

doi: 10.7541/2016.166

## 太原汾河蓄水区2014年丰水期叶绿素的时空变化及 环境因子相关性分析

吕虹瑞<sup>1</sup> 吕俊平<sup>1</sup> 刘琪<sup>1</sup> 谢树莲<sup>1</sup> 冯佳<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:** 应用主成分分析(PCA)和典范对应分析(CCA)方法, 对太原汾河蓄水区的环境因子和浮游植物之间的关系进行分析和探讨。结果表明, 太原汾河蓄水区水体叶绿素含量具有一定的时空差异性, 变化范围为5.83—181.00 mg/m<sup>3</sup>, 各采样点7月的叶绿素含量整体较高, S8河段(南中环桥-祥云桥)具有最大值181.00 mg/m<sup>3</sup>, 而S1河段(柴村桥下)平均含量仅10.60 mg/m<sup>3</sup>。叶绿素含量与高锰酸盐指数、化学需氧量、氨氮、总磷、氮磷比及pH相关性显著。PCA分析表明浮游植物生物量、有机物质、氮磷营养盐、水文气象状况以及水体光合作用强度都是影响汾河蓄水区水环境的因素, 其中叶绿素、高锰酸盐指数、化学需氧量、总磷的影响更为显著。CCA结果表明蓝藻门、绿藻门、硅藻门植物的空间分布差异小, 但相对多度值存在一定的差异, 各样点之间以及环境因子的相关性存在不同程度的差异。

**关键词:** 太原汾河蓄水区; 叶绿素; 环境因子; 相关性; 主成分分析; 典范对应分析

**中图分类号:** X171, X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2016)06-1278-09

汾河(东经110°30′—113°32′, 北纬35°20′—39°00′)是黄河的第二大支流, 也是山西的母亲河, 流经忻州、太原、吕梁、晋中、临汾、运城等6市29县(区)。在太原市, 汾河穿城而过, 将市区一分为二。由于工业污染等原因, 汾河太原段曾断流30多年, 河道被居民开辟成菜地, 垃圾遍地, 杂草丛生。如今, 经过长期治理, 重新流淌的汾河水体和绵延的湿地公园, 成为城市的一道景观。太原汾河蓄水区始建于1998年10月, 北起柴村桥, 南至祥云桥下游500 m, 全长约20 km<sup>[1]</sup>, 汾河水域流经太原面积约为56 km<sup>2</sup>, 两岸滩涂和沼泽地面积256.4 km<sup>2</sup>, 盐碱地面积528 km<sup>2</sup>, 湿地面积约占全省湿地总面积的1/6<sup>[2]</sup>。它是集休闲、度假、观光旅游为一体的大型公园, 也是太原市目前规模最大的公共绿地游乐场。

浮游植物是水环境中的初级生产者和食物链的基础环节<sup>[3]</sup>。在河流生态系统中, 浮游植物群落结构的变化和水生态环境的关系密切相关<sup>[4]</sup>, 其组成和分布对环境变化具有指示作用<sup>[5]</sup>。叶绿素是植

物进行光合作用的主要元素, 广泛存在于绿色植物中, 是衡量水体富营养化的重要指标<sup>[6]</sup>, 同时也是浮游植物生物量测定的重要指标<sup>[7, 8]</sup>。因此, 研究叶绿素与水环境理化因子之间的相关关系对描述水体营养状况和研究河流生境具有重要意义。

数量分类与排序是当前揭示植物群落与环境因子之间相关关系的重要手段之一<sup>[9]</sup>。本文应用主成分分析(PCA)和典范对应分析(CCA)方法, 通过叶绿素和浮游植物生物量表征, 不同采样点浮游植物与水环境理化因子之间的关系, 从而了解不同时期汾河流域的生态特征, 为汾河流域的水环境评价提供依据, 为保护汾河水质, 实现水资源的可持续利用提供一定的理论基础。

### 1 材料与方法

#### 1.1 研究地点及采样点设置

本研究选取的地点为太原汾河蓄水区, 沿河段

收稿日期: 2015-10-10; 修订日期: 2016-03-10

**基金项目:** 山西省科技攻关项目-社会发展项目(20130313010-4); 山西省科技基础条件平台建设项目(2015091004-0102)资助 [Supported by Social Development Foundation of Shanxi (No. 20130313010-4); Foundation of Platform Construction Project of Infrastructure for Science and Technology of Shanxi (2015091004-0102)]

**作者简介:** 吕虹瑞(1992—), 女, 山西省太原人; 在读硕士; 主要从事淡水藻类方面的研究。E-mail: 649892330@qq.com

**通信作者:** 冯佳, E-mail: fengji@sxu.edu.cn

自北向南共设置8个采样点, 分别是柴村桥下(入水)(S1)、汾管委对面木平台处(S2)、胜利桥—漪汾桥(1<sup>#</sup>蓄水区)(S3)、漪汾桥—迎泽桥(2<sup>#</sup>蓄水区)(S4)、迎泽桥—南内环桥(3<sup>#</sup>蓄水区)(S5)、南内环桥—长风桥(4<sup>#</sup>蓄水区)(S6)、长风桥—南中环桥(5<sup>#</sup>蓄水区)(S7)、南中环桥—祥云桥(6<sup>#</sup>蓄水区)(S8)(图 1)。

