J. Lake Sci.(湖泊科学),2010,**22**(5):700-707
http://www.jlakes.org. E-mail:jlakes@niglas.ac.cn
© 2010 by *Journal of Lake Sciences*

黄河干流浮游植物群落特征及其对水质的指示作用*

王　勇[1,2],王海军[1**],赵伟华[1,2],茹辉军[1,2]
(1:中国科学院水生生物研究所,武汉 430072)
(2:中国科学院研究生院,北京 100049)

摘　要:2008 年 5－6 月和 9－10 月对黄河干流 13 个河段和 4 座水库的浮游植物群落及其环境进行了全面调查. 共鉴定浮游植物 8 门 83 属 150 种,其中有硅藻 59 种,绿藻 55 种,蓝藻 24 种,甲藻 4 种,裸藻 4 种,金藻 2 种,黄藻 1 种和隐藻 1 种,平均细胞密度和生物量分别为 126.90×10^{4}cells/L 和 0.940mg/L. 从大的格局上看,浮游植物群落在种类数、种类组成和现存量上均存在较明显的空间分异,这种分异性可从河流流速、泥沙含量和受污染程度得到解释. 根据浮游植物污染指示种和 Shannon-Wiener 多样性指数分析,黄河干流各河段多受到不同程度的污染. 与 1986 年的资料相比,黄河干流浮游植物组成发生了明显变化,属数下降了 9.8%,而平均生物量升高了 128.7%,且在种类组成上也发生了明显的变化,表明河流污染程度的加剧.
关键词:浮游植物;群落特征;污染指示;历史变化;黄河干流

Phytoplankton assemblage characteristics and their indication of water quality in the mainstream of the Yellow River

WANG Yong[1,2], WANG Haijun[1], ZHAO Weihua[1,2] & RU Huijun[1,2]
(1:*Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan* 430072, *P. R. China*)
(2:*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *P. R. China*)

Abstract: An investigation on the phytoplankton assemblage in the mainstream of the Yellow River was carried out in May－June and September－October 2008. A total of 150 species belonging to 83 genera, 8 phylum of phytoplankton were identified. Bacillariophyta, Chlorophyta and Cyanophyta were the main taxa, containing 59 species, 55 species and 24 species, respectively. Cell density and the biomass of total phytoplankton were averaged 126.90×10^{4}cells/L and 0.940mg/L, respectively. In a large scale, high spatial heterogeneity was found in the species number, species composition and standing crops of the phytoplankton. The heterogeneity can be explained by the water velocity, sediment discharge and the pollution the water received. According to the assessment by saprobic indicator and Shannon-Wiener biodiversity index, most river sections were polluted. Compared with the historical data of 1986, the genus number of total phytoplankton in the mainstream of the Yellow River decreased by 9.8%, while the biomass increased by 128.7%. These changes suggested that the pollution of the mainstream of the Yellow River have intensified.
Keywords: Phytoplankton; assemblage characteristics; saprobic indicator; historic changes; mainstream of the Yellow River

黄河是中国第二长河,是我国西北和华北地区重要的水资源[1],在沿黄各省的经济发展中起着举足轻重的作用,而水资源量的匮乏决定了黄河水污染低承载能力的基本特性. 由于废污水的大量排放以及超过 80% 的水资源开发利用率,黄河的健康状况严重受胁,其生态系统服务功能大大丧失[2]. 浮游植物是水域生态系统中重要的生态类群,可用于指示生态系统的健康状况. 浮游植物由于其个体小、细胞结构简单等特点,对栖息环境的变化极为敏感,因此相对于其他生物类群更能及时地反映水域生态环境的变化[3]. 然而,关于黄河流域的浮游植物方面的资料仅见零星报道[4-5]. 相对较系统的仅有 20 世纪 80 年代黄河水系渔业资

* 水利部公益性行业科研专项基金项目(2007SHZ1－19)资助. 2009－11－13 收稿;2010－01－24 收修改稿. 王勇,男,1984 年生,硕士研究生;E-mail: wyhzau@yahoo.com.cn.
** 通讯作者;E-mail:wanghj@ihb.ac.cn.

