

DOI: 10.5846/stxb201508211747

胡俊, 杨玉霞, 池仕运, 沈强, 胡菊香. 邙山提灌站浮游植物群落结构空间变化对环境因子的响应. 生态学报, 2017, 37(3): - .  
Hu J, Yang Y X, Chi S Y, Shen Q, Hu J X. Spatial variation of phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors at the Mangshan pumping station. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): - .

## 邙山提灌站浮游植物群落结构空间变化对环境因子的响应

胡俊<sup>1,\*</sup>, 杨玉霞<sup>2</sup>, 池仕运<sup>1</sup>, 沈强<sup>1</sup>, 胡菊香<sup>1</sup>

1 水利部中国科学院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 武汉 430079

2 黄河水资源保护研究院, 郑州 450004

**摘要:**河南邙山提灌站作为黄河流域的重要水源地之一, 已列入全国重要饮用水水源地名录。邙山提灌站从黄河取水、沉沙至水厂过程中, 沿途生境变化剧烈。为更好地了解这种人工行为造成不同生境中浮游植物群落结构及变化特征, 于 2014 年 6 月对提灌站的黄河取水口至水厂入口沿途设置的 7 个采样点开展了浮游植物调查, 并同步开展水温、溶氧、总磷等水质因子监测。采用极点排序 (Polar Ordination analysis, POA) 和冗余分析 (Redundancy analysis, RDA) 两种多元统计方法研究了浮游植物群落结构变化及其与环境因子的关系。结果表明: 从黄河取水口至水厂取水口, 浮游植物群落结构、密度与生物量沿途发生了明显变化, 其中浮游植物生物量和生物多样性先升高后降低。POA 分析表明 7 个采样断点被分成 3 类生境, 反映了沿途的生境变化过程, 而 RDA 分析进一步表明总磷 (TP)、溶解氧 (DO) 和氧化还原位 (ORP) 等水环境因子对浮游植物群落结构存在显著的影响, 呈现了与湖泊等天然水体不同的变化。

**关键词:**邙山提灌站; 浮游植物; 生境; 群落结构; 环境因子; 溶解氧; 磷; 极点排序; 冗余分析

## Spatial variation of phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors at the Mangshan pumping station

HU Jun<sup>1,\*</sup>, YANG Yuxia<sup>2</sup>, CHI Shiyun<sup>1</sup>, SHEN Qiang<sup>1</sup>, HU Juxiang<sup>1</sup>

1 Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Project and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Wuhan 430079, China

2 The Yellow River Water Resources Protection Research Institute, Zhengzhou 450004, China

**Abstract:** The Mangshan pumping station is one of the most important water sources in the Yellow River basin, and it has been included in the list of national drinking water sources. When water from the Yellow River is pumped, desilted, and transferred to the waterworks at the Mangshan pumping station, the aquatic biotope dramatically changes throughout these steps. To better understand how these artificial actions influence the phytoplankton by changing the biotope, the changes in phytoplankton from the river intake to the entry of the waterworks were investigated in June 2014. Overall, 7 sampling sites were set up along the path of the water. The measured water quality parameters included, among others, water temperature, dissolved oxygen, and total phosphorus, and all were monitored simultaneously. Structural changes in phytoplankton community and the relationship with the environmental factors were analyzed using two multivariate analysis techniques: Polar Ordination Analysis (POA) and Redundancy Analysis (RDA). The phytoplankton community structure, their density, and the biomass changed significantly from the river intakes to the waterworks. The phytoplankton biomass and

基金项目: 水利部 948 项目 (201408); 国家自然科学基金 (51409178)

收稿日期: 2015-08-21; 网络出版日期: 2016-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jhu@mail.ihe.ac.cn

biodiversity showed a decreasing trend along the path of the water. Furthermore, POA analyses indicated that the 7 sampling sites could be divided into three biotopes, and that these three biotopes reflected the change along the way. Finally, RDA analyses showed a significant influence of the environmental factors on the community structure, which differed from the influence these factors have in the lake and other natural water bodies.

**Key Words:** Mangshan pumping station; phytoplankton; biotope; community structure; dissolved oxygen; phosphorus; Polar Ordination Analysis; Redundancy Analysis

邙山提灌站位于郑州市黄河生态旅游风景区内,面积约为 17 km<sup>2</sup>,提水站始引水系统从 1972 年 10 月启用,1979 年开始向郑州市区的柿园水厂供水,承担着郑州西区 70% 的生产和生活用水。邙山提灌站水质基本达《地表水环境质量标准》(GB3838—2002) III 类水质标准<sup>[1]</sup>。河南邙山提灌站已列入全国重要饮用水水源地名录,该水源地每年向郑州市供水 0.6—1.5 亿 m<sup>3</sup>,是郑州市城市供水的主要支柱。

