

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第4期

Vol.37 No.4

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

2013年12月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响 ..... 周敏, 乔利平, 朱书慧, 李莉, 楼晟荣, 王红丽, 陶士康, 黄成, 陈长虹 (1179)

利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态 ..... 黄子龙, 曾立民, 董华斌, 李梅, 朱彤 (1188)

南京大气气溶胶混合态与云凝结核活化特征研究 ..... 朱麟, 马嫣, 郑军, 李时政, 王利朋 (1199)

北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究 ..... 苏捷, 赵普生, 陈一娜 (1208)

重庆市主城区 PM<sub>2.5</sub>时空分布特征 ..... 刘永林, 孙启民, 钟明洋, 钟部卿, 雒昆利 (1219)

大气细颗粒物中有机碳和元素碳监测方法对比 ..... 庞博, 吉东生, 刘子锐, 朱彬, 王跃思 (1230)

深圳市大气中全氟化合物的残留特征 ..... 何鹏飞, 张鸿, 李静, 何龙, 罗骥, 刘国卿, 沈金灿, 杨波, 崔晓宇 (1240)

北京上甸子站大气 CO<sub>2</sub> 及 δ<sup>13</sup>C(CO<sub>2</sub>) 本底变化 ..... 夏玲君, 周凌晔, 刘立新, 张根 (1248)

梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布 ..... 刘婷, 李露, 张家泉, 占长林, 刘红霞, 郑敬茹, 姚瑞珍, 曹军骥 (1256)

城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险 ..... 刘建福, 陈敬雄, 辜时有 (1264)

北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估 ..... 曹治国, 余刚, 吕香英, 王梦蕾, 李琦路, 冯精兰, 闫广轩, 余浩, 孙剑辉 (1272)

西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析 ..... 王丽, 王利军, 史兴民, 卢新卫 (1279)

PDMS 基涂层活性炭对甲苯、苯和丙酮吸附研究 ..... 刘寒冰, 姜鑫, 王新, 杨兵, 薛南冬, 张石磊 (1287)

海南东北部滨海湿地沉积物微量元素分布特征、来源及污染评价 ..... 张卫坤, 甘华阳, 闭向阳, 王家生 (1295)

曹妃甸围填海土壤重金属积累的磁化率指示研究 ..... 薛勇, 周倩, 李远, 章海波, 胡雪峰, 骆永明 (1306)

滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源 ..... 李广, 章新平, 许有鹏, 宋松, 王跃峰, 季晓敏, 项捷, 杨洁 (1313)

江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价 ..... 李莹杰, 张列宇, 吴易雯, 李曹乐, 杨天学, 唐军 (1321)

城市景观水体甲基汞的形成机制及微宇宙模拟研究 ..... 刘小红, 司友斌, 郭子薇, 杜成竹, 朱聪聪 (1330)

我国北方温带水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性 ..... 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 王亚平, 史建超, 周石磊, 刘飞 (1337)

额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征 ..... 韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 张伟, 刘世伟, 周嘉欣 (1345)

太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析 ..... 冯佳, 郭宇宁, 王飞, 吕俊平, 刘琪, 谢树莲, 程革, 张建民 (1353)

铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征 ..... 程建华, 窦智勇, 孙庆业 (1362)

基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究 ..... 马秋梅, 李玮, 王毅, 刘新亮, 李勇, 吴金水 (1371)

重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算 ..... 张远瞩, 贺秋芳, 蒋勇军, 李勇 (1379)

山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价 ..... 邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 张文慧, 许秋瑾, 黄天寅 (1389)

伊乐藻-固定化脱氮微生物技术对入贡湖河道脱氮机制的影响 ..... 韩华杨, 李正魁, 王浩, 朱倩 (1397)

环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征 ..... 高永霞, 宋玉芝, 于江华, 朱广伟 (1404)

藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律 ..... 陈俊, 李勇, 李大鹏, 黄勇, 朱培颖 (1413)

扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响 ..... 郭俊锐, 李大鹏, 刘焱见 (1422)

锆改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响 ..... 章喆, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (1427)

电化学还原-氧化工艺降解 4-氯酚的毒性研究 ..... 王岩, 施钦, 王辉, 卞兆勇 (1437)

水合氧化铝负载的磁性核/壳结构 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub> 纳米颗粒对水中磷的去除及再利用 ..... 赖立, 谢强, 方文侃, 邢明超, 吴德意 (1444)

多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除 ..... 乔梦, 齐维晓, 赵旭, 刘会娟, 曲久辉 (1451)

污水处理厂污泥水溶性有机物的光谱特性分析 ..... 牛天浩, 周振, 胡大龙, 魏海娟, 李晶, 窦微笑, 葛红花 (1460)

高含氟的光伏废水反硝化可行性及经济性分析 ..... 李祥, 朱亮, 黄勇, 杨朋兵, 崔剑虹, 马航 (1467)

连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制 ..... 吴鹏, 张诗颖, 宋吟吟, 徐乐中, 沈耀良 (1472)

反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复 ..... 王翻翻, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳, 张月茹, 刘郭洵 (1478)

低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响 ..... 何势, 顾超超, 魏欣, 黄圣琳, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1485)

低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究 ..... 杨伟强, 王冬波, 李小明, 杨麒, 徐秋翔, 张志贝, 李志军, 向海弘, 王亚利, 孙剑 (1492)

短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响 ..... 谢燕, 陈曦, 胡正华, 陈书涛, 张寒, 凌慧, 申双和 (1499)

不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子 ..... 崔海, 张亚红 (1507)

塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性 ..... 贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 张雪妮, 解丽娜 (1516)

小分子有机酸对紫色土及其溶液中 Pb 的赋存影响 ..... 刘江, 江韬, 黄容, 张进忠, 陈宏 (1523)

鸢尾对石油烃污染土壤的修复以及根系代谢分析 ..... 王亚男, 程立娟, 周启星 (1531)

水锰矿氧化水溶性硫化物过程及其影响因素 ..... 罗瑶, 李珊, 谭文峰, 刘凡, 蔡崇法, 邱国红 (1539)

高温纤维素降解菌群筛选及产酶特性 ..... 冯红梅, 秦永胜, 李筱帆, 周金星, 彭霞薇 (1546)

基于固相萃取及高效液相色谱-荧光检测分析的污泥中氟喹诺酮类抗生素研究方法的开发 ..... 戴晓虎, 薛勇刚, 刘华杰, 戴翎翎, 严寒, 李宁 (1553)

养殖场周边土壤-蔬菜系统磺胺类药物残留及风险评价 ..... 金彩霞, 司晓薇, 王子英, 张琴文 (1562)

4 种典型 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响 ..... 王兰君, 王金凤, 朱鲁生, 王军, 赵祥 (1568)

新型污染物卤代吡啉的环境行为及生态毒理效应 ..... 林坤德, 陈艳秋, 袁东星 (1576)

水源地土壤环境保护优先区划分方法与实例研究 ..... 李蕾, 王铁宇, 王晓军, 肖荣波, 李奇峰, 彭驰, 韩存亮 (1584)

《环境科学》征订启事(1218) 《环境科学》征稿简则(1370) 信息(1352, 1412, 1498)

# 太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析

冯佳<sup>1</sup>, 郭宇宁<sup>1</sup>, 王飞<sup>1</sup>, 吕俊平<sup>1</sup>, 刘琪<sup>1</sup>, 谢树莲<sup>1\*</sup>, 程革<sup>2</sup>, 张建民<sup>2</sup>

(1. 山西大学生命科学学院, 太原 030006; 2. 太原市汾河景区管理委员会, 太原 030002)

**摘要:** 为了探究太原汾河景区水体浮游植物群落结构特征及水质状况, 对浮游植物的种类组成、生物量及其与环境理化因子的相关性进行监测. 在 2014 年丰水期 6~10 月对汾河太原景区从上游到下游设置 9 个采样点进行定期采样调查. 分析结果表明, 太原汾河景区水体中浮游植物主要为蓝藻门、绿藻门、硅藻门植物, 其中蓝藻植物数量最多, 其次为绿藻和硅藻. 在丰水期浮游植物细胞密度呈现先上升后下降现象, 7 月达到最高. 采样点间也存在较大差异, 位于汾河景区中下游的 3 个样点浮游植物数量最多. 浮游植物生物量与环境理化因子的关系通过冗余分析(RDA)进行整体排序, 结果表明浮游植物总细胞密度与溶解氧呈显著正相关, 与化学需氧量呈显著负相关. 硅藻细胞密度与水温、气温呈极显著正相关, 与化学需氧量呈极显著负相关. 各种环境因子的作用在不同时期的表现不同. 综合营养状态指数分析, 太原汾河景区水体中总氮在整个时空范围内超标, 处于轻度到中度富营养水平状态.