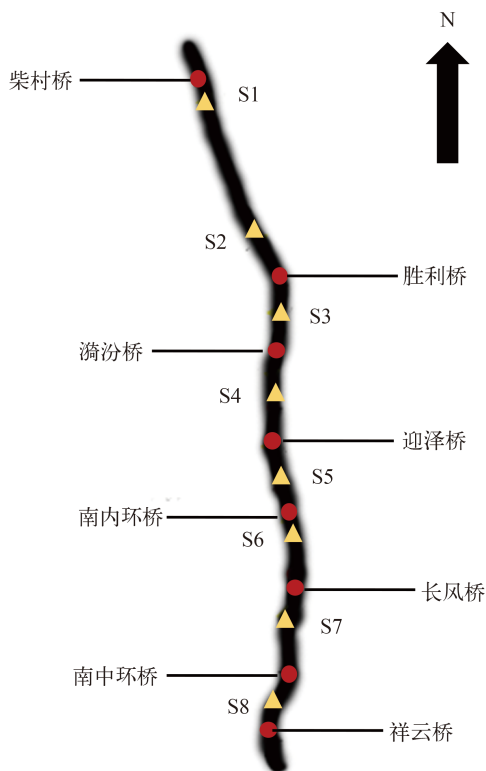


图 1 太原汾河蓄水区采样点示意图

Fig. 1 The sample sites of Taiyuan Fenhe water reserve area

## 1.2 样品的采集和环境理化指标的测定

2014年6月至9月丰水期, 每周对各采样点进行一次浮游的样品采集。使用1 L采水器于水面采样, 置于采样瓶中, 加入15 mL鲁哥氏碘液(Lugol's solution)固定, 使细胞核着色, 易于观察, 静置48h后吸去上清液留30 mL备检, 在显微镜下使用藻类植物计数框对优势类群进行鉴定和计数<sup>[10, 11]</sup>; 各样点水体环境指标, 包括叶绿素(Chl.)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、化学需氧量(COD<sub>Cr</sub>)、水温(WT)、气温(Tair)、pH、溶解氧(DO)、总氮(TN)、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、总磷(TP)采用太原市环保局环境监测中心提供的数据; N/P比应用SPSS 18.0软件计算得到。

## 1.3 数据分析

分别应用OriginPro 8.5软件分析叶绿素含量的时空变化, SPSS 18.0软件分析叶绿素与水体环境指标的相关性, 并应用CurveExpert 1.4软件将部分相关性较强的环境因子与叶绿素含量进行线性拟合。

主成分分析(PCA)是将多个变量通过线性变换以选出较少个数重要变量的一种多元统计分析方法, 彼此之间相互独立, 又能综合反映原来多个指标的大部分信息<sup>[12]</sup>。典范对应分析(CCA)是研究浮游植物群落与环境因子间复杂关系的有利工具<sup>[13]</sup>, 可以为水质综合评价、水资源的永续利用、制定相应保护和恢复措施提供基础资料和科学依据。应用PAST软件<sup>[14]</sup>中的PCA和CCA分析方法对各个样点、优势类群及环境因子进行综合排序分析。

## 2 结果

### 2.1 太原汾河蓄水区丰水期水体环境因子特征

在2014年丰水期, 太原汾河蓄水区水体呈碱性, pH变化范围为7.5—9.0, 水温变化范围为17.3—28.2℃, 气温变化范围为14.6—30.1℃, 高锰酸盐指数均值为5.9 mg/L, 化学需氧量均值为25.1 mg/L, 溶解氧变化范围为2.4—9.5 mg/L, 氨氮、总磷的均值分别为0.7和0.1 mg/L, 总氮含量均值为2.1 mg/L。

### 2.2 叶绿素含量的时空变化

在丰水期, 汾河太原蓄水区各采样点的叶绿素含量具有一定的时空差异性。如图 2显示各样点, 叶绿素的总体变化范围为5.83—181.00 mg/m<sup>3</sup>, 总体均值为48.72 mg/m<sup>3</sup>。S1(柴村桥下入水口)的叶绿素含量持续偏低, 且变化范围很小。叶绿素含量的最高值出现在S8(南中环桥—祥云桥)处。此外, 样点S2、S3、S5、S7、S8的叶绿素平均含量均大于总体均值。

### 2.3 叶绿素含量与水体环境因子的相关性研究

综合汾河蓄水区各个采样点的叶绿素含量, 分析与其他环境因子的相关性(表 1), 结果显示叶绿素含量与高锰酸盐指数、化学需氧量、氨氮及总磷呈极显著正相关( $P < 0.01$ ), 表明随着水体中有机物含量及部分营养盐的增加, 浮游植物的生物量也大大增加; 叶绿素与氮磷比呈极显著负相关( $P < 0.01$ ); 叶绿素与pH呈显著正相关( $P < 0.05$ ); 叶绿素与水温、气温、溶解氧、总氮也有一定的相关性, 但不显著( $P > 0.05$ )。

叶绿素与高锰酸盐指数及化学需氧量的线性回归关系如图 3A、B, 表明随着河水中浮游植物的大量繁殖, 光合作用不断增强合成大量有机物, 从而使高锰酸盐指数和化学需氧量也增大。叶绿素与总磷及氮磷比的线性回归关系如图 3C、D, 表明在一定范围内, 水体中磷含量的上升, 及氮磷比值的下降, 有利于浮游植物的生长。

### 2.4 太原汾河蓄水区丰水期PCA分析

应用PCA对太原汾河蓄水区环境因子进行分

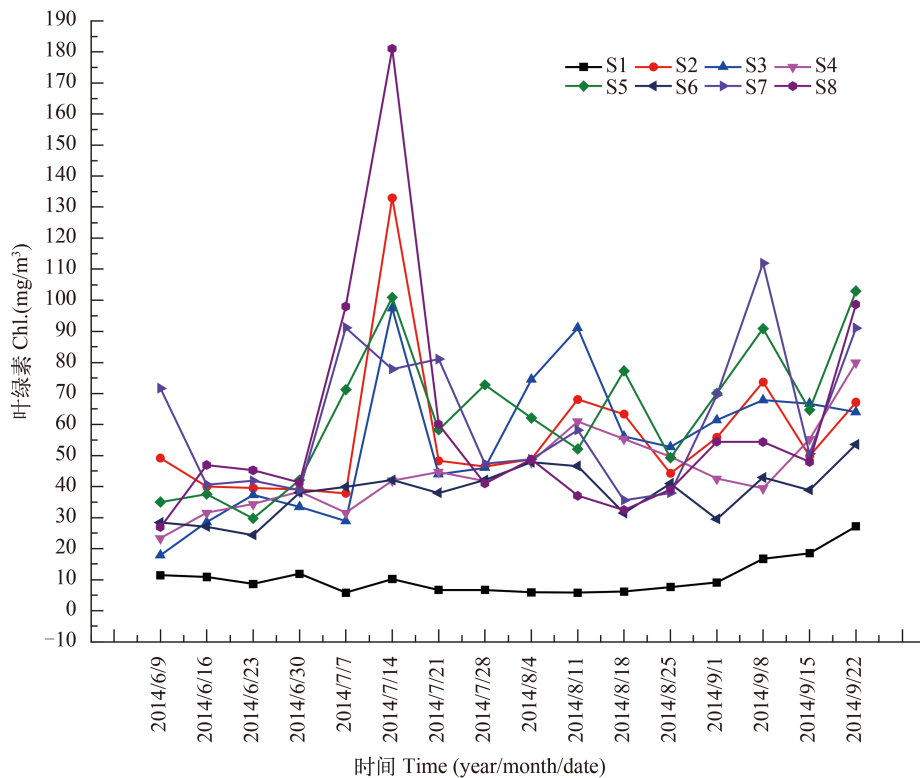


图2 太原汾河蓄水區叶绿素含量时空分布

Fig. 2 Temporal and spatial distribution of Chlorophyll concentration in Taiyuan Fenhe water reserve area

