

大通湖生态修复前后水体浮游植物调查及富营养化评价

罗丛强,曾龙科,石彭灵,杨品红,王素钦*

(湖南文理学院,水产生物资源与环境生态湖南省工程研究中心,
常德市湿地生物与环境生态重点创新团队,湖南 常德 415000)

摘要:2016—2021年夏秋季期间在大通湖布设18个采样点,对大通湖浮游植物及水体理化指标采样分析,并应用综合营养指数对其水质富营养状态进行评价。结果表明,调查期间大通湖浮游植物共鉴定出6门71属,以蓝藻门和绿藻门为主。生态修复后大通湖浮游植物细胞数和Chl-a质量浓度呈显著上升趋势,2020年达峰值,分别为 7.20×10^7 个/L和 $12.56 \mu\text{g/L}$ 。蓝藻门的优势地位逐渐加强,2016—2021年蓝藻门占比由42.8%增长至85.5%,其中微囊藻和长孢藻占据绝对优势地位。大通湖水水质营养状态在沉水植物修复后2019年由轻度富营养短暂降为中度营养水平,由于2019年冬季沉水植物消亡及次年未复苏,2020年又反弹为中度富营养状态。

关键词:浮游植物;群落结构;富营养化;生态修复;大通湖

中图分类号:X171.4;X826

文献标志码:B

文章编号:1006-2009(2023)01-0038-05

Phytoplankton Investigation and Eutrophication Evaluation Before and After Ecological Restoration in Datong Lake

LUO Cong-qiang, ZENG Long-ke, SHI Peng-ling, YANG Pin-hong, WANG Su-qin*

(Hunan Engineering Research Center of Aquatic Organism Resources and Environmental Ecology,
Changde Key Innovation Team of Wetland Biology and Environmental Ecology, Hunan University
of Arts and Science, Changde, Hunan 415000, China)

Abstract: 18 sampling sites were set up in Datong Lake during the summer and autumn of 2016—2021. The phytoplankton and physicochemical indexes were sampled and analyzed, and the eutrophication status of water quality was evaluated by the comprehensive nutrient index. The results showed that 71 genera of phytoplankton in 6 phyla were identified in Datong Lake during the investigation period, mainly Cyanophyta and Chlorophyta. The phytoplankton cell number and Chl-a concentration in Datong Lake showed a significant upward trend after ecological restoration, reaching the peak in 2020, which were 7.20×10^7 cells/L and $12.56 \mu\text{g/L}$ respectively. The dominant position of Cyanophyta was gradually strengthened, the proportion of Cyanophyta increased from 42.8% to 85.5% during 2016—2021, in which *Microcystis* spp. and *Dolichospermum* spp. were in an absolutely dominant position. The water nutritional status of Datong Lake briefly decreased from mild eutrophication to medium nutrient in 2019 after submerged plant restoration. As the submerged plants died out in the winter of 2019 and failed to recover the following year, the water quality rebounded to moderate eutrophication in 2020.

Key words: Phytoplankton; Community structure; Eutrophication; Ecological restoration; Datong Lake

湖泊富营养化可引起藻类水华暴发、水生动物消亡、水生植被衰退等一系列生态问题,导致湖泊生态系统退化甚至崩溃^[1]。浮游植物是水生态系统中最重要的初级生产者,在水生态系统的能量流动、物质循环和信息传递中起着至关重要的作用

收稿日期:2021-11-11;修订日期:2022-10-09

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ50135, 2021JJ40379);常德市科技创新专项基金资助项目(2020G178, 2020S006)

作者简介:罗丛强(1988—),男,吉林白山人,博士,研究方向为水环境生态修复。

*通信作者:王素钦 E-mail: luocqh@126.com

用^[2]。浮游植物对水体环境变化十分敏感,其群落组成和丰度变化可以明确反映水体质量状况,因而被广泛用于水质监测与评价^[3-6]。生态修复是人为操纵下的系统工程,可在短时间内对水体形成强烈干扰,监测浮游植物群落组成和结构的改变对于评价生态修复的效果具有重要的意义。今于 2016—2021 年夏秋季对大通湖的浮游植物群落结构及水质参数进行调查,通过分析该湖生态修复前后浮游植物群落变化和水质状态来评估生态修复效果,旨在为相关部门对大通湖的水环境治理和渔业规划提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

