

## 黑龙江黑河江段藻类植物群落与环境因子的典型对应分析\*

孙春梅, 范亚文\*\*

(哈尔滨师范大学生命科学与技术学院, 哈尔滨 150025)

**摘要:** 2006–2007 两年的 5–10 月期间, 分别在黑龙江黑河江段水域进行藻类植物的生态调查, 在藻类分类的基础上, 应用典型对应分析揭示黑龙江黑河江段 6 个监测点藻类植物的种群结构与环境因子之间的关系. 生化需氧量、总磷、水温和化学需氧量等是影响藻类植物群落分布的主要因素, 藻类植物的群落结构随着这些环境因子的变化表现出一定的空间差异, 说明藻类植物的群落变化和空间分布与环境因子高度相关.

**关键词:** 黑龙江黑河江段; 藻类植物; 环境因子; 典型对应分析

### Canonical correspondence analysis of the relationship between algal community and environment variables of Heilongjiang River in Heihe

SUN Chunmei & FAN Yawen

(College of Life Science and Technology, Harbin Normal University, Harbin 150025, P.R.China)

**Abstract:** The algal community was studied in Heihe channel in Heilongjiang River during May to October of 2006–2007, according to the taxon and relations between algal assemblage structures and environmental variables based on data from six monitor stations, and was analyzed by use of Canonical correspondence analysis. It revealed that biology oxygen demand, total phosphorus, water temperature and chemical oxygen demand from 7 water environmental variables are significant fractions of the distribution and variation of algal community. CCA result indicates that, the algal community and space distribution are correlated with environmental variables, the variety of the algal community may become a useful monitor for river environments.

**Keywords:** Heihe in Heilongjiang River; algae; environmental variables; canonical correspondence analysis

藻类植物存在于各种水体及潮湿的环境中, 由于藻类具有典型敏感性和广布性, 早在 20 世纪初就被作为江河、湖泊生物监测的指示植物, 随着科学技术的不断进步, 藻类植物已经被广泛用来评价江河的水质状况和变化趋势<sup>[1-2]</sup>, 欧盟等国家采用藻类丰富度指数(AAI)和硅藻的污染敏感性指数(IPS)等作为评价水体的重要指标<sup>[3-4]</sup>. 我国利用藻类进行环境综合评价的工作虽起步较晚, 但仍做了许多的工作, 如章宗涉等利用藻类监测, 评价了图们江的水污染<sup>[5]</sup>; 羊向东等利用硅藻生物多样性及其对环境的指示作用, 系统对长江等水域进行了初步研究<sup>[6-7]</sup>. 藻类植物虽然对水环境的化学变化比较敏感, 但其时空分布也明显受到水环境因子的影响. 最近几年, 藻类与环境的相关性研究多借助一种多变量直接梯度的生态学分析方法, 即典型对应分析方法(Canonical Correspondence Analysis, CCA), 以此分析藻类与所处环境, 如: 气候、理化特征等相互关系特点<sup>[8-9]</sup>.

黑龙江位于黑龙江省的北部边疆, 地处中高纬地区, 位于寒温带与温带, 季风气候明显. 水生生物资源丰富. 其流经的黑河江段, 属于黑龙江的上中游, 山区性河段, 水温较低, 浮游植物的分布具有一定的特殊性、地域性与代表性. 本文通过对黑龙江黑河江段水域藻类植物科、属、种的观察和鉴定, 结合各项

\* 国家自然科学基金项目(30570123, 30870157)、黑龙江省教育厅项目(11521062)和黑龙江省普通高等学校骨干教师创新能力资助计划项目(1055G018)联合资助. 2008–11–14 收稿; 2009–02–12 收修改稿. 孙春梅, 女, 1973 年生, 硕士.

\*\* 通讯作者; E-mail: fanyaw@yahoo.com.cn.

生化指标的统计与分析,在分类和群落指示作用的基础上,进一步探讨藻类植物在该水域的生态系统特征、区域保护以及物质循环中的作用.其研究意义不仅能揭示黑龙江黑河段水体的自然状况,同时可以对水体环境质量进行基本的评价与监测,为黑龙江的水域管理提供基础的科学资料.

本研究利用典型对应分析方法,将黑龙江黑河江段藻类植物的属种、样点与环境因子同时表现在一个低维的空间中,这种排序方法的排序轴既包含了种类组成信息,又包含了环境因子信息,因而具有精度高,能结合环境因子等诸多优点,并且可以直观的反映出环境因子与采样点、属种与环境因子之间的关系,初步揭示环境因子对藻类植物时空分布的影响作用以及藻类植物对环境因子的响应,为藻类植物与环境指标的研究提供重要的参考依据.