表1 叶绿素含量与水体环境因子的相关关系

Tab. 1 Correlations between Chlorophyll and other environmental factors

	环境因子Environmental factors									
	高锰酸盐指数 COD <sub>Mn</sub>	化学需氧量 COD <sub>Cr</sub>	水温 WT	气温 T <sub>air</sub>	pH	溶解氧 DO	总氮 TN	氨氮 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	总磷 TP	氮磷比 N/P
相关性Correlation	0.735**	0.709**	0.070	0.042	0.180	0.134	0.102	0.307**	0.540**	-0.557**
显著性 Significance	0.000	0.000	0.432	0.642	0.042	0.133	0.251	0.000	0.000	0.000
N	128	128	128	128	128	128	128	128	128	128

注: \*. 在0.05水平(双侧)上显著相关; \*\*. 在0.01水平(双侧)上显著相关

Note: “\*” and “\*\*” denoted that significant differences [ $P < 0.05$ ] and [ $P < 0.01$ ] were determined

析(表2), 每月分别提取前两个主成分, 其解释的方差累积分别为89.453%、73.908%、77.666%和76.430%。

丰水期各月第一主成分的解释率均大于45%, 且PC1与叶绿素、高锰酸盐指数、化学需氧量、总磷、氮磷比均具有绝对值较大的相关系数, 反映出汾河浮游植物生物量、有机物质以及部分营养盐的特征。6月和7月PC2与pH有绝对值较大的相关系数, 8月PC2与水温 and 气温有绝对值较大的相关系数, 9月PC2与pH、溶解氧、总氮、氨氮有绝对值较大的相关系数, 反应出汾河的水文气象状况、水体光合作用特征以及部分营养盐的特征。结果表明, 浮游植物生物量、有机物质、氮磷营养

盐、水文气象状况以及水体光合作用强度都是影响汾河景区水环境的因素, 而叶绿素、高锰酸盐指数、化学需氧量、总磷的影响更为突出。

从图4可以看出, 丰水期各月S1河段均与其他采样点的距离较远, 表明S1(柴村桥下)(入水)与其他样点的水质差异较大; 叶绿素、化学需氧量、高锰酸盐指数之间正相关性很强, 而与氮磷比负相关性显著; 总氮和氨氮有较强的正相关性, 而与溶解氧有较强的负相关性。6月的PCA排序显示气温、水温、叶绿素、高锰酸盐指数和化学需氧量在S5、S6、S7、S8样点大于其平均值, 总磷、氨氮和总氮在S2、S7、S8样点大于其平均值。7月的PCA排序显示叶绿素、高锰酸盐指数、化学需氧

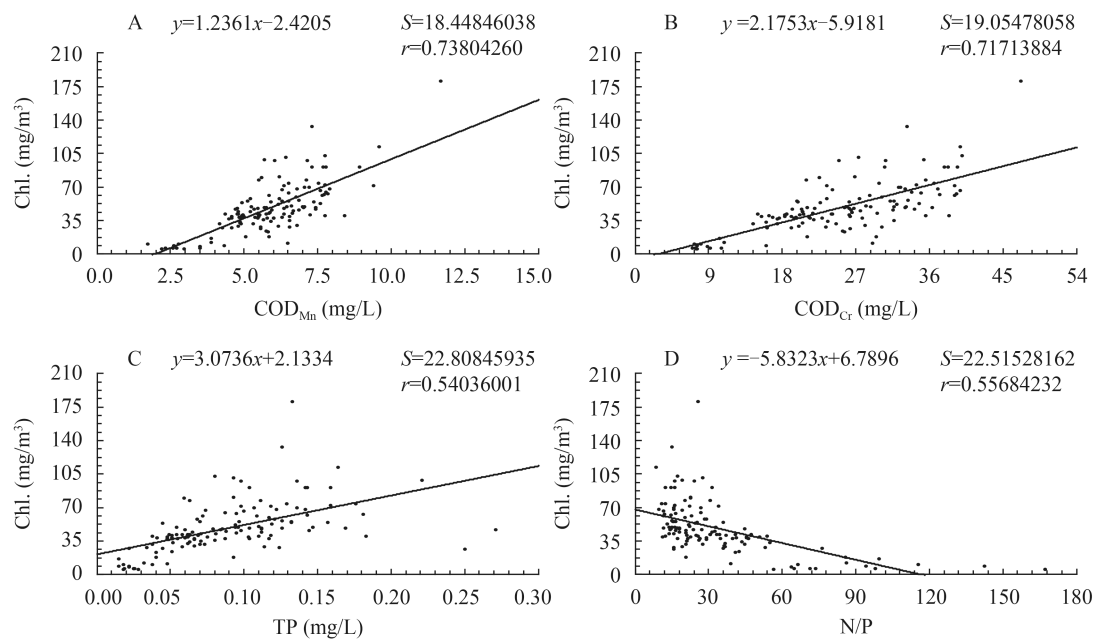


图3 叶绿素含量与高锰酸盐指数、化学需氧量、总磷、氮磷比的相关关系  
Fig. 3 Correlations among Chlorophyll, COD<sub>Mn</sub>, COD<sub>Cr</sub>, TP and N/P

表2 太原汾河蓄水区丰水期环境因子的主成分分析

Tab. 2 Principal component analysis (PCA) of the environmental factors of the Taiyuan Fenhe water reserve area in flooding season

