

DOI: 10.5846/stxb201906131257

赵耿楠, 潘保柱, 丁一桐, 张磊, 朱朋辉, 何浩然. 渭河干流和秦岭北麓典型支流浮游植物功能群特征及水质评价. 生态学报, 2021, 41(8): 3226-3237.
Zhao G N, Pan B Z, Ding Y T, Zhang L, Zhu P H, He H R. Characteristics and water quality evaluation of phytoplankton functional groups in the Weihe River mainstem and its tributaries in the northern foot of the Qinling Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(8): 3226-3237.

渭河干流和秦岭北麓典型支流浮游植物功能群特征及水质评价

赵耿楠, 潘保柱*, 丁一桐, 张磊, 朱朋辉, 何浩然

西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048

摘要: 渭河干流及其秦岭北麓支流地处黄土高原与秦岭山麓交界的生态脆弱区, 且浮游植物作为水生态系统中的初级生产者, 在维持生态系统稳定方面发挥了至关重要的作用。研究于 2017 年秋季及 2018 年春季对渭河流域干流及秦岭北麓五条典型支流开展了系统的水环境及浮游植物研究。首先, 对采集到的样品鉴定, 利用功能群概念对渭河流域浮游植物进行划分, 参考 Padisák 完善的 40 组浮游植物功能群划分方法, 共划分出功能群 25 组, 把每个样点的样本中相对生物量大于 5% 的种类规定为代表性功能群, 得出主要代表性功能群 15 组, 分别为 A、C、D、N、N_A、MP、T_C、T_B、X3、X1、Y、F、J、L₀、W1。然后, 利用 Q_r 指数与 Shannon-Wiener 指数对研究区域进行水质评价, 发现两种指数所反映的水质变化情况并不一致, 通过对两种评价方法的对比分析得出, Q_r 指数更适合评价秦岭北麓典型支流水质, Shannon-Wiener 指数更适合评价渭河干流水质, 因此渭河秦岭北麓典型支流水质季节间无明显变化, 渭河干流水质逐渐好转。并通过冗余分析明确影响 2017 年秋季及 2018 年春季浮游植物功能群特征的主要环境因子分别为水温、pH、亚硝酸盐氮和浊度、电导率与亚硝酸盐氮。本研究选取了渭河流域及秦岭山脉水系生境迥异的干支流为研究对象, 深入探究了不同水质评价方法的适用情况, 完善了将生物与水质联系起来的评价体系。最后, 期望本研究成果能够为渭河流域的水生态管理和保护提供科学依据。

关键词: 渭河; 秦岭北麓; 浮游植物; 功能群; Q_r 指数; Shannon-Wiener 指数

Characteristics and water quality evaluation of phytoplankton functional groups in the Weihe River mainstem and its tributaries in the northern foot of the Qinling Mountains

ZHAO Gengnan, PAN Baozhu*, DING Yitong, ZHANG Lei, ZHU Penghui, HE Haoran

State Key Laboratory of Eco-hydraulic in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

Abstract: The mainstem of Weihe River and its tributaries in the northern foot of Qinling Mountains are located in the ecologically fragile area at the junction of the Loess Plateau and the foothills of Qinling Mountains which are vital for maintaining ecosystem stability. As the primary producer in aquatic ecosystem, phytoplankton plays an important role in maintaining ecosystem stability. In this paper, systematic surveys on water environment and phytoplankton were carried out in the Weihe River mainstem and its five tributaries from the northern foot of the Qinling Mountains in autumn 2017 and spring 2018. First of all, the collected samples were identified, and the concept of functional group was used to divide the phytoplankton in Weihe River Basin. Referring to the 40 groups of functional group division method perfected by Padisák, a total of 25 groups of functional groups were divided into functional groups. The species with relative biomass of more than 5% in each sample were specified as representative functional groups, and the main representative functional groups were 15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51622901); 陕西省自然科学基金基础研究计划 (2019JM-153)

收稿日期: 2019-06-13; **网络出版日期:** 2021-02-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhuzipan@xaut.edu.cn

groups, namely, A, C, D, N, N_A, MP, T_C, T_B, X3, X1, Y, F, J, L_O, and W1. Then, the water quality of the research area was evaluated by *Qr* index and Shannon-Wiener index, and it was found that the changes of water quality reflected by the two indexes were not consistent. By comparison and analysis of the two methods, the *Qr* index is more suitable for evaluating the water quality of the typical tributaries in the northern foot of the Qinling Mountains. The Shannon-Wiener index is more suitable for evaluating the water quality of the Weihe River. The water quality of the typical tributaries in the northern foot of the Weihe River did not obviously change from autumn 2017 to spring 2018, and the water quality of the mainstem of the Weihe River was gradually improved. According to the results of Redundancy analysis (RDA), the main environmental factors affecting the characteristics of phytoplankton functional groups in autumn 2017 and spring 2018 were water temperature, pH, nitrite nitrogen and turbidity, electrical conductivity, and nitrate nitrogen. In this study, the main tributaries with different habitats in the Weihe River Basin were selected as the object, the application of different water quality evaluation methods was deeply explored, and the evaluation system linking biology and water quality was improved. Finally, the results of this study are useful for the ecological management and conservation of the mainstem and tributaries of the Weihe River Basin.

Key Words: Weihe River; Qinling Mountains; phytoplankton; functional group; *Qr* index; Shannon-Wiener index

渭河是中国第二长河黄河的最大支流,地处黄体高原腹地,陕西省关中地区,流域多处于黄土区,是典型的季节性多泥沙河流^[1]。流域总面积 13.5 万 km²,占据了陕西省 64%的人口、52%的耕地、72%的灌溉面积和 60%以上的生产总值,是“一带一路”中线和中心线两条路线上的必经之地,牵动着我国西北地区的社会发展,是维持地区生态平衡的重要流域^[2]。近些年来,由于气候变化和人类活动加剧,渭河流域出现了径流减少、水土流失、水质恶化等生态环境问题^[3-5],严重制约了渭河流域生态健康发展。与高含沙量的渭河干流和北岸支流不同的是,渭河南岸支流即秦岭北麓支流水体浊度低,在秦岭北麓支流汇入渭河干流时形成了独特的“清浊相交”生态景观。但由于渭河南岸支流地处秦岭北麓生态脆弱区,水体承载力差,易受破坏,是渭河流域重要的水源涵养区,也面临着生态环境安全与健康问题^[6]。因此,对渭河流域水生态健康水平进行评价刻不容缓。

