

重污染河道疏浚对菹草水生态环境的影响

沈 乐

(江苏省水文水资源勘测局南京分局,江苏 南京 210008)

摘要 通过采集苏州有机重污染河道南园河疏浚段、未疏浚段底泥和水质较好的内城河底泥进行菹草种植试验,分析各种底泥栽种菹草后上覆水体营养盐质量浓度的变化、菹草生长特点、浮游藻类和底栖附泥藻类的繁殖情况,研究疏浚对菹草水生态环境的影响。结果表明:重污染河道疏浚可以降低底泥中的营养盐浓度,有利于恢复菹草生境和改善水生态环境;河道疏浚后底泥 TN、TP、有机质质量比分别降为 1.50 g/kg、1.00 g/kg、27.00 g/kg 左右时,浮游藻类和底栖附泥藻类的繁殖受到抑制,菹草生物量增加,上覆水体的营养盐质量浓度降低;经过一段时期的泥-水界面反应,疏浚后的底泥含水率得以提高,底栖附泥藻类数量及生物量将会增加,将恢复菹草、浮游藻类和底栖附泥藻类共存并相互制约的生物多样化的水生态环境。

关键词 疏浚;重污染;菹草;浮游藻类;底栖附泥藻类

中图分类号:X52;X17 文献标识码:A 文章编号:1004-6933(2012)03-0032-06

Impacts of dredging of seriously polluted rivers on water ecological environment of *Potamogeton crispus*

SHEN Le

(Nanjing Branch of Hydrology and Water Resources Investigation Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210008, China)

Abstract : *Potamogeton crispus* planting experiments were conducted through collection of deposits in dredged reaches and non-dredged reaches of the Nanyuan River, which is a heavily polluted river, and in the Inland River, which has high-quality water, in Suzhou City. The impacts of river dredging on the water ecological environment of *Potamogeton crispus* were studied through analysis of the change of nutrient concentration in the overlying water, the characteristics of growth of *Potamogeton crispus*, and propagation of planktonic algae and benthic epipellic algae, after planting of *Potamogeton crispus* in various kinds of deposits. The results show that dredging of seriously polluted rivers can contribute to reducing the nutrient concentration in the deposits, restoring the habitat of *Potamogeton crispus*, and improving the water ecological environment. After dredging, the propagation of planktonic algae and benthic epipellic algae was restrained, the biomass of *Potamogeton crispus* increased, and the nutrient concentration in the overlying water decreased, when the concentrations of TN, TP, and organic matter in the deposits decreased to 1.50 g·kg⁻¹, 1.00 g·kg⁻¹, and 27.00 g·kg⁻¹, respectively. After a period of sediment-water reaction, the water content in the deposits, and the species and biomass of benthic epipellic algae increased, which would help restore the bio-diversified water ecological environment where *Potamogeton crispus*, planktonic algae, and benthic epipellic algae co-exist and restrain each other.

Key words : dredging; seriously polluted; *Potamogeton crispus*; phytoplankton algae; benthic epipellic algae

随着城市经济的发展和人们生活水平的提高,大量富含营养物质的污水排入城市河道。长期接纳的污染物积聚在河道底泥中,势必会影响河道水生态环境的健康。沉水植物能降低水体的营养盐质

量比,有效抑制藻类繁殖,促进悬浮物质沉积,提高水体的污染自净能力^[1]。因此,恢复沉水植物是改善水生态系统的重要措施。Kumar 等^[2-3]发现菹草在污染严重点的生物量和生产力高于污染轻的点

位。扎根于底泥中的沉水植物可以通过根系吸收底泥中的营养以维持自身正常生长繁殖,但底泥中有有机质等营养物质质量比过高会导致沉水植物根系腐烂^[1,4-5]。倪乐意^[6]认为在一些超越高等水生生物耐受范围的环境条件下,其生境无法得到立即恢复。段昌群等^[7-8]提出在重污染水体中重建水生植被,底泥疏浚有助于创造适合沉水植物生长的生态环境。然而疏浚程度过大将降低水体的生物多样性^[9]。因而在重污染型河道疏浚前,有必要对河道底泥疏浚的沉水植物水生生态效应展开试验研究。