源调查协作组[6]在调查黄河流域渔业资源时开展的工作. 本研究的目的在于通过选择上、中、下游不同河段开展全面调查，了解黄河浮游植物的群落特征及其空间格局，进而探讨浮游植物群落特征对其环境的指示作用，以期为黄河水资源综合利用、流域的综合整治和渔业资源的合理利用提供基础参考资料.

1 材料与方法

1.1 采样站布设

调查区域从刘家峡水库到利津河段，全长跨度约 3400km. 包括 13 个河段和 4 座水库(图 1). 刘家峡至头道拐属于黄河上游，府谷至小浪底属于中游河段，花园口以下属于下游.

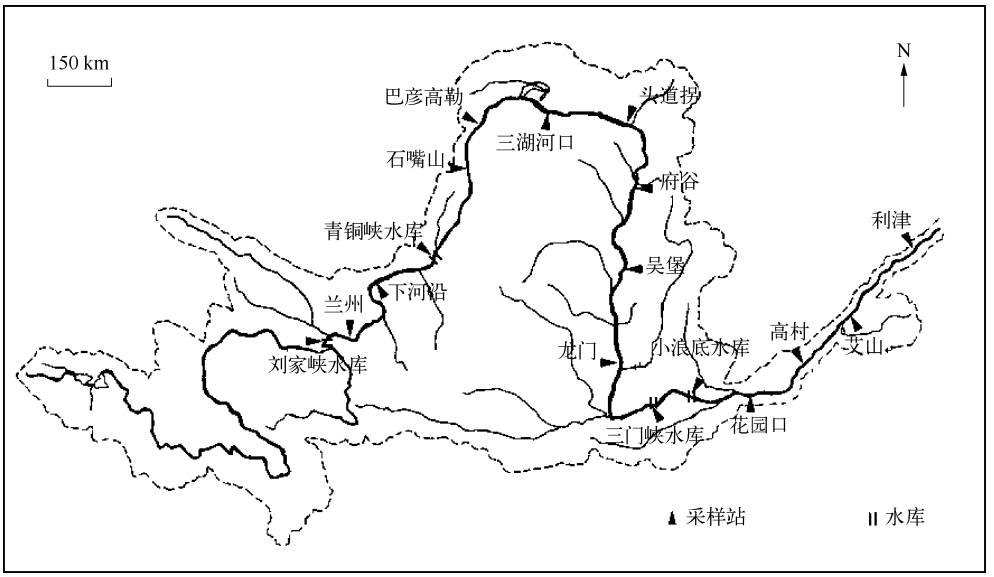


图 1 黄河干流样站分布

Fig. 1 Distribution of the sampling stations in the mainstream of the Yellow River

1.2 样品采集与分析

浮游植物定性样品用 25 号浮游生物网捞取，用 4% 的甲醛溶液固定. 定量水样用 5L 采水器从表层(0.5m)和底层(0.5m)分层取水，混合均匀后，取 1000ml，用鲁哥氏液现场固定，于室内条件下沉淀 48h，浓缩至 30ml，将样品置于 0.1ml 计数框，在显微镜下观察、拍照，参照相关资料[7-9]鉴定和计数. 必要时蓝藻用刚果红染色，绿藻用苯胺蓝染色，硅藻经酸处理后进行鉴定. 藻类的体积根据其相近几何形状计算，藻类的密度接近于 1g/cm^3，计算藻类生物量[10-13].

采样站的海拔高度用 GPS(测量误差 10m)测定；年均气温、年均降雨量均来自当地政府公报；年均流量数据由黄河水利委员会提供；水温采用 SATO 数显式温度计 SK-250WP 测定；河水 pH 采用雷磁 PHS-2F 型数字 pH 计测定；电导率采用鹏顺 DDS-307B 数字电导率仪测定.

1.3 数据处理

根据国内外学者资料[14-19]，利用浮游植物污染指示种对水质进行评价，将浮游植物污染指示种划分为贫营养型(os)、中营养型(β-ms)、中富营养型(α-β-ms)、富营养型(α-ms)和超富营养型(β-ps)5 种类型.

