

滦河干流浮游植物多样性及污染状况

周绪申¹, 齐向华², 吴筱³, 孙峰¹, 孙凯艳¹, 王乙震¹, 张俊¹, 罗阳¹

(1. 水利部海河水利委员会, 天津 300170; 2. 水利部国际经济技术合作交流中心, 北京 100053;
3. 天津市碧波环境资源开发有限公司, 天津 300170)

摘要: 2011年8月和10月分别对滦河水体浮游植物进行了采样和分析。结果表明滦河浮游植物共发现浮游植物8门99种, 物种多样性较高。浮游植物群落组成以蓝藻门为主, 滦河水体蓝藻门细胞密度较大, 所占比例最高, 其次为绿藻门和硅藻门。浮游植物细胞密度和生物量均空间分布不均, 其数值沿程变化趋势较一致, 上游较中下游低, 显示上游水体富营养化水平较低, 而中下游富营养化水平较高。从细胞密度和生物量评价, 上游富营养化水平较低, 而中下游富营养化水平较高。结合 Pielou 指数和 Simpson 指数评价滦河水体污染状况, 表明上游大部分样点为寡污型水体, 下游大部分样点为中污型水体。浮游植物指示污染类型分析表明, 污染指示种类污染10月较8月多。本研究对滦河水体污染状况及水生态修复具有重要的参考价值。

关键词: 滦河; 浮游植物; 生物多样性; 指示生物; 污染类型

中图分类号: X173 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)03-0448-05

Phytoplankton diversity and pollution status in main channel of Luanhe River

ZHOU Xu shen¹, QI Xiang hua², WU Xiao³, SUN Feng¹, SUN Kai yan¹, WANG Yi zhen¹, ZHANG Jun¹, LUO Yang¹

(1. Haihe River Water Conservancy Committee of Ministry of Water Resource, Tianjin 300170, China;

2. International Economic and Technical Cooperation and Exchange Center, Ministry of Water Resources,

Beijing 100053, China; 3. Tianjin Bibo Environmental Resources Development Co., Ltd., Tianjin 300170, China)

Abstract: The phytoplankton diversity in the Luanhe River was sampled and analyzed in August and October 2011. The results showed that (1) a total of 99 taxa with 79 genera and 8 phyla are identified, indicating a high diversity of species; (2) the dominant group is blue green algae in the phytoplankton community composition. The highest proportion of cell density is blue green algae, followed by green algae and diatoms; (3) Cell density and biomass of phytoplankton have unevenly spatial distribution, and their changes show the same trend along the river. Both values are lower in the upstream but higher in the downstream, indicating a lower level of eutrophication in the upstream while a higher level of eutrophication in the downstream; (4) Based on the water pollution analysis using the Pielou index and Simpson index, the upstream has light level of pollution whereas the downstream has middle level of pollution; and (5) the pollution types of phytoplankton indicators suggest that the pollution indicator species are higher in October than those in August. This study provides important reference for the pollution status and aquatic ecosystem restoration in the Luanhe River.

Key words: Luanhe River; phytoplankton; biodiversity; biological indicator; pollution type

浮游植物是淡水生态系统中重要的初级生产者, 在淡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。浮游植物种类组成、数量分布以及生物量是浮游植物群落动态的重要特征, 也是判断水体富营养化程度的关键指标之一, 其种类的组成和分布变化对环境变化具有指示作

用, 同时环境条件的改变也直接或间接地影响到浮游植物的群落组成, 由于存在地域和水利类型差异, 不同水体的浮游植物种类具有不同的特点^[1-2]。作为水体中的初级生产者, 浮游植物的群落结构及其动态与环境因子和营养状态密切相关。在温带地区, 水温是主导的贫营养水体浮游植物群落

收稿日期: 2014-09-30 修回日期: 2015-04-20 网络出版时间: 2015-05-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150513.1535.015.html>

基金项目: 国家国际科技合作专项资助(2013DFA71340); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07203-002); 水利部“948”项目(201412; TG1408)

作者简介: 周绪申(1982-), 男, 山东莒县人, 工程师, 主要从事水质分析方面研究。E-mail: jnsszbp@163.com。

结构发生季节变化的主要原因^[3]。浮游植物的群落的种类组成、数量分布和多样性等群落结构特征是评价水环境质量的重要标准,可以反应环境污染状况。因此,浮游植物已成为生物监测、评价水质污染和营养水平的重要指标,已得到广泛应用并卓有成效^[4]。