目前针对湖泊、河流、水库的浮游植物调查研究比较多,结果也表明不同生境与浮游植物群落结构之间存在密切的联系<sup>[2-5]</sup>。而邙山提灌站属于高度受控的人工水体,水面狭小,沿途水质理化参数变化剧烈,其水生态安全状况的研究较少,不利于其供水安全管理工作。并且提灌站内黄河水经人工过程由沉沙池至柿园水厂,沿途生境变化剧烈,生态系统也必将发生明显变化,而这种变化不同于河流、湖泊及水库等其他天然或半人工水体,生态状况非常值得关注。因此,从掌握提灌站的特殊水生态系统特征,为水源地的水质安全管理服务出发,本研究选择生活史短、对水环境变化响应快的浮游植物为对象,运用多元统计分析技术研究邙山水源地沿途浮游植物群落结构变化,认识提灌站这种特殊水体的浮游植物群落结构变化过程及与有关水环境因子的联系,以期为进一步改善水质,优化水源地管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查断面

邙山提灌站供水系统主要由供水工程和输水干渠组成,供水工程包括引水渠、1 级沉沙池、2 级沉沙池、泵站提水、输水明渠(24 km)以及输水暗管、3 级沉沙池、4 级沉沙池等部分组成。2014 年 6 月 30 日,在邙山提灌站的各级沉沙池、柿园水厂入口设置 7 个点(图 1)。采样点 GPS 位置信息见表 1。

### 1.2 样品采集

浮游植物定性样品用 25#浮游生物网在水面下作“∞”捞取,定量样品用 2.5L 采水器分别在 0、2、4 水深处等量取水(渠道则视实际情况而定),共取 1 L 混合水样。所有样品现场加鲁哥氏液进行固定。定性样品于光学显微镜下 10×40 倍观察,鉴定其种类。定量样品在室内沉淀 48 h,浓缩至 30 ml,然后取 0.1 ml 样品于 0.1 ml 计数框内进行视野法计数并鉴定种类<sup>[6]</sup>,用细胞体积法推算生物量<sup>[7-9]</sup>。

采集浮游植物样品的同时,采用便携式多参数水质分析仪(YSI plus)原位检测水温(Water Temperature)、pH、比电导率(SPC)、氧化还原电位(ORP)、溶解氧(DO)、透明度(SD)等指标。采集表层与水下 1 米处的混

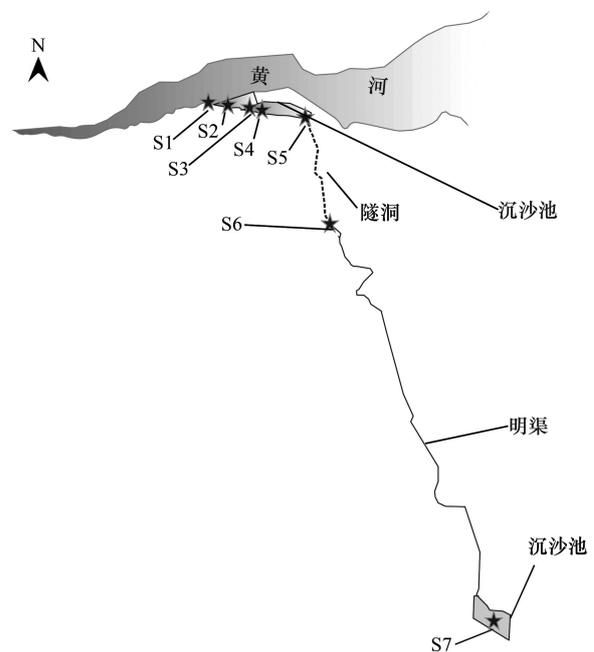


图 1 采样点示意图

Fig.1 The diagrammatic sketch of sampling sites

合水样 1000 ml,其中 500 ml 酸化后带回实验室采用相应的标准方法分析总氮(GB 11894—1989)与总磷(GB 11893—1989)含量,剩余部分现场抽滤(Whatman GF/C)后,滤膜避光低温(0—4°C)保存后带回实验室检测 Chl.a(SL 88—2012)。

表 1 邛山提灌站采样点坐标分布

Table 1 Information of sampling sites along Mangshan Pumping Station

样点编号 Sampling Site Code	样点信息 Information of Sampling Sites	经度 Longitude	纬度 Latitude
S1	桃花峪引黄渠下	113.4886944°	34.95827778°
S2	水源地一级沉沙池	113.4930556°	34.95863889°
S3	水源地一、二级沉沙池交汇处	113.4961389°	34.95750000°
S4	水源地二级沉沙池前段	113.4976944°	34.95780556°
S5	水源地二级沉沙池后段	113.5071667°	34.95563889°
S6	三级沉沙池后的引水渠	113.5178056°	34.92316667°
S7	石佛沉沙池(柿园水厂取水口)	113.5716389°	34.82088889°

### 1.3 数据分析

#### 1.3.1 优势度分析

浮游植物优势种根据每个种的优势度值(Y)来确定:

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

式中, $n_i$ 为第*i*种的个体数, $N$ 为所有种类总个体数, $f_i$ 为出现频率。 $Y$ 值大于 0.02 种类为优势种。

#### 1.3.2 多样性分析

浮游植物多样性采用 Shannon-Wiener 多样性指数表示,其计算公式如下:

$$H = -\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i$$

式中  $n$  表示总物种数, $P_i$ 表示第*i*个物种占总数的比例。

#### 1.3.3 群落相似性分析

浮游植物群落结构相似性采用 Jaccard 相似性指数计算。计算公式为:

$$S = c / (a + b - c)$$

式中, $S$ 为相似性指数, $c$ 为 2 个群落共有的种数, $a$ 、 $b$ 为每个群落的种数。Jaccard 相似性指数反映了生境的相似程度。

相似性等级一般划分为 6 级,具体分级标准如表 2 所示。相似性指数  $S$  值越大,则群落就越相似、生境也越接近。

表 2 相似性分级评价标准

Table 2 The criteria for Similarity of community

评价等级 Rank	阈值 Threshold	等级描述 Description	评价等级 Rank	阈值 Threshold	等级描述 Description
I	0	完全不相似	IV	0.51—0.75	中度相似
II	0.01—0.25	极不相似	V	0.76—0.99	极相似
III	0.26—0.50	轻度相似	VI	1	完全相似

#### 1.3.4 统计分析

本研究中主要采用极点排序(Polar Ordination analysis, POA)和冗余分析(Redundancy analysis, RDA)两种多元统计方法。其中,POA 用于分析水源地沿途不同生境中浮游植物群落结构的差别,采用 PC-Ord v5.0 软件。RDA 用于分析浮游植物群落结构特征与环境因子间的关系,采用 Canoco v4.5 软件。分析过程中物种

变量数据进行  $\log(x+1)$  转换,环境变量自动前置选择,并经过 Monte Carlo Permutation 检验后,筛选对物种变量影响较大的环境变量。统计图则采用 excel 2013 绘制。

## 2 结果

### 2.1 种类组成特征

本次调查共采集到浮游植物 104 种(属)(表 3),分属 6 门。其中硅藻门(*Bacillariophyta*)51 种(属),占种类数比例最高,其次是绿藻门(*Chlorophyta*)34 种(属)和蓝藻门(*Cyanophyta*)12 种(属)。7 个采样点均出现的种类有绿藻门的双对栅藻(*Scenedesmus bijuba*)、盘星藻(*Pediastrum clathratum*),甲藻门的飞燕角甲藻(*Ceratium hirundinella*),硅藻门的变异直链藻(*Melosira varians*)、冠盘藻(*Stephanodiscus* sp.)、尖针杆藻(*Synedra acus*)、偏凸针杆藻小头变种(*S.vaucheriae* var.*capitellata*)。

浮游植物种数在空间上差异明显(图 2)。提灌站二级沉沙池 S4 和 S5 的浮游植物种类数最多,皆为 63 种,而黄河取水口 S1 样点浮游植物种类数最少,只有 26 种。所有采样点绿藻门和硅藻门种(属)数量最多。

表 3 邙山提灌站各门类浮游植物种(属)数和所占比例

Table 3 The number and proportion of phytoplankton species (genus) from the various classes in Mangshan pumping station

组成 Composition	蓝藻门 <i>Cyanophyta</i>	金藻门 <i>Chrysophyta</i>	硅藻门 <i>Bacillariophyta</i>	甲藻门 <i>Dinophyta</i>	裸藻门 <i>Euglenophyta</i>	绿藻门 <i>Chlorophyta</i>	合计 Total
属 Genus	9	1	22	2	2	16	52
种 Species	12	1	51	2	4	34	104
百分比 Percent	11.54	0.96	49.04	1.92	3.85	32.69	100.00

浮游植物优势种类分布参见表 4。黄河取水口(S1)优势度较高的种类为盘星藻(优势度 0.19)和普通等片藻(优势度 0.16);在各级沉沙池和输水干渠中,优势藻类为主要为双对栅藻,其密度占明显优势;S4 采样点处双射盘星藻(优势度 0.23)超越双对栅藻成为第一优势藻种;柿园水厂取水口(S7)处,由于水流再次由流动形态转变为静止,优势藻类相应改变为蓝藻中的小席藻(优势度高达 0.56)。

### 2.2 现存量密度及生物量变化

各采样点的浮游植物细胞密度变动范围在 134726—740035 个/L 之间,平均值为 435642 个/L;生物量变动范围在 0.090—0.992 mg/L 之间,平均值为 0.386 mg/L(表 5)。从空间变化上看,生物量变化趋势与密度变化趋势相同(表 6 和表 8)。黄河取水口(S1)浮游植物密度最低,生物量也较低;经过沉沙处理,浮游植物密度在一级、二级沉沙池(S3、S4、S5)处迅速上升,生物量逐步上升;而后经数十公里输水干渠引水,由于渠道截面变小,水体流速明显加大,浮游植物密度再次下降。由于水流、水体理化因子的改变,生物量急剧下降。最后至柿园水厂取水口的石佛沉沙池,再次变为静水水体,浮游植物密度略有回升,优势种演替为小席藻,而生物量下降至最低点(0.090)。