笔者选取耐污能力强的沉水植物菹草作为试验材料,通过研究不同特性底泥对菹草生长繁殖、水体水质及藻类种群结构等的影响,判定流动性较小的苏州重污染河道疏浚是否有利于菹草水生态环境的恢复。

1 材料及方法

1.1 试验材料

试验采用的沉水植物菹草取自苏州直镇河道,在室外环境条件下放入装有自来水的试验桶内培养2周后,选取大小相似、生长状态较好的菹草个体作为试验材料。选择苏州南园河疏浚段、未疏浚段底泥以及内城河底泥作为试验基质。

菹草(*Potamogeton crispus*)耐污能力较强,只要将其根部固定在任何基质上,都能正常生长发育,在营养物质丰富的水体中靠其茎叶吸收营养物质。扎根于底泥的菹草主要靠吸收底泥中的营养物质进行繁殖^[10-11]。试验用水为南园河未疏浚段河水,其营养盐质量浓度:TN为7.04 mg/L,TP为0.32 mg/L,有机质为13.11 mg/L。各河段底泥的基本物理、化学性质见表1。

表1 各河段底泥的基本物理、化学性质

底泥来源	$u(\text{TN})/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$u(\text{TP})/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$u(\text{有机质})/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	含水率/%
南园河疏浚段	1.41	1.01	27.46	23
南园河未疏浚段	11.83	7.07	256.41	81
内城河	1.62	1.10	27.15	55

1.2 试验方法

为了研究疏浚对菹草生长的影响,待南园河东段疏浚4~5个月,采集不同污染程度河段底泥(即南园河东段(已疏浚)、西段底泥(未疏浚)及水质较好的内城河底泥10 kg各3份,分别放入60 L试验桶(编号分别为1—6号,顶部直径49 cm,底部直径37 cm)内,各编号对应菹草生物量详见表2;选取植株叶片数量和长短相近的菹草植入底泥;小心向各试验桶注入30.6 L南园河未疏浚段河水(桶内约50 cm),并在试验过程中及时用蒸馏水补充由于蒸发损失的水分。整个试验在自然光照的平台上进行,

每5 d观察菹草生长状况。采样时避免扰动水体从而影响悬浮物附着率。

为了研究疏浚对重污染河道水生生物多样性的影响,结合菹草生长情况,每5 d对1—6号桶内水体进行水质监测,每5~10 d观测藻类数量、生物量和种属规律。

表2 试验桶菹草栽种密度

菹草生物量/g	内城河底泥	南园河疏浚段底泥	南园河未疏浚段底泥
100	1号	2号	3号
200	4号	5号	6号

1.3 分析方法

水质指标的测定:采集的水样用玻璃纤维滤膜(Whatman GF/C)过滤后测定其TN、TP和有机质,其中TN、TP采用过硫酸钾消解法同时测定,有机质含量采用酸性高锰酸钾法进行测定。以上测定方法和浮游藻类、底栖附泥藻类测定方法均参照文献^[12]中相应方法。悬浮物附着率为附着于菹草表面的悬浮物质量占所附着的菹草生物量的百分率。

2 结果与分析

2.1 菹草表面的悬浮物附着率

试验开展20 d后各试验桶内附着于菹草上的悬浮物附着率各异,详见图1。

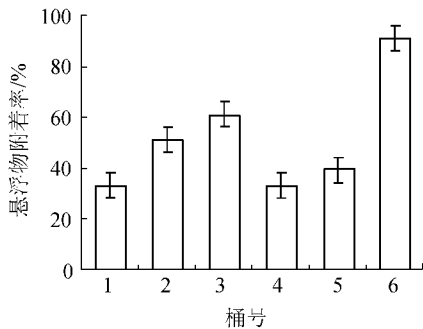


图1 试验桶内菹草表面的悬浮物附着率

几个试验桶内菹草表面悬浮物附着率的关系为:1号<2号<3号<4号<5号<6号。即栽种于内城河底泥中菹草表面的悬浮物附着率最小,其次是南园河疏浚河段底泥;而南园河未疏浚河段底泥中菹草表面的悬浮物附着率最大,3号和6号试验桶内菹草表面悬浮物附着率分别达到60%、90%,这势必会影响菹草的正常生长^[13]。

