

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化 祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)

基于重庆本地碳成分谱的 PM_{2.5} 碳组分来源分析 张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)

重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究 徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)

基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析 王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)

基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价 刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)

典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析 徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)

火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究 王占山, 潘丽波 (853)

国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性 楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)

稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇 刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)

河口湿地近地面大气 CO₂ 浓度日变化和季节变化 张林海, 仝川, 曾从盛 (879)

三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量 李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)

施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH₄、N₂O 和 NH₃ 排放特征 万合锋, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)

干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响 张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)

长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究 吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)

汾河中下游浮游藻类群落特征及水质分析 王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)

基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究 陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)

三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征 李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)

黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析 于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)

太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素 揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)

黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系 董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)

纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究 杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)

铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究 唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)

磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响 张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)

预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响 赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)

陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行 付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)

冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征 黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)

烷基多苷促进污泥水解产酸的研究 陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)

高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响 操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)

兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价 李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)

珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价 郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)

海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价 李飞, 徐敏 (1035)

再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险 吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)

瓦埠湖流域庄集镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估 李如忠, 邹阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)

三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评估 张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)

基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价 陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)

干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究 薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)

缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入 孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)

三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响 韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)

黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例 师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)

天然林土壤有机碳及矿化特征研究 杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)

不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化 张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)

硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响 杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)

6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应 山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)

基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究 张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)

人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究 吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)

农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)

中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态 宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)

苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析 周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)

UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响 刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)

Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响 张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)

对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究 宋彩霞, 邓新平, 厉阆, 肖伟 (1176)

克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用 刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)

铅元素人为循环环境释放物形态分析 梁静, 毛建素 (1191)

污染排放与环境质量关系模型构建与应用 李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)

微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展 闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)

《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)

汾河中下游浮游藻类群落特征及水质分析

王爱爱, 冯佳, 谢树莲*

(山西大学生命科学学院, 太原 030006)

摘要: 为了解汾河中下游的浮游藻类分布并评价其水质状况, 选取 18 个采样点对浮游藻类进行了调查采集、种类鉴定和数据分析。结果表明: ①汾河中下游浮游藻类植物共计有 298 种, 隶属 8 门 96 属, 种类较多的依次是硅藻门、绿藻门和蓝藻门, 分别有 27 属 127 种, 41 属 104 种和 20 属 45 种, 裸藻门、隐藻门、甲藻门、金藻门和黄藻门共 8 属 22 种, 各样点丰水期的种数均高于枯水期。优势种主要有硅藻门的梅尼小环藻、尖针杆藻、隐头舟形藻、谷皮菱形藻, 绿藻门的小球藻, 蓝藻门的弱细颤藻、两栖颤藻等, 多数为 α -中污和 β -中污指示种。细胞密度以丰水期较高, 枯水期较低。②汾河中下游浮游藻类群落的 Shannon-Wiener 物种多样性指数基本介于 1~3 之间, Margalef 物种丰富度指数基本介于 0.5~2 之间, Pielou 均匀度指数介于 0.3~0.8 之间。③汾河中下游浮游藻类优势类群在丰水期, 大部分绿藻和裸藻与化学需氧量、电导率、氨氮具有较高的相关性, 蓝藻受水温和 Cr 影响较大, 硅藻分布与环境因子的关系较复杂; 在枯水期蓝藻与氨氮、总磷、化学需氧量具有较高的相关性, 绿藻和裸藻主要受溶氧和总磷的影响, 硅藻主要与总磷、溶氧、pH 和 Cd 等相关。综合分析, 汾河中下游各样点水质分别为 I 类~V 类不等, 均受到不同程度的污染, 水质总体呈富营养型, 处于中污染至重污染状态。

关键词: 浮游藻类; 群落结构; 环境因子; 水质分析; 汾河中下游

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-0915-09 DOI: 10.13227/j.hjck.2014.03.015

Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River

WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian

(School of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: To understand the distribution of phytoplankton and the water quality in the middle and lower reaches of Fenhe River, 18 sampling sites were selected for specimen collection, species identification and data analysis. The results showed that: ① There were 298 species of phytoplankton under the membership of 8 divisions and 96 genera, among which, Bacillariophyta was the dominant division, with a total of 127 species of 27 genera, followed by Chlorophyta, with 104 species of 41 genera, and Cyanophyta, with 45 species of 20 genera. Only 22 species of 8 genera belonged to Euglenophyta, Cryptophyta, Pyrrophyta, Chrysophyta and Xanthophyta. The number of species in wet season was higher than that in dry season at all sites. Dominant species included *Cyclotella meneghiniana*, *Synedra acus*, *Navicula cryptocephala*, *Nitzschia palea* of Bacillariophyta, *Chlorella vulgaris* of Chlorophyta, *Oscillatoria tenuis*, *O. amphibia* of Cyanophyta, most of which were indicator species of α - and β -mesosaprobic type. Cell density was higher in wet season and lower in dry season. ② Shannon-Wiener species diversity index ranged from 1 to 3 basically. Margalef species richness index ranged from 0.5 to 2. Pielou evenness index ranged 0.3-0.8. ③ During the wet season, most dominant species of Chlorophyta and Euglenophyta had higher correlation with chemical oxygen demand (COD), conductivity and ammonia nitrogen. The dominant species of Cyanophyta were greatly influenced by the contents of water temperature and chromium (Cr). The distribution of dominant species of Bacillariophyta was complicatedly related with environmental factors. During the dry season, there was a higher correlation between the members of Cyanophyta and ammonia nitrogen, total phosphorus, COD. The species of Chlorophyta and Euglenophyta were mainly influenced by the dissolved oxygen and total phosphorus. The bacillariophytes were mainly related with total phosphorus, dissolved oxygen, pH and cadmium (Cd). In conclusion, the water was moderately to heavily contaminated in middle and lower reaches of Fenhe River and the water quality was eutrophic.

Key words: phytoplankton; community structure; environmental factors; water quality; middle and lower reaches of Fenhe River

藻类是水生态系统的初级生产者,是整个水生生态系统物质循环和能量流动的基础^[1,2]。同时,浮游藻类具有个体小、细胞结构简单、对栖息环境变化敏感等特点,易受环境中各种因素的影响而在较短周期内发生改变,相对于其他生物类群更能及时反映水域生态系统的变化^[3,4]。因此,在水质评价中,

通过分析水体中浮游藻类的种类、数量及群落结构

收稿日期: 2013-07-25; 修订日期: 2013-09-12

基金项目: 山西省自然科学基金项目(2011011036); 山西省社会发展科技攻关项目(20130313010-4)

作者简介: 王爱爱(1987~),女,硕士研究生,主要研究方向为淡水藻类与水质监测, E-mail: 414591148@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: xiesl@sxu.edu.cn

等特征,可以分析和评价水质状况^[5,6]. 国内外许多河流、湖泊、水库都进行过大量浮游藻类的研究,并据此对其水质状况进行了分析评价^[7-9]

汾河是山西省最大的河流,也是黄河的第二大支流,全长 716 km,纵贯山西南北,流经全省 27 个县市,是全省经济和社会发展的核心区域. 同时,汾河也是山西省最大的纳污水体,年平均接纳污水量约占全省污水排放总量的 50%. 近 20 年来,汾河中下游流域内乡镇企业发展迅猛,相继建起了大批洗煤、选矿、炼焦、造纸等高污染企业,加重了汾河的污染状况^[10]. 据有关文献报道,汾河中下游的义棠、临汾和柴庄断面近 10 年来水质一直为劣 V 类^[11],临汾段和运城段水质较差,污染严重, COD、BOD₅ 和氨氮严重超标^[12,13].