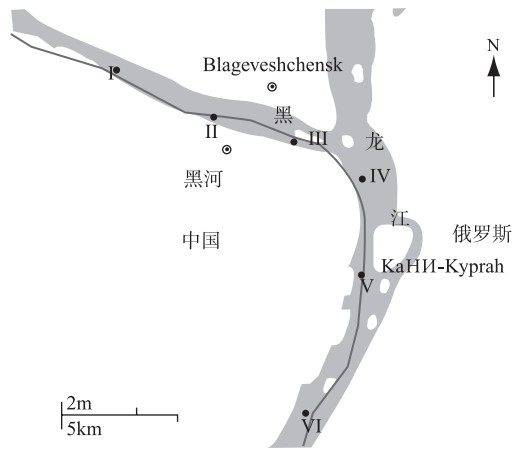


图1 黑龙江黑河江段采样点示意图

Fig.1 Distribution of sampling stations in Heihe section of Heilongjiang River

## 1 材料和方法

### 1.1 样品采集与处理

研究所涉及的黑龙江黑河段流域的位置位于北纬  $42^{\circ}45'-53^{\circ}33'$ , 东经  $108^{\circ}20'-141^{\circ}20'$  之间, 在研究区域共设置了 6 个采集点(I-VI)(图 1), 在 2006-2007 两年的 5-10 月期间, 每个月分别进行浮游和着生藻类的采集<sup>[10]</sup>, 每个采集点每次采样 2-3 次, 同时将标本带回实验室进行各项理化指标测定. pH 用便携式酸度计(PHB-4)测定、生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)用 BOD-System OxDirect, Italy 测定、化学需氧量(COD)用 COD-Reaktor ET 108 测定、总氮(TN)和总磷(TP)用多离子微电脑测量仪测定、溶解氧(DO)用溶解氧瓶碘量法测定、水温(WT)用水银温度计现场测定, 海拔 GPS 测定<sup>[11]</sup>. 观察藻类标本时, 先吸取定性的藻类样品, 在 OLYMPUS-BH 显微镜(15×40)下直接观察鉴定计数. 硅藻观察先计算总的

硅藻细胞数, 然后将部分样品经酸处理, 离心制片后, 在 OLYMPUS-BH 显微镜(10×100)下进行观察、鉴定, 并计算出各种硅藻间细胞数的比例. 每个样品的藻类植物的统计数量大约为 500 个左右<sup>[11]</sup>. 硅藻的鉴定主要依据 Hustedt<sup>[12-13]</sup>, Patrick & Reimer<sup>[14]</sup>, Kramme<sup>[15]</sup>, Langela-Bertalot H<sup>[16-17]</sup>等有关著作, 其他藻类的鉴定主要根据黎尚豪等<sup>[18]</sup>, 胡鸿钧等<sup>[10]</sup>著作.

### 1.2 数据分析

首先选择黑龙江黑河段水域 6 个采样点在不同季节测得的主要水质指标, 作为可分析的数据来源, 其次对数据进行标准化处理, 先建立藻类和环境指标数据库, 其中藻类数据, 选择至少在 2 个采样点出现, 而且在一个样品中含量大于 1% 的属种, 为了减少藻类变量的偏峰影响, 除 pH 不变以外, 对其余的水化学指标进行  $\lg X+1$  的转换. 经过以上处理, 原始数据库包括 72 个样品点(2 年间的采样总和, 分别属于不同季节的 6 个采集断面), 89 个藻类分类单位, 7 个环境因子.

典型对应分析主要按照以下步骤进行: (1)由除趋势对应分析(Detrended Correspondence Analysis, DCA)得出属种的单峰响应值(梯度长度 SD). 当 SD 的数值大于 2 时, 即可进行 CCA 分析. (2)测试各环境变量的边界效应, 每次只包含一个环境变量的 CCA 分析, 可以测试单个环境变量对藻类的影响, 即所谓的边界效应. (3)环境变量的重要性按照其单独解释属种数据的方差值的大小排出顺序, 其解释的显著性由 Monte Carlo 测试来检验<sup>[7-8]</sup>.

