

# 浑河水系着生藻类的群落结构与生物完整性\*

殷旭旺<sup>1,3</sup> 张 远<sup>2\*\*</sup> 渠晓东<sup>2</sup> 刘 颖<sup>1,3</sup> 李庆南<sup>1,3</sup> 孟 伟<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>大连海洋大学生命科学与技术学院, 辽宁大连 116023; <sup>2</sup>中国环境科学研究院流域水生态保护技术研究室, 北京 100012;

<sup>3</sup>辽宁省水生生物学重点实验室, 辽宁大连 116023)

**摘 要** 以辽宁省浑河水系为研究范例, 调查了全流域范围内 62 个样点的着生藻类群落和水环境理化特征, 并应用着生藻类生物完整性评价指数(P-IBI), 结合栖息地环境质量评价指数(QHEI), 对浑河流域水生态系统进行健康评价. 结果表明: 浑河水系着生藻类群落结构具有明显的空间异质性, 浑河水系的采样点可划分为 4 组(Group), 不同组间的着生藻类群落结构、物种多度、密度和香农多样性指数均存在明显差异. 典范对应分析(CCA)结果显示, 驱动浑河着生藻类群落结构形成的水环境因子为铵氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )和活性磷( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ). P-IBI 和 QHEI 在浑河水系某些河段上的评价结果有较大出入, 但从全流域尺度上看, P-IBI 和 QHEI 的评价结果基本一致, 表现为浑河上游的苏子河健康状况较好, 而上游的浑河以及中下游的浑河干流健康状况较差.

**关键词** 生物完整性指数 栖息地环境质量评价 典范对应分析 主成分分析 群落结构

**文章编号** 1001-9332(2011)10-2732-09 **中图分类号** X171, X826 **文献标识码** A

**Community structure and biological integrity of periphyton in Hunhe River water system of Liaoning Province, Northeast China.** YIN Xu-wang<sup>1,3</sup>, ZHANG Yuan<sup>2</sup>, QU Xiao-dong<sup>2</sup>, LIU Ying<sup>1,3</sup>, LI Qing-nan<sup>1,3</sup>, MENG Wei<sup>2</sup> (<sup>1</sup>College of Life Science and Technology, Dalian Ocean University, Dalian 116023, Liaoning, China; <sup>2</sup>Laboratory of Riverine Ecological Conservation and Technology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; <sup>3</sup>Liaoning Province Key Laboratory for Hydrobiology, Dalian 116023, Liaoning, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2011, 22(10): 2732-2740.

**Abstract:** Taking the Hunhe River water system in Liaoning Province of Northeast China as a case, this paper investigated the community structure of periphyton and the physical and chemical characteristics of water environment at 62 sampling sites, and, by using the biological integrity index of periphyton (P-IBI) and the habitat environment quality index (QHEI), a health assessment on the aquatic ecosystem of the water system was conducted. There was a great spatial heterogeneity in the periphyton community structure, and the sampling sites could be divided into 4 groups, with significant differences in the community structure, species richness, density, and Shannon diversity index among the groups. Canonical correspondence analysis (CCA) showed that ammonia nitrogen ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) and dissolved phosphorus ( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ) were the main water environment factors driving the formation of the periphyton community structure in the water system. The health assessment of the water system based on P-IBI and QHEI was basically in consistency, though the assessment of several reaches had large discrepancy. Overall, the Suzi River at the upper reaches of the water system had a better health status, while the upper reaches of Hunhe River and the main stream of Hunhe River at its middle and lower reaches were worse in health.

**Key words:** biological integrity index; habitat environment quality evaluation; canonical correspondence analysis; principal component analysis; community structure.

\* 国家“水体污染控制与治理”重大科技专项和流域水生态功能评价与分区技术课题(2008ZX07526-001)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: zhangyuan@caes. org. cn

2011-02-16 收稿, 2011-06-29 接受.

对河流中水生生物的研究,一直以来都是评估自然生态过程及人类活动对河流生态系统影响的重要手段<sup>[1]</sup>. 着生藻类(periphyton)作为河流生态系统中的重要生物类群,其在河流生物监测与评价中的应用由来已久<sup>[2]</sup>. 然而,与大型底栖动物和鱼类相比,着生藻类在河流评价中的作用远未引起足够重视<sup>[3-4]</sup>,主要原因是该类群的物种数量巨大,且对分类的专业技能要求较高<sup>[5]</sup>.