从浮游植物密度组成来看(表 7),浮游植物密度组成绝大部分是绿藻,占总密度的 25.81%—77.91%,平均值为 57.98%,其他浮游植物以硅藻、蓝藻为主。浮游植物组成表现出明显的空间变化。其中,黄河取水口(S1)主要为硅藻(74.19%),经各级沉沙池、输水管线(S2、S3、S4、S5、S6)后绿藻比例大幅上升,成为主要优势

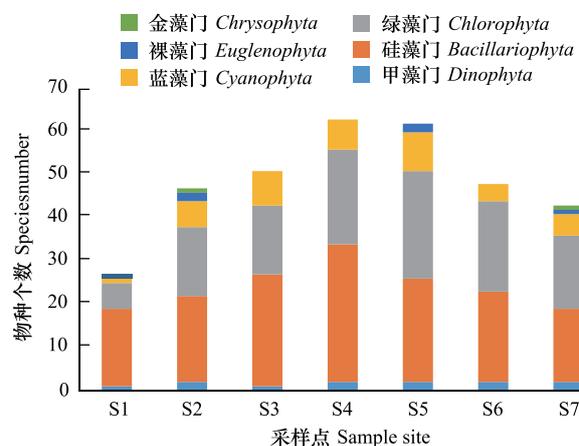


图 2 邙山提灌站浮游植物种类的空间变化

Fig. 2 The spatial variations of the phytoplankton species (genus) in Mangshan pumping station

种类,甲藻密度也逐渐增加,至二级沉沙池后段(S5),甲藻比例上升至9.34%,最后至柿园水厂取水口(S7),由于水流形态的再次改变,蓝藻比例上升至最高。

表4 邛山提灌站浮游植物优势度超过0.2的种类

Table 4 The species with the dominance over 0.2 in Mangshan pumping station

采样点 Sampling Sites	优势度超过0.2的种类 The Species with the dominance over 0.2	优势度超过0.15的种类 The Species with the dominance over 0.15
S1	无	盘星藻(0.19)、普通等片藻(0.16)
S2	双对栅藻(0.33)	无
S3	双对栅藻(0.22)	小空星藻(0.19)
S4	双射盘星藻(0.23)	双对栅藻(0.16)
S5	无	双对栅藻(0.19)、实球藻(0.19)
S6	双对栅藻(0.34)	无
S7	小席藻(0.56)	无

表5 邛山提灌站各采样点浮游植物密度及生物量

Table 5 The densities and biomass of the phytoplankton in each sampling site in Mangshan pumping station

采样点 Sampling Sites	密度(cells/L) Density	生物量(mg/L) Biomass	采样点 Sampling Sites	密度(cells/L) Density	生物量(mg/L) Biomass
S1	134726	0.174	S5	670152	0.992
S2	344202	0.184	S6	151240	0.152
S3	740035	0.437	S7	279013	0.090
S4	730126	0.676			

表6 邛山提灌站浮游植物密度变化(cell/L)

Table 6 The phytoplankton densities from the various classes in Mangshan pumping station

采样点 Smampling Sites	蓝藻门 <i>Cyanophyta</i>	金藻门 <i>Chrysophyta</i>	硅藻门 <i>Bacillariophyta</i>	甲藻门 <i>Dinophyta</i>	裸藻门 <i>Euglenophyta</i>	绿藻门 <i>Chlorophyta</i>
S1			99958			34768
S2	26076		73013	5215		182532
S3	59975		86051	2608		524127
S4			161671	59975		508481
S5			93873	62582	2608	511089
S6			46937	5215		99089
S7	156456		44329		2608	75620

表7 邛山提灌站浮游植物密度组成(%)

Table 7 The density proportion of the phytoplankton from the various classes in Mangshan pumping station

采样点 Smampling Sites	蓝藻门 <i>Cyanophyta</i>	金藻门 <i>Chrysophyta</i>	硅藻门 <i>Bacillariophyta</i>	甲藻门 <i>Dinophyta</i>	裸藻门 <i>Euglenophyta</i>	绿藻门 <i>Chlorophyta</i>
S1			74.19			25.81
S2	9.09		25.45	1.82		63.64
S3	8.91		12.79	0.39		77.91
S4			22.14	8.21		69.64
S5			14.01	9.34	0.39	76.26
S6			31.03	3.45		65.52
S7	56.07		15.89		0.93	27.10