这主要与底泥的泥质和有机质质量比有关。泥质越软,含水率越高,越有利于底泥发生悬浮,从而引起水质浑浊^[14]。而有机质质量比越高,悬浮物量也就越大^[1]。菹草通过靠近根部的茎叶吸附从底泥中释放的悬浮物,从而减少其对上覆水体的影响。由表1可知,疏浚后的河段内源N、P和有机质的质

量比和含水率得以明显的降低,该段底泥中的 TN、TP 及有机质质量比与内城河底泥相近,均远小于未疏浚段底泥的质量比;南园河疏浚河段底泥除有机质外,TN、TP 质量比及含水率均低于内城河底泥,相对而言底泥若受扰动也不容易再悬浮。

参考玄武湖^[15]有机污染指数计算及评价方法,南园河未疏浚河道底泥有机污染指数为 27.18,远远超过了有机污染临界值 0.05。该种底泥富含的有机质不断向水体中释放,附着在菹草茎叶表面,使得 6 号桶内悬浮物附着率最高。

2.2 疏浚对菹草生长的影响

附着于菹草叶片上的悬浮物量越多,越会阻碍菹草的光合作用和呼吸作用,越容易出现叶片腐烂现象^[16]。从菹草长势情况分析,在内城河底泥中长势最好,其次为南园河疏浚河段底泥,而南园河未疏浚底泥不适宜菹草群落的生长繁殖。1 号、2 号、4 号、5 号试验桶内菹草于试验开展 5 d 后陆续长出新芽,试验开展 10 d 后新芽长 1~2 cm,20 d 后新芽长 4~5 cm;而 3 号、6 号试验桶内菹草的茎叶陆续腐烂死亡。这是因为含水率较高的未疏浚段底泥容易发生悬浮,使得试验桶内菹草茎叶上附着的悬浮物较多,菹草光合产氧能力受到影响。该种底泥中的微生物活性较强,底栖藻类产氧量低于耗氧量^[17],而菹草需要大量消耗水体底部的溶解氧以满足自身生命活动的要求,这导致了底层水体生态环境处于厌氧还原状态,菹草根部和茎叶容易发生腐烂^[18]。

同时受有机污染严重的未疏浚段底泥往往含有大量对植物有毒害作用的有机酸,用于菹草种植后,水草的茎叶容易发生腐烂死亡现象。

试验开展第 10 d、第 15 d,1 号、2 号、4 号、5 号试验桶内菹草覆盖率及生物量增长率见图 2。

由图 2 可知,南园河疏浚段底泥(27.46 g/kg)和内城河段底泥总栽种的菹草可以存活,且内城河底泥对菹草生长最为有利。这是因为底泥中适度的有机质、N、P 质量比能促进沉水植物的生长繁殖,缓解浮游藻类和菹草间营养物质的竞争。污染较轻的内城河底泥比疏浚河段底泥更有利于菹草的恢复,这是因为疏浚后的南园河段底泥底质较硬,N、P 等营养盐质量比偏低,使得主要靠根部从底泥中吸收营养来维持生命活动的菹草对营养盐的需求无法得到满足。菹草的生物量越多,越有利于其自身生长繁殖。这是因为沉水植物生物量越多,越有利于其与浮游藻类竞争营养、光照等。