浮游植物是水生态系统的初级生产者,在水生态系统的能量流动、物质循环和信息传递过程中扮演了至关重要的角色,在维持水体生态平衡中发挥了重要作用^[7]。了解浮游植物的种类组成等生物学信息有利于对河流生态结构的深入认识,因此,浮游植物是水环境检测中的重要指示生物^[8]。人们通常利用浮游植物的多种多样性指数^[9-11]、Simpson 生态优势度指数^[12]及浮游植物生物完整性指数^[13]对河流水质进行评价,这是因为利用浮游植物群落特征进行水质评价具有以下几个优点:(1) 直观性。对浮游植物来说,当水质变差,有时仅凭水体颜色就可判断水体的好坏;(2) 全面性。评价结果可反映一段时间内水体污染现状,理化检测则是反应某一个时间点水体状况,且随着污染物增多会产生协同效应,单纯的理化检测技术无法实现全面分析,而利用浮游植物则会更加有效的反应污染物对水体生物带来的一系列影响;(3) 敏感性。浮游植物可对微量有害物质做出反映,敏感度强,理化检测的下限决定了其局限性;(4) 预警性。在污染发生的早期,低浓度污染物进入环境时,浮游植物就可能做出反映。但由于传统的藻类分类法并没有考虑藻类对环境响应的物种特异性和环境特异性,导致鉴定得出的藻类群落结构变化与环境因子之间的关系不准确^[14],使得利用浮游植物群落特征进行水质评价的结果并不可靠。因此,1980 年 Reynolds 借鉴 Grime 在 1977 年提出的陆地植物生态学功能群的概念,将功能群的概念引入水生态系统,经数次改善将浮游植物划分为 31 个不同的功能群 (Functional Group, FG)^[14-17]。随后诸多学者对此进行修订,目前得到 40 组 FG,其中有 39 组功能群应用较广^[18]。浮游植物功能群在藻类群落结构变化及其对气候变化的响应^[19-21]、藻类生产力-多样性关系与功能群结构-多样性关系^[22-24]等方面发挥了重要作用。除此之外,由于 FG 与环境密切相关,所以欧盟水框架据此开发生态健康指数用于环境监测,包括为湖泊和水库制定的 *Q* 评价指数和为河流制定的 *Qr* 指数^[25-27]。目

前,已有诸多学者利用功能群对水质进行评价^[28-32],这是因为功能群的提出合理避免了浮游植物种类鉴定的复杂过程,仅依靠浮游植物生境的相似性就可以从物种功能性上对水体生态系统的健康进行评价。

本研究于 2017 年秋季与 2018 年春季对渭河流域的干流及秦岭北麓五条典型支流(石头河、黑河、灞河、石堤河、罗敷河)开展了系统的水环境及水生生物研究。利用功能群概念对渭河流域浮游植物进行划分,并利用 Q_r 指数与 Shannon-Wiener 指数对研究区域进行水质评价,通过约束性排序分析,明确影响渭河流域浮游植物功能群特征的主要环境因子。主要研究目标有 3 个:(1) 明确渭河干流与秦岭北麓典型支流浮游植物功能群特征;(2) 明晰渭河干流与秦岭北麓典型支流水质评价结果;(3) 揭示影响渭河干流与秦岭北麓典型支流浮游植物功能群差异的主要环境驱动因子。最后,期望本研究成果能够为渭河流域的水生态管理和保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域与样点设置

渭河发源于甘肃省渭源县鸟鼠山北侧,流经甘肃、宁夏、陕西 3 省(区),在陕西省潼关县港口镇注入黄河。该流域地处 $E104^{\circ}00'—110^{\circ}20'$, $N33^{\circ}50'—37^{\circ}18'$,干流全长 818 km,流域面积 13.48 万 km^2 ,其中甘肃省占 44.1%,宁夏回族自治区占 6.1%,陕西省占 49.8%^[33]。渭河流域地形特点为西高东低,北边有六盘山、黄龙山等,南边有秦岭山脉,其中渭南南岸支流均发源于秦岭山区,源短流急,谷狭坡陡,径流较丰富,含沙量小。

本研究于 2017 年秋季与 2018 年春季对渭河干流和秦岭北麓支流石头河、黑河、灞河、石堤河、罗敷河开展系统的生态调查,渭河干流设 15 个断面,五条支流各设 5 个断面,每个断面均设 3 个样点。研究区域及样点设置见图 1。

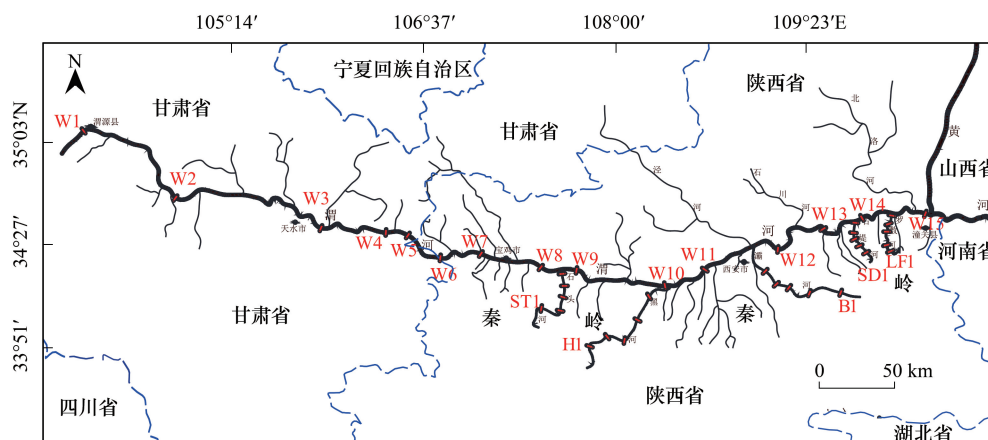


图 1 渭河流域干支流采样断面分布图

Fig.1 Distribution of sampling sections in mainstem and tributaries of the Weihe River Basin

采样断面自上游至下游顺序排列,W1—15 依次为渭河的 15 个断面,ST1 为石头河第一个断面,H1 为黑河第一个断面,B1 为灞河第一个断面,SD1 为石堤河第一个断面,LF1 为罗敷河第一个断面

1.2 水体理化参数测定

在水环境参数测量方面,水温、电导率、溶解氧、pH 四个水质参数采用哈希 HQ40D 便携式多参数分析仪现场测定;浊度采用哈希 2100Q 便携式浊度仪现场测定;流速采用 Global Water FP211 直读式流速仪测定,将流速仪放到水面下离水面 1/3 处,测出样点处的平均流速^[34]。在采样点的表、底层取水样等体积混合,带回实验室分析,根据《水和废水检测分析方法》(第四版)测定总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮(NH_4^+-N)、硝酸盐氮(NO_3^--N)、亚硝酸盐氮(NO_2^--N)^[35]。在各采样点取水样 1 L,保存在低温(0—4℃)避光处,加 1%碳酸镁悬浊液 1ml 以防止酸化引起的色素溶解,根据《湖泊富营养化调查规范》(第二版)测定水体叶绿素 a 含量^[36]。

1.3 样品采集、鉴定

在各采样点取水样 1 L,加 15 mL 鲁哥氏液固定,将水样带回实验室,摇匀倒入 1000 mL 筒形分液漏斗固定在架子上,放在稳定的试验台上,静置沉淀 24 h,用细小虹吸管小心吸去上清液,直至浮游植物沉淀物体积约 20 mL,旋开活塞放入标有 30 mL 刻度的标本瓶中,再用少许上层清液冲洗沉淀分液漏斗 1—3 次一并放入瓶中,定容至 30 mL。摇匀样品瓶,取采集处理好后的浮游植物样品 0.1 mL,置于浮游植物计数框内,在显微镜 400x 下进行浮游植物物种鉴定、细胞计数和称湿重,以《中国淡水藻类-系统、分类及生态》作为参考书录进行分类鉴定^[37]。

