城市中小河道沉水植物盖度和生物量计算方法——基于上海市的调查分析*

张 群^{1,2}, 刘家霖¹, 朱 义^{1,2}, 张春松¹, 宋 晴¹, 崔心红^{1**}

(1: 城市困难立地生态园林国家林业和草原局重点实验室, 国家林业和草原局城市困难立地绿化造林国家创新联盟, 上海城市困难立地绿化工程技术研究中心, 上海市园林科学规划研究院, 上海 200232)

(2: 生物多样性与生态工程教育部重点实验室, 长江河口湿地生态系统国家野外科学观测研究站, 复旦大学生命科学学院生物多样性科学研究所, 上海 200438)

摘 要: 沉水植物的盖度和生物量是衡量浅水系统恢复程度的重要指标, 但城市河道沉水植物的生境由于人为干扰及修复过程, 具有较高的异质性, 使得城市河道沉水植物盖度和生物量测定更加困难, 目前尚无准确、快速的计算方法. 本研究以上海市内中小河道为研究对象, 通过实测 4 条河道 330 余个代表样方的沉水植物生物, 研究了基于采样次数的沉水植物单位面积生物量计算方法、采样布点方法和河道总盖度测算方法. 结果显示: (1) 至少需 30~35 次面积为 0.04 m² 的采样可准确估算上海中小河道内沉水植物单位面积的生物量; (2) 样点设置可选用随机或等距设置; (3) 利用 Rededge-M 多光谱相机对河道拍摄 5 波段影像, 并进行 5~8 次重复处理, 可较为准确获得整条河道沉水植物盖度. 本研究可为城市中小河道沉水植被恢复、河道的分类管理与保护提供参考及依据.

关键词: 城市河流; 大型水生植物; 功效分析; 数据合并; 多光谱相机; 恢复; 健康评价; 上海

Calculation method of submerged plant biomass in small and medium urban rivers: Based on the investigation and analysis of Shanghai City*

Zhang Qun^{1,2}, Liu Jialin¹, Zhu Yi^{1,2}, Zhang Chunsong¹, Song Qing¹ & Cui Xinhong^{1**}

(1: Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Landscaping of Challenging Urban Sites, National Innovation Alliance of National Forestry and Grassland Administration on Afforestation and Landscaping of Challenging Urban Sites, Shanghai Engineering Research Center of Landscaping on Challenging Urban Sites, Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, Shanghai 200232, P.R.China)

(2: Ministry of Education Key Laboratory of Biodiversity Science and Ecological Engineering, National Observations and Research Station for Wetland Ecosystems of the Yangtze Estuary, Institute of Biodiversity Science, School of Life Sciences, Fudan University, Shanghai 200438, P.R.China)

Abstract: The coverage and biomass of submerged plants are the key indicators of the restoration level of shallow water systems. But the habitat of submerged plants in urban rivers usually has high heterogeneity because of the human disturbance and restoration process. This makes it more difficult to determine the coverage and biomass of submerged plants in urban rivers and lacks an accurate and fast method. In this study, we measured the biomasses of submerged plants in more than 330 representative plots in 4 rivers to investigate the method of calculating the biomass per unit area of submerged plants using the numbers of samplings, as well as the methods of sampling and calculation of total coverage of submerged plants in rivers. The results showed that: (1) At least 30 to 35 samplings (0.04 m²) are required to accurately estimate the biomass per unit area of submerged plants in small and medium rivers in Shanghai; (2) Random or equidistant setting can be selected for sample setting; (3) Getting the band-5 images of the river channels using the Rededge-M multi-spectral camera image and repeating the process for 5 to 8 times, the coverage of sub-

* 2021-04-09 收稿; 2021-07-19 收修改稿.

上海市科委科技创新行动计划项目(19DZ1204505)资助.

** 通信作者; E-mail: kyxxinhongcui@163.com.

merged plants in the rivers can be obtained with higher accuracy. This study provides crucial reference and knowledge for the restoration of submerged vegetation in small and medium urban rivers and the management and protection of rivers.

Keywords: Urban rivers; macrophytes; power analysis; data binning; multispectral camera; revegetation; health evaluation; Shanghai

城市河流作为区域重要的生态空间,提供水文调控、气候调节、污染消纳、休闲游憩、生物多样性维持等多种生态系统功能与服务^[1-4],在维护城市与区域生态安全格局方面发挥着重要作用^[5].因受到长期高强度人为活动干扰,城市河流比自然河流面临更高的渠道化、硬化、水质恶化等威胁^[6],水域生物种类和数量明显降低,生态系统健康及其维持机制遭到严重破坏^[7-8],城市河流生态修复已成为该领域研究和管理实践的热点问题^[3].城市中小河道数量众多,处在汇水区接纳、滞留和调蓄径流排水和点面源污染的前缘地带^[9-10],是现阶段水污染治理和生态修复的主要对象^[11].近十余年来,随着中国黑臭水体治理、污染源整治及河湖长制等一系列水环境改善的重大政策实施,取得了水质恶化趋势明显遏制、水质指标初步改善的重要成效.为进一步提升及修复中小河道水环境与水生态,恢复沉水植物成为重要举措之一.