2.3 疏浚后上覆水中 N、P 及有机质变化

菹草可以净化水质。扎根于底泥后,菹草可以通过其茎叶吸收水体中的营养盐,也通过根系吸收

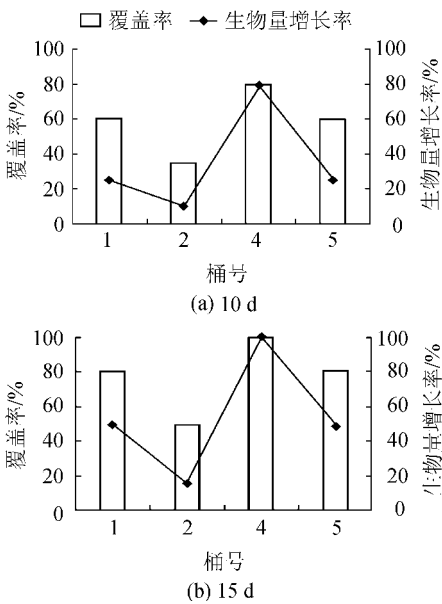


图 2 试验开展第 10 d、第 15 d 各试验桶内菹草的覆盖率及生物量增长率

底泥中的营养盐。试验期间 1—6 号桶内上覆水的 TN、TP 及有机质质量浓度的变化幅度较大,具体情况见图 3 及表 3。

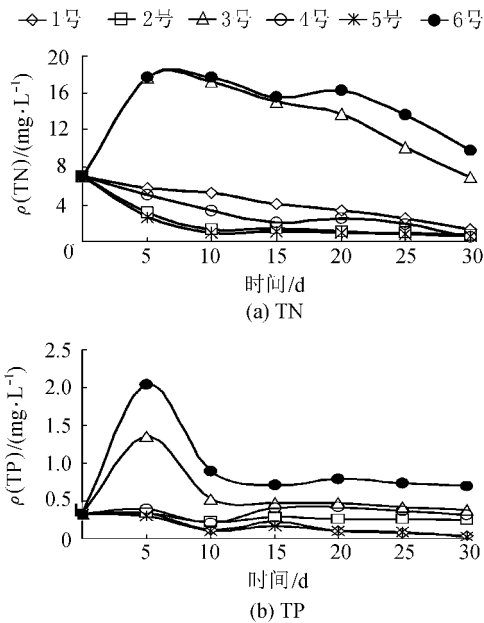


图 3 上覆水中 TN、TP 质量浓度的变化

由图 3 可见,试验桶内上覆水中 TN 质量浓度呈现的规律为 3 号和 6 号>1 号和 4 号>2 号和 5 号,即上覆水体 TN 质量浓度与底泥 TN 质量比成正比。结合试验期间菹草的生长情况,当水体中 N 的质量浓度变动在 4.99~5.72 mg/L 时,菹草的长势最好。当水体中 N 的质量浓度下降到 0.47~1.31 mg/L 时,菹草生长速度明显减慢。由此说明水体中 N 的质量浓度在 5.00 mg/L 左右变动时,菹草生长速度最快,南园河未疏浚段底泥中 TN 质量比高达 17.74 mg/L,

表 3 试验桶内有机质的质量浓度						mg/L
时间/d	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号
0	13.11	13.11	13.11	13.11	13.11	13.11
5	17.60	13.09	27.45	7.96	14.73	27.65
10	9.70	8.45	17.64	10.12	9.07	20.15
15	10.40	13.17	17.69	11.20	14.89	22.64
20	7.33	8.20	11.20	8.64	8.86	14.75
25	11.00	10.90	17.79	10.46	11.52	20.30
30	7.97	9.06	19.83	11.64	8.19	23.49
平均	11.02	10.85	17.82	10.45	11.48	20.30

试验初期水体中 N 的质量浓度超过了 10.00 mg/L , 菹草在此底泥环境中大批腐烂、死亡。由此说明重污染河道疏浚可以降低水体中 TN、TP 和有机物浓度和底泥中 N 的质量浓度 ,以满足菹草的生长要求。栽种 200 g 菹草的试验桶内上覆水中 TN 的质量浓度低于栽种 100 g 菹草的质量浓度 ,说明菹草生物量增大更有利于水体中 N 的净化。

试验桶内上覆水中 TP 质量浓度呈现的规律为：6 号 > 3 号 > 5 号 > 2 号 > 1 号 > 4 号 ,详见图 3。3 种底泥中有机质质量浓度最低的为内城河。有机质