**关键词:** 太原汾河景区; 浮游植物; 环境因子; 冗余分析; 水质

中图分类号: X171; X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)04-1353-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.04.021

## Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan

FENG Jia<sup>1</sup>, GUO Yu-ning<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>1</sup>, LÜ Jun-ping<sup>1</sup>, LIU Qi<sup>1</sup>, XIE Shu-lian<sup>1\*</sup>, CHENG Ge<sup>2</sup>, ZHANG Jian-min<sup>2</sup>

(1. School of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Management Committee of Taiyuan Scenic Segment of Fenhe River, Taiyuan 030002, China)

**Abstract:** In order to explore the structural characteristics of phytoplankton community and the water quality of the Fenhe scenic spot in Taiyuan, the species composition and the biomass of phytoplankton as well as their correlation with the environmental factors were monitored. The survey selected 9 sampling sites along the up and lower reaches in Fenhe scenic spot of Taiyuan, from Chaicun Bridge to Xiangyun Bridge. During the wet season (June-October) in 2014, specimens were collected, qualitative and quantitative investigation on the algae and monitoring on physicochemical indexes of the water were studied. Meanwhile, the water quality was analyzed and evaluated combining all the physicochemical indexes and cell density. Correlation analysis and RDA were conducted to analyze the relationship of algal community structure and the environmental factors. The main results showed that the dominant phytoplanktons were Cyanophyta, Chlorophyta and Bacillariophyta. The algal biomass first increased and then reduced during the wet season, and the maximum value of biomass occurred in July. There were many differences among different sampling points. The cell densities of phytoplankton were much higher in three central areas than the other sampling sites. Physical and chemical factors showed a variation tendency in time and space. Based on the results of RDA between phytoplankton cell densities and the physic-chemical parameters, the cell densities and the physic-chemical parameters had different correlations. The total cell density had significant positive correlation with dissolved oxygen, and negative correlation with COD. There were extremely significant positive correlations between diatom cell densities and water temperature, air temperature. But the diatom cell density was obviously negatively correlated with COD. It was distinct that the functions of the environment factors were different in temporal and spatial distribution. The state index of comprehensive nutrition indicated that the total nitrogen content was beyond the standard in all sampling sites during the whole wet season. The water quality varied from oligotrophic to light eutrophic.

**Key words:** Fenhe Scenic Spot of Taiyuan; phytoplankton; environmental factors; redundancy analysis(RDA); water quality

浮游植物作为水生态系统的初级生产者, 其种类组成、分布状况和生物量的变化会随环境的变化而异<sup>[1]</sup>, 并极大程度地参与到河流水体中的物质能量转换中<sup>[2]</sup>, 能有效地综合反映水域富营养化的程度和过程. 浮游植物具有细胞个体小、结构简单、对环境的敏感性高, 变化较快等特点<sup>[3]</sup>, 在河流湖

泊等水体中与非生物因素, 如磷、氮、高锰酸盐指

收稿日期: 2015-10-29; 修订日期: 2015-11-19

基金项目: 山西省科技攻关项目(20130313010-4); 山西省科技基础条件平台建设项目(2015091004-0102)

作者简介: 冯佳(1980~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为藻类植物与水体环境, E-mail: fengj@sxu.edu.cn

\* 通讯联系人, E-mail: xiesl@sxu.edu.cn

数、溶解氧、温度等具有相互影响、同步变化的效应<sup>[4-7]</sup>,因此,浮游植物群落结构的多样性常被利用监测分析水质状况<sup>[8-10]</sup>,是一种有效的水体生态环境评价方法。

汾河是山西省最大的河流,发源于宁武县管涔山,穿越云中山和吕梁山之间的峡谷,至兰村以上为上游,中下游纵贯省境中部的太原、临汾两大盆地,在黄河禹门口下游的万荣县庙前村附近汇入黄河。汾河干流的中上游段贯穿于太原城区,太原汾河景区是汾河流经太原区域,经过水利治理和绿化美化后而形成的滨水公园。北起柴村桥北侧,南至祥云桥南侧,整体总长超过 18 km,宽有百米。太原汾河景区起着纳污泄洪的作用。每当暴雨过后,排污渠的污水就会进入汾河水体,加上汾河景区游客来往,居民生活和工厂的生产等,极易给汾河景区的水体造成污染。

本研究通过对太原汾河景区的浮游植物细胞密

度和环境因子进行测定,分别以时间和采样点为单位分析浮游植物生物量和环境因子的变化,通过冗余分析(redundancy analysis, RDA)进一步对环境因子和浮游植物生物量的相关性进行排序,分析浮游植物生物量的变化趋势及其影响因素,以期为太原汾河的景观水体治理和生态修复提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域及采样点的设置

本研究对汾河景区 2014 年丰水期 6~10 月进行监测,每周取样一次,从太原汾河景区上游到下游设置 9 个采样点(图 1),分别为柴村桥下(S1)、汾管委对面木平台处(S2),胜利桥-漪汾桥(S3)、漪汾桥-迎泽桥(S4)、迎泽桥-南内环桥(S5)、南内环桥-长风桥(S6)、长风桥-南中环桥(S7)、南中环桥-祥云桥(S8)和西岸浑水渠(S9)<sup>[11]</sup>。

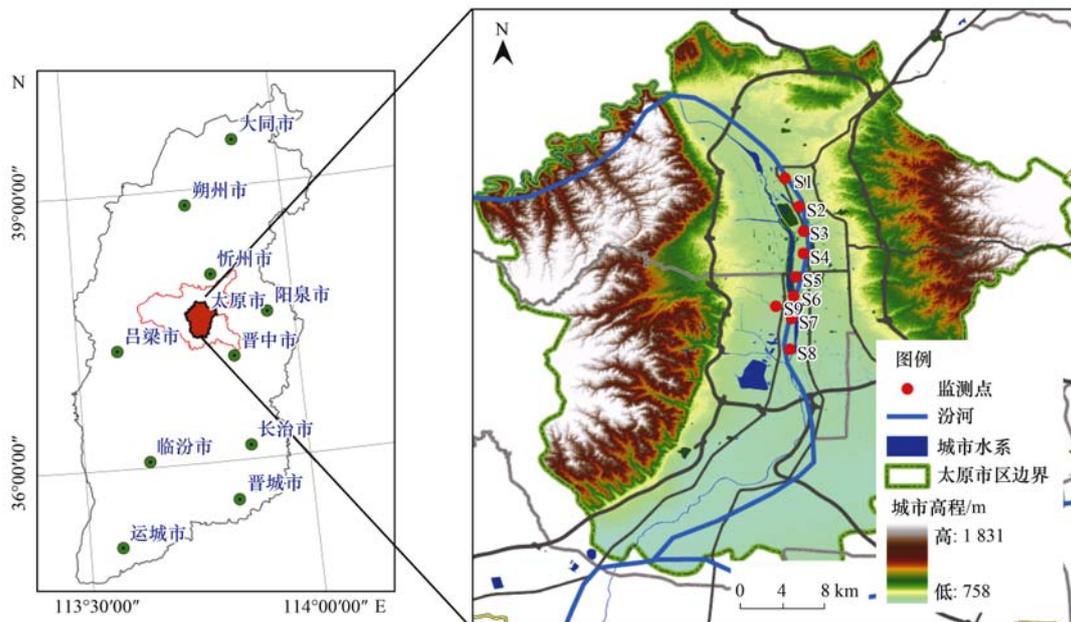


图 1 太原汾河景区采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the Fenhe Scenic Spot of Taiyuan