沉水植物作为水生生态系统的重要组成部分和初级生产者之一,在物质循环和能量流动中发挥重要的调控作用^[12-13],明确其盖度和生物量,是开展水生生态调查、评价和修复的基础性内容^[14-17].沉水植物覆盖度及生物量的调查方法主要包括样方法、遥感解译法和水下声呐法等,国内外学者主要在自然河湖水域开展相关工作.传统上现场调查选择代表性沉水植物分布区,采用方形或圆形沉水植物采样器,在自然湖泊设置多个样带和样方估测生物量^[18-21];利用高分遥感卫片、水下回声探测等技术手段,与现场调查监测数据比对,构建了多种沉水植物盖度和生物量的估测模型^[22-26].由于城市中小河流的沉水植物主要以人工栽植恢复的单一优势种群为主,并且沿岸区段化用地状况差异造成的空间异质性较大,高楼、乔木等沿岸光影对狭长水域数据产品的影响,制约了遥感、声学等技术估测准确性,在城市区域中小河流开展采样布设方式、采样次数及单位面积生物量的相关关系等方面的研究较少.

本研究以上海中小河道为研究对象,基于2019年对全市45条中小河道、130个调查区段研究基础上,选择分布有沉水植物分布的4条典型城市中小河道,开展采样数量、采样方法、盖度计算等调查方法对沉水植物生物量估算准确性的影响研究,主要解决如下技术问题:(1)对于城市中小河道沉水植物的单位面积生物量估算,如何确定最小采样次数和样点布设方法?(2)探索利用多光谱现场调查技术,如何进行城市中小河道沉水植物盖度估测.以期在城市河道沉水植被调查和评价提供科学依据,为城市河道生态系统健康精准化管理提供技术方法.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

上海市2019年全市河道46392条,总长度29862.14 km,平均长度为0.644 km,河网密度达4.71 km/km²,其中市、区、镇(乡)管河道3242条,其余93%以上的河道属于村管及其他河道^[9].本研究的中小河道是指除了通航、水资源调度、排洪等主导功能以外的城市河道,一般通过设置涵闸进行片区内水利控制.基于Google Earth影像目视判读、上海市水利分片划分及现场踏查,并根据2019年在全市选择45条中小河道,每条河道3~4个区段,每个调查区段为沿河长度50 m,共计130个调查区段,其中记录到沉水植物调查区段共计27个,仅占总调查区段的20.8%.并测定沉水植物总盖度(多盖度等级法,采用目测法估计河道内所有沉水植物单位面积内植物茎叶对土地面积的覆盖程度,通常划分为5个等级和2个辅助等级^[27])、电导率、pH、蓝绿藻、浊度等指标.分布有沉水植物区段河道的浊度介于0~85.57 NTU之间,且沉水植物总盖度为COP1及以上(盖度介于5%~25%)的河道浊度小于30 NTU,浊度大于30 NTU的区段,其沉水植物仅零星分布,总盖度均小于5%.于2020年9—10月及2021年5月(沉水植物生物量较多及较少的两季^[18-19,28]),选取进木港(350 m)、三友河(640 m,两季)、北潮港区段(1000 m)、梅陇港区段(1100 m)4条以苦草(*Vallisneria spiralis*)为优势种,竹节水松(*Cabomba caroliniana*)、黑藻(*Hydrilla verticillata*)、穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)为伴生种的中小河道(图1)开展调查,不同河道内各沉水植物比例不同.上述河道除雨季排涝间歇

性人工降低水位外,水流大多处于静止状态. 2020 年 6 月,4 条河道 5 个区段水质调查指标(电导率、pH、浊度、叶绿素 *a*、高锰酸盐指数、TN、TP)见表 1.

图 1 调查河道现场图(北潮港为南北方向区段,梅陇港为东西方向区段)
Fig.1 Field map of river course (Beichao Port is a north-south section, Meilong Port is an east-west section)

表 1 4 条调查河道基本水化学指标
Tab.1 Basic hydrochemical indexes of four rivers

河道名称	电导率/ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	浊度/ NTU	Chl. <i>a</i> / ($\mu\text{g}/\text{L}$)	COD _{Mn} / (mg/L)	TN/ (mg/L)	TP/ (mg/L)
三友河	0.6157	7.1033	3.5611	7.4915	3.7333	1.5191	0.1672
梅陇港	0.6545	6.5967	5.4233	4.5476	3.2444	1.5680	0.3273
进木港	0.6618	6.9400	3.0089	8.1534	3.6444	1.1579	0.1090
北潮港 1	0.8167	6.8067	4.0578	22.5222	4.1481	1.5543	0.1754
北潮港 2	0.8763	7.5533	10.7489	4.9780	3.7185	1.6132	0.2719

1.2 最少采样数量计算

沉水植物在生长过程中,密度及生物量随时间的变化而变化,一般在每年夏季达到最大值^[19],且由于植株长度、密度等差异,导致单位面积的沉水植物生物量之间也存在差异^[18],为准确计算沉水植物单位面积生物量所需的最少采样数量,结合理论和实际操作两方面,利用功效分析法(power analysis)^[29]及数据合并法(data binning)^[30]进行计算.