曾有文献对汾河流域临汾段浮游藻类及群落特征有过初步研究,报道存在 7 门,41 属,131 种^[14]. 但迄今,对整个汾河流域中下游的浮游藻类分布及与环境因子的关系尚无全面的研究分析. 鉴于此,

笔者研究了汾河中下游藻类植物的群落结构,并结合生物指标和理化指标,综合分析了汾河中下游的水质状况,以为汾河流域及其它景观水体的治理和环境保护提供科学依据,同时也为水生态健康指标以及水生态修复评价提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 采样点的设置

根据汾河中下游自然地理情况,共设 18 个采样点(图 1),从上至下分别位于洛阳村南(S1)、汾河二坝(S2)、祁县苗家堡(S3)、汾河三坝(S4)、汾河三坝下游(S5)、孝义北桥头村(S6)、霍家堡(S7)、义棠(S8)、灵石(S9)、霍州(S10)、赵城(S11)、洪洞(S12)、临汾尧都区南芦村(S13)、襄汾三跨大桥(S14)、柴庄(S15),新绛(S16)、稷山(S17)和河津(S18).

1.2 理化指标的测定

现场测量并记录水温、流速、电导率. 按照有

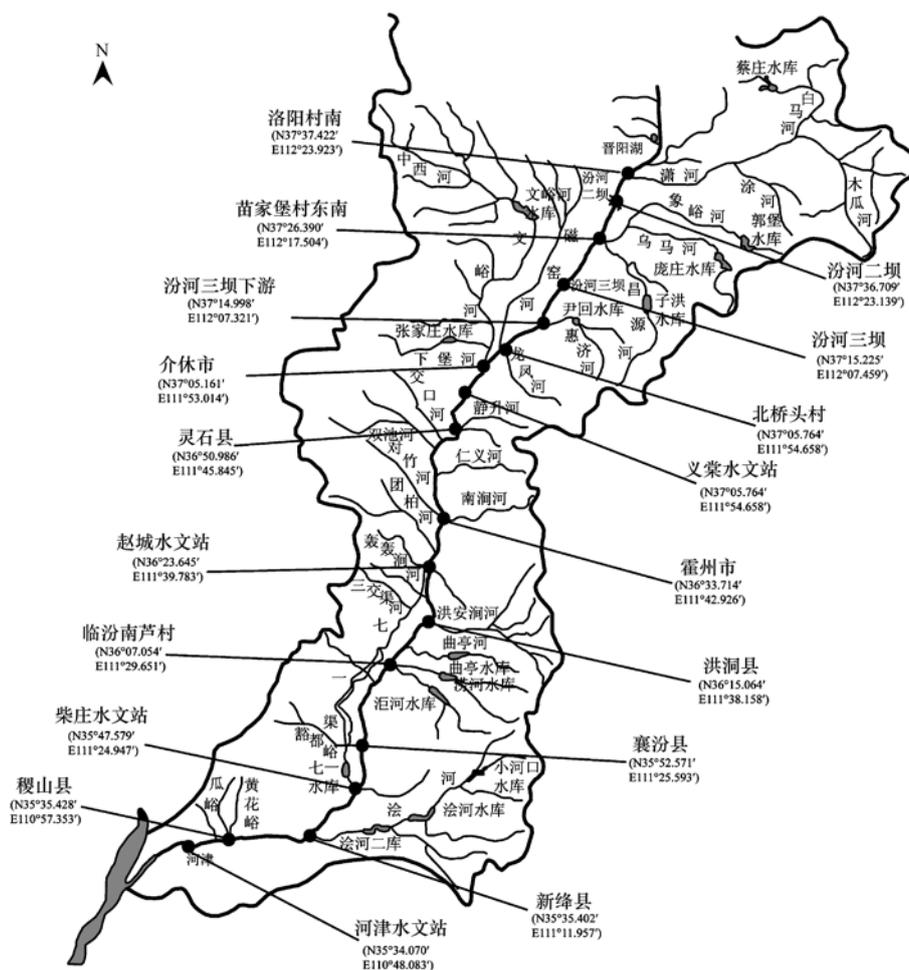


图 1 汾河中下游浮游藻类采样点示意

Fig. 1 Sampling sites of phytoplankton in the middle and lower reaches of Fenhe River

关文献中的规范方法测定总磷、氨氮、总硬度、化学需氧量、溶解氧、pH、镉、铬、锌、铅、铜^[14]。

1.3 标本的采集和鉴定

根据研究地域的自然条件,一般5~9月为丰水期,10~次年3月为枯水期。于2012年6月(丰水期)和2012年11月(枯水期)对汾河中下游进行了两次采集。

定性采集用25号浮游生物网,于水面下“∞”状拖动,每秒20~30 cm,约2 min。将浓缩于网头的水样收集于50 mL标本瓶,用4%福尔马林现场固定,以待镜检鉴定。种类鉴定依据文献[15,16]进行。

定量采集用1 L采水器于水面下采样,置于采样瓶中,加入15 mL鲁哥氏液固定,静置48 h后吸去上清液留50 mL备用。显微镜检计数时,充分摇匀,吸取0.1 mL滴入计数框内,用视野法计数,计算1 L水中浮游藻类的数量。

1.4 数据分析

对固定的浮游植物进行分类鉴定后,把每个采样点所采集到的浮游植物按不同种类准确统计个体数,并计算出每一种类的细胞密度。计算藻类多样性指数、均匀度和优势度,公式分别为:① Shannon-Wiener 物种多样性指数 $H' = - \sum (n_i/N) \ln(n_i/N)$; ② Margalef 物种丰富度指数 $D = (S-1)/\ln N$; ③ Pielou 物种均匀度指数 $J = H'/\ln S$ 。式中, N 为样品中所有种类的总细胞密度, S 为样品中种类总数, n_i 为第*i*种物种的生物密度^[17~20]。

采用 Canoco for Windows 4.5 软件对物种数据和环境数据进行典范对应分析(CCA),物种经过筛选,满足在各样点出现的频度 > 12.5% 和至少在一个样点的相对密度 $\geq 1\%$ ^[21],物种矩阵经过 $\lg(x+1)$ 转换,环境因子数据除 pH 外全部进行 $\lg(x+1)$ 转换^[22]。