湖南省大通湖位于湘中偏北,地处洞庭湖腹地,地理位置范围在 E112°26′~E112°33′,N29°09′~N29°15′之间,现有湖泊面积约为 80.1 km²,平均水深 2.58 m,素有“洞庭之心”美称,也是湖南省最大的内陆养殖湖泊。20 世纪 80 年代后大通湖大力发展渔业养殖业,经历了由天然捕捞到人放天养再到高密度人工肥水养殖模式的发展变化,过度投肥导致大通湖水体营养水平快速升高,由中营养型向富营养型转变,水域生态系统严重退化,水质降为劣 V 类,沉水植被功能显著衰退^[7-8]。为减缓并控制这种趋势,恢复和稳定大通湖水生态系统结构和功能,益阳市自 2018 年起对大通湖先后开展了“停止清淤,清除围网,捕捞食草性鱼类,种植水草,河湖连通”等一系列的生态修复工程。

于 2016—2021 年每年夏秋季期间对大通湖进行水质采样,根据湖区分布、养殖情况、入湖河流的分布、进出水口及近岸环境状况,均匀布设 18 个采样点(S1—S18),见图 1。

1.2 样品的采集和鉴定计数

浮游植物定性样品采用 25 号筛网制作的浮游植物采集网在采样点水面“∞”字摆动,富集后装入 50 mL 样品瓶,加入几滴鲁哥氏碘液(*Lugol's iodine*)现场固定保存,带回实验室于普通光学显微镜下镜检;定量样品采集使用采水器在水面下 0.5 m 处采集 1 L 水样,加入 10 mL 鲁哥氏碘液现场固定,室内静置 48 h 后弃去上清液,浓缩转移下层藻细胞,取 0.1 mL 样本于浮游植物计数框中,在普通光学显微镜下进行鉴定计数。浮游植物的分类鉴定参照《中国淡水藻类——系统、分类及生

态》^[9]和《淡水微型生物图谱》^[10]。

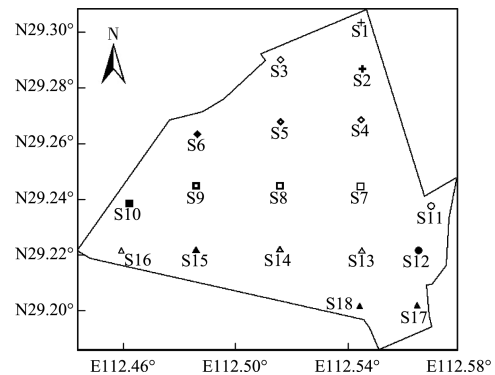


图 1 大通湖采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Datong Lake

水体理化指标的监测主要包括叶绿素 a (Chl-a)、总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(I_{Mn})、pH 值、水温、溶解氧(DO)和透明度(SD)。Chl-a、TN、TP 和 I_{Mn} 的测定方法参照《水和废水监测分析方法》(第四版)。DO 使用 YSI 650 型便携式水质分析仪原位测量,SD 使用塞氏盘测定。

1.3 浮游植物优势度计算

通过优势度(Y)来判断浮游植物群落的优势种,其计算公式为:

$$Y = n_i / N \times f_i \quad (1)$$

式中: n_i 为 i 种的总个体数; N 为全部种的总个体数; f_i 为 i 种在所有采样点中出现的频率。以 $Y > 0.02$ 确定为优势种^[11]。

1.4 水体营养状态评价方法

以大通湖水体 SD、TN、TP、 I_{Mn} 和 Chl-a 为参数,参照文献^[12-13]计算获得综合营养状态指数 TLI(Σ),并用该指数对水体营养状态进行评价。采用 0~100 的连续数字对大通湖营养状态进行分级:TLI(Σ) < 30, 贫营养;30 ≤ TLI(Σ) ≤ 50, 中营养;50 < TLI(Σ) ≤ 60, 轻度富营养;60 < TLI(Σ) ≤ 70, 中度富营养;TLI(Σ) > 70, 重度富营养。在同一营养状态下,TLI(Σ)的数值越高,湖泊富营养程度越重。