## 2 结果

### 2.1 DCA 分析结果

通过属种在 DCA 双轴图上的分布, 可以揭示影响藻类植物分布的潜在环境变量. 原始藻类数据的

DCA 分析中, 第一、二轴的特征值分别是 0.382 和 0.085, 解释的属种数据的方差值分别是 31.7%、7.1%, 其中第一轴的特征值明显高于第二轴, 表明藻类的属种分布主要由第一轴的环境因子所解释, 第二轴反映的环境因子的意义不明显, 同时也反映了样品点的排列主要受第一轴的控制. 本实验属种分布的梯度长度 SD 值为 2.91, 表明属种相对于前两轴具有明显的单峰响应关系, 可用加权平均的 CCA 方法分析藻类与环境之间的关系.

## 2.2 CCA 分析结果

采样点与环境变量典型对应分析结果说明, 第一、二轴的特征值为 0.580 和 0.203, 共解释了属种数据累计方差值的 78.3%(图 2). 分析采样点与环境变量的相关性可知: 第一轴可以清楚的把各采样点分成贫营养和中营养两部分, 沿着第一轴从左侧到右侧形成营养梯度逐渐偏高的趋势. 样点分布的排序反映了第一轴所代表的该江段营养梯度的变化, 其中第 1 轴左侧总磷浓度和生化需氧量普遍偏低, 而溶解氧却较高, 表明了黑龙江黑河江段的采样点 I (1-6, 37-42)、采样点 II (7-12, 43-48) 和采样点 VI (30-36, 67-72) 等监测断面, 具有较好水质; 从理化数据上分析, 也可得出相应的结论. 而第一轴的右侧总氮和总磷以及  $BOD_5$  和 COD 都较高, 主要集中在实验布设的采样点 III (13-18, 以及 49-54), 其所在位置位于排污口附近, 受污水排放的影响, 其监测的水质相对较差.

属种与环境变量典型对应分析结果(图 3), 较好地反映了藻类种类的分布和环境特征的相关性, 从中可以明显看出藻类的种类分布与水温、pH、溶解氧、总氮、总磷等理化因子都具有一定的关系. 在藻类植物属种与环境变量的双轴图中, 可以发现对总磷具有显著指示作用的藻类是: *Asterione formosa*, *Cyclostephanos dubius*, *Cyclotella meneghiniana*, *Surirella minuta*, *Gomphonema parvulum*, 而且主要集中在总磷浓度较高的采样点 III, 有研究认为 *Cyclostephanos dubius* 是潜在的富营养化发生的指示性属种, 而 *Cyclotella meneghiniana* 是属于耐高温的富营养种<sup>[19]</sup>. 对总氮具有显著指示作用的藻类主要是 *Melosira granulata* var. *angustissima* fo. *spiralis*, *Nitzschia capitellata*, *Melosira distans* var. *alpigena*, *Nitzschia acicularis*, 其主要集中分布在总氮浓度较高的采样点, 如图 2 中所示的 28、41、69 等样点, 说明这些采集区域藻类的分布对水体中总氮等营养物质浓度的变化具有较强的敏感性.

## 2.3 显著性检验

环境变量的重要性按照其单独解释属种数据的方差值的大小排出顺序, 其解释的显著性由 Monte Carlo 测试来检验. 在 CCA 分析中, 环境变量被限定为轴的线性组合, 在某个轴上的重要性则由环境变量与轴的相关系数来衡量, 并通过  $t$  值来检验其相关性. 分析表明 7 个环境变量都与排序轴显著相关, 说明环境变量之间也有着相互联系, 每个环境因子独立解释的藻类植物的数量以及 Monte Carlo  $t$  检验测得的显著性值(表 1), 表明在黑河江段的各采集点中, 生化需氧量、总磷、水温、总氮和化学耗氧量, 能够在 95% 的置信区间内独立解释藻类的丰度数据, 而生化需氧量、总磷、水温等环境因子是影响藻类植物群落分布的主要因素( $P < 0.01$ ), 其次是总氮和化学耗氧量, 但是其影响不十分显著, 而 pH 和溶解氧对藻类植物的群落结构的影响不显著( $P > 0.05$ ), 说明其明显依赖其它环境变量不能独立的解释藻类植物的群落分布.