	6月 June		7月 July		8月 August		9月 September	
	PC1	PC2	PC1	PC2	PC1	PC2	PC1	PC2
Eigenvalue	7.009	2.830	6.573	1.557	6.340	2.203	5.225	3.183
% of variance	63.722	25.731	59.751	14.157	57.639	20.028	47.496	28.934
cumulative %	63.722	89.453	59.751	73.908	57.639	77.666	47.496	76.430
叶绿素 Chl.	0.882	0.295	0.974	-0.064	0.981	0.098	0.933	-0.249
高锰酸盐指数 COD <sub>Mn</sub>	0.930	0.264	0.982	-0.141	0.992	-0.011	0.893	-0.291
化学需氧量 COD <sub>Cr</sub>	0.938	0.243	0.970	-0.196	0.993	-0.067	0.847	-0.362
水温 WT	0.802	0.435	0.741	0.175	0.034	0.983	0.780	0.476
气温 Tair	0.762	0.599	0.698	0.450	-0.025	0.985	0.546	0.092
pH	-0.065	0.885	-0.260	0.436	0.360	0.305	0.315	-0.797
溶解氧 DO	-0.716	0.573	0.259	0.847	-0.726	0.135	-0.287	-0.520
总氮 TN	0.700	-0.659	0.715	0.175	0.447	-0.103	0.356	0.866
氨氮 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.820	-0.511	0.719	0.361	0.936	-0.012	0.468	0.848
总磷 TP	0.862	-0.458	0.909	-0.304	0.930	-0.241	0.928	0.166
氮磷比 N/P	-0.916	-0.221	-0.834	0.319	-0.897	-0.269	-0.738	0.517

量、总磷、总氮、氨氮、气温、水温在S3、S5、S7、S8样点大于其平均值。8月的PCA排序显示,叶绿素、高锰酸盐指数、化学需氧量、氨氮、总氮、总磷在S2、S3、S4、S5样点大于其平均值,气温和水温在S4、S5、S6、S7、S8样点的值较大,溶解氧和氮磷比在S1、S6、S7、S8样点有较大值。9月的PCA排序显示叶绿素、高锰酸盐指数和化学需氧量在S3、S4、S5、S7、S8样点有较大值,总氮和氨氮在S7、S8样点有较大值,溶解氧在S2、

S3、S4、S6样点有较大值,氮磷比在S1、S2、S6样点有较大值。

2.5 太原汾河蓄水区丰水期的CCA分析

从图5中可以看出,丰水期各采样点硅藻植物、绿藻植物较蓝藻植物的相对多度值低很多,蓝藻、绿藻、硅藻之间的相对距离基本一致,反映了它们的空间分布差异小。7月和8月S1与其他采样点差异较大,其余月份各采样点情况差异小,表明各个采样点3种浮游植物类群相对多度差异不大。而各

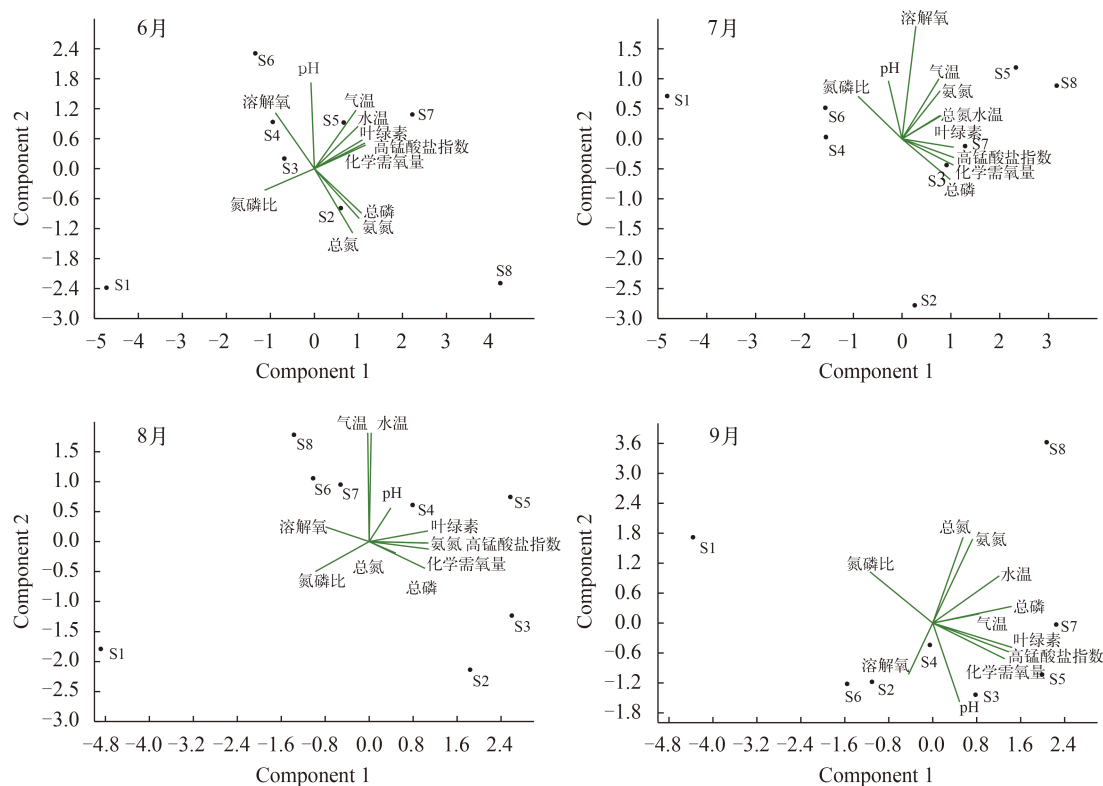


图4 太原汾河蓄水期丰水期的PCA排序图

Fig. 4 PCA ordination chart of the physical and chemical factors of the Taiyuan Fenhe water reserve area in flooding season