2 结果与讨论

2.1 汾河中下游的理化指标

表1是汾河中下游各采样点的理化指标。从中可以看出,不同季节水温变化较大,同一季节各采样点水温变化很小。电导率在不同季节及各采样点间变化较大,从 $772 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 到超过 $4\,000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 不等。水体流速总体较慢,在 $0.5 \sim 2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间。化学需氧量(高锰酸盐指数)衡量水污染状况的重

要指标,数值越大,水体污染越严重。汾河中下游各样点化学需氧量一般在 $0.048 \sim 2.584 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,但在样点 S17 枯水期的数值特别高,达到了 $14.752 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,应该是局部污染严重所致。氨氮也是评价水体的重要指标。从表1可看出,氨氮的变化范围较大,一般在 $0.304 \sim 6.617 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,同样,在样点 S17 数值特别高,达 $59.894 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,可见该样点在枯水期确实污染严重。水体中磷含量过高,可造成藻类的过度繁殖,使河流透明度降低,水质变坏,因此总磷是水质评价中不可或缺的指标。表1显示,总磷浓度的变化范围为 $0.009 \sim 4.59 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。总硬度范围在 $2.240 \sim 6.410 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间。各样点 pH 值均高于7,水体明显偏碱性。溶氧量变化范围在 $3.40 \sim 12.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。各采样点5种重金属锌、镉、铬、铅和铜的含量大多较高。

从表1可知,各采样点多种污染物指标都以枯水期为高,丰水期相对较低,而溶氧量却是丰水期高于枯水期,原因主要是由于枯水期水源补给较少(全年70%的降雨量集中在6~9月)^[23],导致水中物质得不到稀释,浓度增加,水体几乎得不到交换,溶解氧越来越少。从数据比较可知,个别样点污染物浓度特别高,可能是由于水体周边废水的不定期排放所致。如S17(稷山),电导率、氨氮和高锰酸盐指数远高于其它样点,据走访当地居民,就是因为此前水体中有大量生活垃圾倾入,因此导致了局部污染的急剧增加。

2.2 汾河中下游浮游藻类植物的组成

2.2.1 种类组成

对汾河中下游藻类植物的鉴定结果显示,共有298种(包括种下分类单位),隶属8门96属。从图2可以看出,种类较多的依次是硅藻门、绿藻门和蓝藻门,分别有27属127种(占总种数的42.62%),41属104种(占总种数的34.90%),20属45种(占总种数的14.10%)。裸藻门、隐藻门、甲藻门、金藻门和黄藻门共8属22种(占总种数的8.38%)。

图3显示了丰水期和枯水期各样点浮游藻类种类数,可以看出各样点丰水期的藻类种类数均高于枯水期。一般情况,丰水期水温较高,水体营养更新较快,环境适宜浮游藻类生长繁殖,枯水期则反之。但同时可以看出,各样点不同季节浮游藻类种数差异程度不等,有的样点不同季节种类数相差悬殊,说明其生态系统稳定性较差。其中样点S11(赵城)的藻类种数最少,应该与其周边环境情况有关。该镇

表 1 汾河中下游水质理化指标

Table 1 Physico-chemical parameters of sampling sites in the middle and lower reaches of Fenhe River