2 结果与讨论

2.1 大通湖生态修复前后浮游植物丰度和群落结构组成变化

图 2 为 2016—2021 年大通湖浮游植物细胞数和 Chl-a 质量浓度变化。由图 2 可见,调查期间浮

游植物细胞数和 Chl-a 质量浓度整体呈上升趋势。其中,浮游植物细胞数量由 2016 年的低于 3.44×10^6 个/L 上升至 2020 年的超过 7.20×10^7 个/L。Chl-a 质量浓度变化范围为 $2.19 \mu\text{g/L} \sim 12.56 \mu\text{g/L}$, 在 2018 年降至 $2.19 \mu\text{g/L}$ 后,在 2020—2021 年又急剧上升至 $10 \mu\text{g/L}$ 以上。

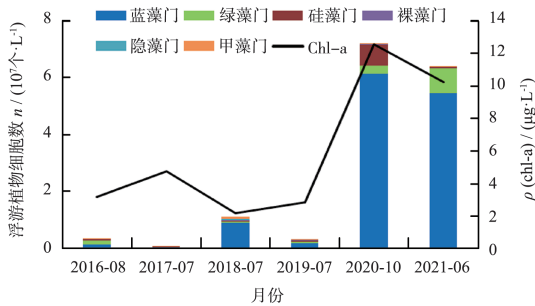


图 2 2016—2021 年大通湖浮游植物细胞数和 Chl-a 质量浓度变化

Fig.2 Variation of phytoplankton cell number and Chl-a mass concentration in Datong Lake from 2016 to 2021

浮游植物群落组成是水生态系统生物构成的重要指标。调查期间大通湖浮游植物共鉴定出蓝藻门、绿藻门、隐藻门、硅藻门、甲藻门和裸藻门共 6 门 71 属,其中以蓝藻门、绿藻门和硅藻门的种类为主,分别为 16 属、31 属和 13 属。图 3 和表 1 分别

为 2016—2021 年大通湖浮游植物各门类占比和浮游植物优势属。由图 3 和表 1 可知,2016 年大通湖的蓝藻门(42.8%)和绿藻门(41.0%)占据绝对优势,其次为硅藻门(12.8%),其他门占比较低,其中蓝藻门席藻属、绿藻门小球藻属和栅藻属,以及硅藻门菱形藻属为优势种属。自 2017 年以来,水华蓝藻微囊藻和长孢藻代替席藻成为优势属后,蓝藻门的优势地位进一步扩大,同时绿藻门和硅藻门的优势地位逐步缩小。至 2021 年大通湖优势门占比从高到低依次为蓝藻门(85.5%) > 绿藻门(13.7%) > 硅藻门(0.8%),其中蓝藻门的微囊藻属和长孢藻属、绿藻门小球藻属为优势种属。

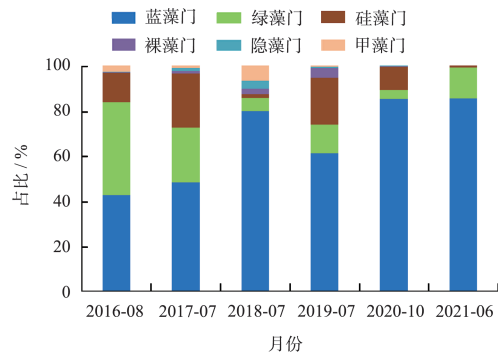


图 3 2016—2021 年大通湖浮游植物各门类占比
Fig.3 Proportion of phytoplankton categories in Datong Lake from 2016 to 2021