本研究使用 Cohen 提出的适用于 *t* 检验的较大效应值基准^[31]来计算最少采样次数,然后据此设计采样方案以估算沉水植物单位面积的平均生物量. 同时,在主要优势种为苦草或竹节水松的 3 条(或区段)中小河道内利用自制沉水植物采样器(图 2)采集沉水植物. 采样器的其固定杆和采样钳通过伸缩杆铰接连接,采样面积固定,拉动驱动柄和手柄后采样钳闭合,切断沉水植物地上部分. 采集 57~65 个 0.2 m×0.2 m 的样

图2 沉水植物采样器(1 驱动柄、2 固定杆、3 铰接座、4 弹簧、5 驱动杆、6 连杆、7 铰接杆、8 伸缩杆、9 采样钳、11 手柄)

Fig.2 Submerged plant sampling apparatus (1 driving handle, 2 fixed rod, 3 hinged seat, 4 spring, 5 driving rod, 6 connecting rod, 7 hinged rod, 8 telescopic rod, 9 sampling clamp, 11 handle)

单位面积的盖度。

由于植物均进行光合作用,所以各类绿色植物具有很相似的反射波谱特性,其特征是在可见光波段 $0.55\ \mu\text{m}$ (绿光)附近有反射率为 $10\% \sim 20\%$ 的一个波峰。充分利用该特性,以及绿光对水的穿透性较强,我们选择绿光照片进行沉水植物盖度识别与提取。沉水植物盖度测算步骤如下:(1)利用 Rededge-M 多光谱相机(图3)拍摄5波段影像;(2)提取出其中绿光波段的数据,同时转换遥感影像的数据格式和地图投影,并利用 ArcGIS 提取波段数据信息,进行质量控制;(3)利用 Arcmap 工具,对绿光原始波段影像进行重分类,提取沉水植物的色彩阈值范围;(4)目视选择影像中沉水植物分布高、中、低的3个区域,生成3个对应矢量图层;(5)以矢量图层为边界提取重分类后的绿波段影像,并进行重采样(resample);(6)重采样时仅保留沉水植物敏感的像素阈值范围并赋值为1,其余像素数值均赋值为0;(7)针对每个小样方,计算像素值为1的占整个样方像素点综合的比例,即为该样方沉水植物盖度。

如图3b 案例所示,高盖度 = $16605 / (16605 + 34695) = 32.4\%$,中盖度 = $10026 / (10026 + 31878) = 23.9\%$,低盖度 = $5198 / (5198 + 37324) = 12.2\%$ 。进而,计算得出该影像拍摄区域的沉水植物盖度为 $22.8\% \pm 8\%$ 。

1.5 数据处理及分析

1.5.1 最小采样数 对于功效分析法,一般的功效阈值为 $0.8^{[36]}$,本研究设置功效值(置信度水平)为 90% ,采用 0.8 作为 t 检验的较大效应值基准^[31],在具有 95% 的准确性下,计算最少采样次数以估算河道内沉水植物单位面积的平均生物量。

数据合并法,首先计算采样次数对应的单位沉水植物生物量,即第10次为前10次(以采样顺序编号的次数)生物量总和的均值,第20次为前20次生物量总和的均值,依此类推;其次,将所得均值以4为单位分段获得14~16组数据,计算每组数据的均值及标准差;再次,利用 Sigmaplot 作图软件,以单位面积生物量作为Y轴,取样次数作为X轴画出散点图(图4);最后,添加所有数据的均值作为参考线,探索取样次数与单位面积生物量之间的关系,计算最少取样数。

方,采样次数是估算中型湖泊沉水植物生物量样方的 $2 \sim 3$ 倍^[19-20],分析采样次数与单位面积沉水植物生物量之间的关系,估算最少采样次数。沉水植物离开水体后,失水较快,鲜重随时间变化差异较大^[32]。为减少差异,将夹起的沉水植物按种类分开后,适当沥干表面水分,迅速称重。

1.3 断面设置及采样方法

河道沉水植物采样点的设置,一般采用系统布点规则,即在多条河流交汇的河段随机布点^[33];也有按照河岸地形地貌在上中下游分别设置采样点^[34]。但是针对单条河道的沉水植物分布,由于河道长度及植物分布的差异,不同采样方法可能对生物量的估算产生影响。因此,本研究比较等距样线法(根据河道长度等分,在中间的等分点设置样方)和多断面样点法(根据沉水植物长势将河道划分为10个断面,每个断面设置4~5个样方)估算同一条河道单位面积生物量的准确性。在北潮港内先以等距离分隔采集43个样方,记为T1组;再根据河道内沉水植物的目视估算盖度,选定10个断面,每个断面采集3~5个样方,共计42个,记为T2组。