时期	样点	水温 /°C	电导率 /μS·cm ⁻¹	流速 /m·s ⁻¹	COD /mg·L ⁻¹	总硬度 /meq·L ⁻¹	总磷 /mg·L ⁻¹	氨氮 /mg·L ⁻¹	溶氧量 /mg·L ⁻¹	pH	镉 /mg·L ⁻¹	铬 /mg·L ⁻¹	锌 /mg·L ⁻¹	铅 /mg·L ⁻¹	铜 /mg·L ⁻¹
丰水期	S1	21.6	2 835	1.0	1.232	3.030	0.549	10.126	8.90	7.30	0.002 5	0.103 5	0.107 2	0.021 2	0.002 9
	S2	19.3	1 720	0.5	2.464	2.300	0.069	10.788	6.20	7.48	0.002 5	0.019 9	0.088 3	0.005 2	0.030 8
	S3	21.6	2 440	1.5	2.352	2.780	0.389	8.581	4.80	7.28	0.004 3	0.062 3	0.189 8	0.117 4	0.038 3
	S4	17.9	1 960	0.5	1.680	2.240	0.219	12.057	7.20	7.41	0.002 9	0.213 5	0.275 9	0.167 8	0.017 1
	S5	18.5	1 849	1.5	1.324	2.414	0.109	10.733	13.0	7.57	0.001 8	0.054 6	0.049 6	0.096 8	0.014 9
	S6	20.6	1 882	1.5	1.008	2.500	0.009	7.477	12.20	7.63	0.001 8	0.055 3	0.179 4	0.069 3	0.192 8
	S7	24.7	1 939	0.5	1.904	3.600	1.129	13.492	12.50	7.83	0.000 5	0.003 7	0.063 3	0.151 7	0.005 2
	S8	21.5	2 198	1.5	2.584	3.314	0.399	9.188	9.00	7.54	0.001 2	0.099 0	0.112 6	0.062 4	0.013 0
	S9	21.2	2 113	1.5	2.016	3.294	0.469	11.284	9.00	7.58	0.001 6	0.090 7	0.077 2	0.060 1	0.015 6
	S10	24.2	1 616	2.0	1.344	2.354	0.719	4.111	5.10	7.69	0.002 1	0.003 5	0.000 1	0.080 7	0.026 0
	S11	28.1	1 994	0.5	1.640	3.060	0.229	0.304	6.32	7.70	0.000 8	0.009 6	0.023 4	0.188 4	0.021 5
	S12	28.7	1 359	0.5	0.896	2.725	0.419	0.414	7.50	7.60	0.003 0	0.041 8	0.080 5	0.053 3	0.006 7
	S13	30.3	1 890	2.0	0.672	3.260	0.019	2.180	6.30	7.54	0.003 1	0.006 4	0.005 8	0.067 0	0.009 6
	S14	26.2	1 820	1.0	1.952	2.914	0.019	7.036	6.70	7.59	0.003 7	0.000 5	0.015 7	0.067 0	0.004 5
	S15	28.5	1 916	2.0	1.344	3.215	0.389	2.731	9.80	7.31	0.004 9	0.006 4	0.102 5	0.051 0	0.008 3
	S16	30.4	1 991	0.5	1.760	3.254	0.029	4.111	6.60	7.78	0.001 2	0.064 3	0.202 2	0.041 8	0.063 5
	S17	32.3	890	2.0	1.440	2.674	0.099	5.878	6.80	7.89	0.000 7	0.010 3	0.207 4	0.023 5	0.015 9
	S18	29.3	2 173	1.5	1.696	3.076	0.159	4.773	11.30	7.88	0.004 8	0.020 8	0.118 0	0.141 0	0.006 3
平均		24.7	1 921	1.2	1.628	2.889	0.301	6.959	8.29	7.59	0.002 4	0.048 1	0.105 5	0.071 4	0.027 4
枯水期	S1	3.0	1 360	0.5	0.416	6.410	3.180	12.956	5.90	7.40	0.003 3	0.053 7	0.215 5	0.038 8	0.084 9
	S2	8.0	1 284	1.0	0.320	3.910	4.590	15.428	6.00	7.60	0.002 5	0.013 4	0.048 4	0.043 4	0.024 4
	S3	5.0	1 452	1.5	0.688	4.630	1.060	14.367	5.70	7.55	0.001 7	0.046 2	0.492 1	0.089 2	0.123 2
	S4	4.5	1 442	1.5	0.944	3.870	2.430	16.617	5.90	7.50	0.000 2	0.023 8	0.095 4	0.008 9	0.077 3
	S5	3.2	1 473	1.0	1.600	3.000	2.870	12.275	5.00	7.72	0.000 1	0.026 8	0.066 3	0.112 1	0.090 0
	S6	3.9	1 223	1.0	1.568	3.880	7.150	14.240	4.60	7.62	0.001 3	0.056 7	0.504 8	0.093 7	0.099 0
	S7	4.9	1 890	0.5	1.240	3.890	1.600	16.506	5.60	8.11	0.001 3	0.083 5	0.360 1	0.089 2	0.100 3
	S8	5.0	1 601	0.5	0.048	4.180	2.160	17.156	5.00	8.35	0.000 2	0.064 1	0.179 4	0.043 4	0.102 2
	S9	8.0	1 551	2.5	1.056	4.190	1.240	13.749	6.20	8.00	0.001 2	0.085 0	0.225 8	0.045 5	0.108 5
	S10	9.8	1 129	2.0	0.208	3.550	1.870	9.312	5.60	7.78	0.001 3	0.073 1	0.529 1	0.020 5	0.091 3
	S11	10.7	778	0.5	1.976	4.110	4.480	8.012	6.00	7.89	0.001 6	0.126 8	1.474 7	0.290 5	0.287 6
	S12	11.9	1 253	0.5	0.816	3.500	2.960	5.698	5.00	7.46	0.000 8	0.107 4	0.268 3	0.054 7	0.109 2
	S13	8.0	1 568	2.0	0.256	4.190	0.130	6.966	6.00	7.85	0.001 3	0.091 0	0.015 0	0.112 0	0.101 5
	S14	8.5	1 530	0.5	0.256	3.890	3.560	10.183	5.80	7.95	0.000 8	0.070 1	0.492 1	0.084 6	0.055 0
	S15	8.6	772	2.0	0.464	4.040	3.730	7.251	5.60	7.75	0.002 6	0.067 1	0.374 3	0.075 4	0.072 2
	S16	9.1	1 705	2.5	0.800	4.720	0.250	9.834	5.90	7.74	0.001 6	0.053 7	0.773 0	0.052 6	0.096 4
	S17	12.2	>4 000	1.0	14.752	4.140	1.000	59.894	3.40	8.37	0.001 1	0.095 5	0.749 5	0.029 7	0.113 0
	S18	8.6	1 589	1.5	1.344	4.630	0.940	12.893	5.60	8.01	0.002 4	0.080 6	0.595 7	0.048 0	0.088 8
平均		7.4	1 388	1.3	1.597	4.150	2.510	14.630	5.49	7.81	0.001 4	0.067 8	0.414 4	0.074 0	0.101 4
年平均		16.1	1 896	1.24	1.613	3.520	1.406	10.794	6.89	7.70	0.001 9	0.057 9	0.260 0	0.072 7	0.064 4

周边有铁厂、洗煤厂等小企业,污水往往直接排放,导致该段河水水体发黑,污染严重,藻类种类较少。

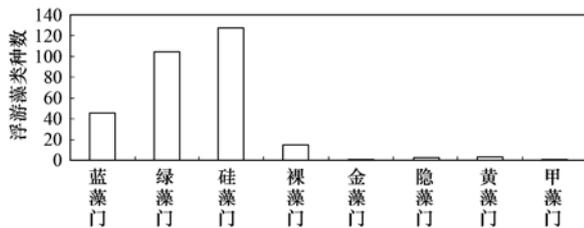


图 2 汾河中下游浮游藻类种类组成

Fig. 2 Phytoplankton composition in the middle and lower reaches of Fenhe River

从图 4 可以看出,各门藻类植物种类数在不同采样点所占百分比也存在着一定差异。虽然都以硅藻门、绿藻门和蓝藻门种类较多,但硅藻门比例较高的往往是污染较轻的河段,而蓝藻和绿藻门种类比例较高的则是污染较重的河段。另外指示较清洁水体的金藻门等出现的频率不高,可见汾河中下游流域整体水质情况堪忧。

2.2.2 优势种

表 2 显示了汾河中下游各采样点不同季节浮游藻类的优势种类。从中可知,优势种主要有硅藻门

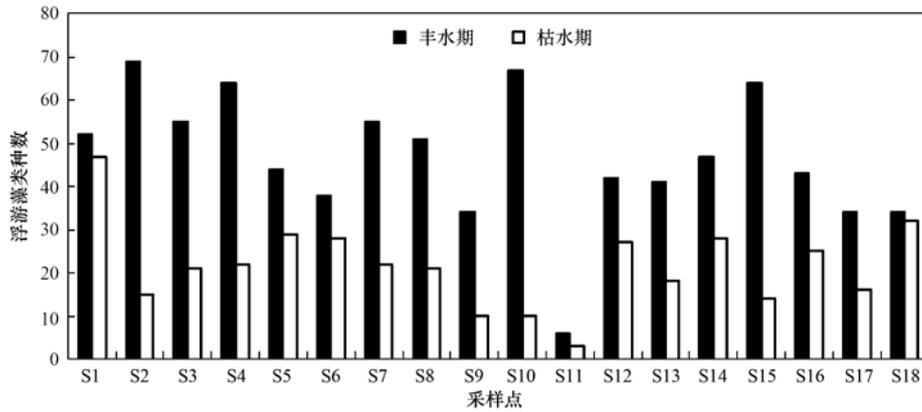


图3 汾河中下游各采样点浮游藻类种类数

Fig. 3 Phytoplankton number of sampling sites in the middle and lower reaches of Fenhe River