物种多样性指数采用 Shannon-Weaver 指数(H')[20]，其计算公式为：

$$H' = -\sum P_i \log_2 P_i$$

式中，$P_i = n_i/N$，n_i 为种类 i 的个体数，N 为同一样品的个体总数. 评价标准：$H' > 3$(轻或无污染)，$H' = 1-3$(中污染)，$H' = 0-1$(重污染).

实验数据用 SPSS 13.0 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和独立样本 T 检验(Independent-Samples T Test).

2 结果

2.1 基本环境参数

黄河干流各个调查河段的基本环境参数可以看出,各个河段在海拔、年均气温、年均降雨量、年均流量、水温、pH 和电导率等方面都存在较大的差异(表 1).

表 1 黄河干流各河段基本环境参数

Tab. 1 Basic environmental parameters in the sampling stations in the mainstream of the Yellow River

样站		海拔(m)	年均气温(℃)	年均降雨量(mm)	年均流量(m^3/s)	水温(℃)	pH	电导率(mS/cm)
上游	刘家峡水库	1723	10.3	187	877	15.2	9.23	0.431
	兰州	1508	11.2	327	1030	13.7	9.40	0.472
	下河沿	1227	8.8	180	1040	14.4	9.25	0.575
	青铜峡水库	1139	9.2	261	1050	13.9	9.40	0.620
	石嘴山	1084	8.0	193	965	14.6	9.33	1.000
	巴彦高勒	1044	7.4	149	935	15.2	8.96	0.741
	三湖河口	1020	6.5	225	880	11.4	8.72	1.270
	头道拐	1039	7.3	362	834	15.1	8.53	1.143
中游	府谷	669	9.1	440	822	15.8	9.05	0.866
	吴堡	636	11.3	475	951	14.6	8.08	0.783
	龙门	380	13.5	560	1012	19.1	7.62	0.878
	三门峡水库	293	13.9	675	1330	22.1	8.90	0.911
	小浪底水库	179	13.7	650	1342	23.6	7.41	0.948
下游	花园口	89	14.4	641	1482	24.3	8.57	0.985
	高村	58	13.7	630	1318	19.0	9.08	0.845
	艾山	33	14.4	563	1311	18.6	9.47	0.851
	利津	9	12.4	544	1264	17.4	8.76	0.831

2.2 浮游植物种类组成

黄河干流各调查样站共鉴定出藻类 150 种,分别属于 8 门 83 属. 其中硅藻门的种数最高,有 59 种,占藻类总种数的 39.3%;其次是绿藻 55 种和蓝藻 24 种,分别占全部种类数的 36.7% 和 16.0%;甲藻 4 种,裸藻 4 种,金藻 2 种,黄藻 1 种和隐藻 1 种,合计 12 种,仅占总种数的 8.0%(图 2).

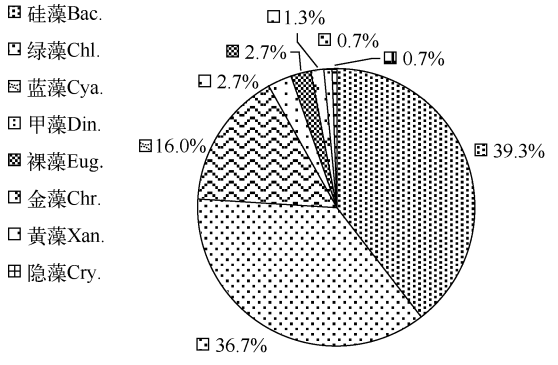


图 2 各门浮游植物种类数所占比例的比较

Fig. 2 Percentages of different phylum of phytoplankton in species number in the mainstream of the Yellow River

各河段浮游植物种类数及门类组成结果表明，各河段种类数平均为 32.5，吴堡的最低仅 13 种，花园口的最高达 77 种（图 3）. 花园口、石嘴山和小浪底水库的种类数明显高于其它河段. 另外，可以看出从巴彦高勒到三门峡水库一区段的藻类种类数明显较低，独立样本 T 检验表明这一区段藻类的种类数与所有其他河段之间的差异达到极显著水平（$t=3.205$，$df=15$，$P=0.003$，单尾检验）.