1.4 沉水植物盖度计算

城市河道沉水植物盖度是城市河道生态修复技术中的重要指标,但以往的调查方法与技术主要依靠样方取样后的测定与目测估算。随着技术的发展,多光谱技术在大尺度已经广泛实现了地表不同生态系统植被盖度的高精度测算。因此,受 Song 等研究的启发^[35],在调查河道上方 $2\ \text{m}$ 处,采用 RedEdge 多光谱相机拍摄照片,利用植被指数等空间计算叠加方法提取沉水植物分布,进而计算其

图 3 Rededge-M 多光谱相机 (a); 绿光波段照片中沉水植物分布高、中、低 3 个区域盖度计算案例示意图 (b)
Fig.3 Rededge-M multispectral camera (a); Schematic of coverage calculation for submerged plants in the green band images: high, medium, and low coverages (b)

图 4 三友河 (a) 和梅陇港、进木港 (b) 取样次数与沉水植物生物量的关系
Fig.4 The relationship between the sampling frequency and the biomass of submerged plants in Sanyou River (a), Meilong and Jinmu Ports (b)

1.5.2 不同采样方法的差异比较 对获取于北潮港的两组数据合并后,进行正态性及方差齐性检验,发现数据不符合正态分布,但方差满足齐次性. 因此,为检验 T1 与 T2 的组间差异,采用威尔科克森 (wilcox) 秩和检验进行分析.

所有的分析工作在 R 4.0.2 软件中进行^[37].

2 结果与分析

2.1 中小河道采样数及采样方法的确定

采用功效分析法,在 90% 置信区间下,以效应值 0.8 为基准值, $n \approx 34$, 即样方取 34 能较为准确地代表整个河道的沉水植物生物量. 以徐汇区三友河为例,该河道主要分布人工种植的苦草,并伴生少量的自然生长的黑藻及金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum*). 通过在 $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ 地块上连续采集沉水植物地上生物量,建立采样次数均值生物量与所有样本生物量之间的关系,以表征小样方的空间异质性^[38]. 结果表明,当取样次数达到 28~32 次后的预测生物量 (图 4a 箭头所示) 与该河道沉水植物单位面积生物量均值较为接近,该取样次数可较为准确地估算河道沉水植物生物量. 以相同方法,对梅陇港和进木港的最小采样数进行计算,结果如表 2、图 4b 所示. 最少取样数介于 32~36 次之间. 结合能效分析方法的结果 (34 次),因此建议对上海市单条中小河道沉水植物生物量估算的最少取样次数为 30~35 次. 同时,研究发现等距样线法和多断面

样点法对估算河道单位面积生物量的准确性差异不显著($P=0.993$)(图 5).

表 2 3 条河道最少取样次数
Tab.2 Minimum sampling numbers of three rivers

河道名称	采样次数	生物量均值/(g/m ²)	最少取样次数	沉水植物种类
三友河(5 月)	65	158.50	32	3
三友河(10 月)	62	203.26	28	3
梅陇港	57	188.35	32	4
进木港	64	191.07	36	3

图 5 北潮港 2 种取样方法的分组差异
Fig.5 Group differences between the two sampling methods in Beichao Port

植物盖度在 44% 水平上,标准差约 25%. 与现场人工评估的沉水植物盖度结果相比(约 50%),光谱影像计算与现场目视评估结果相近.

图 6 9 个拍摄断面的位置(a)和进木港沉水植物盖度影像学提取结果(b)
Fig.6 Nine locations for imaging sections (a) and image extraction results of submerged plant coverage in Jinmu Port (b)

3 讨论

3.1 河道长宽对单位面积生物量估算的影响

城市河道生物量的计算应首先对河道长度、驳岸类型、河道内沉水植物的种类及分布进行全面的调查

和记录,再采用随机或等距方式设置断面及样点.上海市2019年全市河道46392条,总长度29862.14 km,平均长度为0.644 km,其中城市中小河道仅包含在市、区、镇(乡)管河道的3242条之内,其平均长度均在1 km之内,且不具有通航功能的中小河道河宽一般小于8 m(调查数据,未发表),河宽差异较小.因此对于上海绝大多数的中小河道,长度和宽度对取样次数的影响较小,单条河道30~35次的取样次数适用性较高.但是,对于特殊的长度超过1 km的河道中小河道,该取样次数的适用性还需要进一步研究.

3.2 自然及人工水域沉水植物生物量研究方法的差异

自然水域例如湖泊的底部较为平坦,沉水植物分布连续且均匀,通过随机的10次采样,即能较为准确地估算单种沉水植物生物量^[18].而对于多种沉水植物生物量的动态研究,则需设置多个断面,根据断面的长度等距设置2~8个样方,共计30个样方,亦能准确估算^[19].但上海城市中小河道属平原河网河流结构,受自然条件和城市化的双重影响,其中的井网结构是人为构筑的河流结构^[11],河道底部除底泥外,还掺杂有少量的石块、水泥、建筑垃圾等硬质材料.对上海4条河道调查时发现,硬质材料一般分布于河道两侧,呈不连续性和随机性,可能是河道施工、河岸改造过程中遗留的少量建筑废弃物,影响了沉水植物的定植与存活.因此,利用人工样方法调查城市中小河道沉水植物的生物量,增加采样次数可降低异质性带来的误差.但是,随着采样次数、河道长度、河网密度的增加,导致河道调查的人力、时间等投入提高,为有效获取及监测反映河道沉水植物的生物量指标数据,需要权衡投入与产出、成本与效益之间的关系.在明确调查目标的基础上,结合研究区域的河网遥感图像及水利片区划分,可选取不同用地类型、交汇数量多、具有明显差异的能代表河网特征的河道,再根据现场状况选取适宜的断面及样点进行调查和采样.