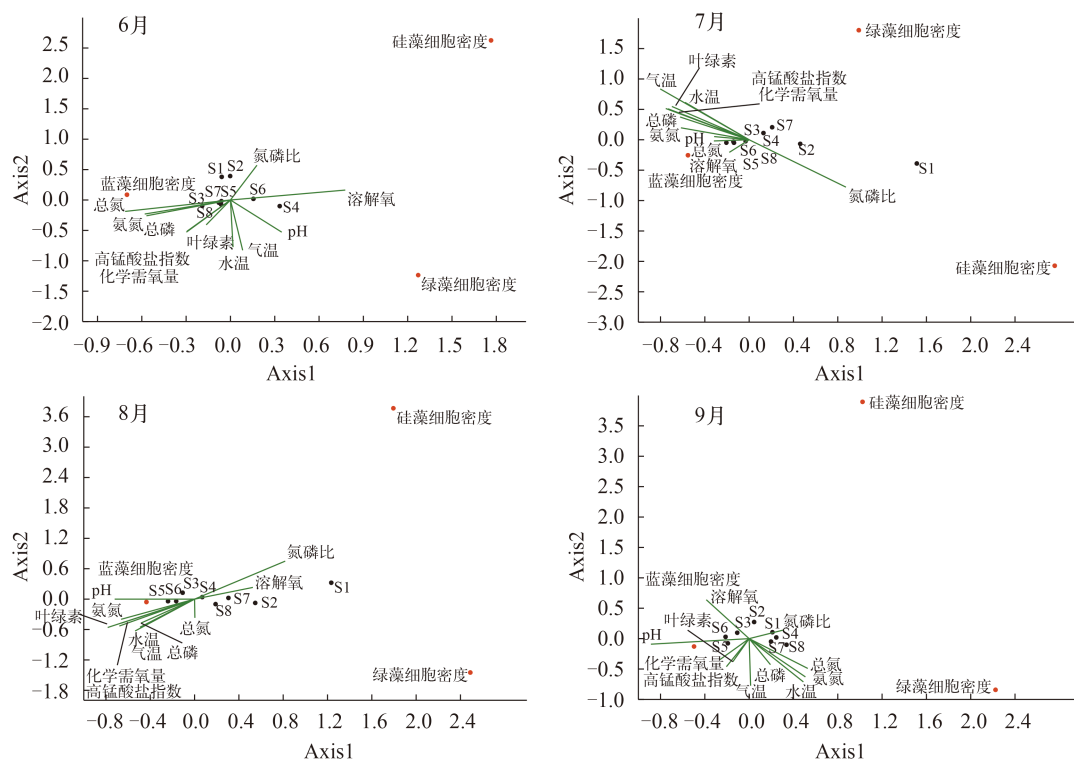


图5 太原汾河蓄水期丰水期浮游植物细胞密度与环境因子典范对应分析(CCA)排序图

Fig. 5 CCA ordination chart of phytoplankton cell density and the environmental factors of the Taiyuan Fenhe water reserve area in flooding season

环境因子之间的关系同PCA排序结果基本一致。

### 3 讨论

#### 3.1 太原汾河蓄水区丰水期水质特征

参照《地表水环境质量标准基本项目标准限值(GB/T3838-2002)》<sup>[15]</sup>, 2014年丰水期期间, 太原汾河蓄水区水体呈碱性, 高锰酸盐指数均值 $<6\text{ mg/L}$ , 符合Ⅲ类水质标准; 化学需氧量均值 $<30\text{ mg/L}$ , 符合Ⅳ类水质标准; 溶解氧变化范围在Ⅱ-V类水质标准范围内; 氨氮、总磷的均值均符合Ⅲ类水质标准; 总氮含量均值为 $2.1\text{ mg/L}$ , 超过了地表水环境质量Ⅴ类水标准( $\leq 2.0\text{ mg/L}$ )。

#### 3.2 叶绿素的时空变化特征分析

叶绿素包括叶绿素 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $f$ 以及原叶绿素和细菌叶绿素等, 存在于所有绿色植物中, 可以反映生物量的相应变化趋势。然而利用传统的丙酮法<sup>[16]</sup>仅测定叶绿素 $a$ 含量, 根据其表征浮游植物的生物量<sup>[17, 18]</sup>存在一定的问题, 例如当水体中叶绿素 $a$ 浓度低时, 会存在很大的误差。本研究采用水体叶绿素荧光测定仪对水体中叶绿素的浓度进行测定, 很好地弥补了丙酮法的缺陷, 在不破坏藻体的情况下, 直接测得叶绿素的相对荧光强度, 经软件换算成叶绿素浓度, 来表征水体中浮游植物的含量和水体的富营养化程度。通过对其的时空变化特征进行分析研究, 对于评价一个河段不同时期的水质状况具有重要意义。

本研究中汾河蓄水区7月份各河段叶绿素含量普遍高于其他月份, 由于7月温度高, 光照强, 降雨量大导致营养盐含量高, 在一定程度上促进了浮游植物的生长<sup>[19, 20]</sup>。在空间上, 总体呈现下游河段叶绿素含量高于上游河段的分布特点, 其中柴村桥下水口(S1)的叶绿素随时间变化范围小, 且持续较低, 主要是由于柴村桥位于太原市重工业主要分布区, 水体受污染严重, 从而抑制了浮游植物的生长, 导致光合作用下降, 而在南中环桥南(S8)达到最大值, 一是因为下游河段营养盐聚集丰富, 有利于藻类的生长, 二是由于南中环桥附近区域近年来刚被开发利用, 而且周边多为学校、公园、居民住宅区等, 污染源少, 水质条件适合浮游植物生长繁殖。

#### 3.3 叶绿素含量与水体环境因子相关性的探讨

高锰酸盐指数是在一定条件下以高锰酸钾为氧化剂处理水样所消耗的量, 化学需氧量是在一定条件下以重铬酸钾为氧化剂处理水样所消耗的量, 它们都可以指示水体中还原性物质的量, 但由于重铬酸钾的氧化能力大于高锰酸钾, 高锰酸盐指数只