1.4 数据分析与处理

运用 Excel 2010 和 Origin9.0 软件对浮游植物数据进行统计和分析。通过 ArcGIS10.0 软件绘制渭河流域采样图。使用 SPSS 22.0 软件对水质评价指标与环境因子进行 Pearson 相关性分析。利用 Canoco 4.5 软件采用 Constrained Ordination (束缚型排序)分析束解析渭河干支流浮游植物功能群特征与环境因子之间的关系,环境参数最大标准化预处理后,作为环境数据源;浮游植物群落组成作为生物数据源,构成环境因子与种类矩阵,对浮游植物群落分布进行 DCA(除趋势对应分析),得出物种的单峰响应值 SD(梯度),SD<3 时采用 RDA(冗余度分析),3<SD<4 时两种分析方法均可,SD>4 时可进行 CCA(典范对应分析),最后对数据进行 999 次蒙特卡洛置换检验,判定显著影响浮游植物功能群特征的环境因子。本研究经 DCA 分析判断后,17 年秋季 SD 为 2.963,18 年春季 SD 为 1.543,因此采用 RDA 分析方法。

适用于河流的 Qr 评价指数^[27]:

$$Qr = \sum_{i=1}^n p_i F_i$$

式中, p_i 为 n_i/N 的比值, n_i 为第 i 个功能群的生物量, N 为浮游植物的总生物量, n 为浮游植物功能群的数量, F_i 为第 i 个功能群的赋值。

通常情况下, F_i 因子的赋值并不是一个固定的常数,需要有经验的研究者根据采样水体的类型和浮游植物群落组成进行相应调整。 Qr 指数 0—5 分别表示:0—1 差,1—2 耐受,2—3 中等,3—4 好,4—5 极好^[26]。

2 结果与分析

2.1 环境因子

表 1 给出了 2017 年秋季与 2018 年春季渭河干流与秦岭北麓典型支流调查样点的水环境参数。两次采样数据渭河干流浊度、电导率、总磷、总氮、氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮明显高于支流,其余水环境参数变化不明显。2017 年秋季至 2018 年春季浊度、营养盐水平均呈下降趋势,叶绿素 a 呈上升趋势,其余水环境参数变化不明显。

2.2 渭河流域浮游植物种类及功能群组成

在调查期间,2017 年秋季共鉴定浮游植物 89 种,隶属 7 门 41 属。其中硅藻门种类数最多,共计 18 属 60 种,其次为绿藻门 13 属 15 种,蓝藻门 5 属 8 种,隐藻门 2 属 2 种,甲藻门 1 属 1 种,裸藻门 1 属 2 种,金藻门 1 属 1 种。2018 年春季共鉴定浮游植物 209 种,隶属 6 门 83 属。其中,硅藻门种类数也最多,共计 29 属 116 种,其次为绿藻门 37 属 64 种,蓝藻门 10 属 16 种,隐藻门 1 属 3 种,甲藻门 5 属 6 种,裸藻门 1 属 4 种。可以发现,2017 年秋季至来年春季渭河干流与秦岭北麓典型支流浮游植物种类数明显增加。

参考 2009 年 Padisák 完善的 40 组浮游植物功能群^[18],将 2017 年秋季渭河流域采集的样品中出现的物种归纳为 17 组功能群,分别为 A、C、D、N、N_A、MP、T_C、T_B、S2、S_N、X2、X1、E、Y、J、L₀、W1。参考 Reynolds 等^[14],把每个样点采集到的样本中相对生物量大于 5% 的种类规定为代表性功能群,得到 2017 年秋季 11 组代表性功能群,分别是 A、C、D、N、N_A、MP、T_C、T_B、Y、L₀、W1。2018 年春季归纳出 23 组功能群,分别是 B、C、D、N、N_A、MP、T、T_C、T_B、S1、S2、S_N、Z_{MX}、X3、X2、X1、Y、F、G、J、H1、L₀、W1,并得到 13 组代表性功能群,分别为

表 1 2017 年与 2018 年渭河干流与秦岭北麓典型支流调查样点的水环境参数(平均±标准差)

Table 1 Water environment parameters (mean ±standard deviation) of samplings in the mainstem of the Weihe River and the northern foot of Qinling Mountains in 2017 and 2018													
调查时间 Time	调查河 流名称 Name	WT/°C	V/ (m/s)	Turb/ NTU	Cond/ (μS/cm)	DO/ (mg/L)	pH	TP/ (mg/m ³)	TN/ (mg/m ³)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg/m ³)	NO ₃ ⁻ -N/ (mg/m ³)	NO ₂ ⁻ -N/ (mg/m ³)	Chl-a/ (mg/m ³)
2017 年秋季 The autumn of 2017	渭河干流	14.26±2.14	0.71±0.59	892.65±528.42	556.91±145.69	9.34±0.40	8.39±0.25	70.69±15.60	6069.40±632.08	2008.78±178.29	3721.89±550.81	170.71±135.56	0.46±0.62
	石头河	13.17±1.30	0.75±0.31	5.27±2.37	200.53±66.82	9.31±0.51	8.12±0.13	64.47±9.14	4450.73±1377.17	1913.33±182.79	2180.67±1254.43	245.33±63.26	1.54±0.50
	黑河	10.85±4.75	0.65±0.37	2.52±3.24	148.49±40.12	10.22±1.16	8.39±0.44	17.93±10.17	2457.33±1418.42	1305.00±789.29	740.67±534.14	111.67±131.82	1.29±0.22
2018 年春季 The spring of 2018	渭河	13.88±0.79	0.56±0.29	17.42±19.75	286.67±77.46	9.61±0.35	8.12±0.07	78.13±7.49	4334.47±1720.63	1259.80±491.73	2564.67±1106.26	369.00±165.19	1.07±0.52
	石堤河	8.14±1.42	0.73±0.61	15.02±13.66	322.80±113.88	9.67±0.53	7.81±0.05	198.53±156.95	4634.93±2352.52	1451.00±636.81	2525.67±1401.08	417.33±369.91	2.06±0.93
	罗敷河	8.05±1.51	0.72±0.51	7.82±4.15	234.03±29.96	9.77±0.75	7.74±0.13	44.30±13.04	3419.27±380.53	1190.00±254.76	1755.33±186.57	321.67±90.28	1.75±1.04
2018 年春季 The spring of 2018	渭河干流	19.07±4.37	0.31±0.30	500.79±507.39	785.60±151.43	8.75±1.26	8.26±0.42	31.98±13.72	6916.81±941.89	1320.22±612.75	5223.55±1317.53	60.42±42.65	50.53±50.78
	石头河	14.30±1.71	0.80±0.36	8.48±4.25	210.95±146.88	9.27±0.58	8.44±0.21	9.67±2.92	2251.77±796.74	633.92±142.54	1331.49±795.71	22.01±11.22	13.86±10.62
	黑河	13.88±5.01	0.53±0.36	4.37±3.09	159.83±120.72	9.20±0.23	8.47±0.21	14.87±5.56	2398.51±1004.15	823.04±324.50	1214.00±690.54	47.64±31.85	9.93±12.99
2018 年春季 The spring of 2018	渭河	21.59±3.70	0.67±0.32	10.31±7.56	301.14±75.78	9.63±0.52	8.81±0.31	3.20±1.46	4837.68±1082.76	535.25±114.43	3554.42±609.89	53.01±41.12	22.44±12.45
	石堤河	20.39±2.60	0.57±0.49	19.36±18.52	676.00±412.10	9.41±0.62	8.17±0.23	25.00±22.22	7404.57±2581.78	148.66±79.54	3596.53±492.77	326.43±699.55	24.15±32.43
2018 年春季 The spring of 2018	罗敷河	16.65±1.93	0.79±0.23	6.67±3.15	410.33±243.11	8.75±0.54	7.48±0.16	1.67±0.62	3621.17±533.54	236.35±258.34	2356.92±328.67	11.47±5.24	3.30±3.07