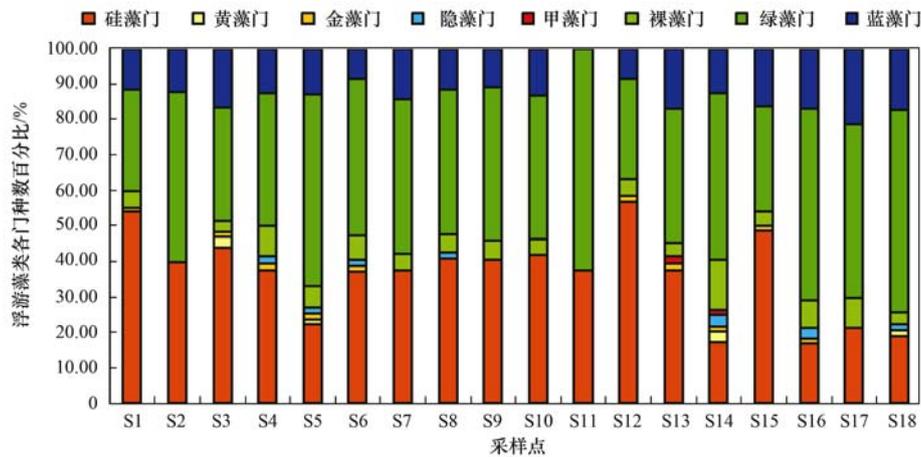


图4 汾河中下游各采样点浮游藻类组成比例

Fig. 4 Phytoplankton percentage of different divisions in the middle and lower reaches of Fenhe River

的梅尼小环藻 (*Cyclotella meneghiniana*)、尖针杆藻 (*Synedra acus*)、隐头舟形藻 (*Navicula cryptocephala*)、谷皮菱形藻 (*Nitzschia palea*)、绿藻门的小球藻 (*Chlorella vulgaris*)、蓝藻门的弱细颤藻 (*Oscillatoria tenuis*)、两栖颤藻 (*Oscillatoria amphibia*) 等,这些种类在丰水期和枯水期均有分布。有的种类仅在丰水期呈现优势,如硅藻门的钝脆杆藻 (*Fragilaria capucina*)、系带舟形藻 (*Navicula cincta*)、普通肋缝藻 (*Frustulia vulgaris*) 和绿藻门的四尾栅藻 (*Scenedesmus quadricauda*) 等,有的种类则仅在枯水期呈现优势,如蓝藻门的小席藻 (*Phormidium tenue*)、窝形席藻 (*Phormidium faveolarum*) 和硅藻门的橄榄形异极藻 (*Gomphonema olivaceum*) 等。

从表2可以看出,各采样点丰水期优势种多为 α -中污、 β -中污指示种,只有少数为 α -寡污指示种,枯水期优势种则全部为 α -中污、 β -中污指示种。根据文献[24],汾河中下游的水质应介于 α -中污之间

至 β -中污。

2.2.3 细胞密度

藻类的细胞密度是水生生态系统功能和水质评价的重要参数之一,在一定程度上也能反映水体的污染程度^[25]。从图5可以看出,同一采样点浮游植物的细胞密度随季节不同差别较大,总体上丰水期较高,平均 3.93×10^8 个 $\cdot L^{-1}$,枯水期较低,平均 2.99×10^8 个 $\cdot L^{-1}$ 。就各样点来看,差别也较大,汾河二坝(S2)和襄汾(S14)段分别在枯水期和丰水期细胞密度最大,赵城段(S11)细胞密度在丰水期和枯水期都最低。由图6还可看出,汾河中下游各采样点均以硅藻门、绿藻门和蓝藻门细胞密度较大,其它门类细胞密度都很低。一般认为浮游藻类细胞密度 $< 30 \times 10^4$ 个 $\cdot mL^{-1}$ 时水体为贫营养型, $30 \times 10^4 \sim 100 \times 10^4$ 个 $\cdot mL^{-1}$ 之间为中营养, $> 100 \times 10^4$ 个 $\cdot mL^{-1}$ 为富营养型^[26],据此汾河中下游水质总体近富营养型。

表 2 汾河中下游各采样点浮游藻类优势种¹⁾

Table 2 Phytoplankton dominant species of sampling sites in the middle and lower reaches of Fenhe River

时间	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18
丰水期	D ₂																	
	D ₇	D ₁₂	D ₇	D ₂₆	D ₈	D ₇		D ₇		D ₆	D ₇	D ₇	D ₇	D ₅	D ₇			D ₇
	D ₁₃	D ₂₄	D ₁₅	D ₂₉	D ₂₉	D ₁₀	D ₂₂	D ₁₁	D ₇	D ₁₆	D ₁₉	D ₁₇	D ₁₈	D ₆	D ₁₂	D ₃₀	D ₆	D ₁₆
	D ₂₉	D ₂₆	D ₂₄		D ₃₃			D ₁₅				D ₂₁	D ₃₁	D ₂₀				D ₃₃
枯水期	D ₆											D ₄		D ₇				
	D ₁₄	D ₃	D ₇	D ₇	D ₅	D ₂₈	D ₂₇	D ₇	D ₇	D ₄		D ₁₄	D ₃	D ₂₄	D ₂₅	D ₁	D ₇	D ₂₄
		D ₇		D ₂₃				D ₃₂		D ₂₄		D ₂₄	D ₉	D ₂₉		D ₁₉		
	D ₂₂																	

1) D₁: 细小隐球藻(*Aphanocapsa elachista*) α-中污带、β-中污; D₂: 微小平裂藻(*Merismopedia tenuissima*) α-中污; D₃: 小席藻(*Phormidium tenue*) β-中污; D₄: 窝形席藻(*Phormidium faveolarum*) α-中污; D₅: 两栖颤藻(*Oscillatoria amphibia*) α-中污; D₆: 弱细颤藻(*Oscillatoria tenuis*) α-中污; D₇: 梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*) α-中污; D₈: 卵形双眉藻(*Amphora ovalis*) β-中污; D₉: 扁圆卵形藻(*Cocconeis placentula*) α-寡污; D₁₀: 偏肿桥弯藻(*Cymbella ventricosa*) α-寡污; D₁₁: 普通等片藻(*Diatoma vulgare*) α-中污、β-中污; D₁₂: 钝脆杆藻(*Fragilaria capucina*) α-寡污、β-中污; D₁₃: 缢缩异极藻(*Gomphonema constrictum*) β-中污; D₁₄: 橄榄形异极藻(*Gomphonema olivaceum*) α-寡污、α-中污、和 β-中污; D₁₅: 变异直链藻(*Melosira varians*) β-中污; D₁₆: 系带舟形藻(*Navicula cincta*) α-中污; β-中污; D₁₇: 放射舟形行藻放射变种(*Navicula radiosa. var*) β-中污; D₁₈: 喙头舟形藻(*Navicula rhynchocephala*) β-中污; D₁₉: 隐头舟形藻(*Navicula. cryptocephala*) α-中污、β-中污; D₂₀: 泉生菱形藻(*Nitzschia fonticola*) α-寡污; D₂₁: 线形菱形藻(*Nitzschia linearis*) α-寡污; D₂₂: 谷皮菱形藻(*Nitzschia palea*) α-中污; D₂₃: 卵形双菱藻卵形变种(*Surirella ovate. var*) β-中污; D₂₄: 尖针杆藻(*Synedra acus*) β-中污; D₂₅: 肘状针杆藻双头变种(*Synedra ulna. var. biceps*) β-中污; D₂₆: 普通肋缝藻(*Frustulia. vulgaris*) β-中污; D₂₇: 绿色裸藻(*Euglena viridis*) α-中污; D₂₈: 宽扁裸藻(*Phacus pleuronectes*) α-中污、β-中污; D₂₉: 小球藻(*Chlorella vulgaris*) β-中污; D₃₀: 小空星藻(*Coelastrum microporum*) β-中污; D₃₁: 美丽网球藻(*Dictyosphaerium pulchellum*) β-中污; D₃₂: 实球藻(*Pandorina morum*) β-中污; D₃₃: 四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*) β-中污