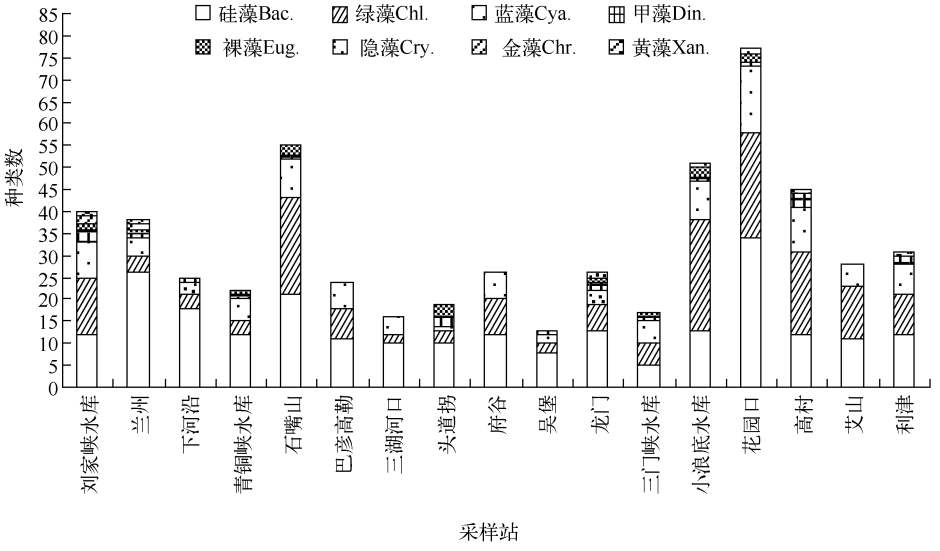


图 3 黄河干流各河段浮游植物种类数比较

Fig. 3 Species number of phytoplankton in the sampling stations in the mainstream of the Yellow River

从浮游植物种类组成上看，各河段多以河流性藻类为主. 硅藻最多，其次为绿藻，再次为蓝藻，其它藻类的种类较少. 在不同河段，浮游植物种类组成存在明显的差异. 硅藻所占总数的比例大于 50% 的各调查河段，都集中在上、中游；下游各调查河段，硅藻所占总数的比例 35% 左右. 下游各河段硅藻所占的比例与刘家峡水库、青铜峡水库、小浪底水库和三门峡水库的较为接近，其浮游植物群落结构更接近湖泊的生态特征.

尽管方差分析显示上游、中游和下游之间浮游植物种类数的差异未达到显著水平（$F=1.704$，$df=2,14$，$P=0.218$），但三个区域之间种类数仍存在较大的差别（图 4）. 上游、中游和下游总的种类数分别为 110、80 和 101 种，三个区域河段平均种类数分别为 29.9、26.6 和 45.3 种. 从大的藻类门类组成上来看，三个区域之间的差别不大，均以硅藻、绿藻和蓝藻占明显优势.

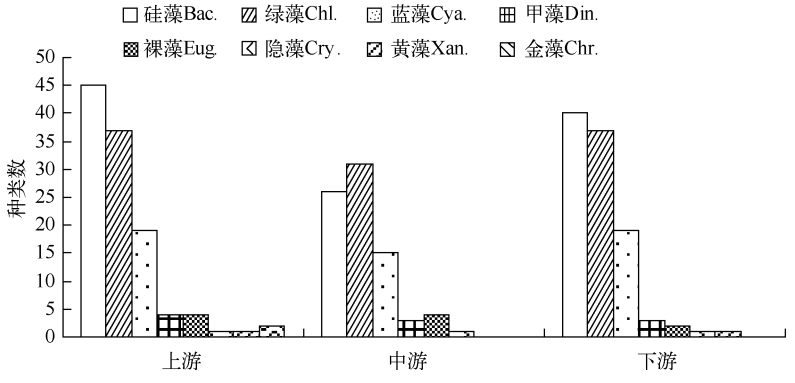


图 4 黄河上游、中游、下游浮游植物种类数比较

Fig. 4 Comparison of phytoplankton species number among the upper, middle and lower reaches of the mainstream of the Yellow River