从浮游植物生物量组成来看(表9),主要以硅藻、绿藻、甲藻为主,其它藻类比例较少。浮游植物门类的

空间分布呈现出明显差异。黄河取水口(S1)的硅藻在生物量中占绝对优势(92.99%),另有少部分绿藻(7.01%)。经过沉沙池处理后,甲藻和绿藻生物量比例大幅上升。其中甲藻生物量在二级沉沙池前段(S4)上升至0.380 mg/L,占总生物量的56.24%。再经输水干渠引水后,S6、S7样点甲藻、绿藻生物量下降,硅藻再次成为生物量占优势的浮游植物。

表8 邙山提灌站浮游植物生物量变化(mg/L)

Table 8 The phytoplankton biomass from the various classes in Mangshan pumping station (mg/L)

采样点 Smampling Sites	蓝藻门 <i>Cyanophyta</i>	金藻门 <i>Chrysophyta</i>	硅藻门 <i>Bacillariophyta</i>	甲藻门 <i>Dinophyta</i>	裸藻门 <i>Euglenophyta</i>	绿藻门 <i>Chlorophyta</i>	合计 Total
S1	0	0	0.162	0	0	0.012	0.174
S2	0	0	0.069	0.033	0	0.051	0.153
S3	0.002	0	0.072	0.183	0	0.141	0.397
S4	0	0	0.156	0.380	0	0.140	0.676
S5	0	0	0.092	0.396	0.019	0.485	0.992
S6	0	0	0.092	0.033	0	0.027	0.152
S7	0.001	0	0.052	0	0.019	0.019	0.090
平均值	0.001	0	0.099	0.146	0.005	0.125	0.376

表9 邙山提灌站浮游植物生物量组成(%)

Table 9 The biomass composition of the phytoplankton from the various classes in Mangshan pumping station

采样点 Smampling Sites	蓝藻门 <i>Cyanophyta</i>	金藻门 <i>Chrysophyta</i>	硅藻门 <i>Bacillariophyta</i>	甲藻门 <i>Dinophyta</i>	裸藻门 <i>Euglenophyta</i>	绿藻门 <i>Chlorophyta</i>	合计 Total
S1	0	0	92.99	0	0	7.01	100
S2	0.06	0	45.14	21.58	0	33.22	100
S3	0.46	0	18.07	45.99	0	35.49	100
S4	0	0	23.04	56.24	0	20.71	100
S5	0	0	9.23	39.97	1.89	48.92	100
S6	0	0	60.64	21.70	0	17.66	100
S7	0.62	0	57.12	0	20.77	21.49	100
平均值	0.06	0	43.75	26.50	3.24	26.36	100

### 2.3 相似度指数和多样性指数计算

各采样点相似度指数和多样性指数计算结果见表10和表11。从表中可以看到,采样点S3、S4、S5物种组成较为相似,达到中度相似效果。而S1与其它采样点相似度均较差;同时,采样点S7与采样点S2—S6相似度较差。所有采样断面的生物多样性指数均在1.75—2.65之间,且以二级沉砂池S4和S5生物多样性最高,水厂取水口的S7点最低。

表10 邙山提灌站各采样点相似度指数

Table 10 The similarity indices in all sampling sites in Mangshan Pumping Station

采样点编号 Sampling Site Code	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
s1	1.00	0.24	0.28	0.25	0.16	0.17	0.23
s2	极不	1.00	0.48	0.51	0.45	0.42	0.38
s3	轻度	轻度	1.00	0.54	0.51	0.48	0.40
s4	极不	中度	中度	1.00	0.64	0.46	0.39
s5	极不	轻度	中度	中度	1.00	0.49	0.46
s6	极不	轻度	轻度	轻度	轻度	1.00	0.42
s7	极不	轻度	轻度	轻度	轻度	轻度	1.00

表 11 邙山提灌站各采样点多样性指数

Table 11 The biodiversity indices in all sampling sites in Mangshan Pumping Station

采样点 Sampling sites	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
多样性指数 Biodiversity indices	2.42	2.18	2.40	2.65	2.59	2.24	1.75

### 3 讨论

#### 3.1 浮游植物群落结构差异分析

不同采样站位浮游植物群落存在一定程度的差异。本研究采用 POA 排序并结合相似性指数、多样性指数研究水源地沿程不同生境中浮游植物群落结构的差别。POA (Bray-Curtis 距离) 排序是一种基本的分析群落结构与生境间关系的方法,通过排序可以显示实体在属性空间中的相对位置以及变化趋势。不同采样点的群落结构差异。排序运算中的物种数据分别选择浮游植物定性数据和定量数据,而环境因子则采用同步监测的水质数据。POA 排序结果显示:浮游植物的定性、定量数据分析均显示 S1(桃花峪引黄渠)和 S7(柿园水厂取水口)的群落结构与其它站位差异明显,S2 和 S3、S4 和 S5 的群落结构相似(图 3)。相似度指数结果也显示 S1、S7 和其它采样点相似度较差(表 10),两者结论一致。S1 基本直接反映了黄河干流的浮游植物状况,表明靠近黄河干流的引水渠浮游植物生态特征与水源地内的其它样点差异明显。而 S7 作为取水口前的沉沙池,通过两级沉沙过程后,泥沙含量极低,且水体相对静止,水体类似于小型湖泊状况,表明靠近取水口的采样点 S7,由于水文情势变为静水等因素导致了取水口蓝藻大量繁殖,浮游植物群落结构发生较大变化。进一步从多样性指数也可以看到黄河水的 S1 生物多样性并不低,反而是靠近取水口的 S7 的浮游植物种类单一。因此,从这个角度看生态状况可能还不如泥沙含量最高的黄河水。此外,图 3 也显示 S1 站位 TP 含量较高,处于富营养化水体,而 S2-S5 的水体处一二级沉沙池,水流较快,生境与 S1 和 S7 有很大不同,而 S6 则处于二者之间。