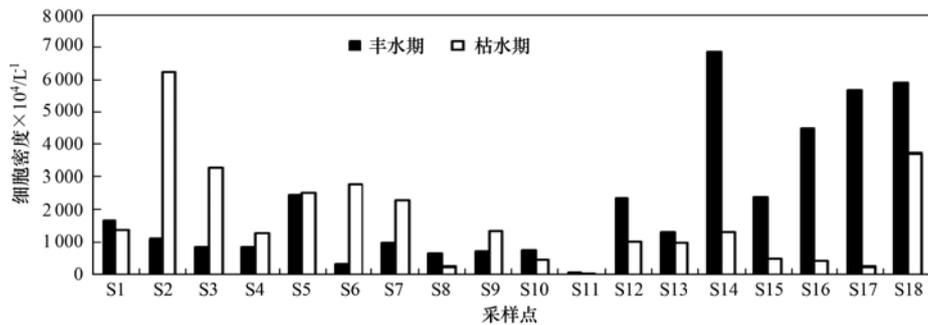


图 5 汾河中下游各采样点浮游藻类细胞密度

Fig. 5 Phytoplankton cell densities of sampling sites in the middle and lower reaches of Fenhe River

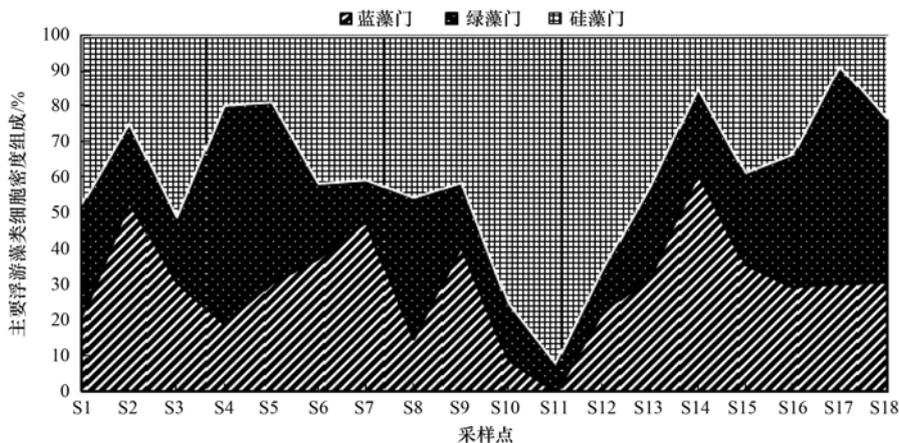


图 6 汾河中下游浮游藻类细胞密度组成比例

Fig. 6 Phytoplankton percentage of cell densities in the middle and lower reaches of Fenhe River

2.3 汾河中下游浮游藻类群落结构特征

生物多样性是群落的主要特征之一,群落内物种愈丰富则生物多样性越大.一般而言,水体发生富营养化会使不适应高营养的藻类消亡,从而导致生物多样性的降低.同时,浮游藻类生物多样性指数也是常用的水质评价指标,可反映水质的优劣^[27,28].

Shannon-Wiener 物种多样性指数多用于反映群落结构的复杂程度,数值越大,群落结构越复杂,对环境的反馈功能越强,越稳定,0 为水质严重污染,0~1 为重污染,1~3 为中污,大于 3 为清洁水体^[29].从图 7 可以看出,汾河中下游各样点 Shannon-Wiener 指数基本介于 1~3 之间,丰水期平均 2.46,枯水期平均 2.08,水质基本属于中污.

Margalef 物种丰富度指数反映植物群落结构与环境之间的关系,理论上,浮游植物种类愈多,个体数量分布愈均匀,所得的 Margalef 多样性指数就愈大,指示环境愈稳定.从图 7 可以看出,汾河中下游各样点的 Margalef 指数基本介于 0.5~2 之间,丰水期平均为 1.40,枯水期平均为 0.81,水质基本属于中污至重污染,个别样点特别是赵城段(S11),

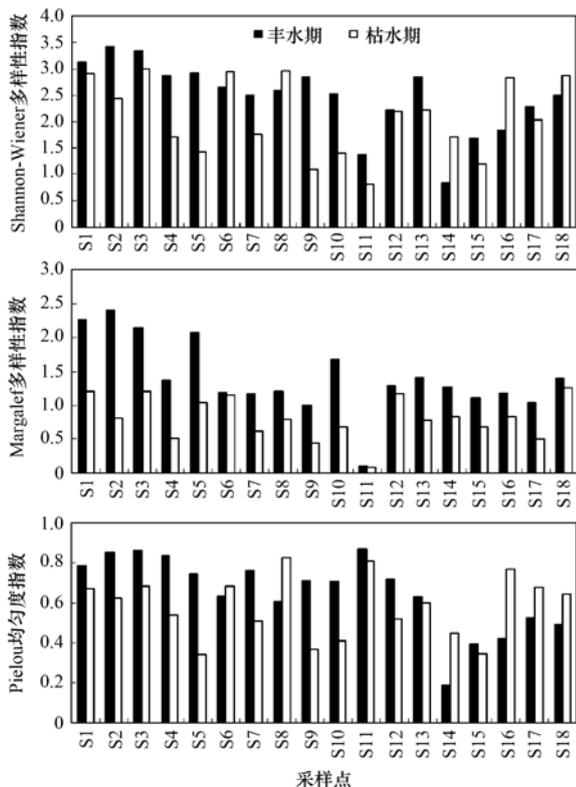


图 7 汾河中下游各样点浮游藻类 Shannon-Wiener 物种多样性指数、Margalef 物种丰富度指数和 Pielou 均匀度指数
Fig. 7 Phytoplankton Shannon-Wiener index, species richness and evenness in the middle and lower reaches of Fenhe River

Margalef 指数小于 0.1,水质明显严重污染.