黄河干流常见种有硅藻门的梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)、克罗脆杆藻(*Fragilaria crotomensis*)、变异直链藻(*Melosira varians*)、小舟形藻(*Navicula minima*)、菱形藻(*Nitzschia sigma*)、尖针杆藻(*Synedra acus*)、肘状针杆藻(*Synedra ulna*);绿藻门的空球藻(*Eudorina elegans*)、实球藻(*Pandorina morum*)、单角盘星藻(*Pediastrum simplex*)、四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)、纤细角星鼓藻(*Staurastrum gracile*);蓝藻门的卷曲鱼腥藻(*Anabaena circinalis*)、水华束丝藻(*Aphanizomenon flos-aquae*)、颤藻(*Oscillatoria* sp.)、伪鱼腥藻(*Pseudoanabaena* sp.);甲藻门的飞燕角甲藻(*Ceratium hirundinella*)、多甲藻(*Peridinium* sp.).

2.3 浮游植物的现存量

黄河干流浮游植物的平均细胞密度为 126.90×10^4 cells/L. 其中,小浪底水库的最高,为 530.6×10^4 cells/L;三湖河口段最低,为 17.7×10^4 cells/L. 上、中、下游的平均细胞密度分别为 72.14×10^4 cells/L、148.65×10^4 cells/L 和 209.24×10^4 cells/L(图 5). 尽管方差分析显示上游、中游和下游之间浮游植物的密度差异不显著($F = 1.601$, $df = 2, 14$, $P = 0.237$),但可以看出下游的浮游植物细胞密度明显高于上游和中游,分别是上游和中游的 2.9 倍和 1.4 倍. 这种不显著结果主要是因为小浪底水库过高的现存量所导致.

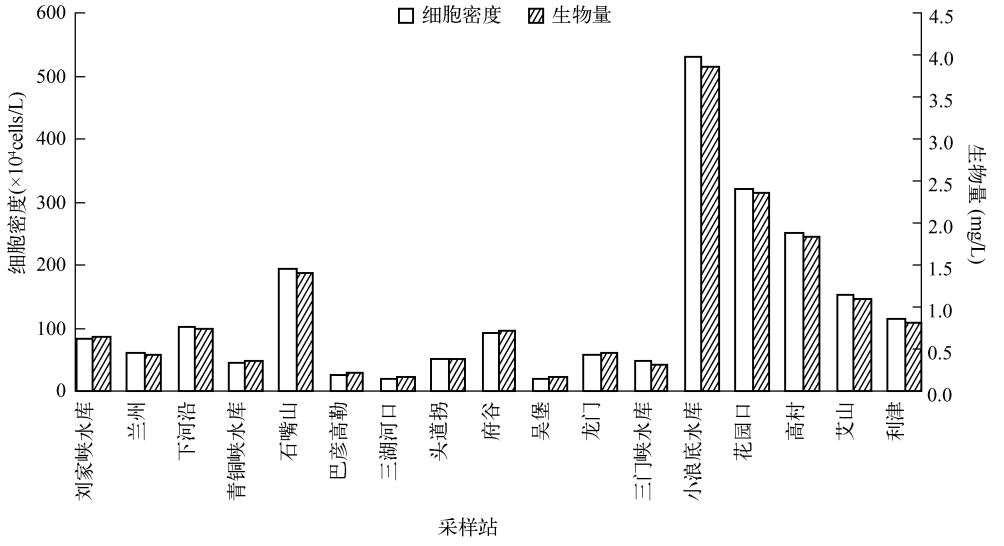


图 5 黄河干流各河段浮游植物细胞密度和生物量

Fig. 5 Cells density and biomass of phytoplankton in the sampling stations in the mainstream of the Yellow River

黄河干流浮游植物的平均生物量为 0.940mg/L,小浪底水库最高,达 3.86mg/L;吴堡段最低,只有 0.17mg/L. 上、中、下游的平均生物量分别为 0.545mg/L、1.103mg/L 和 1.528mg/L. 上、中、下游之间的浮游植物生物量分异规律与细胞密度的类似.