滦河水系浮游植物多样性状况调查至今尚未全面开展过,仅开展过滦河干流的水库及河口等区域的调查。20世纪80年代,潘家口-大黑汀水库建成之后开展浮游植物的调查,范围仅局限在两水库的库区^[5],21世纪初对潘家口-大黑汀及入库支流开展了一次浮游植物的调查^[6],2008年和2012年分别在滦河入海口开展过浮游植物调查^[7],而对滦河水系尤其滦河上游地区未开展过调查和研究,因此滦河水系浮游植物整体状况研究并没有得到全面、系统开展。本研究对滦河水系自上游至下游共13个常规水文断面开展采样调查,并对其生物多样性及水体状况进行评价,为滦河水系水生态状况提供重要的基础数据,也为将来环境演变分析及河流水生态修复提供必要的参考数据。

1 研究区概况

滦河流域是西接北三河水系,东邻辽河水系,主要分布于坝上高原、燕山山地与河北平原,呈现西北-东南走向的一条狭长地带^[8]。滦河发源于河北省丰宁县,流经沽源县、多伦县、隆化县、滦平县、承德县、宽城满族自治县、迁西县、迁安县、卢龙县、滦县、昌黎县、在乐亭县南兜网铺注入渤海。多年平均径流量4 694亿m³,最大洪峰35 000 m³/s,全长888 km,总流域面积44 750 km²,其中流域面积较大的支流有9条,即小滦河、兴洲河、伊逊河、武烈河、老牛河、柳河、瀑河、灏河及青龙河。

滦河是我国北方流量较大、常年有水的河流之一,为沿岸的工农业生产、居民生活提供了水源。20世纪70年代引滦工程开通以来,滦河还供应天津、唐山等大城市生活饮用水及工业用水,起不可替代的作用。20世纪60年代以来滦河两岸森林砍伐速度过快,造成汛期泛滥成灾,冬春季流量锐减,沿岸各种工业发展迅速,居民人数急剧增长,生产废水和生活污水任意排放,已严重影响和制约了滦河流域的工农业生产和居民生活^[9]。通过对滦河干流径流的长期演变趋势分析表明:在气候变化和人类活动影响下,滦河流域地表水资源量出现显著的衰减趋势,并引起滦河下游河道系统严重退化、近代滦河三角洲萎缩、下游平原区地下水位下降等若干生态环境问题^[10]。

2 研究方法

2.1 采样时间与样点布设

根据6月至10月气温高,浮游植物种类较多的特点,本研究于2011年8月份和10月份分别对滦河进行了浮游植物样品采集,样点分布参照水文观测样点布设,共计13个样点,均分布在滦河干流,自上游至下游分别为:闪电河库区、白城子、郭家屯、张百湾、三道河子、下板城、乌龙矶、潘家口、潘家口坝上、郭沟桥、桑园、京山铁路桥和姜各庄,样点分布见图1。



注: N: 闪电河库区, O: 白城子, O: 郭家屯, O: 张百湾, O: 三道河子, O: 下板城, X: 乌龙矶, O: 潘家口村, U: 潘家口水库坝上, U: 郭沟桥, U: 桑园, U: 京山铁路桥, U: 姜各庄

图1 滦河水系样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the Luanhe River

2.2 浮游植物种类鉴定与生物量计算

浮游植物采样方法参照《水和废水监测分析方法》^[11],浮游植物定性样品用25号浮游生物网(200目),在水下0.15 m处作“∞”字型拖曳3 min,收集到的浮游植物装入100 mL样本瓶中,加3 mL福尔马林固定带回分析;浮游植物定量样品则取1 L水样于样品瓶中,加15 mL鲁哥氏液固定,带回实验室静置后分析。

浮游植物镜检以ZEISS Scope A1显微镜进行,定性样品分类主要依据形态学分类方法,种类鉴定参照《Freshwater Algae of North America: Ecology and Classification》^[12]和《中国淡水藻类—系统、分类及生态》^[13];定量样品带回实验室静置24 h,然后浓缩至30 mL,以浮游生物计数框对其进行计数,根据浓缩倍数计算藻细胞密度;浮游植物生物量计算参照《内陆水域渔业自然资源调查手册》^[14],根据浮游植物体积大小进行计算。水体营养类型评价根据参照藻类生物学指标与标准^[15],见表1。

表1 营养类型评价指标与标准

Tab. 1 Eutrophication type evaluation indicators and their standards

评价指标	评价标准						
	极贫营养	贫营养	贫中营养	中营养	中富营养	富营养	极富营养
细胞密度 / 10 ⁶ 个	≤ 0.5	≤ 1.0	1~9	10~40	41~80	81~99	≥ 100
生物量 / (mg · L ⁻¹)	< 0.1	< 1.0	< 3.0	< 5.0	< 7.0	< 10.0	≥ 10.0