Pielou 均匀度指数指一个群落或生境中全部物种个体数目的分配状况,反映各物种个体数目分配的均匀程度,均匀度值越大,则多样性越高.从图 7 可看出,汾河中下游各采样点的 Pielou 指数介于 0.3~0.8 之间,样点之间差异较大,反映出各样点小环境的水质差异.由于各样点所处的位置及环境不同,工矿企业废水废气的排放、居民生活污水的倾入以及农药残留物等都可能造成水质的恶化.

2.4 汾河中下游浮游藻类群落与环境因子的典范对应分析(CCA)

典范对应分析(CCA)可反映浮游植物群落组成与环境因子之间的对应关系^[30,31].根据汾河中下游浮游藻类出现频度和相对密度,选取 31 种用于 CCA 分析,其中丰水期选取 27 种,枯水期选取 17 种,代码见表 3.图 8 是丰水期和枯水期的分析结果排序.对于环境因子来讲,第一、第二排序轴间的相关系数都为 0,说明排序结果是可信^[32].

丰水期第一排序轴与电导率、化学需氧量、总磷、氨氮、溶氧、Cr、Cu、Zn 正相关,与水温、流速等负相关.第二排序轴与水温、流速、总磷、pH、金属 Cu 正相关,与化学需氧量、氨氮等负相关.从浮游植物种类的空间分布来看,大部分绿藻和裸藻分布在第二排序轴的下方,与化学需氧量、电导率、氨氮具有较高的相关性.蓝藻主要分布在第二排序轴的左上方和右下方,受水温和 Cr 影响较大.硅藻在排序轴上分布较分散,与环境因子的关系较复杂.

枯水期第一排序轴与水温、电导率、化学需氧量、氨氮、pH、总硬度、Cr、Zn、Cu 正相关,与总磷、流速、溶氧等负相关.第二排序轴与 pH、溶氧、电导率、Cu、Cr、Pb 正相关,与氨氮、总磷等负相关.从浮游植物种类的空间分布来看,蓝藻主要分布在第二排序轴的下方,与氨氮、总磷、化学需氧量具有较高的相关性.绿藻和裸藻分布在第一排序轴的左方,主要受溶氧和总磷的影响.硅藻主要分布在第一排序轴的左边和第二排序轴的上方,主要与总磷、溶氧、pH 和 Cd 等相关.

从汾河中下游浮游藻类与理化因子分析结果可以看出,浮游藻类群落在不同季节很不稳定,在丰水期水量较多,有些化学指标的增加可能会促进浮游藻类的生长,而在枯水期水量减少,这些指标急剧升高,超出浮游藻类的耐受范围,反而抑制了浮游藻类的生长,如化学需氧量、Zn 和 Cu 等.对于那些与藻类群落相关性较高的理化指标应更多关注.

表 3 汾河中下游 CCA 分析浮游藻类代码

Table 3 Phytoplankton codes for CCA in the middle and lower reaches of Fenhe River

代码		种类	代码		种类
丰水期	枯水期		丰水期	枯水期	
C1	C1	小席藻 <i>Phormidium tenue</i>	B10	B8	谷皮菱形藻 <i>Nitzschia palea</i>
	C2	窝形席藻 <i>Phormidium faveolarum</i>	B11		池生菱形藻 <i>Nitzschia stagnorum</i>
C2	C3	两栖颤藻 <i>Oscillatoria amphibia</i>	E1	E1	绿色裸藻 <i>Euglena viridis</i>
C3	C4	弱细颤藻 <i>Oscillatoria tenuis</i>	Ch1	Ch1	小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>
	C5	大型鞘丝藻 <i>Lyngbya major</i>	Ch2		椭圆小球藻 <i>Chlorella ellipsoidea</i>
	C6	钙生念珠藻 <i>Nostoc calcicola</i>	Ch3		针形纤维藻 <i>Ankistrodesmus acicularis</i>
B1		颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>	Ch4		肥壮蹄形藻 <i>Kirchneriella obesa</i>
		变异直链藻 <i>Melosira varians</i>	Ch5		二形栅藻 <i>Scenedesmus dimorphus</i>
B2	B1	梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>	Ch6	Ch2	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i>
B3	B2	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>	Ch7		小空星藻 <i>Coelastrum microporum</i>
B4	B3	肘状杆藻 <i>Synedra ulna</i>	Ch8		二角盘星藻 <i>Pediastrum duplex</i>
B5	B4	钝脆杆藻 <i>Fragilaria capucina</i>	Ch9		四刺顶棘藻 <i>Chodatella quadriseta</i>
B6	B5	隐头舟形藻 <i>Navicula cryptocephala</i>	Ch10		四足十字藻 <i>Crucigenia tetrapedia</i>
B7	B6	系带舟形藻 <i>Navicula cincta</i>	Ch11		湖生卵囊藻 <i>Oocystis lacustis</i>
B8	B7	喙头舟形藻 <i>Navicula rhynchocephala</i>	Ch12		纤细月牙藻 <i>Selenastrum gracile</i>
B9		小型舟形藻 <i>Navicula minuscula</i>			

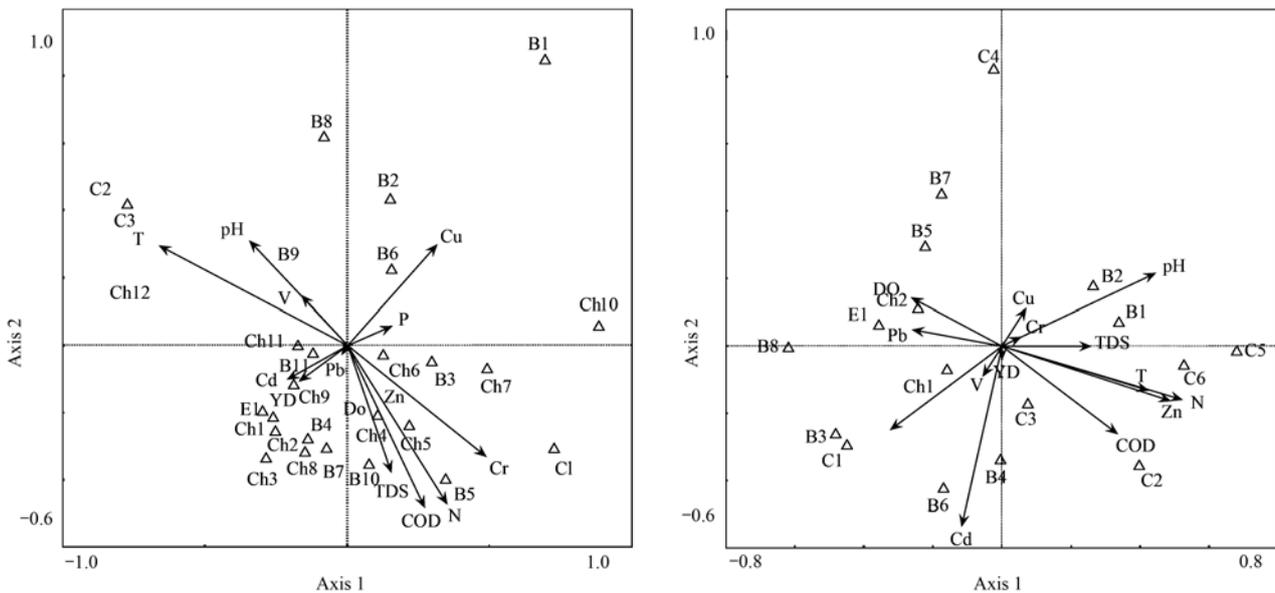


图 8 汾河中下游丰水期和枯水期浮游藻类与环境因子的 CCA 排序图

Fig. 8 CCA biplot of phytoplankton and environmental variables in wet and dry season in the middle and lower reaches of Fenhe River