能表征水样中50%—70%的有机物质, 而化学需氧量几乎是可以表征水样中全部的有机物<sup>[21]</sup>, 一般情况下, 根据化学需氧量的测定值可以推测高锰酸盐指数测定值的范围, 但对一些特殊的含有难降解或惰性的有机水体, 其高锰酸盐指数的测定值远小于化学需氧量, 无法检出。因此, 若只用化学需氧量来评价水中耗氧性有机物不具有客观性。本研究的相关性分析结果显示叶绿素与高锰酸盐指数、化学需氧量均为极显著正相关, 相关系数存在较小的差异, 符合这一原理解释, 说明水中有机物的存在会促进藻类生长, 同时藻类光合作用时会生成大量有机物, 又使得水体高锰酸盐指数和化学需氧量上升。

营养盐是水体浮游植物生长必不可少的因素, 营养盐的含量变化可以影响浮游植物的数量和生长状况, 从而影响水体叶绿素的含量, 而浮游植物的生长状况又可以导致营养盐含量的变动, 当浮游植物的生长受到某一营养元素限制时, 水体叶绿素含量与该元素含量的相关性较显著<sup>[22]</sup>。本研究结果显示叶绿素与总磷相关性显著。氮磷比可代表营养盐表示对浮游植物生长的限制水平。适当的营养盐可以控制浮游植物的生长、生物量以及种群结构, 从而影响水体叶绿素的含量<sup>[23]</sup>, 在一般情况下, 当氮磷比低于9.0—13.0时氮为限制因子, 当氮磷比高于17.0—21.0时, 磷为限制因子<sup>[24]</sup>。而太原汾河蓄水区氮磷比的总体均值为32.88, 而且总氮含量存在超标现象, 表明磷可能是浮游植物生长的限制因子。从总氮和总磷含量的总体情况来看, 水体中存在磷营养盐缺乏而氮营养盐超标的状况, 而且浮游植物生长代谢过程中对磷的吸收速率大于对氮的吸收速率<sup>[25]</sup>, 这也导致了氮磷比值远高于浮游植物对氮和磷的最佳吸收比7.0<sup>[26]</sup>。此外, 叶绿素与氨氮也存在极显著正相关关系, 它可以作为植物合成所需氨基酸等物质的原料。

水体pH对浮游植物的物种丰富度、种类组成以及优势种的变化都有重要的影响, pH通过影响浮游植物的生长来影响其对氮磷的吸收, 同时还可以影响酶活性, 进而影响光合作用<sup>[27]</sup>。碱性环境有利于捕获大气中的二氧化碳<sup>[28]</sup>, 加强浮游植物的光合作用, 而光合作用会吸收水中的二氧化碳, 放出氧气<sup>[29]</sup>, 从而降低水体的酸性, 使pH升高, 因此浮游植物多的地方会使水体偏碱性。本研究结果显示叶绿素与pH呈显著相关, 符合这一原理解释。

另外, 溶解氧是反映水体生物生长状况和污染状态的重要指标, 它也是一种浮游植物代谢过程中的重要能源物质; 适宜的温度可以加快浮游植物细

胞内新陈代谢作用,促进浮游植物的生长繁殖<sup>[30]</sup>。本研究结果显示叶绿素与它们呈现一定的正相关关系,但不显著,说明在太原汾河蓄水区这些因素不是影响水体叶绿素的主要因素。

### 3.4 基于PCA与CCA的比较

排序方法大体可以分为间接和直接两种类型,PCA属于间接排序,CCA属于直接排序。PCA是基于线性模型的多元分析方法,由原变量在不损失原数据主要信息情况下,使信息更加集中、更典型地显示出研究对象的特征,即在保证数据信息量损失最小的前提下,经线性变化,以少数的综合变量取代原始的多维变量<sup>[31]</sup>,但它不能很好地进行物种组成与环境因子关系的分析;CCA是一种非线性多元直接梯度分析方法,它每一步计算结果都与环境因子进行回归,并且可以结合多个环境因子一起分析<sup>[32]</sup>,包含的信息量大,结果直观明显,可以更好地反映群落与环境的关系<sup>[33]</sup>。本研究在对浮游植物群落和环境因子调查的基础上,应用PCA和CCA对相应数据进行排序作图,揭示了太原汾河蓄水区各环境因子之间的相关性以及蓝藻、绿藻、硅藻植物对环境的响应,在一定程度上反映出水体的水质状况。

在PCA排序图中,环境因子起始点的位置表示其平均值的位置。从代表每个样方的点投影到某一个环境因子所代表的线段上,投影点的位置可以近似表示该因子数值在这些样方内的排序。样方间的距离为欧几里得距离,长度越短,表示差异越小,反之越大。环境因子线段间夹角的余弦值可以反应它们之间的相关性,其绝对值越大,相关性越强,如果夹角接近直角,表示相关性很小。

CCA排序图由主轴1和主轴2构成,环境因子用线段表示,其长短代表其在水轴中的作用<sup>[34]</sup>。物种所在点的位置是该物种在梯度上的最适值对应的位置,样方中的相异度是以卡方距离为依据,也就是说,如果两个样方内各个物种的相对多度一样,那么这两个样方在图上的位置是一样的,同样,物种分布的差异也可以这样解释,如果两个物种在各个样方内多度比例是一致的,那么它们在图上位置应该是在一起的。物种与样方间的相对距离代表相应样方中目标物种的相对多度值高低,物种与样方之间的点越近,代表该物种在此样方内的相对多度越大,同样,样方距离某个物种的距离代表该物种在这些样方内相对多度变化,距离越短,相对多度越大。物种点间的距离可以代表不同物种空间分布差异,样方之间的距离可以代表样方之间的差异程度。从物种点到环境因子方向的投影点的位置次序可以代表这些物种在该环境因子上的最适