质量浓度越少 ,消耗水体中 DO 就越少 ,泥–水界面处水体的氧化性就越强 ,从而越能抑制底泥中磷的释放^[9] ,因此内城河底泥 TP 质量分数大于南园河疏浚段底泥 ,但水体中的 TP 质量浓度仍属内城河最低。

上覆水中 COD_{Mn} 质量浓度与底泥中有机质质量分数有密切的关系。与其他试验桶内上覆水相比 ,3 号、6 号桶内上覆水中的有机物质量浓度始终最高 ,水体耗氧量最大。如果水体呈缺氧状态 ,底层菹草群落的生长繁殖势必会受到影响。

2.4 疏浚对浮游藻类繁殖的影响

各试验桶内藻类组成、数量及生物量具有较明显的差异。在菹草和藻类竞争营养物质以维持自身繁殖的生命活动中 ,未疏浚河段的底泥特性使得藻类占据竞争优势。前述研究发现 ,栽种于未疏浚河段底泥中的菹草在该种底泥特性环境中无法正常生长繁殖并出现腐烂现象。其体内营养物质伴随底泥中大量的 N、P 和悬浮有机物溶解释放到水体后 ,促进了浮游藻类的大量生长繁殖。浮游藻类遮阴影响光线射入 ,阻碍了菹草叶片的光合作用 ,而其释放出

表 4 不同河段底泥对浮游藻类数量和生物量的影响

时间		蓝藻门		甲藻门		隐藻门		硅藻门		裸藻门		绿藻门		合计	
		数量/	生物量/	数量/	生物量/	数量/	生物量/	数量/	生物量/	数量/	生物量/	数量/	生物量/	数量/	生物量/
		(万个·mL ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)	(万个·mL ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)	(万个·mL ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)	(万个·mL ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)	(万个·mL ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)	(万个·mL ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)	(万个·mL ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)
1 号	第 5 d	225.0	0.045	8.0	0.240							112.0	0.236	345.0	0.521
	第 10 d					4.5	0.180	22.5	0.810			4.8	0.002	31.8	0.992
	第 15 d					24.0	0.960	4.8	0.192					28.8	1.152
	第 20 d							30.0	1.116			15.0	0.027	45.0	1.143
	第 30 d							9.0	0.360			54.0	0.071	63.0	0.431
2 号	第 5 d			6.6	0.198					6.6	0.132	132.0	0.006	145.2	0.336
	第 10 d							35.7	0.952			20.4	0.041	56.1	0.993
	第 15 d	5.4	0.011					37.2	1.512	5.4	0.108	59.4	0.118	107.4	1.749
	第 20 d							54.0	0.954					54.0	0.954
	第 30 d							3.6	0.072	3.6	0.072	126.0	0.085	133.2	0.229
3 号	第 5 d	99.0	0.297	207.0	6.210			18.0	0.720	189.0	4.500	30978.0	17.685	31491.0	29.412
	第 10 d	7.5	0.053					8.0	0.255			916.5	0.470	933.0	0.738
	第 15 d							174.0	6.960	1.5	0.150	624.0	0.348	799.5	7.458
	第 20 d							414.0	15.660			81.0	0.041	49.5	15.701
	第 30 d							3.9	0.078			35.1	0.057	39.0	0.135
4 号	第 5 d	600.0	0.270					6.0	0.240	7.5	0.225	306.0	0.188	919.5	0.903
	第 10 d							81.0	3.060	18.0	1.800	126.0	0.810	225.0	5.67
	第 15 d							14.4	0.576			38.4	0.077	52.8	0.653
	第 20 d							54.0	1.169			45.0	0.099	99.0	1.268
	第 30 d									4.5	0.450			22.5	1.377
5 号	第 5 d							3.0	0.120	12.0	0.240	6.0	0.012	21	0.372
	第 10 d	195.0	0.039					85.8	3.432			7.8	0.005	288.6	3.476
	第 15 d							36.3	3.432			330.0	0.165	366.3	3.597
	第 20 d							90.0	3.42					90.0	3.42
	第 30 d							14.4	0.072					14.4	0.072
6 号	第 5 d	745.5	0.179	136.5	4.095			94.5	1.780	126.0	2.520	7318.5	4.736	8421.0	13.310
	第 10 d									12.0	0.720	5604.0	3.018	5616.0	3.738
	第 15 d	745.2	0.179					36.3	1.221			330.0	0.165	1111.5	1.565
	第 20 d							447.0	16.755			126.0	0.268	573.0	17.023
	第 30 d							9.0	0.630			45.0	0.083	54.0	0.713