### 1.2 标本的采集与鉴定

定量采集使用采水器在水面采取 1 L 水样,加入 10%~15% 的鲁哥试剂(Lugol's solution) 10 mL 进行固定,避光、静置保存 48 h,吸去上清,留下底层 50 mL<sup>[12, 13]</sup> 备检,在显微镜(Olympus BX51)下进行鉴定和计数<sup>[14, 15]</sup>。

### 1.3 环境因子的测定

环境因子测定包含水温(WT)、气温(AT)、pH、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数、化学需氧量

(COD)、总氮(TN)、氨氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )、总磷(TP)。其中水温、气温、溶解氧及 pH 通过水质分析仪进行分析<sup>[16]</sup>,化学需氧量、总氮、氨氮、总磷等化学指标参照中华人民共和国国家标准(GB 3838-2002)进行测定。

### 1.4 统计分析

综合营养状态指数  $\text{TSI}(\sum) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot \text{TSI}(J)$ <sup>[17, 18]</sup>,采用总磷、总氮、氨氮、化学需氧量、

高锰酸盐指数来作为水体的综合营养状态指数的权重因素. 式中,  $W_j$  表示第  $j$  种参数对应的营养状态指数的权重,  $TSI(J)$  表示第  $J$  种参数对应的营养状态指数,  $m$  表示评价参数的数量.

浮游植物和环境因子的时空变化由 Oringe 8.5 进行分析, 分别以时间和空间为尺度对环境因子和浮游植物细胞密度的变化进行分析. 同时对其进行多元分析, 浮游植物细胞在各样点出现的频率满足  $\geq 12.5\%$  进行多元分析之前<sup>[19]</sup>, 进行标准化, 将物种数据和环境因子除了 pH 外进行  $\lg(x+1)$  转化, 提高正态分布性, 进行冗余分析(RDA)的同时进行蒙特卡洛(Monte Carlo)检验, 整个分析经过 Canoco 4.5 进行<sup>[16]</sup>.

## 2 结果与分析

### 2.1 浮游植物组成特征

太原汾河景区的浮游植物组成主要为蓝藻门(Cyanophyta)、绿藻门(Chlorophyta)、硅藻门(Bacillariophyta), 优势种为微小平裂藻(*Merismopedia tenuissima*)、弱细颤藻(*Oscillatoria*

*tenuis*)、小席藻(*Phormidium tenue*)、尖针杆藻(*Synedra acusvar*).

从时间变化上来看(图2), 6月浮游植物总细胞密度为  $28.75 \times 10^6$  个 $\cdot$ L $^{-1}$ , 其中蓝藻最高为  $18.68 \times 10^6$  个 $\cdot$ L $^{-1}$ ; 7月生物量最大, 总细胞密度达到  $38.4 \times 10^6$  个 $\cdot$ L $^{-1}$ , 其中蓝藻为  $28.4 \times 10^6$  个 $\cdot$ L $^{-1}$ , 8月的总细胞密度为  $33.58 \times 10^6$  个 $\cdot$ L $^{-1}$ , 蓝藻细胞密度为  $26.54 \times 10^6$  个 $\cdot$ L $^{-1}$ , 9月的细胞密度为  $33.39 \times 10^6$  个 $\cdot$ L $^{-1}$ , 蓝藻的细胞密度为  $25.2 \times 10^6$  个 $\cdot$ L $^{-1}$ , 10月的总细胞密度最低, 为  $23.89 \times 10^6$  个 $\cdot$ L $^{-1}$ , 蓝藻的细胞密度为  $18.65 \times 10^6$  个 $\cdot$ L $^{-1}$ .

以采样站点的浮游植物分布来看(图2), 以中游处于市中心繁华地带工厂企业附近中下游和污染区浮游植物生物量较大, 漪汾桥-迎泽桥(S4)、迎泽桥-南内环桥(S5)和南内环桥-长风桥(S6)这3个样点的细胞密度最多, 分别为  $43.04 \times 10^6$ 、 $44.37 \times 10^6$  和  $42.5 \times 10^6$  个 $\cdot$ L $^{-1}$ , 所有样点中, 蓝藻门植物为主要类群, 其次是绿藻门植物. 在水体中, 浮游植物会随着理化因子的变化而呈现出一定的时空差异<sup>[20]</sup>.

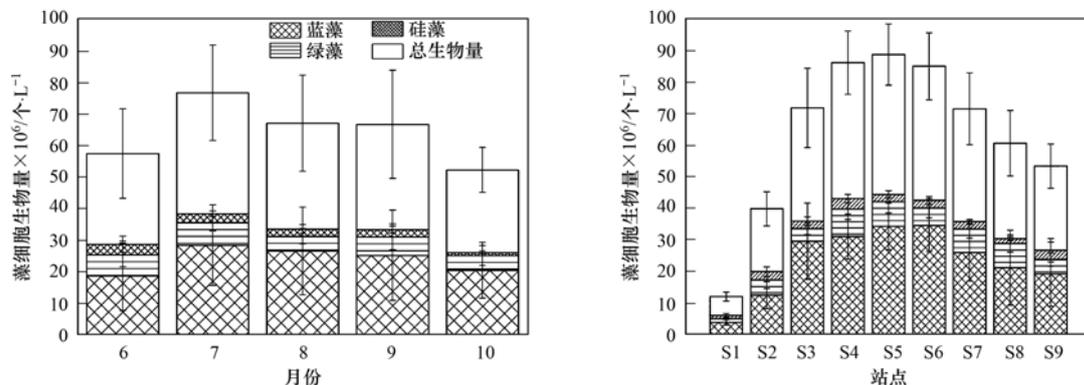


图2 浮游植物细胞密度的时空分布

Fig. 2 Temporal and spatial distribution pattern of phytoplankton cell densities

### 2.2 环境因子的特征

太原汾河景区各环境因子的变化多样(图3), 从时间变化来看, 温度从6~10月先升高再降低, 7月最高为  $25.63^{\circ}\text{C}$ , 10月最低为  $14.93^{\circ}\text{C}$ . 平均 pH 变化在  $8.22 \sim 8.42$  之间, 10月 pH 达到最高. 溶解氧在整个丰水期表现为先上升后下降的趋势, 7月达到最高  $6.68 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 最低值出现在9月, 而后又上升, 主要是因为夏季降雨量较高导致<sup>[21]</sup>. 高锰酸盐指数表现为先下降后上升的趋势, 最高值出现在10月为  $6.55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 最低值出现在8月为  $5.64 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 化学需氧量先降低到7月的最低值  $23$

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  随后又升高到9月的最高为  $27.43 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 波动相对较大. 总氮开始含量最高为  $2.57 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 降到8月最低  $1.77 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  后又继续升高. 氨氮呈现出先减少后增加的趋势, 最低为8月的  $0.38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 最高为9月的  $1.16 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 而总磷在整个时间段的变化不大.