2.3 浮游植物多样性指数计算

浮游植物多样性指数包括 Shannon Wiener 指数 H' (S)、Margalef 指数 R、Simpson 指数 D、Pielou 指数 J、优势度指数 Y、藻类综合指数 K,计算公式如下:

$$H'(S) = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i \quad (1)$$

$$R = \frac{S-1}{\ln N} \quad (2)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2, P_i = \frac{n_i}{N} \quad (3)$$

$$J = \frac{H'}{\log_2 S} \quad (4)$$

$$Y = \frac{n_i f_i}{N} \quad (5)$$

$$K = \frac{(\text{蓝藻门} + \text{绿球藻目} + \text{中心纲硅藻} + \text{裸藻}) \text{种类数}}{\text{硅藻目种数}} \quad (6)$$

式中: P_i 为第 i 种个体数所占总个体数的比例; S 为种类个数; N 为同一样品中的个体总数; n_i 为第 i 种的个体数^[13-14]; f_i 为第 i 种在各样点出现的频率。

浮游植物种类多样性指数越高,其群落结构越复杂,稳定性越大,水质也越好,浮游植物多样性指数评价水质类型标准见表 2^[15-18]。

浮游植物指示污染类型分析主要参照文献[19]方法进行统计分析,污染指示类型主要分为 α_m 、 β_m 、 α_s 和 β_s 。

表 2 生物多样性指数评价污染类型标准

Tab. 2 Algal biodiversity index standard for pollution evaluation

多样性指数	清洁型	清洁寡污型	β 中污型	α 中污型
Shannon Wiener 指数		> 3	1~ 3	0~ 1
Pielou 指数	0.8~ 1.0	0.5~ 0.8	0.3~ 0.5	0~ 0.3
Simpson 指数	> 6	4~ 6	2~ 3	0~ 2
Margalef 指数	> 5	4~ 5	3~ 4	0~ 3
藻类综合指数		≤ 1.0 (贫营养)	1.0~ 2.9 (中营养)	≥ 3 (富营养)

3 结果与分析

3.1 浮游植物群落组成

2011 年滦河 13 个样点两次浮游植物采集和鉴定中,共发现蓝藻门(Cynophyta)、绿藻门(Chlorophyta)、硅藻门(Bacillariophyta)、隐藻门(Cryptophyta)、甲藻门(Dinophyta)、金藻门(Chrysophyta)和黄藻门(Xanthophyta)等 8 个门类,共计 79 属 99 种,其中绿藻门的种类数最多,共鉴定出 31 属 36 种,其次为硅藻门和蓝藻门,其它门类种类数量均未超过 10 种,所占种类比例较少。

在 8 月和 10 月样品分析中分别鉴定出 63 和 55 种,两次调查各门类种数组成见图 2、图 3。8 月份浮游植物种类较 10 月份稍多,可能原因为 8 月份较 10 月份气温高、光照强烈,较适宜浮游植物生长。另外,绿藻门在两次调查中种类数均最多,两次调查分别鉴定出 23 和 22 种,其次为硅藻门和蓝藻门,再次为裸藻门,两次调查分别有 7 种和 3 种,金藻门、隐藻门、甲藻门和黄藻门种类较少,通过优势度测定席藻、舟行藻、小球藻和月牙藻为优势种。

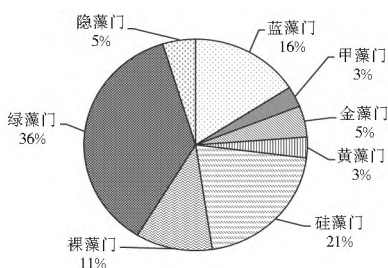


图 2 8 月份滦河水系浮游植物的种类组成
Fig. 2 Phytoplankton species composition in the Luanhe River in August

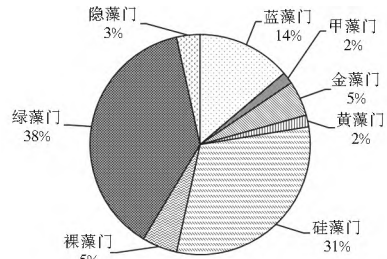


图 3 10 月份滦河水系浮游植物的种类组成
Fig. 3 Phytoplankton species composition in the Luanhe River in October