C、D、N、N_A、MP、T_C、T_B、X3、X1、Y、F、J、L₀。两次采样共调查到 15 组代表性功能群,各功能群耐受性、敏感性及生境如表 2 所示。

图 2 表示了两次采样期间渭河干流与秦岭北麓支流调查断面浮游植物功能群相对生物量情况。2017 年秋季渭河干流下游主要功能群总生物量明显高于干流上游,其中 MP 功能群在渭河下游的相对比例最高时达到了 76.57%(WH-9)。渭河秦岭北麓五条支流主要功能群总生物量没有显著差异,主要功能群有 D、MP 和 T_B,最高时相对比例分别为 65.21%(LFH-5)、66.06%(BH-1)和 53.62%(LFH-2)。2018 年春季渭河干支流主要功能群总生物量变化较为显著,其中主要功能群总生物量较高的调查断面均以 MP 为主,MP 功能群相对比例最高时为 83.33%(STH-3)。从 2017 秋季至 2018 年春季,渭河干支流代表性功能群相对比例呈下降趋势,且浮游植物功能群数量呈增加趋势,D、MP 和 T_B 功能群是渭河干支流常年共有的优势功能群,这些功能群都主要分布在浑浊、有营养盐和冲刷作用强的水体中。

表 2 调查期间渭河流域代表性功能群主要识别特征

Table 2 Main identification features of representative functional groups in the Weihe River Basin during the investigation

序号 Order	功能群 Functional groups	代表性种(属) Representative species (genus)	耐受性 Survivability	敏感性 Sensitivity	生境(环境描述) Habitat (environmental description)	F 因子 Factor
1	A	小环藻属 <i>Cyclotella</i> sp. 环冠藻属 <i>Cyclostephanos</i> spp.	低营养	pH 升高	贫营养、洁净、深水	4
2	C	梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i> 美丽星杆藻 <i>Asterionella formosa</i>	低光照、低含碳量	硅消耗、水体分层	富营养、中小型水体	4
3	D	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i> 肘状针杆藻 <i>Synedra ulna</i>	冲刷	营养缺乏	含有营养盐、浑浊	4
4	N	鼓藻属 <i>Cosmarium</i> spp. 角星鼓藻属 <i>Staurastrum</i> spp.	低营养	水体分层、pH 升高	持续或半持续的混合水层	3
5	N _A	脆杆藻属 <i>Fragilaria</i> spp. 新月藻属 <i>Closterium</i> sp.		水体混合	贫到中营养、静水、低纬度地区	3
6	MP	双菱藻属 <i>Surirella</i> spp. 曲壳藻属 <i>Achnanthes</i> sp. 舟形藻属 <i>Navicula</i> spp.	混合搅动		经常性搅动、浑浊、浅水	5
7	T _C	席藻属 <i>Phormidium</i> spp.		冲刷作用	富营养、静水或者流动缓慢、具有挺水植物	2
8	T _B	双生双楔藻 <i>Didymosphaenia geminate</i> 异极藻属 <i>Gomphonema</i> spp. 变异直链藻 <i>Melosira varians</i>	冲刷作用		强急流	5
9	X3	小球藻属 <i>Chlorella</i> spp.	恶劣环境条件	水体混合、牧食作用	贫营养、混合、浅水	3
10	X1	纤维藻属 <i>Ankistrodesmus</i> spp. 小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i> 弓形藻属 <i>Schroedieriella</i> sp.	分层	营养缺乏、滤食作用	超富营养、浅水	3
11	Y	隐藻属 <i>Cryptomonas</i> spp. 薄甲藻属 <i>Glenodinium</i> spp.	低光照	吞噬作用	静水环境	3
12	F	湖生卵囊藻 <i>Oocystis lacustris</i>	低营养、高浑浊	二氧化碳缺乏	贫营养或异养型、小型水体、浅水	3
13	J	栅藻属 <i>Scenedesmus</i> spp. 微芒藻属 <i>Golenkinia</i> spp.		高光照	高营养、混合、浅水	2
14	L ₀	多甲藻属 <i>Peridinium</i> spp. 石栖色球藻 <i>Chroococcus limneticus</i>	营养分层	长时间或深层的混合	贫到富营养、中到大型水体、可深可浅	1
15	W1	裸藻属 <i>Euglena</i> spp. 扁裸藻属 <i>Phacus</i> spp. 盘藻属 <i>Gonium</i> spp.	高生化需氧量	牧食作用	有机污染、浅水	1