表 1 2016—2021 年大通湖浮游植物优势属^①

Table 1 Dominant genera of phytoplankton in Datong Lake from 2016 to 2021^①

门	属	监测月份					
		2016-08	2017-07	2018-07	2019-07	2020-10	2021-06
蓝藻门	席藻属 (<i>Phormidium</i>)	0.143				0.149	
	长孢藻属 (<i>Dolichospermum</i>)		0.023	0.058	0.433	0.046	0.208
	微囊藻属 (<i>Microcystis</i>)		0.021	0.025	0.332	0.057	0.530
	平裂藻属 (<i>Merismopedia</i>)				0.024		
	颤藻属 (<i>Oscillatoris</i>)				0.052		
绿藻门	色球藻属 (<i>Chroococcus</i>)			0.037			0.037
	小球藻属 (<i>Chlorella</i>)	0.027					
	栅藻属 (<i>Scenedesmus</i>)	0.048	0.030				
硅藻门	衣藻属 (<i>Chlamydomonas</i>)		0.117				
	空球藻属 (<i>Eudorina</i>)						0.075
	菱形藻属 (<i>Nitzschia</i>)	0.043	0.110			0.023	
	桥弯藻属 (<i>Cymbella</i>)					0.023	
裸藻门	小环藻属 (<i>Cyclotella</i>)		0.206			0.039	
	直链藻属 (<i>Melosira</i>)		0.044		0.098		
	囊裸藻属 (<i>Trachelomonas</i>)					0.026	
隐藻门	隐藻属 (<i>Cryptomonas</i>)		0.239	0.054			

①空白栏表示浮游植物优势度 $Y < 0.02$, 为非优势属。

2.2 大通湖水质参数及富营养状态评价

表2为2016—2021年大通湖水质参数及水体富营养状态。由表2可知,大通湖的水质状况在2019年得到较大改善,各项水质参数均达近年最佳水平。其中,DO由2016年的8.03 mg/L升高为10.83 mg/L,SD由0.52 m提高为1.20 m,TN和TP分别由2016年的2.90 mg/L和0.48 mg/L降

至0.49 mg/L和0.17 mg/L, I_{Mn} 降为5.07 mg/L。而2020—2021年大通湖水质指标发生反弹。依据湖泊营养状态分级标准,2016—2018年大通湖TLI(Σ)值为54.44~59.31,属于轻度富营养;而2019年TLI(Σ)值下降为46.46,为中营养水平,达近年最佳水质营养状态;2020—2021年TLI(Σ)值>67,水体呈中度富营养状态。

表2 2016—2021年大通湖水质参数及水体富营养状态

Table 2 Water quality parameters and eutrophication status of Datong Lake from 2016 to 2021

监测月份	监测结果							富营养状态	
	DO $\rho/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SD/m	TN $\rho/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP $\rho/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$I_{Mn} \rho/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Chl-a $\rho/$ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	氮磷比	TLI(Σ)	富营养状态
2016-08	8.03	0.52	2.90	0.48	6.25	3.18	6.09	59.31	轻度富营养
2017-07	10.84	0.62	1.99	0.10	6.89	4.78	19.33	54.44	轻度富营养
2018-07	9.60	0.46	3.32	0.35	5.32	2.19	9.37	57.36	轻度富营养
2019-07	10.83	1.20	0.49	0.17	5.07	2.84	2.83	46.46	中营养
2020-10	10.08	0.18	2.95	0.31	13.50	12.56	9.52	69.56	中度富营养
2021-06	10.90	0.20	3.05	0.23	12.42	10.26	13.26	67.39	中度富营养

2.3 生态修复对浮游植物群落结构的影响

一般认为,当湖泊水体中TN质量浓度>0.5 mg/L、TP质量浓度>0.02 mg/L时达到蓝藻水华暴发的营养条件^[14]。大通湖在生态修复前浮游植物密度长期维持在较低状态。大通湖已有20 a以上的集约化养殖历史,湖区水域封闭,水体交换迟缓,氮磷水平已达到发生水华的条件;而该湖生态修复前未出现过表观水华现象,这主要归因于每年投放大量的滤食性鲢鳙鱼对浮游植物形成的摄食压力。此外,大通湖以圆顶珠蚌、三角帆蚌、河蚬、梨形环棱螺为主要优势种的底栖软体动物丰度较高^[15],也在一定程度上抑制了藻类水华的发生^[16-18]。