3.2 浮游植物细胞密度与生物量

滦河浮游植物各样点细胞密度与生物量见图 4, \hat{U} 样点细胞密度最大,为 41.4×10^6 个/L,其次为样点 \hat{O} 、 \hat{N} 、 \hat{U} 和 \hat{U} ,细胞密度分别为 14.92×10^6 个/L、 12.19×10^6 个/L、 11.94×10^6 个/L 和 6.14×10^6 个/L, \hat{O} 和 \hat{U} 样点细胞密度最小,分别为 0.35×10^6 和 0.18×10^6 个/L,其余的样点细胞密度为两者之间。总体来看藻细胞密度在空间分布不均,滦河下游和上游样点较高,中游各样点细胞密度较低,在潘家口水库坝上藻细胞密度较高,反应了水库的富营养化水平较高,应值得我们警惕。从各样点浮游植物平均细胞密度组成来看,蓝藻门细胞密度最大,为 3.18×10^6 个/L,所占比例最高,其次为绿藻门和硅藻门,细胞密度分别为 2.61×10^6 和 1.74×10^6 个/L,其它门类细胞密度均较小,其中甲藻门细胞密度最小,仅为 0.04×10^6 个/L。

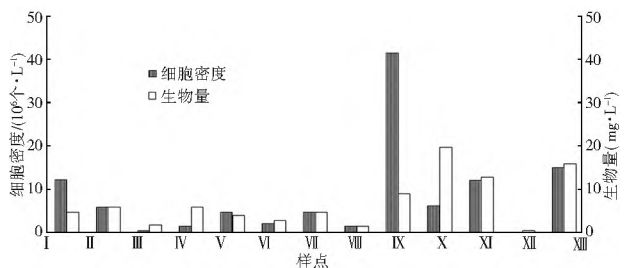


图 4 滦河水系浮游植物细胞密度与生物量
Fig. 4 Phytoplankton cell density and biomass in the Luanhe River system

滦河浮游植物总生物量在 0.49~ 19.68 mg/L 之间,平均生物量为 6.84 mg/L 之间。其中样点 \hat{U} 平均生物量最高,为 1.51 mg/L,其次为 \hat{O} 和 \hat{U} 样点,生物量分别为 1.21 mg/L 和 0.96 mg/L, \hat{U} 样点生物量最小,为 0.04 mg/L,其余的样点生物量为两者之间。总体来看浮游植物生物量在各样点变化趋势与细胞密度类似,均空间分布不均,滦河下游和上游样点较高,中游各样点细胞密度较低。从浮游植物各样点平均生物量组成可知,硅藻门生物量最高,为 3.65 mg/L,其次为绿藻门和蓝藻门,分别为 1.28 mg/L 和 0.78 mg/L,甲藻门生物量最少,仅为 0.005 mg/L,裸藻门、金藻门、隐藻门和黄藻门生物量分别为 0.44 mg/L、0.42 mg/L、0.17 mg/L 和 0.09 mg/L。

参照湖泊营养类型评价的藻类生物学指标与标准(表 2),根据细胞密度指标评价滦河各样点营养化水平,评价结果见表 3。 \hat{O} 、 \hat{U} 样点为极贫营养化水平, \hat{O} 、 \hat{O} 、 \hat{O} 、 \hat{O} 、 \times 、 \hat{O} 和 \hat{U} 样点为贫中营养化水平, \hat{N} 、 \hat{U} 和 \hat{O} 为样点中营养化水平, \hat{U} 样点为中富营养化水平。根据生物量指标评价, \hat{U}

样点为极贫营养化水平, 样点 $\hat{0}$ 、 $\hat{0}$ 、 $\hat{0}$ 和 \emptyset 为贫中营养化水平, \hat{N} 、 $\hat{0}$ 和 \times 样点为中营养化水平, $\hat{0}$ 样点为中富营养化水平, \hat{U} 样点为富营养化水平, \hat{U} 、 \hat{U} 和 \hat{U} 样点为极富营养化水平。从评价结果来看, 整体而言, 上游富营养化水平较低, 而中下游富营养化水平较高。 \hat{U} 样点两种评价结果均为极贫营养化水平, 考虑 \hat{U} 为样点受到污染影响, 不适宜浮游植物生长所致。

通过细胞密度和生物量判断结果变化趋势基本一致, 但

两种评价结果有些差异, 细胞密度评价富营养化水平好于细胞密度评价结果, 再次在 $\hat{0}$ 、 \hat{U} 、 \hat{U} 和 \hat{U} 样点评价结果不一致, 主要原因一方面可能为各样点水生态环境变化较大, 如滦河上游闪电电水库以下和滦河下游大黑汀水库以下为常处于断流状态, 因此浮游植物群落结构变化较大; 另一方面对河流通过浮游植物细胞密度和生物量评价河流富营养化水平, 仍需进一步细化评价标准, 并与其它影响因素相结合进行评价。