3.3 沉水植物优势种覆盖度的多光谱监测方法

利用卫星数据对水体水生植被的监测主要集中于大型的浅水湖泊^[39-41],且部分方法基于全年遥感数据的统计分析,不适用于实时监测.而对于中小型湖泊及水库水生植被类群的遥感监测,可利用高光谱分辨率的Sentinel-2数据进行统计分析^[24],但沉水植物的冠层深度及水环境因素会导致遥感分类出现偏差.水声学技术对浅水湖泊沉水植物的调查也取得较多的进展及成果^[42-44],还可通过回声探测技术研究浅水湖泊沉水植物的分布^[26],但是这些方法需要大量的专业设备,并对水体深度有一定的要求.

城市中小河道宽度较窄,分辨率较低的遥感影像难于识别和区分.以上海为例,城市河道水体的平均深度介于1.5~2.0 m间(未发表数据),因此基于卫星或无人机的深空和高空遥感技术以及目前在自然河湖地带采用的水声学技术等监测方法较难应用于城市中小河道沉水植物的监测及评估^[45].本研究提出基于河面上方的人工控制的主动式多光谱相机拍摄,可以充分地发挥多光谱技术对沉水植物优势种覆盖度的监测能力,并有效地避免天气变化、云层覆盖度、水深异质性等陆面本底状况对深空和高空遥测技术的阻碍^[46].但是,本研究提出的人工控制的主动式多光谱相机监测技术尚处于开发状态,还需要辅助以代表性断面的人工取样方法予以校正,后续相关研究需要针对以下两点进行调研与探索,以更好地服务于城市中小河道沉水植物调查技术的完善与发展:(1)如何从多光谱照片中有针对性地对优势种沉水植物覆盖度和非优势沉水植物覆盖度进行区分?(2)如何调整R/G/B/NIR波段计算公式以更好地表征高浊度(>30 NTU)下城市河道优势沉水植物覆盖度?

3.4 中小河道沉水植物的保护和管理建议

水生植物是水体生态系统的初级生产者,其在生长期可吸收水体中大量的营养盐,对水体有较好的净化作用^[47].但是沉水植物过度繁殖可导致植物衰亡分解产生大量的氮、磷等营养物,进而引起水质的恶化及二次污染^[48-49],因此当河道内沉水植物大量繁殖后,需对沉水植物的生物量进行控制.适宜的控制措施能去除植物体中的部分营养物质,促进沉水植物的恢复和生长,维持水体的正常水质^[43].但是不同沉水植物的繁殖和扩散能力不同,建议在河道管理过程中,主要控制和打捞黑藻、穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)、竹节水松(*Cabomba caroliniana*)、菹草(*Potamogeton crispus*)等依赖茎段散布营养繁殖的种类^[18].此外,不同时期控制沉水植物生物量,对水体的影响存在差异,在生长期收割沉水植物可降低水体的营养盐水平^[50].因此,对中小河道沉水植物的收割管理,应权衡种类、强度及时间阶段的相互影响,制定科学合理的措施及方案.

随着城镇黑臭水体治理、河湖长制深入推进,准确快速地掌握沉水植物特征对水生态修复具有重要指

导价值.由于目前缺乏在城镇河道人工恢复的沉水植物生长响应与机制深入研究,后续应明确其主要影响因素和典型类型,通过不断累积城镇典型片区的河道沉水植物调查数据,提高单位面积生物量估算和近地无人机多光谱测定盖度的准确性,构建城镇典型片区河道沉水植物分布与生物量估算模型,从而建立快速、准确、高效的城镇河道沉水植物调查方法和技术.

4 结论

1)通过对上海中小河道沉水植物生物量和盖度的调查研究,建议在单位长度为 1000 m 的城镇河道,开展沉水植物单位面积生物量估算中,最少需取样 30~35 次,可随机或等距设置采样点.

2)利用多光谱相机进行河道沉水植物总盖度估算,通过 5~8 次的 5 波段影像拍摄,平均后可获得整条河道的沉水植物盖度.利用单位面积生物量及总盖度,可准确估算河道沉水植物生物量.

致谢:感谢复旦大学邱士允博士、王新新博士对本文写作的指导,感谢上海应用技术大学高涛、万一砾同学以及杨震林在河道调查数据获取过程中提供的帮助.