根据太原汾河景区的空间分布如图3所示, 各样点之间的温度和 pH 差异较小, 西岸浑水渠(S9)站点处的溶解氧较小, 除此外, 其余站点间的差异不显著, 高锰酸盐指数和总磷的值均在漪汾桥-迎泽桥(S4)站点处最大, 分别达到  $24.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.43$

mg·L<sup>-1</sup>,化学需氧量在柴村桥下(S1)和漪汾桥-迎泽桥(S4)站点处的量非常少,漪汾桥-迎泽桥(S4)最少为1.74 mg·L<sup>-1</sup>,其余站点含量较多,且差异较小,总氮和氨氮均表现为漪汾桥-迎泽桥(S4)处含量最少,而南中环桥-祥云桥(S8)处含量最多.综合分析,理化因子在漪汾桥-迎泽桥(S4)和南中环桥-祥云桥(S8)处呈现多样性.

综合营养状态指数为TLI(∑),其分级标准为TLI(∑) < 30 为贫营养,30 ≤ TLI(∑) ≤ 50 为中营养,TLI(∑) > 50 为富营养,50 < TLI(∑)

≤ 60 为轻度富营养,60 < TLI(∑) ≤ 70 为中度富营养,TLI(∑) > 70 为重度富营养<sup>[18, 22]</sup>.太原汾河景区在丰水期总氮均超标,6月的化学需氧量超标,7月和9月的氨氮超标,整个丰水期汾管委对面木平台处(S2)、迎泽桥-南内环桥(S5)、长风桥-南中环桥(S7)、南中环桥-祥云桥(S8)和西岸浑水渠(S9)站点多次达到了中度富营养化水平,枯水期胜利桥-漪汾桥(S3)、迎泽桥-南内环桥(S5)、长风桥-南中环桥(S7)、南中环桥-祥云桥(S8)达到了中度富营养化水平(表1).

表1 丰水期的综合营养状态指数

Table 1 Index of comprehensive nutrition in wet season and dry season

日期(月-日)	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
06-16	/	/	61.97	58.19	61.80	53.59	64.58	66.61	/
06-23	/	57.03	59.49	59.38	59.38	56.06	58.73	61.92	/
06-30	/	58.67	57.58	57.63	59.78	57.52	59.55	62.70	69.25
07-07	/	63.67	64.32	54.12	64.91	55.65	66.75	66.18	67.41
07-14	/	67.47	65.56	56.75	65.02	56.32	61.48	72.62	58.69
07-21	/	/	61.45	58.65	64.17	56.32	62.80	62.83	58.40
07-28	/	62.36	64.70	59.13	66.26	57.59	60.48	59.32	58.89
08-04	/	67.06	67.61	61.33	65.20	58.04	61.63	60.58	60.28
08-11	/	65.12	66.53	61.48	62.78	57.74	61.16	57.31	58.97
08-18	/	/	64.36	62.67	65.18	56.12	60.31	57.78	58.54
08-25	/	/	64.04	62.05	62.32	55.92	60.93	58.68	57.12
09-01	/	/	64.17	60.33	65.59	54.79	65.16	65.84	56.91
09-09	/	/	65.30	60.07	67.71	57.32	68.04	63.28	57.81
09-15	/	/	63.72	59.93	64.68	56.39	64.34	62.35	59.99
09-22	/	/	63.41	59.74	63.98	55.81	67.73	68.44	56.96
10-08	/	/	60.69	59.38	62.80	56.23	68.32	69.23	61.51
10-13	/	/	59.18	60.99	61.68	57.58	61.89	73.61	61.69
10-27	/	/	56.21	55.32	57.27	53.51	63.83	65.95	57.46

2.3 浮游植物细胞密度与环境因子的相关性

对物种和环境因子进行分析时,为了确定选择线性模型还是单峰模型,先对物种数据进行非约束性分析去趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA),确定排序轴的最大长度,如果最大排序轴的长度大于4时,选择单峰模式模型;如果小于3,则选择线性模式;如果介于3~4之间,则单峰模型和线性模型均合适<sup>[30]</sup>.通过太原汾河景区浮游植物蓝藻(SP1)、绿藻(SP2)、硅藻(SP3)、总细胞密度(SP4)与环境因子的多元关系进行除趋势对应分析(DCA分析),得到藻类细胞的最大梯度值为0.272,远小于3,因此选择约束排序选择线性模型冗余分析(RDA),进一步寻找新的变量作为最好的预测响应变量分布.在进行冗余分析RDA分析<sup>[24]</sup>时,同时检测水温(WT)、气温(AT)、pH、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数、化学需氧量(COD)、总

氮(TN)、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、总磷(TP)各环境因子的独立效应,每个因子的重要性和显著性用Monte-Carlo假设检验<sup>[25, 26]</sup>(表2),以P < 0.05筛选出对环境影响显著的因子<sup>[16]</sup>,剩下水温、气温、溶解氧、化学需氧量、总氮、总磷这6种理化因子,然后对平均环境因子和平均藻类细胞生物量进行RDA排序分析(图4),前两轴的特征值分别为0.550、0.101,为主要的排序轴,表明前两轴的生物环境相关性系数分别为0.728、0.736.生物-环境的相关关系累积率为48.3%(表3),浮游植物细胞密度到原点的直线与环境因子夹角的余弦值表示二者的相关性.浮游植物总细胞密度与溶解氧呈显著正相关(P = 0.048),与化学需氧量呈显著负相关(P = 0.022);蓝藻细胞密度与溶解氧均呈显著正相关(P = 0.032),与化学需氧量呈显著负相关(P = 0.042);绿藻细胞密度与化学需氧量和总磷均呈显著负相关(P = 0.0440、P =