表 3 水体营养化程度评价结果

Tab. 3 Water eutrophication evaluation results

评价参数	样点												
	\hat{N}	$\hat{0}$	$\hat{0}$	$\hat{0}$	$\hat{0}$	$\hat{0}$	\times	\emptyset	\hat{U}	\hat{U}	\hat{U}	\hat{U}	\hat{U}
细胞密度	中	贫中	极贫	贫中	贫中	贫中	贫中	贫中	中富	贫中	中	极贫	中
生物量	中	中富	贫中	贫中	中	贫中	中	贫中	富	极富	极富	极贫	极富

3.3 浮游植物多样性分析及评价

浮游植物多样性指数是常用的水质评价指标, 水体受污染后, 浮游植物群落往往出现种类减少而某些抗性强种类的分体大量增长的倾向, 导致多样性指数下降, 因此多样性指数可反映水体的污染情况^[18], 滦河浮游植物多样性指数见表 4。

表 4 滦河浮游植物多样性指数

Tab. 4 Phytoplankton diversity index in the Luanhe River

样点	Shannon Wiener 指数	Pielou 指数	Simpson 指数	Margalef 指数
\hat{N}	0.646	0.278	1.223	0.245
$\hat{0}$	2.943	0.693	4.495	1.156
$\hat{0}$	3.450	0.863	7.547	1.175
$\hat{0}$	3.067	0.886	5.155	0.706
$\hat{0}$	3.614	0.949	10.875	0.847
$\hat{0}$	3.091	0.812	5.632	0.895
\times	3.445	0.826	8.253	1.106
\emptyset	1.792	0.422	2.312	1.274
\hat{U}	2.817	0.614	4.036	1.311
\hat{U}	3.251	0.813	7.469	0.960
\hat{U}	2.147	0.564	3.270	0.798
\hat{U}	2.440	0.641	3.008	1.075
\hat{U}	2.886	0.706	4.485	0.968

Shannon Wiener 多样性指数范围在 0.464~3.614, 平均值为 2.738。Pielou 指数范围在 0.278~0.949, 平均值为 0.697。Simpson 指数范围在 1.223~10.875, 平均值为 5.212, 总体来看, Shannon Wiener 多样性指数中上游多样性指数较高, 而中下游多样性指数较低。Shannon Wiener 多样性指数在大部分样点较高, 表明滦河大部分样点污染程度较轻。

Margalef 指数在 0.245~1.311, 平均值为 0.963, 各样点指数均在 0~3, 为 α 中污型, Margalef 指数对各样点的污染类型指示不敏感, 未能反映滦河各样点污染状况, 故该指数不适合对滦河各个样点进行评价。鼓藻仅在滦河 \hat{U} 样点种出现 2 种, 该样点藻类综合指数为 3.5, 营养类型为富营养, 由于鼓藻在滦河各样点分布太少, 故藻类综合指数也不适合对滦河各个样点进行评价。本研究主要采用 Shannon Wiener 多样性指数、Pielou 指数和 Simpson 指数对滦河各样点污染类型状况进行评价。

\hat{N} 和 \hat{U} 样点采用三种指数的评价结果大体相同, 分别为 α 中污型和 β 中污型。 $\hat{0}$ 和 \emptyset 样点通过 Shannon Wiener 指数评级是 β 中污型, 而采用 Pielou 指数和 Simpson 指数评价时均为清洁-寡污型, $\hat{0}$ 、 $\hat{0}$ 、 \times 和 \hat{U} 样点通过 Shannon Wiener 指数评级为清洁-寡污型, 而通过 Pielou 指数和 Simpson 指数评价时均为清洁型, \hat{U} 样点通过 Shannon Wiener 指数评级是 β 中污型, 而通过 Pielou 指数和 Simpson 指数评价时均为清洁-寡污型, $\hat{0}$ 和 $\hat{0}$ 样点通过 Shannon Wiener 指数和 Simpson 指数评价时均为清洁-寡污型, 而通过 Pielou 指数评级是清洁型, \hat{U} 和 \hat{U} 样点通过 Shannon Wiener 指数和 Simpson 指数评价时均为 β 中污型, 而通过 Pielou 指数评级是清洁-寡污型。通过三种多样性指数对滦河污染类型的评价可知, 部分样点浮游植物多样性指数评价结果较一致, 部分样点几种生物多样性指数评价结果有差异, 滦河上游大部分样点为寡污型水体, 下游大部分样点为中污型水体。