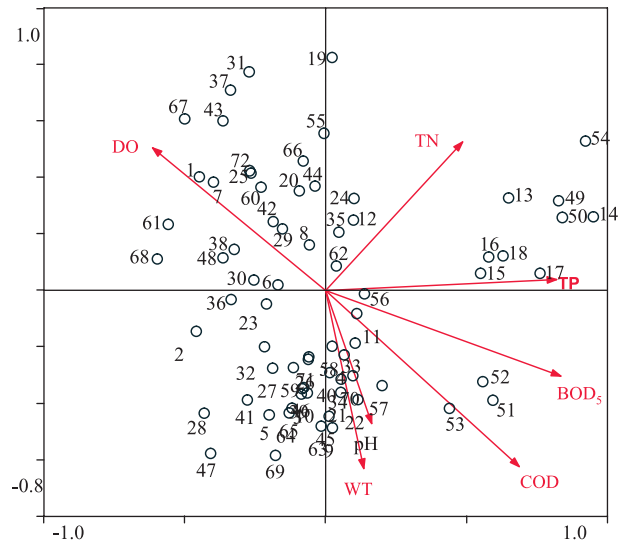


图 2 典型对应分析结果(样点与环境变量双轴图) (1-76 表示样点及对应的生态信息, 其中 1-6 代表 2006 年采样点 I 的 5-10 月份的生态信息, 以此类推, 67-72 代表 2007 年采样点 VI 的 5-10 月份的生态信息)

Fig.2 Results of canonical correspondence analysis(sites and environment variables)

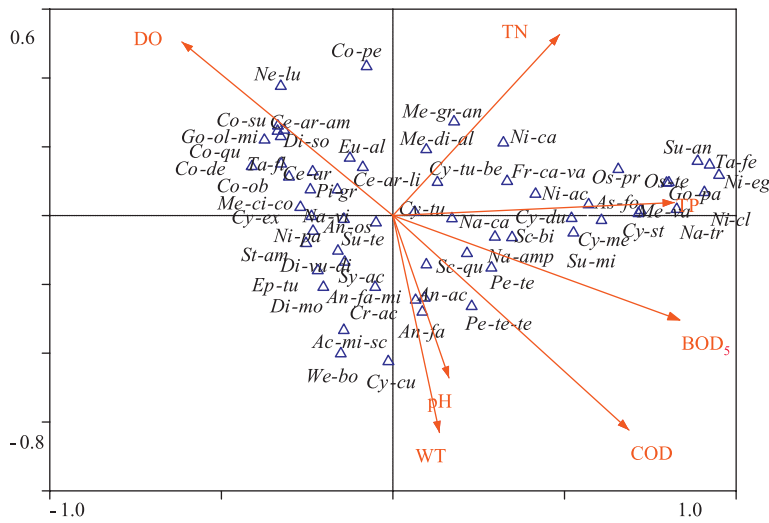


图3 典型对应分析结果(属种与环境变量双轴图)

Fig.3 The results of canonical correspondence analysis(species and environment variables)

(拉丁文缩写表示用于分析的主要藻类植物属种代码名称, 其中部分指示作用较小的藻类已被删除。An-fa=Ankistrodesmus falcatus, Co-ob=Cosmarium obtusatum, An-fa-mi=Ankistrodesmus falcatus var. mirabilis, An-ac=Ankistrodesmus acicularis, Co-qu=Cosmarium quadrum, Ne-lu=Nephroclytium lunatum, Pe-te=Pediastrum tetras, Pe-te=Pediastrum tetras var. tetraodum, Co-su=Cosmarium subtumidum, St-am=Stigeoclonium amoenum, We-bo=Westella botryoides, Di-so=Dinobryon sociale, Os-pr=Oscillatoria princes, An-os=Anabaena osicellarioides, Eu-al=Eucapsis alpine, Sc-bi=Scenedesmus bijuga, Os-te=Oscillatoria tenuis, Ac-mi-so=Achnanthes minutissima var. scotica, As-fo=Asterione formosa, Ce-ar-am=Ceratoneis arcus var. amphioxys, Ce-ar=Ceratoneis arcus, Co-pe=Cocconeis pediculus, Co-de=Cosmarium depressum, Cr-ac=Craticula acidoclinata, Cy-cu=Cymbella cuspidate, Di-mo=Diatoma moniliformis, Cy-st=Cyclotella stelligera, Cy-me=Cyclotella meneghiniana, Cy-ex=Cymbella excise, Di-vu-di=Diatoma vulgaris var. distorta, Cy-tu-be=Cymbella turgidula var. bengalensis, Cy-tu=Cymbella tumida, Cy-du=Cyclostephanos dubius, Ep-tu=Epithemia turgide, Go-ov-mi=Gomphonema olivaceum var. minutissimum, Go-pa=Gomphonema parvulum, Me-ci-co=Meridiom circulare var. constrictum, Na-vi=Navicula viridula, Ni-pa=Nitzschia palea, Ni-cl=Nitzschia clausii, Ni-eg=Nitzschia eglei, Me-va=Melosira varians, Ni-ca=Nitzschia capitellata, Na-am=Navicula amphiceropsis, Sc-qu=Scenedesmus quadricau, Su-mi=Surirella minuta, Su-an=Surirella angusta, Na-tr=Navicula trivialis, Ta-fe=Tabellaria fenestrata, Ni-ac=Nitzschia acicularis, Fr-ca-va=Fragilaria capucina var. vaucheriae, Ta-fl=Tabellaria flocculosa, Me-gr-an=Melosira granulata var. angustissima fo. spiralis, Me-di-al=Melosira distans var. alpigena, Sy-ac=Synedra acus)