5 参考文献

- [1] Karr JR, Chu EW. Sustaining living rivers. *Hydrobiologia*, 2000, **422**: 1-14. DOI: 10.1023/A:1017097611303.
- [2] Cai QH, Tang T, Deng HB. Discussion on freshwater ecosystem service and its evaluation index system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14**(1): 135-138. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2003.0030.[蔡庆华, 唐涛, 邓红兵. 淡水生态系统服务及其评价指标体系的探讨. 应用生态学报, 2003, **14**(1): 135-138.]
- [3] Wu EN, Yang K, Che Y *et al.* Characterization of rivers health status and its assessment. *Advances in Water Science*, 2005, **16**(4): 602-608.[吴阿娜, 杨凯, 车越等. 河流健康状况的表征及其评价. 水科学进展, 2005, **16**(4): 602-608.]
- [4] Yan SY, Wang XR. Preliminary study on the roles and applied ways of urban river in urban ecological construction. *Urban Environment & Urban Ecology*, 1999, **12**(6): 36-38.[阎水玉, 王祥荣. 城市河流在城市生态建设中的意义和应用方法. 城市环境与城市生态, 1999, **12**(6): 36-38.]
- [5] Zhao YW, Yang ZF. Preliminary study on assessment of urban river ecosystem health. *Advances in Water Science*, 2005, **16**(3): 349-355.[赵彦伟, 杨志峰. 城市河流生态系统健康评价初探. 水科学进展, 2005, **16**(3): 349-355.]
- [6] May R. "Connectivity" in urban rivers: Conflict and convergence between ecology and design. *Technology in Society*, 2006, **28**(4): 477-488. DOI: 10.1016/j.techsoc.2006.09.004.
- [7] Che Y, Yang K, Chen T *et al.* Assessing a riverfront rehabilitation project using the comprehensive index of public accessibility. *Ecological Engineering*, 2012, **40**: 80-87. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2011.12.008.
- [8] Hermida MA, Cabrera-Jara N, Osorio P *et al.* Methodology for the assessment of connectivity and comfort of urban rivers. *Cities*, 2019, **95**: 102376. DOI: 10.1016/j.cities.2019.06.007.
- [9] Hu XF, Kong Y, Xie CS *et al.* Report on Shanghai River (Lake) in 2019. Shanghai: Shanghai Water Authority, 2020. <http://swj.sh.gov.cn/hhbg/20200909/8f8b475a016f4f58b826c8ac2443657a.html>.[胡险峰, 孔聿, 谢翠松等. 2019 上海市河道(湖泊)报告. 上海: 上海市水务局, 2020.]
- [10] Xu HT. Study on construction of ecosystem health evaluation system and governance effect of middle and small sized rivers in Shanghai[Dissertation]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016.[徐后涛. 上海市中小河道生态健康评价体系构建及治理效果研究[学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2016.]
- [11] Yuan W, Yang K, Wu JP. River structure characteristics and classification system in river network plain during the course of urbanization. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, **27**(3): 401-407.[袁雯, 杨凯, 吴建平. 城市化进程中平原河网地区河流结构特征及其分类方法探讨. 地理科学, 2007, **27**(3): 401-407.]
- [12] Blindow I, Andersson G, Hargeby A *et al.* Long-term pattern of alternative stable states in two shallow eutrophic lakes. *Freshwater Biology*, 1993, **30**(1): 159-167. DOI: 10.1111/j.1365-2427.1993.tb00796.x.
- [13] Wu ZB, Qiu DR, He F *et al.* Studies on eutrophicated water quality improvement by means of aquatic macrophytes. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2001, **19**(4): 299-303.[吴振斌, 邱东茹, 贺锋等. 水生植物对富营养水体水质净化作用研究. 武汉植物学研究, 2001, **19**(4): 299-303.]
- [14] Moss B. Engineering and biological approaches to the restoration from eutrophication of shallow lakes in which aquatic plant