3.4 浮游植物指示污染类型分析

分别对 8 月和 10 月浮游植物污染类型进行比较, αm 型污染在 8 月和 10 月分别有 3 种和 7 种, 其中 8 月蓝藻门、裸藻门、绿藻门各 1 种, 10 月蓝藻门、裸藻门、绿藻门各有 2 种, 隐藻门 1 种。 βm 型污染型分别在 8 月和 10 月有 3 种和 5 种, 其中, 蓝藻门、绿藻门在 8 月和 10 月种类数相同, 分别为 2 种和 1 种, 此外, 裸藻门和隐藻门在 10 月各有 1 种。 os 分别在 8 月和 10 月都有 2 种, 但 8 月, 蓝藻门有 2 种, 而 10 月蓝藻门和隐藻门各有 1 种, ps 在 8 月和 10 月分别有 2 种和 5 种, 绿藻门在 8 月和 10 月都有 1 种, 裸藻门 8 月有 1 种, 10 月有 2 种, 此外, 10 月蓝藻门、隐藻门各有 1 种。通过数据可以

表 5 浮游植物污染类型分布

Tab. 5 Distribution of phytoplankton pollution types

浮游植物	αm		βm		os		ps	
	8 月	10 月	8 月	10 月	8 月	10 月	8 月	10 月
蓝藻门	1	2	2	2	2	1		1
裸藻门	1	2		1			1	2
绿藻门	1	2	1	1			1	1
隐藻门		1		1		1		1
合计	3	7	3	5	2	2	2	5

看出, 滦河水体浮游植物中型污染较多, 而寡污型的较少, 10 月浮游植物污染种类数较多, 污染较 8 月严重。

4 结论与讨论

4.1 主要结论

(1) 2011 年 8 月和 10 月分别对滦河水体浮游植物进行了分析, 共发现浮游植物 8 门 99 种, 物种多样性较高。滦河水体蓝藻门细胞密度较大, 所占比例最高, 其次为绿藻门和硅藻门。浮游植物细胞密度和生物量均空间分布不均, 其数值沿程变化趋势较一致, 上游较中下游低, 显示上游水体富营养化水平较低, 而中下游富营养化水平较高。从细胞密度和生物量评价, 上游富营养化水平较低, 而中下游富营养化水平较高。

(2) Shannon Wiener 多样性指数范围在 0.464~3.614, 中上游多样性指数较高, 而中下游多样性指数较低, 多样性指数在大部分样点较高, 表明滦河大部分样点污染程度较轻。Margalef 指数和藻类综合指数不适合对滦河各个样点中进行评价。通过结合 Pielou 指数和 Simpson 指数评价滦河水体污染状况, 表明上游大部分样点为寡污型水体, 下游大部分样点为中污型水体。浮游植物指示污染类型分析表明滦河水体浮游植物中型污染较多, 而寡污型的较少, 10 月浮游植物污染种类数较多, 污染较 8 月严重。

4.2 讨论

本研究中仅为一个年份的调查, 且调查月份仅在夏秋季节的两次调查, 未覆盖一年中的全部月份, 可能存在因为气候、水量等因素带来的年际变化的影响, 因此一些调查种类可能会存在调查不全的问题。在样点布设中, 样点分布较分散, 且分布密度较小, 仅参照水质水文站点布设, 因此样点布设中, 受局部区域的水体因素影响较大, 可能存在以点代面的问题, 在将来的调查过程中, 将对样点的布设合理性加以改进。

在滦河浮游植物种类鉴定、分析、研究过程中难免出现不足, 对滦河浮游植物物种组成以及各区域之间的差异未能全面研究。应用浮游植物多样性指数评价水质时, 至少选用 2 种以上的计算式进行计数, 以确保评价结果的可信性, 本研究选择 4 种多样性指数, 并结合浮游植物群落结构、生物量等参数评价, 结果据有较高的可信度和参考性。本研究通过浮游植物多样性及污染特性反映水体的污染状况, 对滦河水体生态状况的改善具有重要的参考价值。

参考文献 (References):

[1] 张婷, 李林, 宋立荣. 熊河水库浮游植物群落结构的周年变化[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 1-2. (ZHANG Ting, LI Lin, SONG Li Rong. Annual dynamics of phytoplankton abundance and community structure in the Xionghe Reservoir[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 1-2. (in Chinese))

[2] 沈会涛, 刘存奇. 白洋淀浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析[J]. 湖泊科学, 2008, 20(1): 773-779. (SHEN Hui tao, LIU Cun qi. Canonical correspondence analysis of phytoplankton community and its environmental factors in the Lake Baiyangdian[J]. Journal of Lake Science, 2008, 20(1): 773-779.