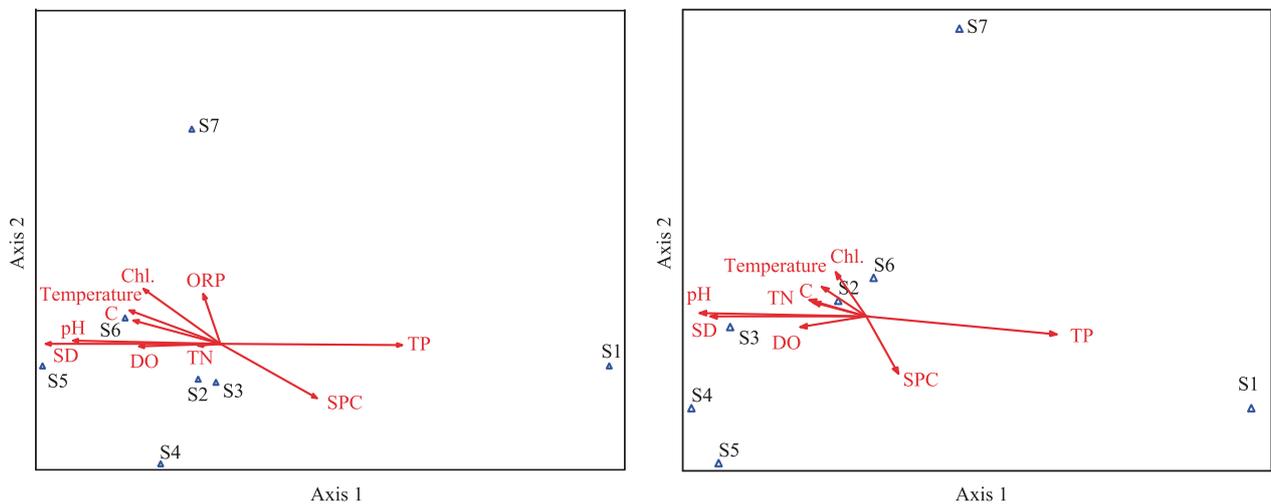


图 3 浮游植物定性(左)与定量(右)的空间分布的 POA 分析

Fig.3 The biplots of POA based on the qualitative data (left) and the quantitative data (right) of the phytoplankton

#### 3.2 环境因子与浮游植物群落特征的关系

环境因子与浮游植物群落结构的关系一直是生态监测评价领域的重要研究对象,在湖泊、河流等浮游植物研究中也一直是热点<sup>[10-12]</sup>。RDA 是一种直接梯度分析方法,能从统计学的角度来评价一个或一组变量与另一组多变量数据之间的关系<sup>[13]</sup>。本研究采用 RDA 来详细分析环境因子与浮游植物群落之间的内在联系。具体分析过程中以各采样点优势种类百分比( $\geq 10\%$ )、浮游植物各门浮游植物数量比(%)、总物种数、多样性指数、各门类种类数、各门类密度、各门类生物量等作为物种数据,以 WT、pH、SPC、ORP、DO、SD、TP、TN、

Chl.a 等作为环境数据,分析浮游植物变量与环境因子间的关系。

RDA 分析结果表明:前 4 轴共解释了 88.1% 的物种数据变异,9 个环境因子中的 TP (膨胀因子 IF = 1.8990)、ORP (IF = 1.3808)、DO (IF = 2.0724)、SPC (IF = 2.4198) 对浮游植物群落结构的影响较为显著。由图中可以看出,第 1 轴(横轴)代表的是 DO 和 ORP 梯度,第 1 轴从左到右 DO 呈现减少的趋势,而 ORP 呈现增加的趋势;第 2 轴(纵轴)主要反映了水体 TP 梯度,从下至上 TP 呈增加的趋势。根据双序图的展示结果来看,盘星藻和硅藻门数量百分比随水体营养浓度的升高而增加,而绿藻密度和蓝藻门物种数则随水体营养浓度的升高而下降。生物多样性和短棘盘星藻数量百分比与溶氧浓度成正比,而绿藻门物种数、小席藻和蓝藻数量百分比则与氧化还原电位呈正相关,与溶氧水平呈负相关。