2.4 浮游植物对水质的指示

本次调查共鉴定出污染指示种 50 种,其中贫营养型 1 种、中营养型 16 种、中富营养型 22 种、富营养型 9 种、超富营养型 2 种. 各河段不同营养型指示种类数及其所占比例可以看出,黄河干流各河段的水域环境均受到不同程度的污染(表 2). 兰州、石嘴山、巴彦高勒、三湖河口、头道拐河和三门峡水库段的指示种类较多,富营养型、中富营养型和中营养型指示种类所占的比例较高. 超富营养型指示种类节旋藻(*Arthrospira* sp.)和鱼形裸藻(*Euglena pisciformis*)在污染严重的兰州段、石嘴山段和三门峡水库段等均有发现.

黄河干流各采样河段的多样性指数(H')的值在 0.98 - 2.65 之间波动(表 2),均值为 1.562,评价结果为中度污染. 比较各采样河段之间的数据可见,石嘴山和兰州段的多样性指数都小于 1,表明两个河段污染较为严重. 三门峡水库、巴彦高勒、头道拐和三湖河口段的多样性指数较其它河段略低,这在一定程度上说明,这几个河段的污染较其它河段严重.

表2 黄河干流各河段污染指示藻类的种数及其所占比例，多样性指数和水质评价

Tab. 2 Species number and percentage of indicator algae, Shannon-Wiener biodiversity index and general result of assessment in the sampling stations in the mainstream of the Yellow River

样站	os		α-ms		α-β-ms		β-ms		β-ps		多样性指数	水质状况
	种数	比例(%)	种数	比例(%)	种数	比例(%)	种数	比例(%)	种数	比例(%)		
刘家峡水库	1	2.5									2.65	轻度污染
兰州			3	8.1	9	24.3	5	13.5	2	5.4	0.99	重度污染
下河沿			2	8.0	1	4.0	2	8.0			1.41	中度污染
青铜峡水库			2	8.7	4	17.4	1	4.3			1.60	中度污染
石嘴山			6	10.9	15	27.3	7	12.7	2	3.6	0.98	重度污染
巴彦高勒			1	5.6	6	33.3	4	22.2			1.12	重度污染
三河湖口			1	6.3	6	37.5	1	6.3	1	6.3	1.19	重度污染
头道拐			1	5.3	4	21.1	4	21.1			1.15	重度污染
府谷			1	3.8	4	15.4	3	11.5			1.47	中度污染
吴堡			1	7.7	1	7.7	2	15.4			1.56	中度污染
龙门			1	3.8	3	11.5	3	11.5			1.39	中度污染
三门峡水库			3	18.8	4	25.0	2	12.5	2	12.5	1.02	重度污染
小浪底水库			7	13.7	7	13.7	5	9.8			1.69	中度污染
花园口			5	6.6	12	15.8	10	13.2			1.73	中度污染
高村			4	9.1	4	9.1	6	13.6			2.39	中度污染
艾山			2	6.9	3	10.3	3	10.3			2.24	中度污染
利津			3	9.7	5	16.1	2	6.5			1.98	中度污染

3 讨论

有学者认为由于黄河水体含沙量高、透光度低，河底经常处于冲淤状态，使干流生物群落结构表现出“生物结构简单、生物的种和量都较少”的显著特点[21]. 然而根据本次系统调查的结果发现，黄河的浮游植物群落总体上发展较好. 本次调查共鉴定浮游植物 8 门 83 属 150 种，各河段浮游植物种类数在 13－77 之间，平均 32.5 种. 浮游植物的平均细胞密度也高达 126.90×10^4 cells/L，平均生物量也达 0.940mg/L. Gao 等[22]报道长江口有浮游植物 87 种，细胞密度是 67.5×10^4 cells/L；唐毅等[23]调查长江云阳江段检出浮游植物共 5 门 37 属 61 种，生物量为 0.51mg/L. 可以看出，黄河干流浮游植物的种类数与长江不相上下，且其各河段的密度和生物量多高于长江的密度和生物量.