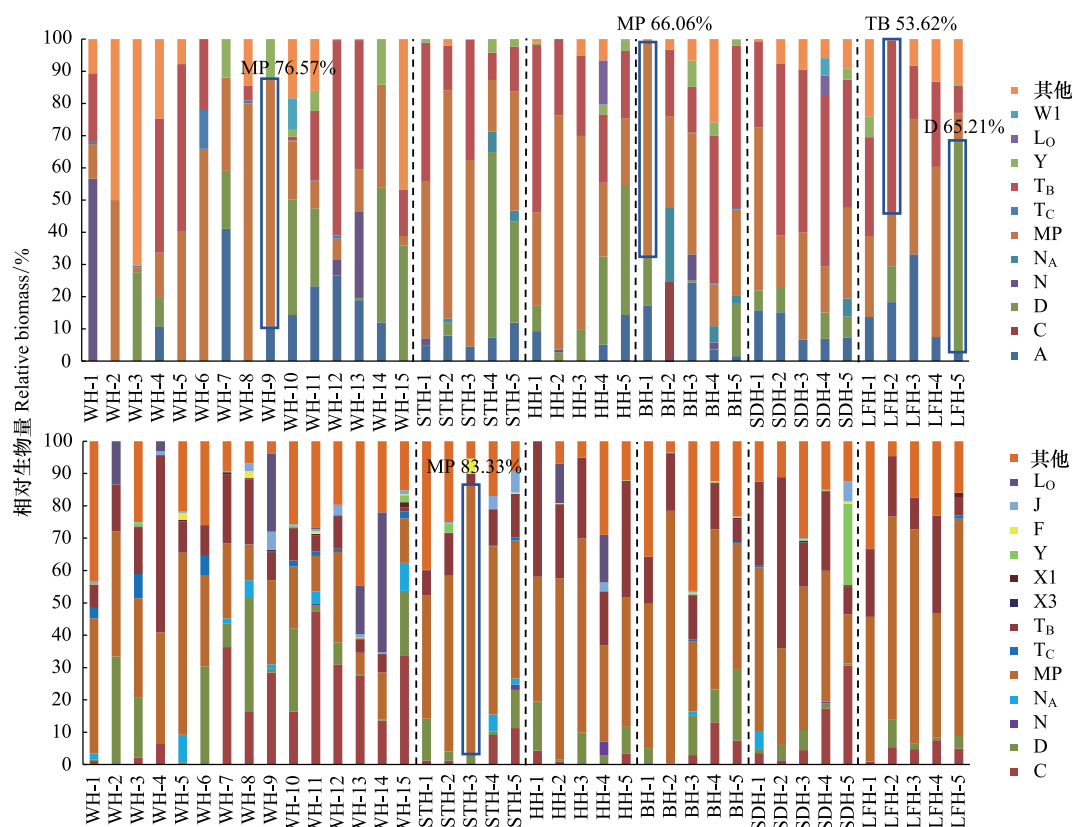


图2 2017年秋季与2018年春季渭河流域调查断面各功能群相对生物量/%

Fig.2 Relative biomass (%) of functional groups in the sampling sections of the Weihe River Basin in autumn 2017 and spring 2018

WH1—15 依次为渭河的 15 个断面,STH1—5 为石头河的 5 断面,HH1—5 为黑河的 5 个断面,BH1—5 为灞河的 5 个断面,SDH1—5 为石堤河的 5 个断面,LFH1—5 为罗敷河的 5 个断面

2.3 基于浮游植物群落的水质评价

2.3.1 Q_r 指数

通过分别对渭河干流及秦岭北麓五条典型支流 2017 年秋季和 2018 年春季两次浮游植物功能群数据计算得出,2017 年秋季渭河干流 Q_r 指数平均范围为 1.21—4.89,石头河为 4.22—4.91,黑河为 3.87—4.96,灞河为 3.59—4.76,石堤河为 4.11—4.76,罗敷河为 1.01—4.67(图 3),由此判断渭河干流与罗敷河水体情况属于好-中-耐受的标准范围,其余河流则属于好-极好的标准范围。分析罗敷河数据发现,罗敷河入渭河口断面(LFH-5)的 Q_r 指数为 1.01,其余数值均在 4 左右,所以可以判断罗敷河水体质量在入渭河之前都是极好的,在入渭河时可能由于人类活动或其他影响因素导致水质突然变差。2018 年春季渭河干流 Q_r 指数平均范围为 1.94—4.77,石头河为 2.86—4.61,黑河为 3.00—4.80,灞河为 3.16—4.81,石堤河为 4.36—4.38,罗敷河为 3.34—4.63(图 3),由此判断渭河干流属于好-中-耐受的标准范围,其余河流水体情况差异不大。通过两次采样 Q_r 指数的变化情况来看,2018 年春季渭河干支流 Q_r 指数比 2017 年秋季低,可以推断,渭河水质情况逐渐恶化。

2.3.2 Shannon-Wiener 多样性指数

通过对渭河干流及秦岭北麓五条典型支流 2017 年秋季和 2018 年春季两次浮游植物数据计算得出,2017 年秋季渭河干流 Shannon-Wiener 多样性指数范围为 0.69—2.28,平均值为 1.70,其余河流均为 2 左右(图 3),由此判断渭河干流水体情况为重污染-β-中污染,支流为 α 中污染-β 污染。2018 年春季渭河干流与支流 Shannon-Wiener 多样性指数平均值均为 2.9 左右,属于 α 中污染,接近轻污染(图 3)。通过多样性指数的变化

来看,2018年春季渭河流域水质较2017年秋季好。

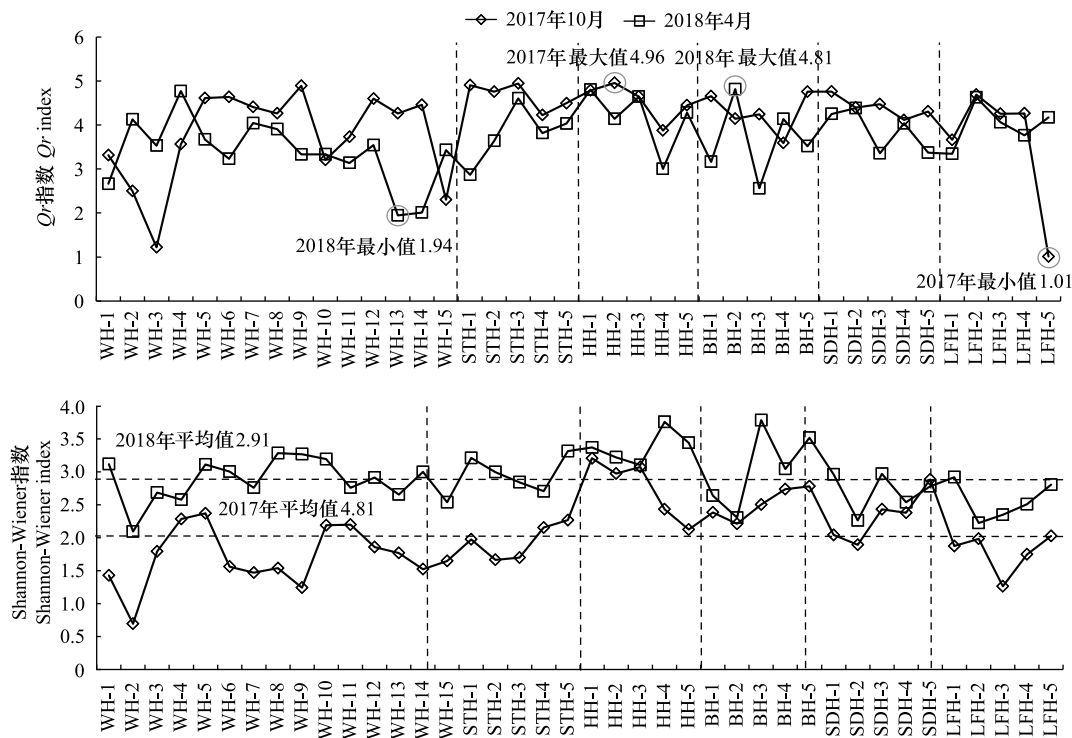


图3 渭河流域各调查断面 Q_r 指数与 Shannon-Wiener 指数

Fig.3 Q_r Index and Shannon-Wiener Index in the sampling sections of the Weihe River Basin