值的排序。而环境因子之间关系的解读同PCA排序图中一致。

### 参考文献:

- [1] Duan X N. The beautification design of the Fenhe River in Taiyuan city of the third phase of south extension management [J]. *Shanxi Water Resources*, 2013, (1): 28—29 [段宪楠. 汾河太原城区三期南延伸段治理美化工程设计. 山西水利, 2013, (1): 28—29]
- [2] Zhang L S, Song B W. Ecological function of wetland and its play a role in harness Fen River [J]. *Journal of Shanxi University*, 2000, **23**(2): 172—174 [张龙胜, 宋伯为. 湿地的生态功能及其在汾河治理中的作用. 山西大学学报(自然科学版), 2000, **23**(2): 172—174]
- [3] Chen J L, Hu M M, Zhou H D, *et al.* Studies on population dynamics and the underlying impact factors of phytoplankton during the cyanobacteria bloom in lake Erhai [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, **39**(1): 24—28 [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. 水生生物学报, 2015, **39**(1): 24—28]
- [4] Dong J, Li Y H, Li G B, *et al.* Seasonal dynamics characteristics and affecting physical factors of phytoplankton functional groups in Dongjiang River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, **37**(5): 836—843 [董静, 李艳晖, 李根保, 等. 东江水系浮游植物功能群季节动态特征及影响因素. 水生生物学报, 2013, **37**(5): 836—843]
- [5] Lu N, Yin H B, Deng J C, *et al.* Spring community structure of phytoplankton from Lake Chaohu and its relationship to environmental factors [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(6): 950—956 [路娜, 尹洪斌, 邓建才, 等. 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]
- [6] Ma R H, Dai J F. chlorophyll-*a* concentration estimation with Field Spectra of water-body near Meiliang Bayou in Taihu Lake [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, **9**(1): 78—86 [马荣华, 戴锦芳. 应用实测光谱估测太湖梅梁湾附近水体叶绿素浓度. 遥感学报, 2005, **9**(1): 78—86]
- [7] Xiao Y. Distribution characteristic of chlorophylla and its relationships with environmental factors in Minjiang Estuary in 2008 [J]. *Journal of Fujian Fisheries*, 2014, **36**(4): 271—277 [肖莹. 2008年闽江口海域叶绿素a时空分布及其与环境因子的相关性分析. 福建水产, 2014, **36**(4): 271—277]
- [8] Wang F E, Lü H C, Chen Y X, *et al.* Analysis of the spatial and temporal changes in chlorophyll-*a* concentration in Qiandao Lake and its impact factors [J]. *Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.)*, 2004, **30**(1): 22—26 [王飞儿, 吕唤春, 陈晓旭, 等. 千岛湖叶绿素浓度的动态变化及其影响因素分析. 浙江大学学报, 2004, **30**(1): 22—26]
- [9] Xiong X, He Q, Cui B S. Double principal coorclinate

- analysis of herbaceous vegetation in wetlands of the Yellow River Delta, China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, **27**(9): 1631—1638 [熊雄, 贺强, 崔保山. 黄河三角洲湿地草本植被的双变量主坐标排序. 生态学杂志, 2008, **27**(9): 1631—1638]
- [10] Lei A P, Shi Z X, Wei Y X. Diversity of the phytoplankton in Donghu Lake, Wuhan [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2003, **27**(2): 179—184 [雷安平, 施之新, 魏印心. 武汉东湖浮游藻类物种多样性的研究. 水生生物学报, 2003, **27**(2): 179—184]
- [11] Jin X C, Tu Q Y. Specifications for Lake Eutrophication Survey (2nd Edition) [M]. Beijing: China Environmental Science Press. 1990, 213—215 [金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范(第二版). 北京: 中国环境科学出版社. 1990, 213—215]
- [12] Zhang L. The Application of SPSS in the Biological Statistics [M]. Xiamen: Xiamen University Press. 2008, 171 [张力. SPSS在生物统计中的应用. 厦门: 厦门大学出版社. 2008, 171]
- [13] Li Q H, Han B P. Structure and dynamics of phytoplankton community based CCA analysis in a pumped storage reservoir [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(6): 2355—2364 [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]
- [14] Guo S L, Yu J, Chen G Q. Ecology Methods-procedures and Data Analysis, Software [M]. Beijing: Science Press. 2015, 129—175 [郭水良, 于晶, 陈国奇. 生态学数据分析—方法、程序与软件. 北京: 科学出版社. 2015, 129—175]
- [15] State Environmental Protection Administration. Environmental quality standards for surface water [S]. Beijing: China Environmental Press. 2002 [国家环境保护总局. GB/T 3838-2002地表水环境质量标准. 北京: 中国环境科学出版社. 2002]
- [16] Xu C P, Liu X, Chen Y W. Comparison of methods for determination of phytoplankton chlorophyll-*a* [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, **29**(4): 438—442 [徐彩平, 刘霞, 陈宇炜. 浮游植物叶绿素 $a$ 浓度测定方法的比较研究. 生态与农村环境学报, 2013, **29**(4): 438—442]
- [17] Sartory D P, Grobbelaar J U. Extraction of chlorophyll-*a* from freshwater phytoplankton for spectrophotometric analysis [J]. *Hydrobiologia*, 1984, **114**: 177—187
- [18] Reynolds C S. The Ecology of Fresh Water Phytoplankton [M]. London: Cambridge University Press. 1984, 1—396
- [19] Tian S M, Yang Y, Qiao Y M, *et al.* Temporal and spatial distribution of phytoplankton chlorophyll-*a* and its relationships with environmental factors in Dongjiang River, Pearl River basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(1): 31—37 [田时弥, 杨扬, 乔永民, 等. 珠江流域东江干流浮游植物叶绿素 $a$ 时空分布及与环境因子的关系. 湖泊科学, 2015, **27**(1): 31—37]
- [20] Wang S, Long S X, Li Z, *et al.* Study on the distribution characteristics and related factors of chlorophyll-*a* in Hongfeng Lake Reservoir [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, **38**(2): 895—897 [王叁, 龙胜兴, 李荔, 等. 红枫湖水库叶绿素 $a$ 分布特征与相关因子研究. 安徽农业科学, 2010, **38**(2): 895—897]
- [21] Li Z L. BOD, COD<sub>Cr</sub>, COD<sub>Mn</sub> relationship analysis [J]. *Journal of Water Resources Research*, 2000, **21**(1): 36—37 [李志亮. BOD, COD<sub>Cr</sub>, COD<sub>Mn</sub>三者关系简析. 水文水资源, 2000, **21**(1): 36—37]
- [22] Li D, Zhang J M, Cheng G, *et al.* Dynamics of chlorophyll-*a* and analysis of environmental factors in the Fenhe park of Taiyuan during summer and autumn [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, **12**(6): 39—43 [李岱, 张建民, 程革, 等. 太原汾河公园水华高发期叶绿素 $a$ 与环境因子的关系. 南水北调与水利科技, 2014, **12**(6): 39—43]
- [23] Feng M W, Wu Y H, Ma S X, *et al.* Effect of different N/P ratios on algal growth [J]. *Ecology and Environment*, 2008, **17**(5): 1759—1763 [丰茂武, 吴云海, 冯仕训, 等. 不同氮磷比对藻类生长的影响. 生态环境, 2008, **17**(5): 1759—1763]
- [24] Veljo K, Lea T, Tiina N. Role of phosphorus and nitrogen for bacteria and phytoplankton development in a large shallow lake [J]. *Hydrobiologia*, 2001, **457**: 187—197
- [25] Li T, Shi Z L, Qiu C B, *et al.* A study on the uptake rate of the nutrients by *Skeletonema costatum* and *Nitzschia closterium* and the environmental effects [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1999, **30**(6): 640—645 [李铁, 史致丽, 仇赤斌, 等. 中肋骨条藻和新月菱形藻对营养盐的吸收速率及环境因素研究. 海洋与湖沼, 1999, **30**(6): 640—645]
- [26] Liu H Y, Xu Y L. Preliminary observations of algal growth and lake eutrophication in Jingbo Lake [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, **16**(2): 195—201 [刘鸿雁, 徐云麟. 镜泊湖藻类生长和湖泊富营养化的预测初探. 生态学报, 1996, **16**(2): 195—201]
- [27] Ouyang Z R, Wen X C, Geng Y H, *et al.* The effects of light intensities, temperatures, Ph and salinities on photosynthesis of chlorella [J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2010, **28**(1): 49—55 [欧阳峥嵘, 温小斌, 耿亚红, 等. 光照强度、温度、pH、盐度对小球藻光合作用的影响. 武汉植物学研究, 2010, **28**(1): 49—55]
- [28] Imhoff J F, Sahl H G, Soliman GSH, *et al.* The Wadi Natrun: chemical composition and microbial mass developments in alkaline brines of Eutrophic Desert Lakes [J]. *Geomicrobiology Journal*, 1979, **1**(3): 219—234
- [29] Liu Z S, Wang C S, Ni J Y, *et al.* Ecological distribution characteristics of chlorophyll-*a* in Fuxian Lake [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(9): 1773—1780 [刘镇盛, 王春生, 倪建宇, 等. 抚仙湖叶绿素 $a$ 的生态分布特征. 生