3 结论

(1) 根据国家地面水环境质量标准 (GB 3838-2002), 从化学需氧量、总磷、氨氮、溶氧量和重金属镉、铬、锌、铅、铜的含量标准判断, 汾河中下游各样点水质分别为 I 类 ~ V 类不等. 总的来看, 汾河中下游各采样点均受到不同程度的污染, 与上游相比水质更差.

(2) 汾河中下浮游藻类植物共计有 298 种, 隶属 8 门 96 属. 种类较多的依次是硅藻门、绿藻门和

蓝藻门, 分别有 27 属 127 种, 41 属 104 种, 20 属 45 种. 裸藻门、隐藻门、甲藻门、金藻门和黄藻门共 8 属 22 种. 各样点丰水期的种数均高于枯水期. 优势种主要有硅藻门的梅尼小环藻、尖针杆藻、隐头舟形藻、谷皮菱形藻, 绿藻门的小球藻, 蓝藻门的弱细颤藻、两栖颤藻等, 多数为 α -中污和 β -中污指示种. 细胞密度以丰水期较高, 枯水期较低, 水质总体呈富营养型.

(3) 汾河中下游浮游藻类群落的 Shannon-Wieaver 物种多样性指数基本介于 1 ~ 3 之间,

Margalef 物种丰富度指数基本介于 0.5 ~ 2 之间, Pielou 均匀度指数介于 0.3 ~ 0.8 之间. 综合分析, 汾河中下游水体处于中污染至重污染状态.

(4) 根据典范对应分析(CCA)的结果, 汾河中下游浮游藻类优势类群在丰水期, 大部分绿藻和裸藻与化学需氧量、电导率、氨氮具有较高的相关性, 蓝藻受水温和 Cr 影响较大, 硅藻分布与环境因子的关系较复杂; 在枯水期蓝藻与氨氮、总磷、化学需氧量具有较高的相关性, 绿藻和裸藻主要受溶氧和总磷的影响, 硅藻主要与总磷、溶氧、pH 和 Cd 等相关.

参考文献:

- [1] 韩博平, 林旭旭, 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.
- [2] 林秋奇, 胡初, 段舜山, 等. 广东省大中型供水水库营养现状及浮游生物的响应[J]. 生态学报, 2003, 23(6): 1101-1108.
- [3] 刘静, 杜桂森, 刘晓端, 等. 密云水库的浮游生物群落[J]. 西北植物学报, 2004, 24(8): 1485-1488.
- [4] Pérez J R, Loureiro S, Menezes S, *et al.* Assessment of water quality in the Alqueva Reservoir (Portugal) using bioassays [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2010, 17(3): 688-702.
- [5] Yang Y S, Wang L. A review of modelling tools for implementation of the EU water framework directive in handling diffuse water pollution [J]. Water Resources Management, 2010, 24(9): 1819-1843.
- [6] 况琪军, 马沛明, 胡征宇, 等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(2): 87-91.
- [7] 张永生, 郑丙辉, 王坤, 等. 三峡库区大宁河枯水期藻细胞的时空分布[J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2166-2175.
- [8] 张永生, 郑丙辉, 姜霞, 等. 三峡库区大宁河藻细胞昼夜垂直迁移研究[J]. 环境科学, 2012, 33(11): 3787-3796.
- [9] 李哲, 郭劲松, 方芳, 等. 三峡小江回水区蓝藻季节变化及其与主要环境因素的相互关系[J]. 环境科学, 2010, 31(2): 301-309.
- [10] 邢肖鹏, 王少璇, 冯民权. 汾河中下游复流前后水环境容量及排污控制量研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(5): 217-223.
- [11] 梁新阳. 汾河 10 年水质污染分析与治理保护建议[J]. 山西水利科技, 2009, (1): 76-78.
- [12] 邢肖鹏, 薛鹏松, 冯民权. 汾河运城段河流水质评价[J]. 水土保持通报, 2011, 31(2): 142-145.
- [13] 杨波龙, 闫子煜, 史华锋. 汾河下游运城段污染状况及防治对策[J]. 山西水利, 2011, 27(7): 12-14.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 中国孢子植物志编辑委员会. 中国淡水藻志[M]. (第一至第十五卷). 北京: 科学出版社, 1988-2012.
- [17] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [18] Andersen R A. Diversity of eukaryotic algae [J]. Biodiversity & Conservation, 1992, 1(4): 267-292.
- [19] 尚玉昌. 普通生态学[M]. (第二版). 北京: 北京大学出版社, 2002.
- [20] Broady P A. Diversity, distribution and dispersal of Antarctic terrestrial algae [J]. Biodiversity & Conservation, 1996, 5(11): 1307-1335.
- [21] Lopes M R M, Bicudo C E M, 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.
- [22] 徐金森, 郑天凌, 郭清华, 等. 两种海洋细菌对赤潮藻的细胞生物量的影响研究[J]. 海洋科学, 2002, 26(12): 57-60, 67.
- [23] 李英明, 潘军峰. 山西河流[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [24] 沈韞芬, 章宗涉, 龚循矩, 等. 微生物监测新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
- [25] 王亚尼, 周序协, 张桂蓉, 等. 大茶湖浮游藻类调查与水质初步评价[J]. 华中农业大学学报, 2013, 32(3): 118-123.
- [26] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. 中国环境监测, 2002, 18(5): 47-49.
- [27] 张洁, 计勇, 麻夏, 等. 抚河干流浮游藻类群落调查及水质评价[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(2): 306-312.
- [28] 胡远东, 吴妍, 魏欣瑶, 等. 大庆市主要湖泊夏季藻类植物多样性及水质评价[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(4): 64-67.
- [29] 章晶晶. 乌溪港河群落结构及环境相关性研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2011.
- [30] 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[J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2355-2364.
- [31] 张元明, 陈亚宁, 张小雷. 塔里木河下游植物群落分布格局及其环境解释[J]. 地理学报, 2004, 59(6): 903-910.
- [32] 郝占庆, 郭水良, 叶吉. 长白山北坡木本植物分布与环境关系的典范对应分析[J]. 植物生态学报, 2003, 27(6): 733-741.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron: Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangnu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Xiong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2014年3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行