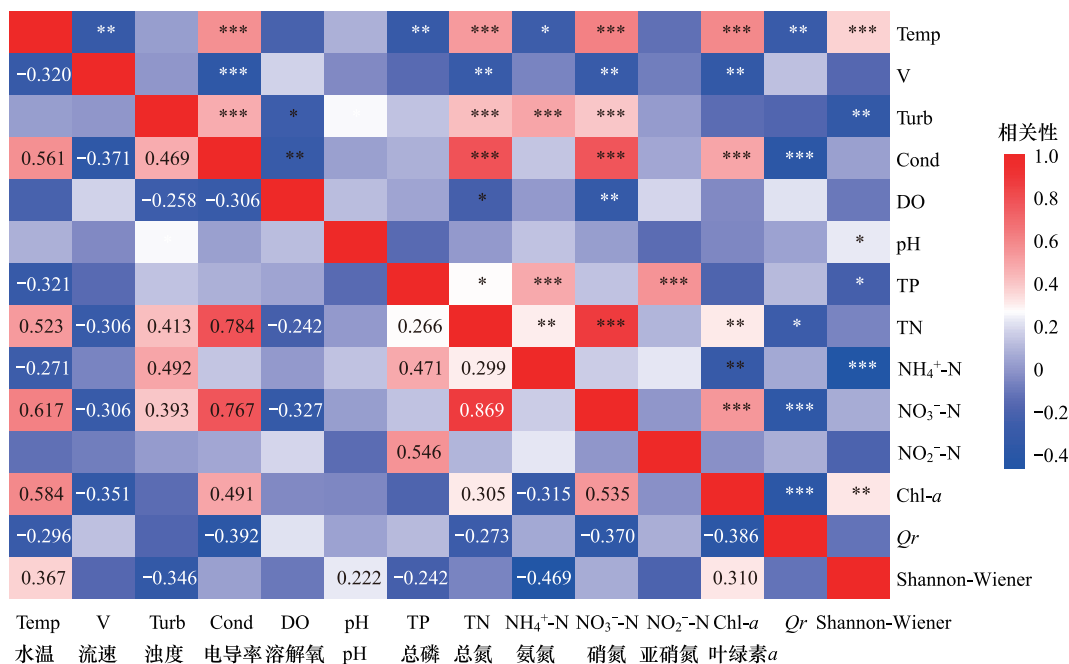


图4 渭河流域环境因子与水质评价指标 (Q_r 指数, Shannon-Wiener 指数) 的 Pearson 相关性分析图

Fig.4 Pearson correlation analysis between environmental factors and water quality evaluation index (Q_r index and Shannon-Wiener index) of the Weihe River Basin

其中矩阵下三角为 P 值数据,上三角为 r 值数据;*** 在 0.001 水平(双侧)上显著相关;** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关;* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

2.4 浮游植物与环境因子关系

2.4.1 水质评价指标与环境因子的 Pearson 相关性分析

将两次采样的多种环境因子相互之间及与 Q_r 指数、Shannon-Wiener 多样性指数之间进行相关性分析(表 3), 结果表明 Q_r 指数与水温、电导率、总氮、硝酸盐氮、叶绿素 a 的含量呈显著负相关; Shannon-Wiener 多样性指数则与水温、pH、叶绿素 a 呈显著相关, 与浊度、总磷、氨氮呈显著负相关; 水温、浊度、总氮和硝酸盐氮与其他多数水环境因子存在显著关系。

2.4.1 浮游植物功能群与环境因子的 RDA 分析

经过冗余性分析之前的水环境参数筛选, 发现对 2017 年秋季渭河干流与秦岭山脉支流浮游植物功能群特征有重要作用的环境因子有水温、pH、亚硝酸盐氮(图 5)。2017 年秋季渭河流域浮游植物功能群与环境因子的 RDA 分析结果显示, 第一、第二轴特征值分别为 0.089 和 0.061, 共解释了采样断面生物数据 16.2% 的方差值。其中第一轴主要体现在化学参数方面, 第二轴体现在物理参数方面。

经过冗余性分析之前的水环境参数筛选, 2018 年春季渭河流域浮游植物功能群与环境因子的 RDA 分析结果显示, 第一、第二轴特征值分别为 0.270 和 0.028, 共解释了采样断面生物数据 29.7% 的方差值。主要环境影响因子为浊度、电导率、亚硝酸盐氮(图 6), 其中第一轴主要体现在化学参数方面, 第二轴体现在物理参数方面。

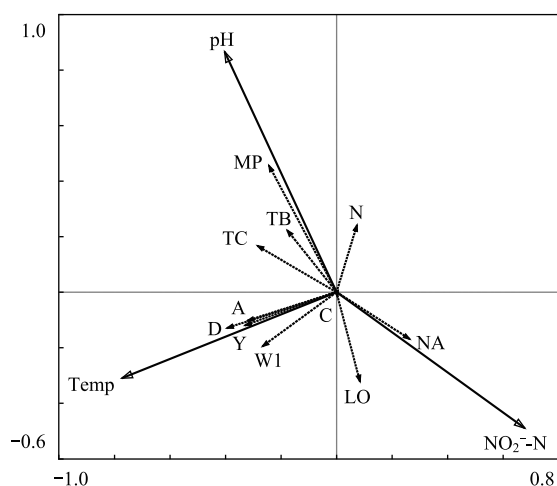


图 5 2017 年秋季渭河流域代表性功能群与环境因子的 RDA 分析

Fig.5 RDA analysis of representative functional groups and environmental factors of the Weihe River Basin in autumn 2017

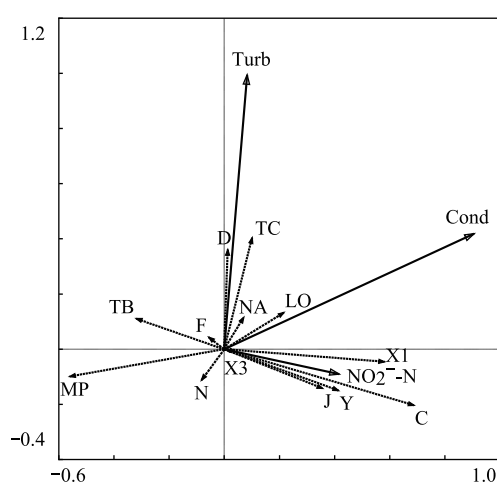


图 6 2018 年春季渭河流域代表性功能群与环境因子的 RDA 分析

Fig.6 RDA analysis of representative functional groups and environmental factors of the Weihe River Basin in spring 2018

3 讨论

渭河流域浮游植物功能群在时空上具有差异性。2017 年秋季渭河干流功能群主要以 D、MP、 T_B 为主, 可能是由于渭河干流含沙量高, 光照强度低, 流速快, 冲刷作用强, 水体混合搅动作用强, 适合尖针杆藻、舟形藻和异极藻等生长。由于 D 功能群对营养缺乏的水体环境较为敏感, 说明了渭河干流营养盐水平高。五条支流功能群主要以 A、MP、 T_B 为主, 与干流不同的代表性功能群为 A 说明支流水体环境稳定, 水体洁净。干支流间代表性功能群的不同体现了水体富营养化水平。2018 年春季渭河干流功能群主要以 C、MP、 T_B 、X1 为主。C 功能群能适应弱光低温低含碳量条件, 适宜生长在富营养化的中小型水体中。渭河干流浊度高, 透明度低, 营养水平高, 再加之采样时间 4 月份为枯水期, 昼夜温差大, 水体表面温度升高会影响水体分层^[38], 因此适合