着生藻类是河流生态系统的初级生产者,通过光合作用将无机营养元素转化成有机物,并被更高级的有机生命体所利用;此外,着生藻类还能稳固水底的基质,并为鱼类和底栖动物提供隐蔽所和产卵场<sup>[6]</sup>. 鉴于着生藻类在河流生态系统中的重要地位,国际上已经越来越多地应用该类群评价河流的生态状况,而国内的相关研究主要集中在长江流域的香溪河和冈曲河<sup>[7-9]</sup>. 本研究调查了辽宁省浑河水系着生藻类的群落结构特征,并在此基础上评价了浑河水系着生藻类的生物完整性,希望以此为例,为我国应用着生藻类评价河流健康提供参考,并为浑河水系水生态系统的维护及管理提供基础数据.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域

浑河水系(40°20'—41°00' N,122°20'—125°20' E)位于我国辽宁省东部地区,流域面积 1.14 × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>. 水系发源于清原县滚马岭西南麓,西南流经清原、新宾、抚顺和沈阳,在海城与太子河汇合形

成大辽河后至营口注入渤海,全长 415 km. 水系地势东南高,西北低,水量较丰富. 大伙房水库以上的浑河和苏子河,流经中低山丘,植被覆盖率达 79.2%. 中、下游流经东北平原,河网交错,工农业发达;下游河口段地势低洼,水面宽阔.

1.2 样品采集

在浑河水系设定 62 个调查站位(图 1),于 2010 年 5 月进行采样调查,用全球定位系统(MAGELLAN eXplorist-200)记录采样点的经纬度. 在采样点河流上下游 100 m 范围内,依据河流生境的不同(流速、水深和透明度),挑选 9 个石块,从各石块上用硬毛刷分别刮取面积为 15.2 cm<sup>2</sup>(直径 4.4 cm 的圆形塑胶环)的着生藻类,用自来水冲刷至不锈钢托盘中,依据该方法采集 3 份样品,其中两份加入甲醛(5% 体积)固定后转移到广口塑料瓶中保存,作为着生藻类的定性和定量样品;第 3 份样品不加药品,用孔径 0.45 μm 的醋酸纤维滤膜抽滤后,黑暗低温保存(4 ℃),带回实验室测定叶绿素 a 含量. 着生藻类的种类鉴定依据相关文献<sup>[10-11]</sup>. 叶绿素样品在黑暗低温(4 ℃)条件下,用丙酮萃取 12 h 后用分光光度法测定叶绿素 a 含量<sup>[12]</sup>.

1.3 栖息地环境质量评价及水体理化性质的测定

对浑河水系各采样点的栖息地环境质量进行评价(qualitative habitat evaluation index, QHEI)时,选取 10 个评价指标(底质、栖境复杂性、速度和深度结合特征、堤岸稳定性、河道变化、河水水量状况、植被多样性、水质状况、人类活动强度、河岸土地利用