表 5 不同河段底泥表面的底栖附泥藻类

门 类		硅藻门		绿藻门		裸藻门		蓝藻门		合计	
		数量/ (万个·mL ⁻¹)	生物量/ (mg·L ⁻¹)	数量/ (万个·mL ⁻¹)	生物量/ (mg·L ⁻¹)	数量/ (万个·mL ⁻¹)	生物量/ (mg·L ⁻¹)	数量/ (万个·mL ⁻¹)	生物量/ (mg·L ⁻¹)	数量/ (万个·mL ⁻¹)	生物量/ (mg·L ⁻¹)
南园河	3 号	174	6.222	174	0.321	3	0.060			351	6.603
未疏浚段	6 号	96	3.273	6	0.306	3	0.300			105	3.879
南园河	2 号	6	0.075							6	0.075
疏浚河段	5 号	3	0.015	3	0.006					6	0.020
内城河段	1 号	81	3.048	36	0.030	3	0.300	150	0.030	270	3.408
	4 号	30	1.152							30	1.152

的藻毒素同样又会危害菹草的正常生长。由表 4 可见,南园河疏浚河段试验桶内发现的浮游藻类数量和生物量均较少。未疏浚河段试验桶内发现的浮游藻类生物量和数量最多,出现的种属包括蓝藻门(*Cyanophyta*)、甲藻门(*Dinoflagellata*)、硅藻门(*Bacillariophyta*)、裸藻门(*Euglenophyta*)和绿藻门(*Chlorophyta*),且以绿藻门(*Chlorophyta*)为主。

装有未疏浚河段底泥的试验桶内绿藻门下的绿球藻(*Chlorococcales*)种群繁殖速度极快。试验后的第 5 d,3 号桶内绿球藻猛增到 29880 万个/L,生物量达到 14.94 mg/L,占藻类总数的 94.9% 和 50.8%。至第 10 d,由于溶解态有机物被大量消耗,COD_{Mn}质量浓度从 27.45 mg/L 降至 17.64 mg/L,绿球藻数量和生物量猛降到 900 万个/L 和 0.45 mg/L,但仍占藻类总数的 96.5% 和 61.0%。随着一段时间泥-水界面反应,试验后期疏浚段水体营养盐含量、浮游藻类数量和生物量得以增加。

2.5 疏浚对底栖附泥藻类繁殖的影响

试验后期研究发现,随着水体中浮游藻类种群及数量的减少,底栖附泥藻类中硅藻门下的颗粒直链藻(*Melosira granul*)、小环藻(*Cyclotella*)、冠盘藻(*Stephanodiscus hantzschii*)等种群则逐步发展起来。这是因为遮蔽水底光照的浮游藻类的减少改善了底栖附泥藻类的光合作用。

由表 5 可知,南园河未疏浚段试验桶内底栖附泥藻类数量及生物量最多,其次是内城河段,南园河疏浚河段最少;且不同河段底泥中底栖附泥藻类的种群结构不一。其中 1 号试验桶内底栖附泥藻类发现了硅藻门、绿藻门、裸藻门和蓝藻门 4 个门类,装有南园河未疏浚段底泥的 3 号、6 号试验桶内底栖附泥藻类发现了 3 个门类,即硅藻门、绿藻门与裸藻门。装有南园河疏浚段底泥的 2 号试验桶内底栖附泥藻类仅发现硅藻门。南园河未疏浚河段底泥含水率最高,且有机物质量分数丰富。由此说明相对于硬质、有机质质量分数低的底泥,底栖附泥藻类更容易从含水率较高的软质泥中汲取营养以实现自身繁殖和种群多样性。4 号试验桶由于菹草覆盖了整个