C 功能群生长。以弓形藻属为代表性种属的 X1 功能群对水体分层呈现很强的耐受性,适合生活在超富营养水体中。与功能群 C 一样,枯水期的渭河干流为 X1 功能群提供了良好的栖息场所。渭河秦岭山脉五条支流功能群与干流差异不显著,差异仅体现在一些相对生物量不高的功能群上,比如 Y 功能群,这是因为以嗜蚀隐藻为代表的 Y 功能群喜欢生活在冷水环境中,因此主要存在与水温较低的山泉水或春、冬季节^[39]。结合两次调查研究结果可以发现,首先,渭河干流营养盐水平与浊度均比支流高,水质情况较支流恶劣。其次,从 2017 年秋季至 2018 年春季,渭河流域代表性功能群数量增加,各功能群相对生物量下降,这可能是由于藻类经过越冬期后,逐步进入复苏期,水体环境复杂多变导致的。

通过对渭河干支流浮游植物功能群与环境因子的 RDA 分析表明,不同的功能群受到不同环境因子不同程度的影响。2017 年秋季影响浮游植物功能群的主要环境因子有 pH、水温和亚硝酸盐氮。水温和营养盐水平对浮游植物群落有共同作用,水体表面温度升高会影响水柱分层,而水柱分层反过来会影响水体表面与较深层营养丰富水域之间的混合,从而减少无机养分向透光带的传输^[38],与此同时,pH 对于不同种藻具有不同的促进或抑制作用^[40],这些因素间接导致了浮游植物功能群的组成。2018 年春季影响浮游植物功能群特征的主要环境因子有浊度、电导率和亚硝酸盐氮。电导率与浊度大小密切相关,浊度影响了浮游植物光合作用,水体中颗粒物质对光的吸收和反射会导致进入水体的光照发生衰减,浮游植物等的生产力将会降低^[41]。由冗余性分析可知,渭河流域代表性功能群 MP 和 T_B都与 pH 呈正相关关系,与亚硝酸盐氮呈负相关关系,其中功能群 MP 多出现在经常性扰动的浑浊浅水体中,功能群 T_B则多出现在冲刷水体中,渭河流域水体正符合了这一特点。结合两次 RDA 分析结果可以发现,影响浮游植物功能群特征的环境因子主要为水温、pH、浊度与营养盐,除浊度外本研究影响浮游植物功能群特征的环境因子与前人的研究成果是一致的^[28,42]。由此可见,相比于其他河流,渭河流域干流与秦岭北麓典型支流之间浊度分布不均的特点已成为影响渭河流域浮游植物功能群特征的关键因素。

由渭河水质评价结果可知,Qr 指数与 Shannon-Wiener 指数所反映的 2017 秋季与 2018 春季两季水质变化情况并不一致,这可能是两种评价方法的适用情况及渭河干支流间含沙量不同造成的。首先,由于 Qr 指数计算时需要对各功能群进行赋值,F 因子的确定较为复杂,除要考虑水体的营养水平数据之外,还需考虑水体的流速,功能群建群时间等等^[27],有可能由于渭河干流含沙量较高,绝大多数河流通用的 F 因子赋值已经不能准确反映渭河干流功能群特征,造成了指数计算时的误差。其次,通过水环境因子与水质评价指标的 Pearson 相关性分析可知,Shannon-Wiener 指数与浊度呈极显著负相关,与叶绿素 *a* 呈极显著正相关,说明该指数可以对河流浊度变化进行准确的反应,由此可以得出 Shannon-Wiener 指数相对于 Qr 指数可以对浊度较高的河流进行评价。最后,有研究表明,地理气候及水环境变化对水体中浮游植物的物种组成影响明显,但对功能群影响有限^[43],渭河干流水体由于含沙量高,不同河段水环境差异比支流大,因此基于浮游植物物种组成计算出的 Shannon-Wiener 多样性指数进行的水质评价方法更适用于渭河干流。综上所述,两种水质评价方法的适用情况有区别,Qr 指数更适合评价秦岭北麓典型支流水质,Shannon-Wiener 指数更适合评价渭河干流水质。以总结出的适用情况结合两种指标的水质评价结果可以得出,渭河秦岭北麓典型支流 2017 秋季至 2018 年春季水质无明显变化,渭河干流水质逐渐好转。

渭河流域干流及秦岭北麓支流水环境差异明显,本研究以浮游植物为指示生物,对研究区域浮游植物的功能群特征及水质评价进行深入探讨可为渭河流域生态文明建设谏言献策。首先,浮游植物是水生态系统中的初级生产者,当浮游植物密度等生物数据发生变化时,以浮游植物为食的其他水生生物就会发生相应的变化。渭河流域秦岭北麓支流是重要的水源涵养区,许多珍稀动物(如大鲵、细鳞鲑等)的栖息地,研究渭河流域浮游植物群落特征可为流域生态保护实时监测提供关键生物数据,这是保持渭河流域生物多样性及生态系统稳定的关键一环。其次,利用浮游植物功能群对渭河流域水质进行评价,可与其他水质评价方法相互印证,以得出适宜人类生存的水质标准,制定考虑生物因素且契合渭河流域水体状况的环境基准,为完善生态文明建设工程增砖添瓦,为渭河流域的水生态管理和保护提供科学依据。

参考文献 (References):

