得较为明显,既可直观地了解无锡基础装备的建设现状,也可加快传统治水观念的转变^[25]。海绵城市建设,按照生态优先的定律、将不加修饰的天然途径与相对应的人工治理方法统一,使得城区中的河湖水资源系统成为收藏雨水的重要中间体,这对于城市的科学有机构造具有极大的用处^[26-27],所以,想要构造并且完美演绎出城市的“海绵体”,就需要从考虑河道排污与净化改造,大环境与微环境的平衡,充分利用雨水及节约用水,以及加强城区不受人类干扰的水资源自然生态自我修复功能等多方面入手,完成多方面相互协调的水资源系统健康发展,并通过大幅度地提升城区河湖内部的全部特征,以期达到城区河湖健康功能综合、有效利用,既满足了城市居民的居住需求,又降低了城区工业和居民用水的安全隐患,使得城区整体经济和全员社会走向绿色健康的

发展途径^[28]。

对无锡市新吴区3条不同状况下的河流健康问题的治理需要,应对不同角度的角度来进行。城市河道作为城市生命、生态系统非常关键的部分,修复与管理的好坏,将直接影响城市未来的生存与发展速度。健全的生态系统是物质流和能量流的统一整体,更是整座城市得以平稳运转的基础^[29-30]。不过,根本性修复并不是使已受到损害的城市河道完全恢复到没有人类干扰的原始状态,而是综合考虑城市的河道作用及特征,使用独特的科技方法,符合自然发展规律地进行补救。对于城市内河,应注重水质及水生态的保护,减少人类对生态系统的影响。对于半城市内河,应加强其岸坡稳定性,保障其基本功能,同时保护原有的水生态。对于一直维持在自然情况下的河流,应积极保留其原有的水生态环境,并针对日后的开发进行水生态安全评价,使其在保障原有条件下发挥其功能。

在进行健康生态城区河湖的恢复时,可以从以伯渎港为代表河道的健康生态河堤建设开展。随着人工智能和计算机模拟技术对自然灾害预测的增强,如说对于洪涝灾害的分析与预测能力的快速提升,城市的河堤建设,将会从硬性实施基础管控

措施向加强绿色生态健康环境柔性建设方向前进,并且会在科学防控措施逐步完善时,遵循生态系统自然发展的需求,同时综合改善众多生物的生存条件和生态关系。

特别是在修复策略的制定中,应该突出以人为本^[31-33]。城区河流的有效治理与生态修复不单要从生态系统的健康环保方面进行考虑,还需要为提高人类的生活品质和优良环境创造有利条件^[34],即在修复健康生态系统的基础上,尽量增强自然山水景观和建设更好的中国水文化。

参考文献:

- [1] CHAN F K S, GRIFFITHS J A, HIGGITT D, et al. "Sponge City" in China—a breakthrough of planning and flood risk management in the urban context [J]. *Land Use Policy*, 2018, 76(4):772-778.
- [2] TOWNSEND C R. Concepts in river ecology: pattern and process in the catchment hierarchy [J]. *Large Rivers*, 1996, 10(1/2/3/4):3-21.
- [3] RANDRUP T B, BUIJS A, KONIJNENDIJK C C, et al. Moving beyond the nature – based solutions discourse: introducing nature – based thinking [J]. *Urban Ecosystems*, 2020, 1(2):1-8.
- [4] 刘合拴. 海绵城市理论及其在城市规划中的实践构想 [J]. *中华建设*, 2015, 127(12):86-87.
- [5] HE B J, ZHU J, ZHAO D X, et al. Co – benefits approach: Opportunities for implementing sponge city and urban heat island mitigation [J]. *Land Use Policy*, 2019, 86(2):147-157.
- [6] 吴阿娜, 杨凯, 车越, 等. 河流健康状况的表征及其评价 [J]. *水科学进展*, 2005, 25(4):602-608.
- [7] 赵衡, 闫旭, 王富强, 等. 基于 PSR 模型的三门峡库区湿地生态系统健康评价 [J]. *水资源保护*, 2020, 36(4):21-25.
- [8] 王建平. 海绵城市建设与城市水污染治理职责:以我国《环境保护法》第 2 条效用性为视角 [J]. *江苏大学学报(社会科学版)*, 2015, 17(5):66-70.
- [9] 高峰. 建设海绵城市 还水于自然 [J]. *绿色中国*, 2015(22):51-52.
- [10] ROUX D J. Strategies used to Guide the Design and Implementation of a National River Monitoring Programme in South Africa [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2001, 69(2):131-158.
- [11] 何梁, 陈艳, 陈俊贤. 河流健康评价研究现状与展望 [J]. *人民珠江*, 2013, 34(6):1-4.
- [12] 文伏波, 韩其为, 许炯心, 等. 河流健康的定义与内涵 [J]. *水科学进展*, 2007, 6(1):140-150.
- [13] LI L, COLLINS A M, CHESHMEHZANGI A, et al. Identifying enablers and barriers to the implementation of the green infrastructure for urban flood management: A comparative analysis of the UK and China [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 54(5):1267-1270.
- [14] 杨文慧, 严忠民, 吴建华. 河流健康评价的研究进展 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2005(6):5-9.
- [15] 陈静生. 河流水质全球变化研究若干问题 [J]. *环境化学*, 1992, 7(2):45-53.
- [16] ROGERS K, BIGGS H. Integrating indicators, endpoints and value systems in strategic management of the rivers of the Kruger National Park [J]. *Freshwater Biology*, 1999, 41(2):439-451.
- [17] 董哲仁. 河流保护的发展阶段及思考 [J]. *中国水利*, 2004(17):16-17, 32-35.
- [18] RAVEN P J, HOLMES N T H, NAURA M, et al. Using river habitat survey for environmental assessment and catchment planning in the UK [J]. *Hydrobiologia*, 2000, 149(72):359-367.
- [19] LADSON A R, WHITE L J, DOOLAN J A, et al. Development and testing of an Index of Stream Condition for waterway management in Australia [J]. *Freshwater Biology*, 1999, 41(2):234-258.
- [20] 刘恒, 涂敏. 对国外河流健康问题的初步认识 [J]. *中国水利*, 2005(4):19-22.
- [21] 金旸. 基于 GIS 的县(市、区)生态环境功能区划及管理方法研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2012.
- [22] 耿雷华, 刘恒, 钟华平, 等. 健康河流的评价指标和评价标准 [J]. *水利学报*, 2006, 22(3):253-258.
- [23] KLEYNHANS C J. A qualitative procedure for the assessment of the habitat integrity status of the Luvuvhu River (Limpopo system, South Africa) [J]. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1996, 5(1):45-61.
- [24] 梁启震, 张现宝, 胡润婷. 城市内河的问题及其治理措施 [J]. *河南水利与南水北调*, 2015(14):137-138.
- [25] WANG Y, LIU X, HUANG M, et al. Received vs. given: Willingness to pay for sponge city program from a perceived value perspective [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256(3):1204-1279.
- [26] 李国英. 黄河治理的终极目标是“维持黄河健康生命” [J]. *人民黄河*, 2004, 20(1):1-2, 46.
- [27] DENG H, WANG Q, CAI Q. Watershed ecology—New discipline, new idea and new approach [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 6(3):114-135.
- [28] NGUYEN T T, NGO H H, GUO W, et al. Implementation of a specific urban water management – Sponge City [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 652(1):147-162.

(下转第 49 页)