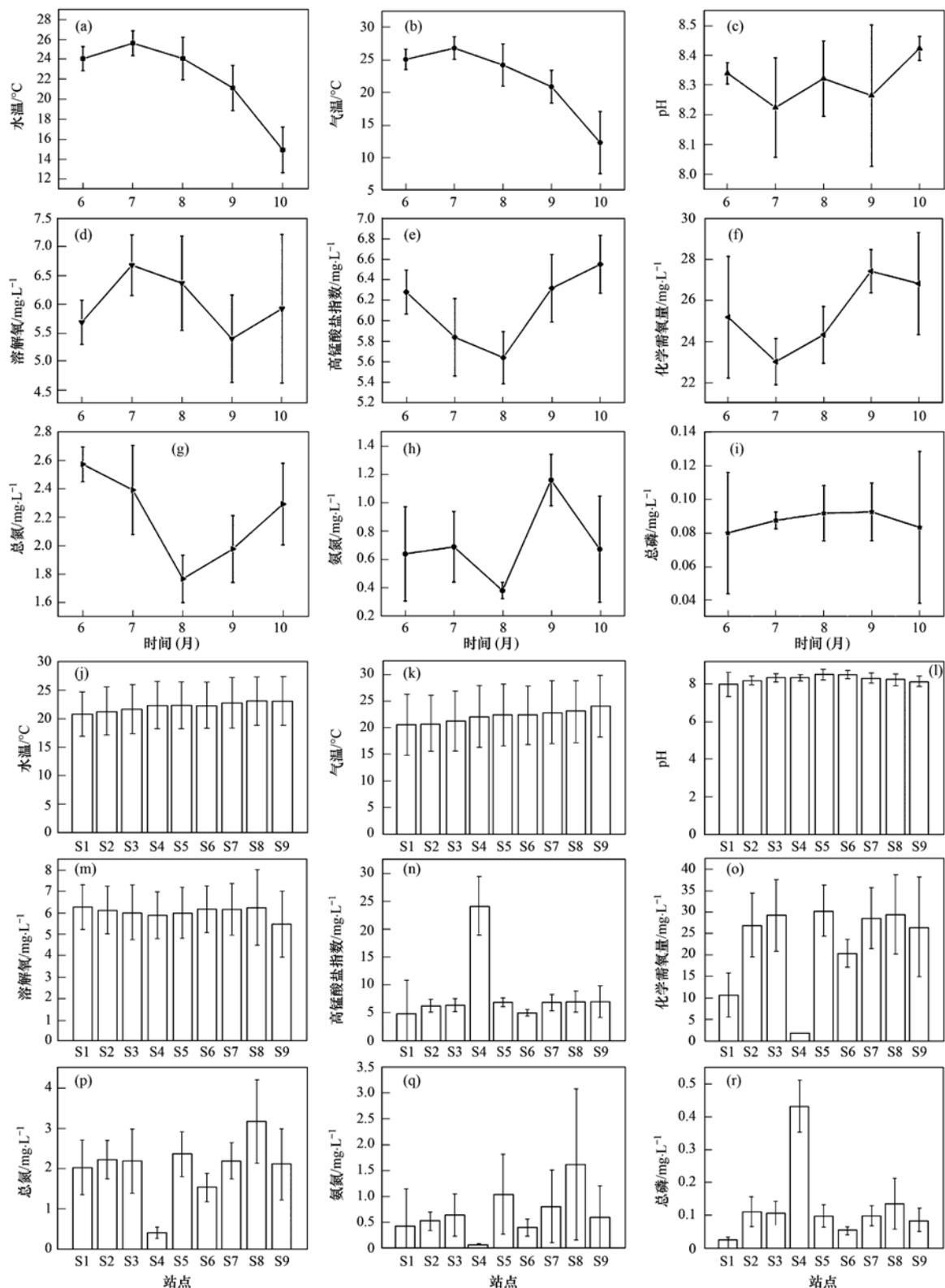


图3 各环境因子的时空分布

Fig. 3 Temporal and spatial distribution pattern of environmental factors

0.0260), 硅藻细胞密度与水温、气温呈极显著正相关( $P=0.01$ 、 $P=0.008$ )、与化学需氧量呈极显著负相关( $P=0.008$ )。

根据太原汾河景区丰水期6~8月浮游植物细胞与环境因子的RDA排序分析[图5(a)],前两轴的特征值较高,分别为0.728和0.189,为主要的排

序轴,能解释的数据比例高达 91.7% (表 4). 由此得知,总细胞密度与化学需氧量、总磷呈显著负相关 ( $P = 0.016$ 、 $P = 0.034$ ),蓝藻细胞密度与化学需氧量呈显著负相关 ( $P = 0.044$ );绿藻细胞密度与总磷呈显著负相关 ( $P = 0.018$ );硅藻细胞密度

与化学需氧量呈显著负相关 ( $P = 0.03$ ). 9 ~ 10 月浮游植物的 RDA 排序分析如图 5(b),前两轴的特征值分别为 0.895 和 0.071 (表 4),硅藻细胞密度与水温、气温呈显著正相关 ( $P = 0.034$ 、 $P = 0.032$ ),与其他水体环境因子相关性不显著.

表 2 对 RDA 分析的约束性检验 Monte Carlo 检验结果

Table 2 Monte Carlo permutation test for RDA in constrained vectors for three different phytoplankton species and total cells densities

变异指标	蓝藻		绿藻		硅藻		总细胞	
	P 值	相关性						
水温	0.306 0	0.271	0.468 0	0.195	0.010 0	0.614	0.220 0	0.332
气温	0.284 0	0.278	0.306 0	0.261	0.008 0	0.621	0.184 0	0.354
pH	0.472 0	0.168	0.322 0	0.253	0.782 0	0.071	0.434 0	0.196
溶解氧	0.032 0	0.532	0.318 0	0.251	0.172 0	0.327	0.048 0	0.507
高锰酸盐指数	0.402 0	0.217	0.890 0	0.039	0.422 0	0.216	0.476 0	0.185
化学需氧量	0.042 0	0.504	0.044 0	0.484	0.008 0	0.569	0.022 0	0.571
总氮	0.614 0	0.141	0.086 0	0.411	0.512 0	0.163	1.000 0	0.005
氨氮	0.758 0	0.076	0.398 0	0.243	0.920 0	0.027	0.676 0	0.107
总磷	0.284 0	0.277	0.026 0	0.513	0.498 0	0.171	0.176 0	0.358

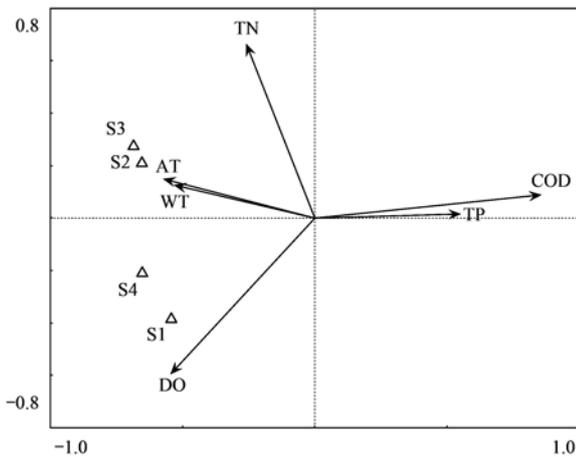


图 4 浮游植物细胞密度与环境因子的 RDA 排序图

Fig. 4 RDA biplot of phytoplankton cell densities and environment factors

表 3 基于 RDA 的环境因子对藻类的变异

Table 3 RDA results of environment factors for phytoplankton

变异指标	AX1	AX2	AX3	AX4
排序轴特征值	0.404	0.079	0.034	0.000
生物与环境相关性	0.728	0.736	0.604	0.290
生物数据累积变化/%	40.4	48.3	51.7	51.7

### 3 讨论

环境因子是变化多样的,对浮游植物群落的影响是非常重要的<sup>[27]</sup>. 研究表面水和降雨量是驱动环境变化的主要因子<sup>[28]</sup>,对浮游植物的生长状况有着十分重要的影响. 尤其是在靠近市中心的站点,由于游客、居民、工厂等影响,总氮超标<sup>[29]</sup>,导致水质整体处于一个贫营养到中度富营养的状态. 在太原汾河景区丰水期期间,浮游植物的群落结构主要

表 4 丰水期基于 RDA 环境因子对浮游植物细胞密度的变异

Table 4 RDA results of phytoplankton cell densities and environment factors in wet season

变异指标	6 ~ 8 月				9 ~ 10 月			
	AX1	AX2	AX3	AX4	AX1	AX2	AX3	AX4
排序轴特征值	0.728	0.189	0.062	0.000	0.895	0.071	0.034	0.000
生物与环境相关性	0.987	0.998	0.999	0.694	1.000	1.000	1.000	1.000
生物数据累积变化/%	72.8	91.8	98.0	98.0	89.5	96.6	100.0	100.0
生物与环境相关关系/%	74.3	93.6	100.0	100.0	89.5	96.6	100.0	100.0

为蓝藻、绿藻和硅藻,蓝藻为主要类群,其中 7 月浮游植物的生物量达到最大,并且在靠近市中心的样点的生物量最多.