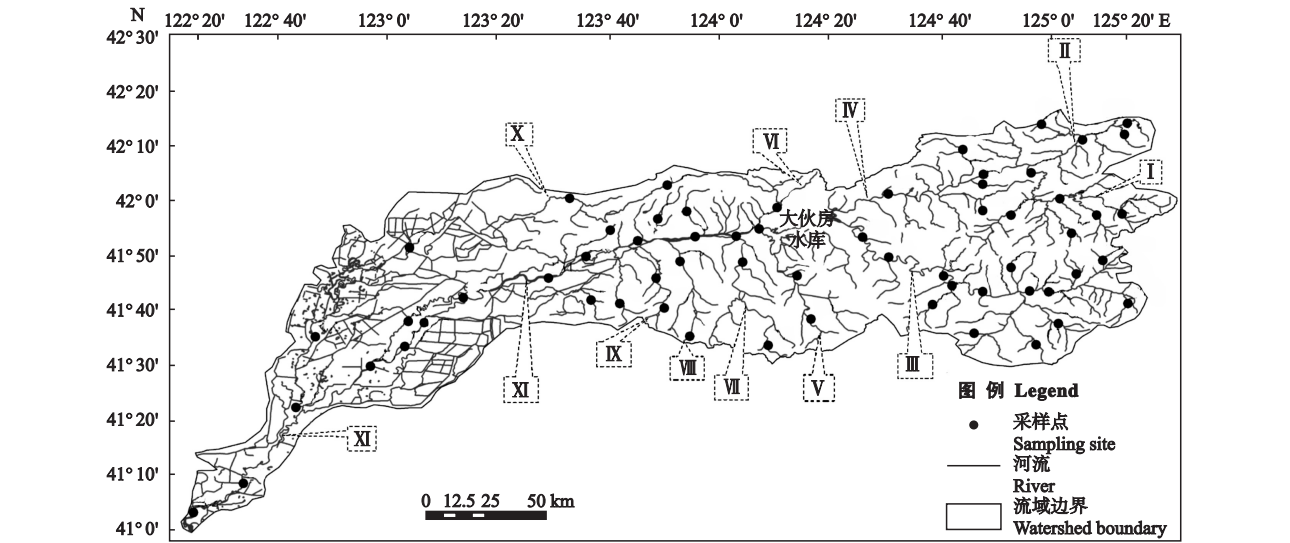


图 1 浑河水系采样点示意图

Fig. 1 Location sketch of sample sites in the Hunhe River.

I : 红河 Honghe River; II : 英额河 Ying'e River; III : 苏子河 Suzi River; IV : 浑河 Hunhe River; V : 社河 Shehe River; VI : 党章河 Dangzhang River; VII : 东洲河 Dongzhou River; VIII : 古城河 Gucheng River; IX : 李石河 Lishi River; X : 蒲河 Puhe River; XI : 浑河干流 Hunhe main river.

类型), 每项 20 分, 总分 200 分, 共计 4 个得分等级 (健康、较好、一般和较差). 所有样点的评分均由同一调查者完成, 以消除由于人为误差导致的评价结果不一致. 各评价指标的判定标准详见相关研究<sup>[13-14]</sup>.

同期对各样点进行水体理化性质的测定. 水温 (Temp)、电导率 (Cond)、总溶解固体 (TDS)、溶解氧 (DO) 和 pH 用 YSI 水质分析仪 (Pro1020) 现场测定; 流速 (Velo) 用流速仪现场测定; 在各样点采集两个平行水样 (各 2 L), 置于低温保温箱中 (4 °C), 于 48 h 内带回实验室, 根据标准方法<sup>[12]</sup>, 测定以下水质指标: 总悬浮物 (TSS)、氯离子 ( $\text{Cl}^-$ )、硫酸根 ( $\text{SO}_4^{2-}$ )、铵氮 ( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )、亚硝酸氮 ( $\text{NO}_2^--\text{N}$ )、硝酸氮 ( $\text{NO}_3^--\text{N}$ )、总氮 (TN)、活性磷 ( $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ )、总磷 (TP)、碱度 (Alk)、硬度 (THD)、化学耗氧量 ( $\text{COD}_{\text{Cr}}$ ) 和高锰酸盐指数 ( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ).

## 1.4 数据分析和处理

### 1.4.1 着生藻类群落结构特征和水环境因子分析

各样点的着生藻类计算以下群落特征参数: 物种多度、密度 ( $\text{cells} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) 和香农多样性指数. 对各样点水环境理化数据首先进行主成分分析 (principal component analysis, PCA), 以判定影响浑河水系水环境质量的主要环境因子. 将筛选出的主要环境因子进行偏相关分析 (partial correlation test, PCT), 显著相关 ( $P < 0.05$ ) 的两个水体理化因子仅保留其一. 对各样点着生藻类相对多度数据进行除趋势对应分析 (detrended correspondence analysis, DCA) 后发现, 第 1 轴的特征值为 0.339, 梯度长度在 4 个轴中最大, 值为 3.542, 介于 3~4 之间, 因此选用线性模型 (冗余分析) 和单峰模型 (典范对应分析) 均可. 在本研究中我们选用单峰模型, 对水体理化数据和着生藻类群落数据进行典范对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA) 时, 水体理化参数为 PCA 和 PCT 筛选出的指标, 着生藻类密度数据均转化为相对多度 (%); 与此同时, 对数据进行 9999 次蒙特卡罗循环检验 (Monte Carlo test, MCT), 以找出影响着生藻类群落空间分布特征的最显著的水环境因子 ( $P < 0.05$ ). 进行 PCA、PCT、DCA 和 CCA 时, 除 pH 以外的所有水体理化数据和着生藻类相对多度数据均进行数据转换 ( $\text{Log}_{10}[x+1]$ ).