从种类数、种类组成和现存量来看，黄河干流的浮游植物群落表现出明显的空间分异. 这种分异性可从河流流速、含沙量和受污染程度得到解释. 上、中游河段河水的流量、流速较下游大，其浮游植物的群落结构显示出更明显的河流生态特征. 上游从刘家峡水库到青铜峡水库河段水流湍急以适合点着生和面着生种类针杆藻、舟形藻等为主. 从石嘴山到头道拐河段污染十分严重，蓝藻门的颤藻和绿藻门的实球藻等耐污种类较多. 进入中游，随着海拔降低，峡谷和平原交错，水流急缓结合，泥沙含量大，以真性浮游种类小环藻为主. 下游河道宽阔，河水流速缓慢，变异直链藻较多. 变异直链藻能在波动频繁的水体中生长，能够迅速地增加单位细胞叶绿素和辅助色素的含量以提高对光的捕捉能力. 另外，从巴彦高勒到三门峡水库之间的河段由于处在黄土高原腹地，大量泥沙涌入黄河，河水含沙量极高加上这段河的流速也较大，而不利于藻类的生存，因此这一区段的浮游植物种类数和现存量均较低.

与 1986 年的资料相比较，黄河干流浮游植物组成发生了明显变化，属数下降了 9.8%. 1986 年调查黄河流域共鉴定出浮游植物 197 种，黄河干流报道浮游植物 92 属，其中绿藻 35 属，硅藻 29 属，蓝藻 12 属，裸藻 6 属，甲藻 5 属，金藻 4 属和黄藻 1 属(图 6). 黄河水体污染加重，水质下降，是蓝藻属数大幅上升，金藻属数下降，隐藻出现的主要原因. 大量修建水库等水利工程，使得黄河的流态，流速等改变，河流性硅藻的比例有所下降，而湖泊性蓝藻的比例大幅上升.

1986 年调查的浮游植物生物量在 0.003－1.341mg/L，平均为 0.411mg/L，平均生物量升高了 129%，究

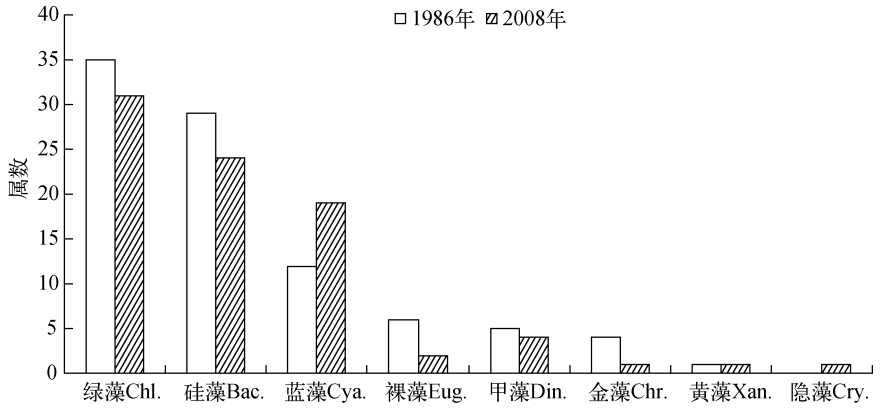


图 6 1986 年和 2008 年浮游植物各门属数比较

Fig. 6 The genus number of different phylum of phytoplankton in 1986 and 2008

其原因主要是黄河污染加重,接纳氮、磷等污染物增多,促进浮游植物生长繁殖.

根据 2009 年 12 月水利部黄河水利委员会发布的《2008 年黄河水资源公报》[24],2008 年黄河干流水质劣于Ⅲ类的占 81.1%. 根据浮游植物污染指示种的分析,发现黄河干流各河段的水域环境多受到不同程度的污染. 其中兰州、石嘴山、巴彦高勒、三湖河口、头道拐河和三门峡水库段的污染程度较高,尤其是兰州段、石嘴山段和三门峡水库段. 总之,目前黄河的污染范围已经极为广泛,且污染程度在加剧. 由此,建议从全流域加强点源和面源的污染控制,重点加强对兰州段、石嘴山段、内蒙古段和三门峡水库段来水污染物的处理和源头控制.