温度的变化对浮游植物的生物量和密度有着明显的影响<sup>[30]</sup>,是影响浮游植物密度季节变化的重要理化因子,水温的变化影响着水体物理、化学和生物的活动,从而影响水体上下水层的交换,进而影响

到浮游植物的垂直分布,并直接影响其生长、死亡等生态过程和水质营养物的生化循环和分布<sup>[31, 32]</sup>. 河流中浮游植物和环境因子 RDA 排序分析和季节排序分析发现,浮游植物的生物量会随温度的升高而增加<sup>[33, 34]</sup>. 但是太原汾河景区的丰水期的浮游植物生物量与水温之间关系不同,6 ~ 8 月的浮游植物生物量与水温呈负相关,9 ~ 10 月浮游植物生

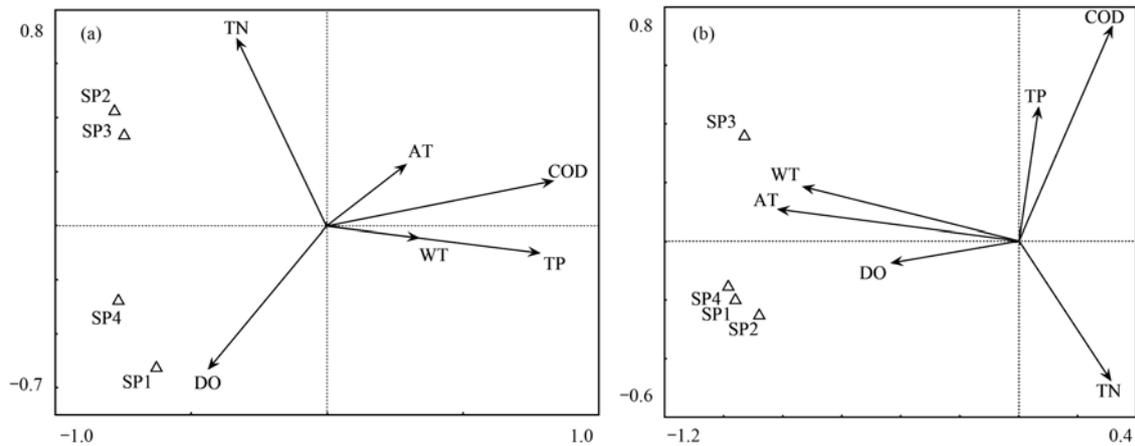


图5 丰水期浮游植物细胞密度与环境因子的 RDA 排序图

Fig. 5 RDA biplot of phytoplankton cell densities and environment factors in wet season (June-August (a) and September-October (b))

物量与水温相关性不显著,这与7、8月的降雨量大,稀释了浮游植物生物量,并且降雨会导致水位上升,水流速度加快,导致浮游植物不能积累有关<sup>[1]</sup>.

营养盐是浮游植物生长的关键因素,水体中营养盐的变化与浮游植物的变化具有相互促进的关系,即营养盐可以影响浮游植物的生长状况,同时浮游植物的生长也会影响营养盐的含量.溶解氧是影响浮游植物的主要因素<sup>[35]</sup>,也是研究水体自净能力的重要指标.水体中的生物结构分布不合理会导致溶解氧产生变化,同时溶解氧的变化会进一步导致水体生物结构的变化,水体中丰富多样的浮游植物可以使水体保持较高的溶解氧含量<sup>[36]</sup>.因此,浮游植物与溶解氧呈显著的正相关性,高的溶解氧伴随着高的浮游植物生物量<sup>[37]</sup>.在丰水期,汾河景区水体中溶解氧与浮游植物呈现显著正相关,这与大量浮游植物进行光合作用产生氧气有密切关系.7月时,溶解氧含量达到最大,表明水体营养状况较好.7月以后,随着降雨量增加,未经处理的城市居民污水和上游工厂废水流入河流,大量的有机污染物和无机盐的降解过程会消耗大量的水体中的氧,进而制约了浮游植物的光合作用,进一步导致溶解氧的含量下降.此外影响溶解氧的因素还有水体温度,气候、径流量、水体的滞留时间、营养物质的含量等因素<sup>[38]</sup>.9月以后随着降雨量规模的减弱,污水渠污水不会漫过围坝而进入汾河水体,同时由于降雨量的稀释作用,使化学需氧量浓度减少<sup>[39]</sup>,进而溶解氧的浓度恢复.

化学需氧量表示水体中还原性物质的含量,由于淡水河流中主要的还原性物质是有机物,化学需氧量也可以作为衡量水体中有机物含量的指标,化学需氧量越大,表明水体受有机物的污染程度就越

严重.化学需氧量的变化主要与城市生活污水和工厂排放量,以及降雨量有关<sup>[38, 40]</sup>.在丰水期的6~8月,太原汾河景区水体中化学需氧量与浮游植物的生长呈显著负相关,在9~10月相关性减小.由于汾河景区周边的居民和游客生活活动带来污染,尤其是夏季的6~8月,降雨量增加,排污渠的污水进入,导致汾河景区水体化学需氧量升高,同时也造成溶解氧含量降低,使得化学需氧量成为影响浮游植物生长的主要因子.

研究表明水体中浮游植物的生长与氮、磷含量的变化有密切关系,水体的富营养化主要是由于氮、磷盐的含量适合水体中个别浮游植物物种大量增殖,而引起浮游植物群落结构的简化,生物量异常增大,导致水华暴发<sup>[13, 41]</sup>.通常,水体中的氮、磷营养盐的增加在一定范围内会促进藻类植物的生长,然而过高的氮、磷含量反而会促使藻类植物密度的降低,抑制其生长,总氮和总磷的阈值分别为 $16.55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.58 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .水体富营养化发生时,总氮浓度为 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,总磷为 $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .太原汾河景区水体中氮、磷营养盐含量均高于发生浓度.总氮在6、7月超标,由于降雨量过高的情况下将污水中的氮、磷和有机物大量带入河流水体中,造成水体富营养化.总磷在整个丰水期含量保持在一个较为稳定的状态,各种环境因子的作用在不同时期表现不同<sup>[42]</sup>.研究结果显示绿藻与总氮呈显著正相关,而与总磷呈显著负相关,由于总磷含量高于阈值导致绿藻植物的细胞密度降低.此外,氮磷比是一个综合的影响方式,促使藻类生长的最佳氮磷比为16:1,而太原汾河景区水体中氮磷比远远大于16:1,表明磷是该河流水体藻类生长的主要限制因子<sup>[43]</sup>.由于太原汾河景区6~8月雨水量较大,

水流较快,从而降低了河流水体中的磷的含量,使磷的作用减小<sup>[39]</sup>,从而降低了暴发水华的风险。

#### 4 结论

(1)太原汾河景区的浮游植物组成主要为蓝藻门(Cyanophyta)、绿藻门(Chlorophyta)、硅藻门(Bacillariophyta),优势种为微小平裂藻(*M. tenuissima*)、弱细颤藻(*O. tenuis*)、小席藻(*P. tenue*)和尖针杆藻(*S. acusvar*)。丰水期期间,7月生物量最大,总细胞密度达到 $38.4 \times 10^6$ 个 $\cdot L^{-1}$ ,10月份的总细胞密度最低。以中游处于市中心繁华地带工厂企业附近中下游和污染区浮游植物生物量较大,所有样点中,蓝藻门为主要类群,其次是绿藻。

(2)太原汾河景区各环境因子的变化多样,丰水期期间,温度为 $14.93 \sim 25.63^{\circ}C$ ,平均pH在 $8.22 \sim 8.42$ 之间。由于夏季降雨量较高,溶解氧在整个丰水期表现为先上升后下降的趋势。高锰酸盐指数、化学需氧量和氨氮都表现为先下降后上升的趋势。总磷在整个时间段的变化不大。理化因子在漪汾桥-迎泽桥(S4)和南中环桥-祥云桥(S8)处呈现多样性。

(3)太原汾河景区在丰水期总氮均超标。综合营养状态指数显示,整个丰水期汾管委对面木平台处(S2)、迎泽桥-南内环桥(S5)、长风桥-南中环桥(S7)、南中环桥-祥云桥(S8)和西岸浑水渠(S9)站点多次达到了中度富营养化水平。

(4)通过太原汾河景区浮游植物蓝藻、绿藻、硅藻、总细胞密度与环境因子的多元关系进行去趋势对应分析(DCA分析),显示藻类细胞的最大梯度值为0.272,需通过约束排序选择线性模型冗余分析(RDA),进一步确定新变量作为最好的预测响应变量分布。

(5)通过冗余分析(RDA)表明浮游植物总细胞密度与溶解氧呈显著正相关,与化学需氧量呈显著负相关。

#### 参考文献:

[1] 李然然,章光新,张蕾. 查干湖湿地浮游植物与环境因子关系的多元分析[J]. 生态学报, 2014, **34**(10): 2663-2673.