水面,阻挡了光照,因而其底栖附泥藻类数量和生物量与 1 号相比相对较少。

3 讨 论

通过前述研究,发现试验开展 15 d 后,菹草生长状态、水体营养盐含量等趋于稳定。当南园河未疏浚段试验桶内上覆水中 N 的质量浓度降到 10.00 mg/L 以下,再重新种植菹草未发生菹草腐烂死亡的现象。这与张兰芳^[16]的研究结果相似。重污染河道水体中 TN 质量浓度的降低将有利于菹草生境的恢复。目前苏州河流开展的疏浚工程一般先采用围隔方式将水体拦截,待疏浚完毕后将原河水导入疏浚段。由此可知,若重污染河道采用疏浚结合的调水方式清除内源污染,将更有利于菹草等沉水植物生境的恢复,为其与藻类争夺营养盐增加了竞争优势。沉水植物和浮游植物其中任何一种在水体中过量繁殖均不利于水生态环境的良性发展。若浮游植物过量繁殖,必然导致水体富营养化,而沉水植物过量繁殖,则必然不利于底栖生物的生长,两种情况均不利于水体生物多样性的发展^[20]。沉水植物在营养盐质量分数较低的环境中容易占据生存优势,浮游藻类和附泥藻类的繁殖势必会受到影响,营养盐质量分数的过高和过低都将不利于水生态环境的生物多样性。在重污染河道拟开展疏浚工程之前,需要调查河道底泥层级分布特性、水污染类型和水生态环境的特征,研究待疏浚河道不同疏浚深度的水生态效应,以确定其最佳疏浚程度。

4 结 论

- a. 在外污染源得以控制、水生生物光照和溶解氧等得以满足的条件下,疏浚有利于改善菹草的生境。河道疏浚至底泥 TN、TP 及有机质质量比分别为 1.50 g/kg、1.00 g/kg、27.00 g/kg 左右时有利于菹草种群的恢复;当河道底泥中 TN、TP 及有机质质量浓度分别达到 11.80 g/kg、7.00 g/kg、256.40 g/kg 左右时浮游藻类大量繁殖,菹草发生腐烂死亡。
- b. 菹草生物量越多,越有利于其与浮游藻类竞

争营养、光照等,对自身生长繁殖越有利,从而达到改善水质的目的。当水体中 N 的质量浓度变动在 5.00 mg/L 时,菹草生长速度最快;当 N 的质量浓度上升到 10.00 mg/L 时,菹草植株会发生腐烂。

c. 营养盐丰富有助于缓解浮游植物与菹草之间的竞争,促进两者的生长繁殖。但有机质和营养盐质量分数过量则不利于菹草的生长,浮游藻类在该种水体中占据优势。装有苏州重污染河道未疏浚河段底泥的试验桶内浮游植物优势门为绿藻门。疏浚后浮游藻类数量和生物量均减少。

d. 底栖附泥藻类的数量及生物量受底泥含水率和有机质质量浓度的影响,有机质质量比为 27.00 g/kg、含水率为 50% 左右时,底栖附泥藻类多样性较好。底泥有机质质量比达到 256.40 g/kg 时底栖附泥藻类在底泥表层仍能正常生长和繁殖。说明底栖附泥藻类中发现的颗粒直链藻、小环藻、冠盘藻、菱形藻和绿球藻是耐污能力较强的种类。疏浚后的河道底泥含水率较低,但经过一段时期的泥-水界面反应,其底泥含水率得以提高,底栖附泥藻类数量及生物量将会增加,将有利于底栖附泥藻类的种群多样性。

参考文献：

[1] 刘建康.高级水生生物学[M].北京:科学出版社,1999:233-237.

[2] KUMAR P ,GUPTA R K. Growth characteristics of Potamogeton crispus and Elodea Canadensis in polluted water[J]. Pollution Research 2002 21(3) 305-307.

[3] 高华梅,谷孝鸿,曾庆飞,等.不同基质下菹草的生长及其对水体营养盐的吸收[J].湖泊科学 2010 22(5) 655-659.