进一步分析第 1 轴和第 2 轴交叉形成的四个象限可以看到:第 1 象限区域内,蓝藻门的密度比例呈升高区域,尤其是优势种类相应改变为蓝藻门的小席藻(优势度高达 0.56);在第 2 象限(DO 和 TP 较高的区域),硅藻门的生物量及数量比均呈增加趋势,其中普通等片藻优势明显;第 3 象限属于 DO 较高而 TP 较低的区域,可以看到此区域内生物多样性较高,且多样性与 DO 更为密切,并且硅藻门种类数、甲藻门密度、绿藻门密度比例及密度随着 DO 的升高和 TP 的下降呈增加趋势;在第 4 象限内,水体营养等级较低而 ORP 梯度升高时,对蓝藻门的密度与种类数、绿藻门的种类数与密度有显著影响,并且随着营养梯度的升高,绿藻有逐渐向蓝藻演替的趋势。

一般而言,不同水体的浮游植物群落结构具有不同的特征<sup>[14]</sup>。浮游植物是水生态系统的重要组成部分,其种类组成、数量分布及丰度通常呈季节性变化,是浮游植物群落动态的特征,也是评价水体富营养程度的重要指标之一<sup>[15]</sup>。浮游植物种类组成、丰度等变化在天然水体中主要与季节和营养盐密切相关。例如,在没有

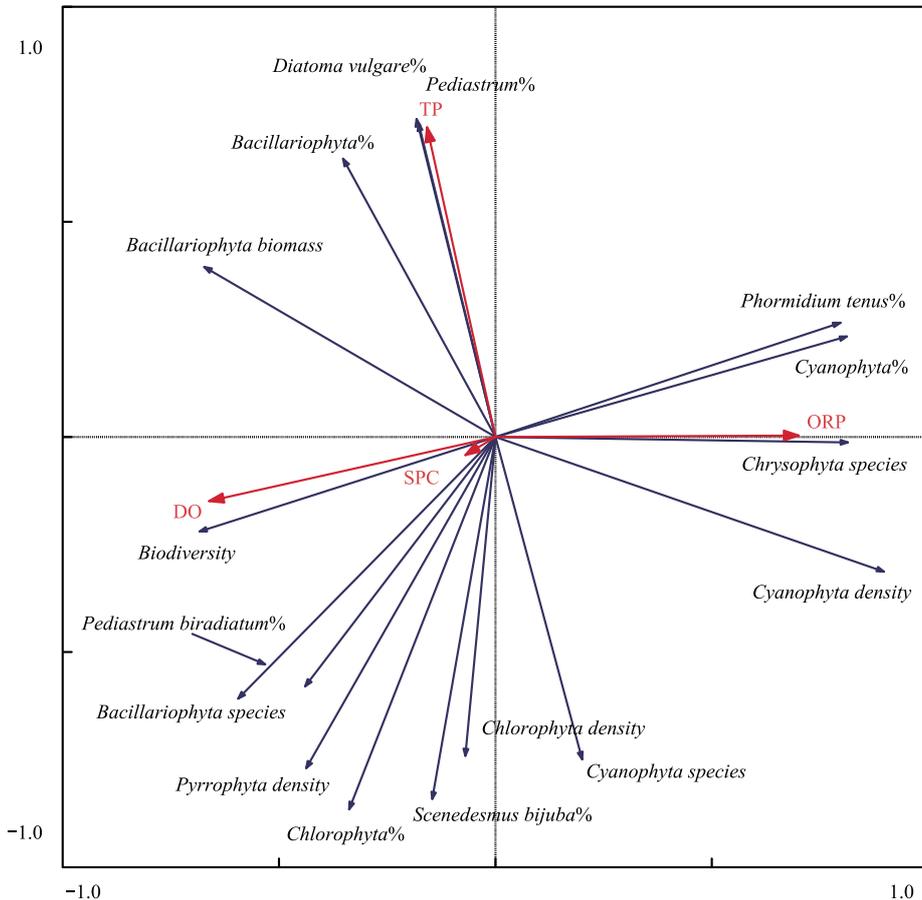


图 4 浮游植物与环境因子的 RDA 排序图

Fig.4 The biplot of RDA based on the data of the phytoplankton and the environmental factors

人为污染的自然淡水水体中,浮游植物季节性变化的一般规律是:春秋季以喜低温的硅藻、金藻为主,夏季以喜高温的蓝藻、绿藻为主,冬季浮游植物种类和数量都很少<sup>[16]</sup>,而中营养型湖泊常以甲藻、隐藻和硅藻类占优势,富营养型湖泊则常以绿藻和蓝藻类占优势<sup>[17]</sup>。在一些水库,类似的规律也能被发现<sup>[10,18]</sup>。而在本次调查中,可以看到即使同一时间段采样,提灌站的环境因子对浮游植物群落结构的影响与湖泊等水体还是明显不同。虽然图 4 中第 3 象限区域,该区域内生物多样性较高。这种水体 DO 较高而营养等级较低一般是认为水体水质较好。但是 TP 升高后,水体浮游植物将以蓝绿藻为主,浮游植物快速生长导致且水体中溶解氧升高。但在本研究中,主要表现适宜于流水形态的为硅藻而非蓝绿藻。可能的一种原因是 TP 更多的反映了泥沙中的磷含量,而非生物可利用态磷,所以不能反映出水体真实营养状态。此外,沉沙池存在较大的动水-静水变化过程,对浮游植物的群落演替产生较为明显的影响。总之,这与提灌站这种人工造成的生境密切相关。