[2] 韩博平,林旭钿,李铁. 广东省大中型水库富营养化现状与防治对策研究[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[3] 王爱爱,冯佳,谢树莲. 汾河中下游浮游藻类群落特征及水质分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 915-923.

[4] Chalar G. The use of phytoplankton patterns of diversity for algal bloom management[J]. Limnologia, 2009, **39**(3): 200-208.

[5] Reynolds C S. What factors influence the species composition of

phytoplankton in lakes of different trophic status [J]. Hydrobiologia, 1998, **369-370**: 11-26.

[6] Naselli-Flores L. Phytoplankton assemblages in twenty one Sicilian reservoirs relationships between species composition and environmental factors[J]. Hydrobiologia, 2000, **424**(1): 1-11.

[7] Whitton B A. Changing approaches to monitoring during the period of the 'Use of Algae for Monitoring Rivers' symposia[J]. Hydrobiologia, 2012, **695**(1): 7-16.

[8] 李静,崔凯,卢文轩,等. 春季和夏季巢湖浮游生物群落组成及其动态分析[J]. 水生生物学报, 2015, **39**(1): 185-192.

[9] Xu Y Y, Cai Q H, Ye L, et al. Asynchrony of spring phytoplankton response to temperature driver within a spatial heterogeneity bay of Three-Gorges Reservoir, China [J]. Limnologia, 2011, **41**(3): 174-180.

[10] 常乐,张秀红. 汾河临汾城区浮游植物群落特征[J]. 农业与技术, 2012, **32**(2): 52-56.

[11] 章宗涉,黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.

[12] Haande S, Rohrlack T, Semyalo R P, et al. Phytoplankton dynamics and cyanobacterial dominance in Murchison Bay of Lake Victoria (Uganda) in relation to environmental conditions[J]. Limnologia, 2011, **41**(1): 20-29.

[13] 姜雪芹,禹娜,毛开云,等. 冬季上海市城区河道中浮游植物群落结构及水质的生物评价[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2009, (2): 78-87, 140.

[14] 时红,孙新忠,范建华. 水质分析方法与技术[M]. 北京: 地震出版社, 2001.

[15] 中国孢子植物志编辑委员会. 中国淡水藻志(第一~第十五卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1988-2012.

[16] 李艳利,李艳粉,徐宗学. 影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 94-106.

[17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[18] 陈建良,胡明明,周怀东,等. 洱海蓝藻水华暴发期浮游植物群落变化及影响因素[J]. 水生生物学报, 2015, **39**(1): 24-28.

[19] Lopes M R M, de M Bicudo C E, Ferragut M C. Short term spatial and temporal variation of phytoplankton in a shallow tropical oligotrophic reservoir, southeast Brazil [J]. Hydrobiologia, 2005, **542**(1): 235-247.

[20] Jiang Z B, Chen J F, Zhou F, et al. Controlling factors of summer phytoplankton community in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and adjacent East China Sea shelf [J]. Continental Shelf Research, 2015, **101**: 71-84.

[21] 李英明,潘军峰. 山西河流[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

[22] 成芳,凌去非,徐海军,等. 太湖水质现状与主要污染物分析[J]. 上海海洋大学学报, 2010, **19**(1): 105-110.

[23] 李然然. 查干湖湿地水环境演变及生态风险评估[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.

[24] Borcard D, Legendre P, Drapeau P. Partialling out the spatial

- component of ecological variation [J]. *Ecology*, 1992, **73**(3): 1045-1055.
- [25] 李红, 马燕武, 祁峰, 等. 博斯腾湖浮游植物群落结构特征及其影响因子分析[J]. *水生生物学报*, 2014, **38**(5): 921-928.
- [26] Wang F, Wang X, Zhao Y, *et al.* Temporal variations of NDVI and correlations between NDVI and hydro-climatological variables at Lake Baiyangdian, China [J]. *International Journal of Biometeorology* 2014, **58**(7): 1531-1543.
- [27] 江志兵, 陈全震, 寿鹿, 等. 象山港人工鱼礁区的网采浮游植物群落组成及其与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2012, **32**(18): 5813-5824.
- [28] 侯伟, 黄成, 江启明, 等. 粤北三座典型中型水库富营养化与浮游植物群落特征[J]. *生态环境学报*, 2011, **20**(5): 913-919.
- [29] 闵文武, 王培培, 李丽娟, 等. 渭河流域浮游植物功能群与环境因子的关系[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(9): 1397-1406.
- [30] Temponeras M, Kristiansen J, Moustaka-Gouni M. Seasonal variation in phytoplankton composition and physical-chemical features of the shallow Lake Doirani, Macedonia, Greece [J]. *Hydrobiologia*, 2000, **424**(1-3): 109-122.
- [31] 邱小琮, 赵红雪, 孙晓雪. 宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(7): 2265-2271.
- [32] 卢亚芳, 黄永春, 黄世玉, 等. 厦门杏林湾水库浮游植物密度与生态因子的灰关联分析[J]. *台湾海峡*, 2002, **21**(2): 209-216.
- [33] Dupuis A P, Hann B J. Warm spring and summer water temperatures in small eutrophic lakes of the Canadian prairies; potential implications for phytoplankton and zooplankton [J]. *Journal of Plankton Research*, 2009, **31**(5): 489-502.
- [34] 陈向, 刘静, 何琦, 等. 东江惠州河流段人工基质附着硅藻群落季节性动态[J]. *湖泊科学*, 2012, **24**(5): 723-731.
- [35] Eisner L B, Gann J C, Ladd C, *et al.* Late summer/early fall phytoplankton biomass (chlorophylla) in the eastern Bering Sea: Spatial and temporal variations and factors affecting chlorophyll a concentrations [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2015, doi:10.1016/j.dsr2.2015.07.012.
- [36] 赵海超, 王圣瑞, 赵明, 等. 洱海水体溶解氧及其与环境因子的关系[J]. *环境科学*, 2011, **32**(7): 1952-1959.
- [37] O'Boyle S, Wilkes R, McDermott G, *et al.* Factors affecting the accumulation of phytoplankton biomass in Irish estuaries and near shore coastal waters: A conceptual model [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, **155**: 75-88.
- [38] 杨福霞, 简慧敏, 田琳, 等. 大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2014, **35**(10): 3748-3754.
- [39] 杨晓英, 罗兴章, 郑正, 等. 平水期和丰水期殷村港污染物浓度时空变异比较研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3051-3056.
- [40] 杨亮杰, 余鹏飞, 竺俊全, 等. 浙江横山水库浮游植物群落结构特征及其影响因子[J]. *应用生态学报*, 2014, **25**(2): 569-576.
- [41] 苟婷, 马千里, 许振成, 等. 贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 946-954.
- [42] Lehman P W. The influence of climate on phytoplankton community biomass in San Francisco Bay Estuary [J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, **45**(3): 580-590.
- [43] 吴述园, 葛继稳, 苗文杰, 等. 三峡库区古夫河着生藻类叶绿素 a 的时空分布特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2013, **33**(21): 7023-7034.