[4] 吴振斌,邱东茹,贺锋,等.沉水植物重建对富营养化氮磷营养水体的影响[J].应用生态学报 2003 14(8) :1351-1353.

[5] 米玮洁.不同湖泊沉积物营养特征与沉水植物菹草生长的应答关系研究[D].武汉:华中农业大学,2008:133-135.

[6] 倪乐意.富营养水体中肥沃底质对沉水植物生长的胁迫[J].水生生物学报 2001 25(4) 399-405.

[7] 段昌群.环境生态学[M].北京:科学出版社,2004:315-321.

[8] 包先明,陈开宁,范成新,等.种植沉水植物和疏浚底泥对氮磷营养水平的影响[J].土壤通报 2006 37(5) 932-935.

[9] 濮培民,王国祥,胡春华,等.底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗?[J].湖泊科学 2000 12(3) 269-279.

[10] AE N ,ARIHARA J ,OKADA K ,et al. Phosphorus uptake by pigeon pea and its role in cropping systems of the Indian

subcontinent[J]. Science ,1990 248 :477-480.

[11] CARR G M. Macrophyte growth and sediment phosphorus and nitrogen in a Canadian prairie river[J]. Freshwater Biology , 1998 39 :525-536.

[12] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M].4 版.北京:中国环境科学出版社 2002 224-622.

[13] 张兰芳,朱伟,操家顺,等.污染水体中悬浮物对菹草(*Potamogeton crispus*)生长的影响[J].湖泊科学 2006 18(1) :73-78.

[14] 秦伯强,高光,胡维平,等.浅水湖泊生态系统恢复的理论与实践思考[J].湖泊科学 2005 17(1) 9-16.

[15] 朱敏,王国祥,王建,等.南京玄武湖清淤前后底泥主要污染指标的变化[J].南京师范大学学报:工程技术版,2004 4(2) 66-69.

[16] 张兰芳.水质条件对沉水植物(伊乐藻、菹草)生长的影响[D].南京:河海大学 2006 23-32.

[17] 赵振华,阮晓红,邢雅固,等.城市重污染河道水质及底栖附泥藻类生态特征[J].环境科学 2009 30(12) 3579-3584.

[18] 丁国际,赵洪涛,邹联沛,等.曝气、氮和磷对滇池底泥中菹草生长的影响[J].湖南科技大学学报:自然科学版 2008 23(2) :120-124.

[19] 尹大强,覃秋荣,阎航.环境因子对五里湖沉积物磷释放的影响[J].湖泊科学 1994 1(3) 240-244.

[20] 金相灿.湖泊富营养化控制和管理技术[M].北京:化学工业出版社 2001 52-57.

(收稿日期 2011-09-05 编辑 徐 娟)

(上接第 31 页)

[4] LIU Yong ,YANG Ping-jian ,HU Cheng ,et al. Water quality modeling for load reduction under uncertainty :a Bayesian approach[J]. Water Research 2008 42 :3305-3314.

[5] SHEN Jian ,ZHAO Yuan. Combined Bayesian statistics and load duration curve method for bacteria nonpoint source loading estimation[J]. Water Research 2010 44 :77-84.

[6] LI Zhan-ling ,XU Zong-xue ,SHAO Quan-xi ,et al. Parameter estimation and uncertainty analysis of SWAT model in upper reaches of the Heihe river basin[J]. Hydrological Processes , 2009 23 :2744-2753.

[7] GABRIELE F ,GIORGIO M. Bayesian approach for uncertainty quantification in water quality modelling :the influence of prior distribution[J]. Journal of Hydrology 2010 392 :31-39.

[8] LUNN D J ,THOMAS A ,BEST N ,et al. WinBUGS-a Bayesian modelling framework :concepts ,structure ,and extensibility[J]. Statistics & Computing 2000 10 :325-337.

[9] MALVE O ,QIAN S S. Estimating nutrients and chlorophyll a relationships in Finnish lakes[J]. Environmental Science & Technology 2006 40(24) :7848-7853.

(收稿日期 2011-12-26 编辑 徐 娟)