- communities are important components. *Hydrobiologia*, 1990, **200/201**(1): 367-377. DOI: 10.1007/BF02530354.
- [15] Petersen JR, Robert C. The RCE: a Riparian, Channel, and Environmental Inventory for small streams in the agricultural landscape. *Freshwater Biology*, 1992, **27**(2): 295-306. DOI: 10.1111/j.1365-2427.1992.tb00541.x.
- [16] Raven PJ, Holmes NTH, Dawson FH *et al.* River Habitat Quality The physical character of rivers and stream in the UK and Isle of Man. River Habitat Survey Report No. 2. 1998. <http://www.environmentdata.org/archive/ealit;1913>.
- [17] Ecke F, Hellsten S, Köhler J *et al.* The response of hydrophyte growth forms and plant strategies to river restoration. *Hydrobiologia*, 2016, **769**(1): 41-54. DOI: 10.1007/s10750-015-2605-6.
- [18] Li W, Cheng Y. Quantitative analysis on the main submerged communities in Honghu Lake. II. *Potamogeton maackianus*+*Myriophyllum spicatum*+*Chara* community. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1999, **23**(3): 240-244. [李伟, 程玉. 洪湖主要沉水植物群落的定量分析 II. 微齿眼子菜+穗花狐尾藻+轮藻群落. 水生生物学报, 1999, **23**(3): 240-244.]
- [19] Chen ZY, Lei ZX, Zhou J *et al.* Monthly quantitative and biomass dynamics of six submerged macrophytes populations in Liangzi Lake. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2000, **24**(6): 582-588. [陈中义, 雷泽湘, 周进等. 梁子湖六种沉水植物种群数量和生物量周年动态. 水生生物学报, 2000, **24**(6): 582-588.]
- [20] Champion PD, Tanner CC. Seasonality of macrophytes and interaction with flow in a New Zealand lowland stream. *Hydrobiologia*, 2000, **441**(1): 1-12. DOI: 10.1023/A: 1017517303221.
- [21] Blindow I, Hargeby A, Meyercordt J *et al.* Primary production in two shallow lakes with contrasting plant form dominance: A paradox of enrichment?. *Limnology and Oceanography*, 2006, **51**(6): 2711-2721. DOI: 10.4319/lo.2006.51.6.2711.
- [22] Vis C, Hudon C, Carignan R. An evaluation of approaches used to determine the distribution and biomass of emergent and submerged aquatic macrophytes over large spatial scales. *Aquatic Botany*, 2003, **77**(3): 187-201. DOI: 10.1016/S0304-3770(03)00105-0.
- [23] Rybicki NB, Landwehr JM. Long-term changes in abundance and diversity of macrophyte and waterfowl populations in an estuary with exotic macrophytes and improving water quality. *Limnology and Oceanography*, 2007, **52**(3): 1195-1207. DOI: 10.4319/lo.2007.52.3.1195.
- [24] Wang ZH, Xin CL, Sun Z *et al.* Automatic extraction method of aquatic vegetation types in small shallow lakes based on Sentinel-2 data: A case study of Cuiping Lake. *Remote Sensing Information*, 2019, **34**(5): 132-141. [汪政辉, 辛存林, 孙喆等. Sentinel-2 数据的小型湖泊水生植被类群自动提取方法——以翠屏湖为例. 遥感信息, 2019, **34**(5): 132-141.]
- [25] Haga H, Ohtsuka T, Matsuda M *et al.* Echosounding observations of coverage, height, PVI, and biomass of submerged macrophytes in the southern basin of Lake Biwa, Japan. *Limnology*, 2007, **8**(2): 95-102. DOI: 10.1007/s10201-006-0200-2.
- [26] Wu DH, Wang Y, Xu ZA. Hydroacoustic investigation of submerged macrophyte coverage in Gonghu Bay, Taihu Lake. *Journal of China Hydrology*, 2016, **36**(4): 44-47. [吴东浩, 王玉, 徐兆安. 基于水声学的太湖贡湖湾沉水植物盖度调查. 水文, 2016, **36**(4): 44-47.]
- [27] Wikum DA, Shanholtzer GF. Application of the Braun-Blanquet cover-abundance scale for vegetation analysis in land development studies. *Environmental Management*, 1978, **2**(4): 323-329. DOI: 10.1007/BF01866672.
- [28] Xiong BH, Li W. Ecological studies on *Vallisneria* L. China. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2000, **18**(6): 500-508. [熊秉红, 李伟. 我国苦草属 (*Vallisneria* L.) 植物的生态学研究. 武汉植物学研究, 2000, **18**(6): 500-508.]
- [29] Song C, Hu GD, Fan LM *et al.* Power analysis on the biomarkers used in biological monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2011, **6**(6): 589-594. [宋超, 胡庚东, 范立民等. 环境中多环芳烃 (PAHs) 的生物标志物的功效分析. 生态毒理学报, 2011, **6**(6): 589-594.]
- [30] Knuth KH. Optimal data-based binning for histograms. arXiv preprint physics/0605197, 2006: 1-30. <https://arxiv.org/abs/physics/0605197>.
- [31] Cohen J. Statistical power analysis. *Current Directions in Psychological Science*, 1992, **1**(3): 98-101. DOI: 10.1111/1467-8721.ep10768783.
- [32] Cui XH, Chen JK, Li W. Survey methods on aquatic macrophyte vegetation in lakes in the middle and lower reaches of Changjiang River. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 1999, **17**(4): 357-361. [崔心红, 陈家宽, 李伟. 长江中下游湖泊水生植被调查方法. 武汉植物学研究, 1999, **17**(4): 357-361.]
- [33] Wang SP, Chen JW, Liu YH *et al.* Distribution characteristics of submerged plants in urban rivers and its influencing factors: A case of Ningbo urban rivers. *J Lake Sci*, 2019, **31**(4): 1064-1074. DOI: 10.18307/2019.0414. [王苏鹏, 陈吉