水生植物可通过遮光、竞争营养盐和分泌的化感物质对藻类生长产生抑制作用^[19-20]。2018年和2019年通过开展水生植物修复工程,大通湖在短时间内提升了水质状况。2018年和2019年夏季大通湖整体水生植物覆盖率分别达到15%和30%,水体透明度明显增加,氮磷含量与存在形态发生重大转变,浮游植物生物量下降。

在湖泊水生植物恢复和维护过程中大型水生植物的生物量和覆盖率是十分重要的指标,生物量过高时水生植物衰亡腐解造成系统崩溃,加速湖泊沼泽化的事件时有发生^[21-23]。2019年夏季大通

湖湖区水生植物覆盖率达到30%,其中有40 km²水域的水生植物覆盖率超过80%,单位面积生物量达1.5 kg/m²。随着冬季衰亡期的到来,未及时收割的沉水植物残体沉积在湖底,造成生物淤积,并在水中逐渐腐烂分解,导致2020年沉水植物并未二次复苏,水生植物群落覆盖率急剧下降。与生态修复前相比,2020—2021年夏季大通湖浮游植物种类降低,密度与生物量显著提高,蓝藻门占比达85.5%,出现以微囊藻为优势属的蓝藻水华。这是由于水生植物衰亡腐解期大量营养盐又释放入水体,成为水体营养物质的内源污染^[24-25]。大通湖水生植物腐烂分解一方面降低水生植物对藻类的抑制效应,增加水体中营养盐,转变氮磷存在形态,促进藻类的生长繁殖;另一方面,大通湖丰富的底栖软体动物资源逐渐消亡,降低了对藻类的摄食抑制效应,进一步促进了藻类的繁殖,给水华发生提供了条件。

2.4 大通湖生态修复问题分析

为改善大通湖水生态状况,对湖泊持续开展水质改善及生态修复项目,种植和恢复水生植物成为大通湖生态修复的主要手段。大通湖水质在2019年水生植物修复后达到最佳,为中营养水平。然而,随着次年沉水植物并未二次复苏,水质又出现反弹并急剧恶化,转变为中度富营养水平。其主要原因可能是水生植物种植类群及密度的不合理造

成水生植被夏季爆发式增长,而随着冬季水生植被的衰亡,氮磷腐解再释放,造成大通湖水质继续恶化,水体生态系统动荡不稳定。

富营养化浅水湖泊生态修复主要目标是形成稳定的生态系统,在修复过程中恢复水生植物群落,特别是沉水植物群落,是实现这一目标的重要而非唯一途径。浅水湖泊在种植和恢复水生植物时,要根据水域特性科学选择种植类群与搭配,要加强水生植物生长期适宜生物总量的控制和衰亡期腐解的管理,避免植物体有机物的堆积和氮磷腐解再释放。同时,在修复过程中强化底栖动物、鱼类等水生生物功能群的构建,发挥底层软体动物和净水鱼类对藻类与悬浮有机物的控制,增加生物多样性,提高系统的复杂与稳定性。

3 结论

(1) 调查期间大通湖浮游植物共鉴定出6门71属,其中以蓝藻门和绿藻门为主。生态修复后大通湖浮游植物细胞数和Chl-a质量浓度呈显著上升趋势,蓝藻门的优势地位逐渐加强,占比由2016年的42.8%增长至2021年的85.5%,其中蓝藻门的微囊藻和长孢藻占据绝对优势地位。

(2) 生态修复后大通湖营养状态不稳定,仍处于中度富营养状态。大通湖水质营养状态在沉水植物修复后2019年由轻度富营养短暂降为中营养水平,由于次年水生植物未二次复苏,2020年又反弹为中度富营养状态。

(3) 在开展湖泊生态修复时,要科学选择种植类群与搭配,同时要强化底栖动物、鱼类等水生生物功能群的构建,发挥底层软体动物和鱼类的净水作用,提高系统多样性与稳定性。

[参考文献]