### 3 讨论与结论

许多研究表明, 环境条件的改变可以直接影响藻类植物的生长、繁殖, 如温度的变化可以刺激藻类细胞分裂的速度; 而 pH 值、水环境的各种离子及营养成分的改变也同样对藻类群落结构的分布起到重要的作用, 因此, 藻类植物在所处空间及时间的分布会受到环境因素的综合影响<sup>[19]</sup>。黑龙江黑河段水域蕴藏着丰富的藻类资源, 其中硅藻门占所观察藻类总数的 72.6%; 绿藻门占藻类总数的 15.8%; 蓝藻门占藻类总数的 4.8%; 金藻门占藻类总数的 4.1%; 黄藻门占藻类总数的 2.7%; 从浮游植物的种类组成和数量上来看, 硅藻、绿藻两门在种类组成上远比其他藻类多, 生物量也较高, 由此表明黑龙江的藻类植物群落组成主要为硅藻-绿藻类型。

从黑龙江黑河段各属种与环境变量的双轴图(图 3)的分析可以看出, 几乎所有的种类都是有规则的按照营养梯度分布, CCA 的第一轴明显的根据 BOD<sub>5</sub> 的变化分成两部分, 从左侧至右侧 BOD<sub>5</sub> 逐渐增大, 第一轴的左侧很大一部分种类属于贫营养的普生种, 只有极小部分属于中营养的耐污种类。表现最为明

显的是在受人类活动干扰相对较少的采样点 I 和采样点 VI, 具有种类丰富, 生物量较高的特征, 而且一些寡污带和  $\beta$ -中污带的藻类如 *Ceratoneis arcus*, *Achnanthes lanceolata*, *Cosmarium obtusatum*, *Cosmarium quadrum*, *Tabellaria flocculosa*, *Cymbella excise*, *Nitzschia palea* 等出现, 说明这些种类具有较高的优势度和指示能力. 而第一轴的右侧  $BOD_5$  偏大的出现在采样点 III 和采样点 IV, 该区域属于市区段, 受船舶停靠, 以及生活污水等条件的影响, 藻类植物的群落结构组成单一, 种类多样性显著下降, 一些  $\alpha$ -中污带的蓝藻类 *Oscillatoria tenuis*, *Oscillatoria princeps*, *Merismopedia tenuissima* 大量出现, 同时还有一

些耐受富营养类型的硅藻, 如: *Surirella tenera*, *Surirella minuta*, *Cyclotella stelligera*, *Tabellaria fenestrata*, *Pediastrum tetras* var. *tetraodom* 出现. 结合环境变量的显著性检验,  $BOD_5$  单个环境因子的边缘效应最大 (0.31), 可以说生化需氧量( $BOD_5$ )在群落结构的分布上起到了比较重要的作用, 这主要是由于好氧微生物在分解有机物的过程中, 其生长、繁殖、呼吸所需要的溶解氧量, 与藻类植物的群落结构的相关性最大, 是衡量水生动植物多寡的一个重要指标<sup>[20]</sup>.