- 伟, 刘意恒等. 城区河流中沉水植物分布特征及其影响因素分析——以宁波城区内河为例. 湖泊科学, 2019, **31**(4): 1064-1074.]
- [34] Wang FX, Zhu GR, Liu XF *et al.* Aquatic floristic characteristics and community structure of submerged macrophytes in the Henan section of the Qihe River. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2020, **26**(4): 985-998.[王芳侠, 祝国荣, 刘晓峰等. 淇河河南段的水生植物区系及沉水植物群落特征. 应用与环境生物学报, 2020, **26**(4): 985-998.]
- [35] Song B, Park K. Detection of aquatic plants using multispectral UAV imagery and vegetation index. *Remote Sensing*, 2020, **12**(3): 387. DOI: 10.3390/rs12030387.
- [36] Wu RSS, Chan AKY, Richardson BJ *et al.* Measuring and monitoring persistent organic pollutants in the context of risk assessment. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, **57**(6/7/8/9/10/11/12): 236-244. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2008.03.012.
- [37] R Development Core Team. R: a language for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. www.r-project.org. 2020.
- [38] Morris JT, Haskin B. A 5-yr record of aerial primary production and stand characteristics of *Spartina alterniflora*. *Ecology*, 1990, **71**(6): 2209-2217. DOI: 10.2307/1938633.
- [39] Wang L, Dronova I, Gong P *et al.* A new time series vegetation-water index of phenological-hydrological trait across species and functional types for Poyang Lake wetland ecosystem. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **125**: 49-63. DOI: 10.1016/j.rse.2012.07.003.
- [40] Oyama Y, Matsushita B, Fukushima T. Distinguishing surface cyanobacterial blooms and aquatic macrophytes using Landsat/TM and ETM + shortwave infrared bands. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **157**: 35-47. DOI: 10.1016/j.rse.2014.04.031.
- [41] Liang QC, Zhang YC, Ma RH *et al.* A MODIS-based novel method to distinguish surface cyanobacterial scums and aquatic macrophytes in Lake Taihu. *Remote Sensing*, 2017, **9**(2): 133. DOI: 10.3390/rs9020133.
- [42] Sabol BM, Eddie MR, Chamberlain R *et al.* Evaluation of a digital echo sounder system for detection of submersed aquatic vegetation. *Estuaries*, 2002, **25**(1): 133-141. DOI: 10.1007/BF02696057.
- [43] Jäger P, Pall K, Dumfarth E. A method of mapping macrophytes in large lakes with regard to the requirements of the Water Framework Directive. *Limnologia*, 2004, **34**(1/2): 140-146. DOI: 10.1016/S0075-9511(04)80033-1.
- [44] Zhu LY, Liu HS, Zhang JW. Research on the benthic algae distribution around Gouqi Island using digital echo sounding system and interpolation. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2012, **21**(3): 445-451.[诸邈莹, 刘洪生, 张婧雯. 枸杞岛周围底栖海藻分布的回声探测及其插值研究. 上海海洋大学学报, 2012, **21**(3): 445-451.]
- [45] Wang Q, Zhou XD, Luo J *et al.* The remote sensing monitoring of dominant species of submerged vegetation of Lake Taihu with the consideration of their living histories. *J Lake Sci*, 2015, **27**(5): 953-961. DOI: 10.18307/2015.0523.[王琪, 周兴东, 罗菊花等. 考虑生活史的太湖沉水植物优势种遥感监测. 湖泊科学, 2015, **27**(5): 953-961.]
- [46] Chabot D, Dillon C, Shemrock A *et al.* An object-based image analysis workflow for monitoring shallow-water aquatic vegetation in multispectral drone imagery. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018, **7**(8): 294. DOI: 10.3390/ijgi7080294.
- [47] Li CH, Ye C, Kong XZ *et al.* Preliminary idea on assessment of macrophyte optimal biomass in shallow lake. *China Environmental Science*, 2018, **38**(12): 4644-4652.[李春华, 叶春, 孔祥臻等. 浅水湖泊水生植物适宜生物量评估方法的探讨. 中国环境科学, 2018, **38**(12): 4644-4652.]
- [48] Li EH, Liu GH, Li W *et al.* Decomposition rate and nitrogen and phosphorus dynamics of three kinds of hydrophyte in Lake Honghu. *China Environmental Science*, 2006, **26**(6): 667-671.[厉恩华, 刘贵华, 李伟等. 洪湖三种水生植物的分解速率及氮、磷动态. 中国环境科学, 2006, **26**(6): 667-671.]
- [49] Tang ZK, Zhang YM, Yang F *et al.* Migration and transformation of phosphorus nutrients in the decomposition process of three aquatic plants. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(3): 716-721. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2018.0398.[汤志凯, 张毅敏, 杨飞等. 3种水生植物腐解过程中磷营养物质迁移、转化过程研究. 环境科学学报, 2019, **39**(3): 716-721.]
- [50] Xu WW, Hu WP, Deng JC *et al.* Influence of harvesting *Potamogeton crispus* in A submerged plant community on the growth of submerged aquatic plants and their effects on water quality. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(7): 1222-1227.[徐伟伟, 胡维平, 邓建才等. 菹草生物量控制对群落中沉水植物生长及水质的影响. 生态环境学报, 2015, **24**(7): 1222-1227.]