## CONTENTS

Chemical Characteristics of Particulate Matters and Trajectory Influence on Air Quality in Shanghai During the Heavy Haze Episode in December, 2013 .....	ZHOU Min, QIAO Li-ping, ZHU Shu-hui, <i>et al.</i> (1179)
Analysis of Single Particle Aging and Mixing State at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer .....	HUANG Zi-long, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (1188)
Investigation of Aerosol Mixed State and CCN Activity in Nanjing .....	ZHU Lin, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1199)
Characteristics of Number Concentration Size Distributions of Aerosols Under Different Weather Processes in Beijing .....	SU Jie, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (1208)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of PM <sub>2.5</sub> in Chongqing Urban Areas .....	LIU Yong-lin, SUN Qi-min, ZHONG Ming-yang, <i>et al.</i> (1219)
Comparison of Monitoring Methods of Organic Carbon and Element Carbon in Atmospheric Fine Particles .....	PANG Bo, JI Dong-sheng, LIU Zi-rui, <i>et al.</i> (1230)
Residue Characteristics of Perfluorinated Compounds in the Atmosphere of Shenzhen .....	HE Peng-fei, ZHANG Hong, LI Jing, <i>et al.</i> (1240)
Monitoring Atmospheric CO <sub>2</sub> and δ <sup>13</sup> C(CO <sub>2</sub> ) Background Levels at Shangdianzi Station in Beijing, China .....	XIA Ling-jun, ZHOU Ling-xi, LIU Li-xin, <i>et al.</i> (1248)
Concentration and Size Distribution of Bioaerosols in Indoor Environment of University Dormitory During the Plum Rain Period .....	LIU Ting, LI Lu, ZHANG Jia-quan, <i>et al.</i> (1256)
Air Microbial Pollution and Health Risk of Urban Black Odorous Water .....	LIU Jian-fu, CHEN Jing-xiong, GU Shi-you (1264)
Particle Size Distribution, Seasonal Variation Characteristics and Human Exposure Assessment of Heavy Metals in Typical Settled Dust from Beijing .....	CAO Zhi-guo, YU Gang, LÜ Xiang-ying, <i>et al.</i> (1272)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dust of Xi'an City, China .....	WANG Li, WANG Li-jun, SHI Xing-min, <i>et al.</i> (1279)
Toluene, Benzene and Acetone Adsorption by Activated Carbon Coated with PDMS .....	LIU Han-bing, JIANG Xin, WANG Xin, <i>et al.</i> (1287)
Distribution Characteristics, Sources and Pollution Assessment of Trace Elements in Surficial Sediments of the Coastal Wetlands, Northeastern Hainan Island .....	ZHANG Wei-kun, GAN Hua-yang, BI Xiang-yang, <i>et al.</i> (1295)
Heavy Metals Accumulation in the Caofeidian Reclamation Soils: Indicated by Soil Magnetic Susceptibility .....	XUE Yong, ZHOU Qian, LI Yuan, <i>et al.</i> (1306)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan .....	LI Guang, ZHANG Xin-ping, XU You-peng, <i>et al.</i> (1313)
GIS Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province .....	LI Ying-jie, ZHANG Lie-yu, WU Yi-wen, <i>et al.</i> (1321)
Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City .....	LIU Xiao-hong, SI You-bin, GUO Zi-wei, <i>et al.</i> (1330)
Seasonal Stratification and the Response of Water Quality of a Temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China .....	ZENG Ming-zheng, HUANG Ting-lin, QIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (1337)
Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River, Xinjiang .....	WEI Hong, WU Jin-kui, SHEN Yong-ping, <i>et al.</i> (1345)
Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan .....	FENG Jia, GUO Yu-ning, WANG Fei, <i>et al.</i> (1353)
Distribution Characteristics of Nitrifiers and Denitrifiers in the River Sediments of Tongling City .....	CHENG Jian-hua, DOU Zhi-yong, SUN Qing-ye (1362)
Contribution of Base Flow to Total Nitrogen Loading in Subtropical Agricultural Catchments .....	MA Qiu-mei, LI Wei, WANG Yi, <i>et al.</i> (1371)
Characteristics and Transport Patterns of Ammonia, Nitrites, Nitrates and Inorganic Nitrogen Flux at Epikarst Springs and a Subterranean Stream in Nanshan, Chongqing .....	ZHANG Yuan-zhu, HE Qiu-fang, JIANG Yong-jun, <i>et al.</i> (1379)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China .....	QIU Zu-kai, HU Xiao-zhen, YAO Cheng, <i>et al.</i> (1389)
Effect of <i>Elodea natallii</i> -immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay .....	HAN Hua-yang, LI Zheng-kui, WANG Hao, <i>et al.</i> (1397)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Different Forms of Phosphorus in Three Sorts of Rivers around Lake Taihu .....	GAO Yong-xia, SONG Yu-zhi, YU Jiahua, <i>et al.</i> (1404)
Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae .....	CHEN Jun, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1413)
Impacts of Sediment Disturbance on the Distribution of Suspended Particle Size and Phosphorus .....	GUO Jun-rui, LI Da-peng, LIU Yan-jian (1422)
Effect of Zirconium Modified Kaolin-Based Cap on Migration and Transformation of Phosphorus Between Sediment and Overlying Water .....	ZHANG Zhe, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1427)
Toxicity of 4-Chlorophenol Solution Under Electrochemical Reduction-oxidation Process .....	WANG Yan, SHI Qin, WANG Hui, <i>et al.</i> (1437)
Removal and Recycle of Phosphor from Water Using Magnetic Core/Shell Structured Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @SiO <sub>2</sub> Nanoparticles Functionalized with Hydrated Aluminum Oxide .....	LAI Li, XIE Qiang, FANG Wen-kan, <i>et al.</i> (1444)
Occurrence and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Typical Wastewater Treatment Plants in Beijing .....	QIAO Meng, QI Wei-xiao, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (1451)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants .....	NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, <i>et al.</i> (1460)
Feasibility and Economic Analysis of Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine .....	LI Xiang, ZHU Liang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (1467)
Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor .....	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (1472)
Performance Recoverability of Denitrifying Granular Sludge Under the Stressing Effect of Nanoscale Zero-valent Iron .....	WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1478)
Effect of Low-concentration Ciprofloxacin on the Nitrification and Nitrifying Microorganisms of Biofilms in Biological Aerated Filter .....	HE Shi, GU Chao-chao, WEI Xin, <i>et al.</i> (1485)
Optimization Study on the Nitrogen and Phosphorus Removal of Modified Two-sludge System Under the Condition of Low Carbon Source .....	YANG Wei-qiang, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (1492)
Effects of Short-time Conservation Tillage Managements on Greenhouse Gases Emissions from Soybean-Winter Wheat Rotation System .....	XIE Yan, CHEN Xi, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1499)
Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppe .....	CUI Hai, ZHANG Ya-hong (1507)
Correlation Among Soil Organic Carbon, Soil Inorganic Carbon and the Environmental Factors in a Typical Oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin .....	GONG Lu, ZHU Mei-ling, LIU Zeng-yuan, <i>et al.</i> (1516)
Effects of Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Speciation of Pb in Purple Soil and Soil Solution .....	LIU Jiang, JIANG Tao, HUANG Rong, <i>et al.</i> (1523)
Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils with <i>Iris pseudacorus</i> L. and the Metabolic Analysis in Roots .....	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1531)
Oxidation Process of Dissolvable Sulfide by Manganite and Its Influencing Factors .....	LUO Yao, LI Shan, TAN Wen-feng, <i>et al.</i> (1539)
Screening and Enzyme Production Characteristics of Thermophilic Cellulase-producing Strains .....	FENG Hong-mei, QIN Yong-sheng, LI Xiao-fan, <i>et al.</i> (1546)
Development of Determination Method of Fluoroquinolone Antibiotics in Sludge Based on Solid Phase Extraction and HPLC-Fluorescence Detection Analysis .....	DAI Xiao-hu, XUE Yong-gang, LIU Hua-jie, <i>et al.</i> (1553)
Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Feedlot Livestock .....	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Zi-ying, <i>et al.</i> (1562)
Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of <i>Vicia-faba</i> and Garlic .....	WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, <i>et al.</i> (1568)
Environmental Behaviors and Ecotoxicology of the Emerging Contaminants Polyhalogenated Carbazoles .....	LIN Kun-de, CHEN Yan-qiu, YUAN Dong-xing (1576)
Classification of Priority Area for Soil Environmental Protection Around Water Sources; Method Proposed and Case Demonstration .....	LI Lei, WANG Tie-yu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (1584)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年4月15日 第37卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 4 Apr. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行