#### 4 结论

邙山提灌站通过从黄河取水后通过沉沙池沿途沉降进入取水厂。通过本次调查,可以看到从水源地黄河取水口至水厂取水口,浮游植物群落结构、密度与生物量沿途发生了明显变化,这种变化从黄河取水口开始浮游植物生物量和生物多样性先升高后降低,并且 RDA 和 POA 分析表明 7 个采样断面被分成三类相似生境,而且环境因子对浮游植物群落结构存在显著的影响。从黄河取水口到水厂取水口,采样结果显示水源地蓝藻比例升高,最终到石佛沉沙池蓝藻门的小席藻优势度高达 0.56。因此,建议对几级沉沙池,尤其是作为柿园水厂取水口蓝藻优势度高的石佛沉沙池要着重关注,尤其是加强蓝藻及有关异味藻的预防性监测工作,以及后续改建过程中要针对沉沙池造成的不利影响开展。此外,考虑到邙山提灌站沉沙池水面面积小、引水渠长达数十公里且横穿市区,受人为影响因素严重,其生境较为脆弱,建议严格控制提灌站和引水渠周围的土地开发,特别是工业、矿业等相关产业的建设,加强管理,从而避免各类潜在污染的发生。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 张雪华,朱艳,晁红霞.郑州市饮用水源地水质分析和现状评价.科技资讯,2009,(23):107-108.
- [ 2 ] 邓建明,蔡永久,陈宇炜,张路.洪湖浮游植物群落结构及其与环境因子的关系.湖泊科学,2010,22(1):70-78.
- [ 3 ] 李秋华,韩博平.基于 CCA 的典型调水水库浮游植物群落动态特征分析.生态学报,2007,27(6):2355-2364.
- [ 4 ] 龚路军,张仕萍,熊邦喜,刘定柱,李金忠,曹军.不同类型湖泊夏季浮游生物多元聚类分析.水生生物学报,2010,34(1):43-50.
- [ 5 ] 杨丽标,韩小勇,孙璞,晏维金,李玉成.巢湖藻类组成与环境因子典范对应分析.农业环境科学学报,2011,30(5):952-958.
- [ 6 ] 朱爱民,胡菊香,李嗣新,周连凤,梁友光.三峡水库长江干流及其支流枯水期浮游植物多样性与水质.湖泊科学,2013,25(3):378-385.
- [ 7 ] 章宗涉,黄祥飞.淡水浮游生物研究方法.北京:科学出版社,1991.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] 胡鸿钧.中国淡水藻类.上海:上海科学技术出版社,1980.
- [ 10 ] 邬红娟,郭生练.水库浮游植物群落与环境多因子分析.武汉大学学报:工学版,2001,34(1):18-21.
- [ 11 ] 路娜,尹洪斌,邓建才,高峰,胡维平,高俊峰.巢湖流域春季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系.湖泊科学,2010,22(6):950-956.
- [ 12 ] 孟睿,何连生,过龙根,席北斗,李中强,舒俭民,刁晓君,李必才.长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析.环境科学,2013,34(7):2588-2596.
- [ 13 ] 董旭辉,羊向东,刘恩峰,王荣.冗余分析(RDA)在简化湖泊沉积指标体系中的应用——以太白湖为例.地理研究,2007,26(3):477-484.
- [ 14 ] 王丽,魏伟,周平,李杨,孙庆业.铜陵市河流冬季浮游植物群落结构及其与环境因子的关系.应用生态学报,2013,24(1):243-250.
- [ 15 ] 吴洁,虞左明.西湖浮游植物的演替及富营养化治理措施的生态效应.中国环境科学,2001,21(6):540-544.
- [ 16 ] Wang X L, Lu Y L, He G Z, Han J Y, Wang T Y. Exploration of relationships between phytoplankton biomass and related environmental variables using multivariate statistic analysis in a eutrophic shallow lake: A5-year study. Journal of Environmental Sciences, 2007. 19(8): 920-927.
- [ 17 ] 庞清江,李白英.东平湖水体富营养化评价.水资源保护,2003,19(5):42-44.
- [ 18 ] 胡芳,许振成,姚玲爱,陈晓燕,马千里,张杏杏,王丽,赵学敏.剑潭水库浮游植物群落特征与水环境因子关系研究.环境科学学报,2014,34(4):950-958.