(in Chinese))

- [3] 刘蕾, 肖利娟, 韩博平. 一座南亚热带小型贫营养水库浮游植物群落结构及季节变化[J]. 生态学报, 2008, 27(4): 218. (LIU Lei, XIAO Li Juan, HAN Bo ping. Dynamics and structure of the phytoplankton community of a small oligotrophic reservoir in southern China[J]. Ecology Science, 2008, 27(4): 218. (in Chinese))
- [4] 覃雪波. 安邦河湿地夏季浮游植物对水质的生物监测[J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2009, 27(2): 184-189. (QIN Xue bo. Biomonitoring water quality by using phytoplankton in Anbang River wetland during summer[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2009, 27(2): 184-189. (in Chinese))
- [5] 水利部海委引滦工程管理局. 潘家口、大黑汀水库水质管理规划报告[R]. 天津: 水利部海河水利委员会, 1989. (Ministry of Water Resources Engineering HWCC Luanhe Authority. Water Quality Management Planning Report for Panjiakou Daheiting Reservoirs[R]. Tianjin: Haihe River Water Conservancy Committee, 1989. (in Chinese))
- [6] 王新华, 纪炳纯, 李明德, 等. 引滦工程上游浮游植物及其水质评价[J]. 环境科学研究, 2004, 17(4): 18-24. (WANG Xin Hua, JI Bing Chun, LI Ming De, et al. Phytoplankton and bioassessment of water quality in upper waters of Yinluan Project[J]. Research of Environmental Science, 2004, 17(4): 18-24. (in Chinese))
- [7] 李莉, 陈武军, 张永丰. 滦河口, 北戴河海域夏季浮游植物群落变化研究[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(6): 896-901. (LI Li, CHEN Wu jun, ZHANG Yong feng, et al. Variation characteristics of phytoplankton communities structure in Luanhe Beidaihe estuary in summer[J]. Marine Environmental Science, 2013, 32(6): 896-901. (in Chinese))
- [8] 王子平. 简论滦河文化体系及其基本特征[J]. 唐山学院学报, 2012, 25(4): 5-7. (WANG Zi pin. The cultural system and essential features of the Luan River[J]. Journal of Tangshan College, 2012, 25(4): 5-7. (in Chinese))
- [9] 崔光华, 何燕青. 滦河污染及治理[J]. 煤矿环境保护, 1999, 13(5): 36-37. (CUI Guanghua, HE Yanqing. Pollution and treatment in Luan River[J]. Coal Mine Environmental Protection, 1999, 13(5): 36-37. (in Chinese))
- [10] 路献品, 王刚, 陈宁, 等. 滦河流域水资源开发的水文效应及其生态环境响应[J]. 环境保护科学, 2014, (1): 18-21. (LU Xian pin, WANG Gang, CHEN Ning, et al. Hydrological effects of water resources development and its environmental response in Luanhe River Basin[J]. Environmental Protection Science, 2014, (1): 18-21. (in Chinese))
- [11] 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. (Ministry of Environmental Protection and Water and wastewater monitoring and analysis methods Editorial Committee. Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods[M]. 4th edit, Beijing: China Environmental Science Press, 2002. (in Chinese))
- [12] John D, Robert G. Freshwater Algae of North America: Ecology and Classification[M]. Academic Press, Amsterdam; Boston: 2003.

(下转第 462 页)