- 态学报, 2003, **23**(9): 1773—1780]
- [30] Ruan X H, Shi X D, Zhao Z H, *et al.* Correlation between chlorophyll-*a* concentration and environmental factors in shallow lakes in plain river network areas of Suzhou [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, **20**(5): 556—562 [阮晓红, 石晓丹, 赵振华, 等. 苏州平原河网区浅水湖泊叶绿素 $a$ 与环境因子的相关关系. 湖泊科学, 2008, **20**(5): 556—562]
- [31] Wang R E, Wang H W. Multivariate Statistical Data Analysis [M]. Beijing: National Defense Industry Press. 1997, 92—119 [王若恩, 王惠文. 多元统计数据分析. 北京: 国防工业出版社. 1997, 92—119]
- [32] Ter B C. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector method for multivariate direct analysis [J]. *Ecology*, 1986, **67**(5): 1167—1179
- [33] Jia H B, Cao L Y, Hu H Y. Canonical correspondence analysis of spring macrobenthos community and its environment in Changjiang Estuary and Adjacent Sea [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2014, **30**(1): 93—97 [贾海波, 曹柳燕, 胡颢琰. 长江口及其邻近海域春季大型底栖生物群落与环境因子的典范对应分析. 中国环境监测, 2014, **30**(1): 93—97]
- [34] Habib O A, Tippet R, Murphy K J. Seasonal changes in phytoplankton community structure in relation to physico-chemical factors in Loch Lomond, Scotland [J]. *Hydrobiologia*, 1997, **350**: 63—79

## TEMPORAL AND SPATIAL VARIATION OF CHLOROPHYLL AND THE CORRELATION ANALYSIS WITH ENVIRONMENTAL FACTORS IN THE TAIYUAN FENHE WATER RESERVE AREA IN FLOODING SEASON IN 2014

LÜ Hong-Rui<sup>1</sup>, LÜ Jun-Ping<sup>1</sup>, LIU Qi<sup>1</sup>, XIE Shu-Lian<sup>1</sup>, FENG Jia<sup>1</sup>, CHENG Ge<sup>2</sup> and ZHANG Jian-Min<sup>2</sup>

(1. School of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. The Administration Committee of Fenhe Scenic Spot of Taiyuan City, Taiyuan 030002, China)

**Abstract:** Principal component analysis (PCA) and Canonical correspondence analysis (CCA) were used to investigate the relationships between environmental factors and phytoplankton of the Taiyuan Fenhe water reserve area in flooding season. Meanwhile, it studied the temporal and spatial distribution characteristic of chlorophyll concentration and the correlations between chlorophyll and other environmental factors. The results showed that chlorophyll concentration appeared some spatial and temporal difference in the Taiyuan Fenhe water reserve area, ranging from 5.83 to 181.00 mg/m<sup>3</sup>, and the mean chlorophyll value in July is higher than that of the other three months. The S8 sampling site reached to a maximum value at 181.00 mg/m<sup>3</sup>, whereas S1 has the lowest level of mean chlorophyll value. Significantly correlation was found between chlorophyll concentration and COD<sub>Mn</sub>, COD<sub>Cr</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TP, N/P and pH. Principal component analysis indicated that the factors affected the environment of Fenhe water reserve area including phytoplankton biomass, organic matters, nitrogen and phosphorous nutrients, hydrologic and meteorological conditions as well as photosynthesis intensity of water. Chl, COD<sub>Mn</sub>, COD<sub>Cr</sub>, and TP had significant effect among them. Through Canonical correspondence analysis, there was some difference of relative abundance among Cyanophyta, Chlorophyta and Bacillariophyta, but insignificant difference of spatial distribution. It was also revealed that the different correlations between environmental factors and sampling sites.

**Key words:** Taiyuan Fenhe water reserve area; Chlorophyll; Environmental factors; Correlation; Principal component analysis; Canonical correspondence analysis