从生态学观点来看, 水环境决定了藻类植物的种群或群落结构特征<sup>[21]</sup>; 另一方面, 藻类植物的个体、种群或群落的变化, 可以客观反映出水体质量的变化规律<sup>[22]</sup>. 黑龙江黑河段地处中高纬地区, 位于寒温带与温带, 季风气候明显. 水温的季节变化差异显著( $P < 0.01$ ), 呈现夏季高、春秋低的现象. 水温基本上从春季开始回升, 在夏季(7月)达最高( $25^{\circ}\text{C}$ ), 之后逐渐下降, 至秋季的10月末降低至 $4^{\circ}\text{C}$ . 所以夏季比较适合广温普生性种类的生长, 早春和晚秋则适合一些喜低温的冷水种类, 诸如 *Cymbella excise*, *Ceratoneis arcus*, *Ceratoneis arcus* var. *amphioxys*, *Fragilaria Pinnata*, *Dinobryon sociale* 等的生长和繁殖.

通常 TN 和 TP 是藻类植物生长的限制因子, 藻类植物的生物量与 TN, TP 等生态因子的关系比较密切. 我们所涉及的 7 个环境因子中,  $BOD_5$  和 TP 对藻类的分布有着重要的影响,  $\lambda_1/\lambda_2$  的比值(0.9 左右)也表明这 2 种环境因子的作用要高于其他因子的影响.

黑龙江黑河江段藻类与环境的实验分析结果表明, 水体氮素化合物总氮含量较高, 总氮含量变动在  $0.85\text{--}1.35\text{mg/L}$  之间. 此外, 总磷也是影响藻类植物群落分布的另一重要环境因子, 比总氮这一环境因子的影响略大, 例如采样点 III 处于污水口附近, 总磷值的波动范围在  $0.068\text{--}0.165\text{mg/L}$  之间, 高于其他各采集点, 而且溶解氧明显低于其他 5 个采样点, 这可能与其处于污水口附近, 微生物分解生活污水中的有机物, 而消耗水中的大量氧气所致. 虽然我们在采样点 III 还发现了 *Cyclostephanos dubius*, *Cyclotella meneghiniana* 等具有一定潜在富营养化发生的指示性属种, 但由于数量较少, 目前还不足以引起水域的大面积环境变化.

黑龙江黑河段水域各采样点之间的 pH 较为稳定, 也无显著差异( $P=0.94 > 0.05$ ), pH 值年内变化趋势不明显( $6.7\text{--}7.4$  之间). 两年间各个月份之间的差异显著( $P=0.0037 < 0.01$ ), 2006 年的 10 月和 2007 年的 5 月偏低, 而 2006 年和 2007 年的 9 月却偏高. 江水呈中性偏弱碱性, 整个江段各采集区域的 pH 值变化, 基本符合国家 II-III 类水质的标准( $6.5\text{--}8.5$ ), 因此具有一定的缓冲能力, 适合藻类植物生长繁茂. 从各采样点监测的溶解氧来看, 其差异极其显著( $P=0.0018 < 0.01$ ), 整个水域的溶解氧基本符合国家渔业水域水质标准(DO 不低于 3);  $BOD_5$  值的波动范围在  $1\text{--}5$  之间, COD 值的波动范围在  $5.26\text{--}10.78\text{mg/L}$  之间, 也均符合国家 II-III 类水质标准, 水体的营养状态基本为贫至中营养类型.

典型对应分析表明黑龙江黑河江段藻类植物的个体丰度与环境因子之间存在着适当的依赖关系, 生化需氧量、总磷、水温和化学需氧量等是主要环境影响因子, 藻类植物的群落结构随着这些环境因子的变化表现出一定的空间差异, 同时藻类植物的群落结构变化又可以在一定程度上指示和预示着水体的特定环境特征.

表 1 CCA 分析中环境变量的显著性检验  
Tab.1 The importance of each variable and the significance test in CCA

| 环境因素                     | 边缘效应 | F    | P     | $\lambda_1/\lambda_2$ |
|--------------------------|------|------|-------|-----------------------|
| $BOD_5(\text{mg/L})$     | 0.31 | 8.72 | 0.001 | 0.981                 |
| TP(mg/L)                 | 0.30 | 3.66 | 0.001 | 0.926                 |
| WT( $^{\circ}\text{C}$ ) | 0.07 | 2.28 | 0.001 | 0.875                 |
| TN(mg/L)                 | 0.19 | 2.10 | 0.002 | 0.308                 |
| COD(mg/L)                | 0.15 | 1.84 | 0.004 | 0.59                  |
| pH                       | 0.07 | 0.97 | 0.503 | 0.102                 |
| DO(mg/L)                 | 0.06 | 0.85 | 0.693 | 0.449                 |

综合分析黑龙江黑河江段水域的理化监测和生物监测结果,水质的总体评价处于贫至中营养状态,只是在个别采集点污水口附近有中营养化的趋势.通过对黑龙江黑河段水域的水生藻类植物出现的种类和数量变化进行的初步研究,结果表明藻类植物的周年演替情况对黑龙江未来水体营养化的预测和水环境的监测具有一定的生物学意义.所以有必要对黑龙江水体的藻类植物进行继续跟踪调查,为黑龙江的水域管理提供基础的科学资料.