致谢:感谢沈亚强和张晓可同学在野外采样过程中给予的帮助;感谢郑凌凌老师和周广杰博士在藻类鉴定过程中给予的指导;感谢黄河水利科学院水资源研究所蒋晓辉总工、付新峰工程师及花园口水文站吴岩站长和王军科长的大力协助!

4 参考文献

[1] 王兆印,田世民. 黄河的综合治理方略. 天津大学学报,2008,**41**(9):1130-1135.

[2] 李国英. 维持黄河健康生命. 郑州:黄河水利出版社,2009:1-359.

[3] Barbour MT, Gerritsen J, Snyder BD *et al*. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: Periphyton, benthic macroinvertebrates and fish, Second Edition. EPA 841-B-99-002. U. S. Environmental Protection Agency; Office of Water; Washington, D. C, 1999.

[4] 高 霞,田家怡. 黄河三角洲淡水浮游植物名录. 海洋湖沼通报,2000,(3):65-77.

[5] 马正学,宋玉珍. 黄河兰州段的藻类调查. 西北师范大学学报(自然科学版),1995,**31**(3):67-71.

[6] 黄河水系渔业资源调查协作组. 黄河水系渔业资源. 大连:辽宁科学技术出版社,1986:95-121.

[7] 胡鸿钧,魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态. 北京:科学出版社,2006:1-950.

[8] 黎尚豪,毕列爵. 中国淡水藻类志. 北京:科学出版社,1998:1-136.

[9] 朱蕙忠,陈嘉佑. 中国西藏硅藻. 北京:科学出版社,2000:1-353.

[10] 黄翔飞. 湖泊生态调查观测与分析. 北京:科学出版社,2000:72-79.

[11] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范. 北京:中国环境科学出版社,1990:21-112.

[12] Montagne DJS, Berges JA, Harrison PJ *et al*. Estimating carbon, nitrogen, protein, and chlorophyll *a* from volume in marine phytoplankton. *Limnology & Oceanography*, 1994, **39**(5): 1044-1060.

[13] 孙 军,刘东艳,钱树本. 浮游植物生物量研究:浮游植物生物量细胞体积转化法. 海洋学报,1999,(2):75-85.

[14] 福迪(捷)B 著. 罗迪安译. 藻类学. 上海:上海科学技术出版社,1980:422-428.

[15] Lobo EA, Bes D, Tudesque L *et al*. Water quality assessment of the Pardinho river, RS, Brazil, using epilithic diatom assemblages and faecal coliforms as biological indicators. *Vie et Milieu*, 2004, **54**(2/3): 115-126.

[16] Kitner M, Poulickova A. Littoral diatoms as indicators for the eutrophication of shallow lakes. *Hydrobiologia*, 2003, **506-509**: 519-524.
[17] 况琪军,胡征宇,周广杰等. 香溪河流域浮游植物调查与水质评价. 武汉植物学研究,2004,**22**(6):507-513.
[18] 李运贤,张乃群,李玉英等. 南水北调中线水源区浮游植物. 湖泊科学,2005,**17**(3):219-225.
[19] 况琪军,马沛明,胡征宇等. 安全与环境学报,2005,**5**(2):87-91.
[20] Shannon CE, Wiener W. The mathematical theory of communication. Illinois: University of Illinois Press, 1963: 29-125.
[21] 刘晓燕. 构建黄河健康生命的指标体系. 中国水利,2005,**21**:28-32.
[22] Gao Xuelu, Song Jinming. Phytoplankton distributions and their relationship with the environment in the Changjiang Estuary, China. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, **50**: 327-335.
[23] 唐　毅,刘建虎,唐洪玉等. 长江云阳江段四大家鱼产卵场浮游植物初步调查. 淡水渔业,2003,**33**(3):32-35.
[24] 水利部黄河水利委员会. 2008 年黄河水资源公报. http://www.yellowriver.gov.cn/other/hhgb/2008.htm.