- [1] Wang S J, Lu A G, Dang S H, Chen F L. Ammonium nitrogen concentration in the Weihe River, central China during 2005—2015. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(6): 512.
- [2] Song J X, Cheng D D, Li Q, He X J, Long Y Q, Zhang B. An evaluation of river health for the Weihe River in Shaanxi Province, China. *Advances in Meteorology*, 2015, 476020.
- [3] Chang J X, Wang Y M, Istanbuloglu E, Bai T, Huang Q, Yang D W, Huang S Z. Impact of climate change and human activities on runoff in the Weihe River Basin, China. *Quaternary International*, 2015, 380-381: 169-179.
- [4] Wu W, Xu Z X, Kennard M J, Yin X W, Zuo D P. Do human disturbance variables influence more on fish community structure and function than natural variables in the Wei River basin, China? *Ecological Indicators*, 2016, 61: 438-446.
- [5] Li J K, Li H E, Shen B, Li Y J. Effect of non-point source pollution on water quality of the Weihe River. *International Journal of Sediment Research*, 2011, 26(1): 50-61.
- [6] 范亚宁, 刘康, 陈姗姗, 袁家根. 秦岭北麓陆地生态系统水源涵养功能的格局. *水土保持通报*, 2017, 37(2): 50-56.
- [7] Wang X C, Yang X Z, Lv B B, Xing B B, Zhang J J, Liu J. Community structure of the phytoplankton and its relationship with environmental factor in lower reaches of the Yellow River. *Meteorological and Environmental Research*, 2012, 3(7): 1-4.
- [8] Gasiūnaitė Z R, Cardoso A C, Heiskanen A S, Henriksen P, Kauppila P, Olenina I, Pilkaitytė R, Purina I, Razinkovas A, Sagert S, Schubert H, Wasmund N. Seasonality of coastal phytoplankton in the Baltic Sea; influence of salinity and eutrophication. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 65(1/2): 239-252.
- [9] Shannon C E. The mathematical theory of communication. 1963. M.D. Computing; *Computers in Medical Practice*, 1997, 14(4): 306-317.
- [10] Spellerberg I F, Fedor P J. A tribute to Claude Shannon (1916-2001) and a plea for more rigorous use of species richness, species diversity and the 'Shannon-Wiener' Index. *Global Ecology and Biogeography*, 2003, 12(3): 177-179.
- [11] Pielou E C. The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, 13: 131-144.
- [12] 吴波. 上海苏州河、黄浦江浮游植物群落结构及其对环境指示作用的研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2006.
- [13] 闵文武. 辽河流域着生藻类群落结构及水生态健康评价[D]. 大连: 大连海洋大学, 2015.
- [14] Reynolds C S, Huszar V, Kruk C, Naselli-Flores L, Melo S. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 2002, 24(5): 417-428.
- [15] Reynolds C S. Phytoplankton assemblages and their periodicity in stratifying lake systems. *Ecography*, 1980, 3(3): 141-159.
- [16] Reynolds C S. Phytoplankton periodicity: the interactions of form, function and environmental variability. *Freshwater Biology*, 1984, 14(2): 111-142.
- [17] Reynolds C S. Vegetation processes in the pelagic: a model for ecosystem theory//Kinne O, ed. *Excellence in Ecology*. Germany: Ecology Institute, 1997: 70-71.
- [18] Padisák J, Crossetti L O, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates. *Hydrobiologia*, 2009, 621(1): 1-19.
- [19] Becker V, Huszar V L M, Crossetti L O. Responses of phytoplankton functional groups to the mixing regime in a deep subtropical reservoir. *Hydrobiologia*, 2009, 628(1): 137-151.
- [20] Wang L, Cai Q H, Xu Y Y, Kong L H, Tan L, Zhang M. Weekly dynamics of phytoplankton functional groups under high water level fluctuations in a subtropical reservoir-bay. *Aquatic Ecology*, 2011, 45(2): 197-212.
- [21] Abonyi A, Ács É, Hidas A, Grigorszky I, Várbíró G, Borics G, Kiss K T. Functional diversity of phytoplankton highlights long-term gradual regime shift in the middle section of the Danube River due to global warming, human impacts and oligotrophication. *Freshwater Biology*, 2018, 63(5): 456-472.
- [22] Skácelová O, Lepš J. The relationship of diversity and biomass in phytoplankton communities weakens when accounting for species proportions. *Hydrobiologia*, 2014, 724(1): 67-77.
- [23] Török P, T-Krasznai E, B-Béres V, Bácsi I, Borics G, Tóthmérész B. Functional diversity supports the biomass-diversity humped-back relationship in phytoplankton assemblages. *Functional Ecology*, 2016, 30(9): 1593-1602.
- [24] Görgényi J, Tóthmérész B, Várbíró G, Abonyi A, T-Krasznai E, B-Béres V, Borics G. Contribution of phytoplankton functional groups to the diversity of a eutrophic oxbow lake. *Hydrobiologia*, 2019, 830(1): 287-301.
- [25] 胡韧, 蓝于倩, 肖利娟, 韩博平. 淡水浮游植物功能群的概念、划分方法和应用. *湖泊科学*, 2015, 27(1): 11-23.
- [26] Padisák J, Borics G, Grigorszky I, Soróczki-Pintér É. Use of Phytoplankton assemblages for monitoring ecological status of lakes within the water

- framework directive: the assemblage index. *Hydrobiologia*, 2006, 553(1): 1-14.
- [27] Borics G, Várbiro G, Grigorszky I, Krasznai E, Szabó S, Kiss K T. A new evaluation technique of potamo-plankton for the assessment of the ecological status of rivers. *Large Rivers*, 2007, 161(3/4): 465-486.
- [28] 汪星, 李利强, 郑丙辉, 刘琰, 田琪, 王丽婧. 洞庭湖浮游藻类功能群的组成特征及其影响因素研究. *中国环境科学*, 2016, 36(12): 3766-3776.
- [29] Townsend S A. Hydraulic phases, persistent stratification, and phytoplankton in a tropical Floodplain Lake (Mary River, Northern Australia). *Hydrobiologia*, 2006, 556(1): 163-179.
- [30] Antenucci J P, Ghadouani A, Burford M A, Romero J R. The long-term effect of artificial destratification on phytoplankton species composition in a subtropical reservoir. *Freshwater Biology*, 2005, 50(6): 1081-1093.
- [31] Burford M A, O'Donohue M J. A comparison of phytoplankton community assemblages in artificially and naturally mixed subtropical water reservoirs. *Freshwater Biology*, 2006, 51(5): 973-982.
- [32] Hu R, Xiao L J. Functional classification of phytoplankton assemblages in reservoirs of Guangdong Province, South China//Han B P, Liu Z W, eds. *Tropical and Sub-Tropical Reservoir Limnology in China*. Dordrecht: Springer, 2012.
- [33] 白海锋, 赵乃锡, 殷旭旺, 鲁媛媛, 武玮, 徐宗学. 渭河流域浮游动物的群落结构及其与环境因子的关系. *大连海洋大学学报*, 2014, 29(3): 260-266.
- [34] 谢悦波. 水信息技术[M]. 中国水利水电出版社, 2009.
- [35] 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(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [36] 刘鸿亮. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社, 1987.
- [37] 胡鸿钧, 李尧英, 魏印心, 朱慧忠, 陈嘉佑, 施之新. 中国淡水藻类. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
- [38] Varela M. Phytoplankton ecology in the Bay of Biscay. *Scientia Marina*, 1996, 60: 45-53.
- [39] Barone R, Naselli-Flores L. Distribution and seasonal dynamics of Cryptomonads in Sicilian water bodies. *Hydrobiologia*, 2003, 502(1/3): 325-329.
- [40] Torstensson A, Chierici M, Wulff A. The influence of increased temperature and carbon dioxide levels on the benthic/sea ice diatom *Navicula directa*. *Polar Biology*, 2012, 35(2): 205-214.
- [41] Obrador B, Pretus J L. Light regime and components of turbidity in a Mediterranean coastal lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 77(1): 123-133.
- [42] 庄道阔, 刘存歧, 刘录三, 李黎, 刘志超, 杨晨晨. 镜泊湖流域浮游植物群落及其功能类群的时空演替特征研究. *环境科学与管理*, 2015, 40(5): 142-147.
- [43] Wirtz K W, Sommer U. Mechanistic origins of variability in phytoplankton dynamics. Part II: analysis of mesocosm blooms under climate change scenarios. *Marine Biology*, 2013, 160(9): 2503-2516.