致谢:本文 CCA 分析及部分参考文献得到中国科学院南京地理与湖泊研究所羊向东博士的大力支持,作者在此表示最诚挚的谢意!

#### 4 参考文献

- [1] Round FE, Crawford RM, Mann DG. The diatoms. Biology & morphology of the genera. Cambridge: Cambridge University Press, 1990: 747.
- [2] Mariacristina T, Antonio DU. Biology monitoring of some Apennine Rivers using the Diatom-Based Eutrophication / Pollution index compare to other European Diatom indices. *Diatom Research*, 2006, **21**(1): 159-174.
- [3] Munne A, Prat N. Defining river types in a Mediterranean Area: A methodology for the implementation of the EU water framework directive. *Environment Management*, 2005, (34): 711-729.
- [4] Rott E, Pipp E, Pfsiter P. Diatom Methods developed for river quality assessment in Austria and crosscheck against numerical tropic indication methods used in Europe. *Algological Studies*, 2003, **110**: 91-115.
- [5] 章宗涉, 莫珠成, 戎克文. 用藻类监测和评价图们江的水污染. 水生生物学集刊, 1983, **8**(1): 97-104.
- [6] 董旭辉, 羊向东, 王 荣等. 长江中下游地区湖泊硅藻—总磷转换函数. 湖泊科学, 2006, **18**(1): 1-12.
- [7] 董旭辉, 羊向东, 王 荣. 长江中下游地区湖泊富营养化的硅藻指示性属种. 中国环境科学, 2006, **26**(5): 570-574.
- [8] Ter Braak CJF. Canonical correspondence analysis: A new eigenvector method for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, 1986, **67**(5): 1167-1179.
- [9] Ter Braak CJF, Prentic IC. A theory of gradient analysis. *Advances in Ecological Research*, 1986, **18**: 271-317.
- [10] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类系统、分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006.
- [11] 沈韞芬, 章宗涉, 龚循矩等. 微型生物监测新技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990: 100-148.
- [12] Hustedt. Bacillariophyta (diatomeae). A. Pascher, "Diesusswasser—Flora Mitteleuropas", 1930: 211-340.
- [13] Hustedt. Bacillariophyta (diatomeae). A. Pascher, "Diesusswasser—Flora Mitteleuropas", 1935: 376-713.
- [14] Patrick R, Reimer CW. The diatoms of the United States. Monographs of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia, 1966, I: 295-643.
- [15] Krammer K. Diatoms of the European Inland waters and comparable habitats. Vol 1. Gantner ARG, Verlag KG. 2000, ISBN 3-904144-24-3.
- [16] Langela-Bertalot H. Diatoms of the European Inland waters and comparable habitats. Vol 2. Gantner ARG, Verlag KG. 2001, ISBN 3-904144-78-2.
- [17] Langela-Bertalot H. Diatoms of the European Inland waters and comparable habitats. Vol 3. Gantner ARG, Verlag KG. 2001, ISBN 3-904144-84-7.
- [18] 黎尚豪, 毕列爵. 中国淡水藻志第五卷绿藻门. 北京: 科学出版社, 1998.
- [19] Manel L Sergi S. Diatom assemblage distribution in catalan rivers, NE Spain, in relation to chemical and physiographical factors. *Water Research*, 2005, **39**: 73-82.
- [20] Rimet F, Goma J, Cambra J *et al.* Benthic diatoms in western European streams with altitudes above 800m: characterisation of the main assemblages and correspondence with ecoregions. *Diatom Research*, 2007, **22**(1): 147-188.
- [21] Kiplagatat K, Lothar K, Francis MM. Temporal changes in phytoplankton structure and composition and the Turkwel Corge Reservoir. *Hydrobiologia*, 1998, **368**: 41-59.
- [22] Thomnton KW, Kimmel BL, Payne FE. Reservoir limnology: Ecological perspectives. New York: Wiley interscience Publication, 1990.