- [1] WANG H J, XU C, LIU Y, et al. From unusual suspect to serial killer: Cyanotoxins boosted by climate change may jeopardize African megafauna[J]. The Innovation, 2021, 2(2): 100092.
- [2] LEPISTÖ L, HOLOPAINEN A L, VUORISTO H. Type-specific and indicator taxa of phytoplankton as a quality criterion for assessing the ecological status of Finnish boreal lakes[J]. Limnologia, 2004, 34(3): 236 - 248.
- [3] 蔡琨, 陆维青, 牛志春, 等. 洮湫水系湖泊春季浮游植物群落结构和水质生物学评价[J]. 环境监测管理与技术, 2018, 30(3): 37 - 41.
- [4] 徐珏, 顾继光, 杨阳, 等. 热带水库浮游植物形态性状的季节变化及影响因子分析——以高州水库为例[J]. 湖泊科学, 2019, 31(3): 825 - 836.
- [5] 李红, 马燕武, 祁峰, 等. 博斯腾湖浮游植物群落结构特征及其影响因子分析[J]. 水生生物学报, 2014, 38(5): 921 - 928.
- [6] 刘晓东, 郭劲松, 赵鹏宇. 忻州市滹沱河主要支流生态系统健康评价[J]. 环境监测管理与技术, 2016, 28(2): 33 - 36.
- [7] 廖粤军, 李春华, 董旭辉, 等. 湖南省大通湖百余年环境演化历史及营养物质基准的建立[J]. 水生生物学报, 2021, 45(1): 206 - 215.
- [8] 简永兴, 王建波, 何国庆, 等. 洞庭湖区三个湖泊水生植物多样性的比较研究[J]. 水生生物学报, 2002, 26(2): 160 - 167.
- [9] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [10] 周凤霞. 淡水微型生物图谱[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [11] 李祚泳, 丁晶, 彭荔红. 环境质量评价原理与方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [12] 王亚坤, 汪洋, 裴瑞华, 等. 广东东莞松木山水库浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 大连海洋大学学报, 2022, 37(1): 129 - 139.
- [13] 梁丽娥, 刘浩然, 张正洪. 红碱淖水体现状富营养化评价[J]. 农村经济与科技, 2021, 32(8): 24 - 25.
- [14] 孔繁翔, 宋立荣. 蓝藻水华形成过程及其环境特征研究[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [15] 李德亮, 张婷, 余建波, 等. 典型养殖湖泊大通湖软体动物的时空分布格局[J]. 水生生物学报, 2011, 35(6): 946 - 954.
- [16] ZHU J Y, LU K H, LIU X S. Can the freshwater snail *Bellamya aeruginosa* (Mollusca) affect phytoplankton community and water quality? [J]. Hydrobiologia, 2013, 707(1): 147 - 157.
- [17] 李萍, 张修峰, 莫树青. 背角无齿蚌 (*Anodonta woodiana*)、苦草 (*Vallisneria spiralis*) 及其共存对水质的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(6): 1589 - 1594.
- [18] 朱鹏飞, 雷留萍, 李德亮. 环棱螺与河蚬摄食率、滤水率及对小球藻清除率研究[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(5): 63 - 67.
- [19] 李锋民, 胡洪营. 大型水生植物浸出液对藻类的化感抑制作用[J]. 中国给水排水, 2004, 20(11): 18 - 21.
- [20] 潘继征, 李文朝, 陈开宁. 滇池东北岸生态修复区的环境效应——I. 抑藻效应[J]. 湖泊科学, 2004, 16(2): 141 - 149.
- [21] 刘伟龙, 胡维平, 陈永根, 等. 西太湖水生植物时空变化[J]. 生态学报, 2007, 27(1): 159 - 170.
- [22] 李文朝. 浅水湖泊生态系统的多稳态理论及其应用[J]. 湖泊科学, 1997, 9(2): 97 - 104.
- [23] 谷孝鸿, 张圣照, 白秀玲, 等. 东太湖水生植物群落结构的演变及其沼泽化[J]. 生态学报, 2005, 25(7): 1541 - 1548.
- [24] 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[J]. 中国环境科学, 2006, 26(6): 667 - 671.
- [25] 杨文丽, 夏品华, 李惠男, 等. 万峰湖水体浮游植物调查及富营养化评价[J]. 环境监测管理与技术, 2018, 30(1): 41 - 45.

本栏目编辑 谢咏梅