- (in Chinese)
- [15] 王振强, 刘春广, 乔光建. 氮、磷循环特征对水体富营养化影响分析[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(6): 82-85, 87. (WANG Zhen-qiang, LIU Chun-guang, QIAO Guang-jian. Effect of nitrogen and phosphorus cycling characteristic on eutrophication of water body[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(6): 82-85, 87. (in Chinese))
- [16] 刘双爽, 陈诗越, 姚敏, 等. 天津地区团泊洼水库和七里海沼泽水质研究[J]. 湿地科学, 2014, 2(12): 257-261. (LIU Shuang-shuang, CHEN Shi-yue, YAO Min, et al. Water quality of Tianpowa Reservoir and Qilihai Marshes in Tianjin Area[J]. Wetland Science, 2014, 2(12): 257-261. (in Chinese))
- [17] 姚敏, 刘倩, 李艳玲, 等. 南京市两个小型富营养湖泊浮游硅藻的季节性变化[J]. 湖泊科学, 2009, 2(5): 693-699. (YAO Min, LIU Qian, LI Yan-ling, et al. Seasonal change of planktonic diatom of two small shallow eutrophic lakes in Nanjing[J]. Journal of Lake Science, 2009, 2(5): 693-699. (in Chinese))
- [18] 梁淑轩, 王云晓, 秦哲. 白洋淀叶绿素 a 及其水质因子分析[J]. 海洋湖沼通报, 2012(3): 66-73. (LIANG Shu-xuan, WANG Yun-xiao, QIN Zhe. Chlorophyll a and analysis of water quality of Lake Baiyangdian[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2012(3): 66-73. (in Chinese))
- [19] 沈吉, 薛滨, 吴敬禄, 等. 湖泊沉积与环境演化[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 289-308. (SHEN Ji, XUE Bin, WU Jing-lu, et al. The Lacustrine Record and Environmental Evolution[M]. Beijing: Science Publishing House, 2010: 289-308. (in Chinese))
- [20] 徐信, 支崇远, 马健荣, 等. 硅藻在水质监测和古环境重建中的应用[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(9): 5216-5217, 5386. (XU Xin, ZHI Chong-yuan, WANG Xing, et al. Application of diatoms in water quality monitoring and reconstruction of palaeo-environment[J]. Journal of Anhui Agri. Sci. 2011, 39(9): 5216-5217, 5386. (in Chinese))
- [21] 李国忱, 刘录三, 汪星, 等. 硅藻在河流健康评价中的应用研究进展[J]. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2617-2624. (LI Guo-chen, LIU Lu-san, WANG Xing, et al. Applications of diatom in river health assessment: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(9): 2617-2624. (in Chinese))
- [22] 董旭辉, 羊向东, 潘红玺. 长江中下游地区湖泊现代沉积硅藻分布基本特征[J]. 湖泊科学, 2004, 16(4): 298-304. (DONG Xu-hui, YANG Xiang-dong, PAN Hong-xi. Distribution of modern lake sediment diatoms in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River Catchment[J]. Journal of Lake Science, 2004, 16(4): 298-304. (in Chinese))
- [23] 李亚蒙, 赵琦, 冯广平, 等. 白洋淀硅藻分布及其与水环境的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(17): 4559-4570. (LI Ya-meng, ZHAO Qi, FENG Guang-ping, et al. The diatom assemblages and their response to different environments of Baiyangdian Lake, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(17): 4559-4570. (in Chinese))
- [24] 胡胜华, 叶艳婷, 贺锋, 等. 武汉月湖近代沉积物中的硅藻组合与环境关系研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(3): 490-498. (HU Sheng-hua, YE Yan-ting, HE Feng, et al. Relationship between diatom assemblage in modern sediments and the environment of Yuehu Lake in Wuhan[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(3): 490-498. (in Chinese))

(上接第 452 页)

- [13] 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. (HU Hong-jun, WEI Yin-xin. The freshwater algae of China—systematics, taxonomy and ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [14] 张觉民, 何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册[K]. 北京: 农业出版社, 1991. (ZHANG Jue-min, HE Zhi-hui. Inland water fisheries natural resources survey manual[K]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [15] 况琪军, 马沛明, 胡征宇, 等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(2): 89-90. (KUANG Qi-jun, MA Pei-ming, HU Zheng-yu, et al. Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology[J]. Journal of Safety and Environment, 2005, 5(2): 87-91. (in Chinese))
- [16] Shannon E. Weaver W. The mathematical theory of communication[M]. London: The University of Illinois Press, 1949.
- [17] 高远, 慈海鑫, 亓树财, 等. 沂河 4 条支流浮游植物多样性季节动态与水质评价[J]. 环境科学研究, 2009, 22(2): 177-179. (GAO Yuan, CI Hai-xin, QI Shu-cai, et al. Seasonal changes of phytoplankton diversity and assessment of water quality in four tributaries of Yi River[J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(2): 177-179. (in Chinese))
- [18] 王大鹏, 陈晓汉, 张益峰, 等. 合浦水库浮游植物及营养现状评价[J]. 水产学杂志, 2009, 22(1): 56-67. (WANG Da-peng, CHEN Xiaohan, ZHANG Yi-feng, et al. Phytoplankton and trophic levels in Hepu Reservoir[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2009, 22(1): 56-67. (in Chinese))
- [19] 日本生态学会环境问题专门委员会. 卢全章译. 环境和指示生物(水域分册)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1987. (Ecological Society of Japan Panel on Environment. LU Quan-zhang translated. The environment and biological indicator: Water volume[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1987. (in Chinese))