依据浑河水系分布、地貌特征和水环境特征, 将浑河水系的采样点划分为 4 组 (Group), 其中 Group 1 为苏子河, Group 2 为浑河 (包括英额河和红河), Group 3 为浑河中下游各支流 (社河、党章河、东洲

河、古城河、李石河和蒲河), Group 4 为浑河干流 (大伙房水库以下浑河河段). 为了检验以上 4 组间的差异性, 我们对着生藻类群落数据进行多响应置换过程 (multi-response permutation procedures, MR-PP) 分析; 同时, 对着生藻类群落数据进行指示种分析 (indicator value analysis, IVA), 以确定各组的指示性着生藻类物种. 进行 MRPP 和 IVA 时, 着生藻类相对多度数据同样进行对数转换.

**1.4.2 着生藻类生物完整性 (P-IBI) 评价** 有研究报道, 大辽河流域的浑河水系和太子河水系, 归属于同一个水生态一级分区 (辽东部多水区), 它们具有相似的气候、水文、地貌和流域特征<sup>[15]</sup>. 在同一水生生态分区内, 水生生物类群结构相近<sup>[16]</sup>, 因而对环境因子有着相似的响应模式<sup>[17]</sup>. 鉴于此, 本研究中的 P-IBI 核心参数体系采用我们从太子河水系筛选出的 10 个 P-IBI 核心参数: 绿藻属的总数、敏感性物种相对多度、硅藻分类单元相对多度、蓝藻分类单元相对多度、菱形藻百分比、颤藻百分比、可运动硅藻百分比、具柄硅藻百分比、着生藻类叶绿素 a 含量和着生藻类密度, 核心参数的属性和筛选过程见太子河流域的相关研究.

根据所有样点核心参数的分布范围, 对核心参数采用四分法进行赋分 (10、7、4 和 1 分)<sup>[2]</sup>, 经累加得到最终的 P-IBI 得分. 以参照样点 P-IBI 得分值分布的 25<sup>th</sup> 分位数作为健康评价的标准<sup>[18-19]</sup>, 如果样点的 P-IBI 分值大于 25<sup>th</sup> 分位数值, 则表示该站点受到的干扰很小, 是健康的; 对小于 25<sup>th</sup> 分位数值值的分布范围, 进行 3 等分, 以划分出不同的健康等级. 据上述方法, 确定出健康、较好、一般和较差 4 个等级的划分标准.

## 1.5 数据处理

用 Biodiversity Professional 2.0 计算香农多样性指数, 用 SPSS 12.0 进行数据的相关性分析, PCA 在 Statistica 8.0 上进行, DCA 和 CCA 在 Canoco 4.5 上进行, MRPP 和 IVA 用 Pcord 5.0 分析, 浑河水系着生藻类群落结构和水生态健康评价图在 ArcMap 9.3 上完成.

## 2 结果与分析

### 2.1 着生藻类群落结构特征和水环境因子分析

浑河水系采集到着生藻类 163 种, 其中硅藻门 134 种, 占 82%; 绿藻门 20 种, 占 12%; 蓝藻门 9 种, 占 6%. 常见的硅藻种类包括: 变异直链藻 (*Melosira varians*)、梅尼小环藻 (*Cyclotella meneghiniana*)、普



通等片藻 (*Diatoma vulgare*)、环状扇形藻 (*Meridium circulare*)、钝脆杆藻中狭变种 (*Fragilaria capucina* var. *mesolepta*)、沃切里脆杆藻 (*F. vaucheriae*)、膨大桥弯藻 (*Cymbella turgida*)、胡斯特桥弯藻 (*C. hustedtii*)、系带舟形藻细头变种 (*Navicula cincta* var. *leptocephala*)、简单舟形藻 (*N. simplex*)、窄异极藻 (*Gomphonema angustatum*)、肘状针杆藻 (*Synedra ulna*)、线形菱形藻 (*Nitzschia sublinearis*)、小片菱形藻 (*N. frustulum*)、卵圆双菱藻 (*Surirella ovalis*)；常见的绿藻和蓝藻种类包括：环丝藻 (*Ulothrix zonata*)、小颤藻 (*Oscillatoria tenuis*) 和小席藻 (*Phormidium tenus*)。

MRPP 显示，浑河水系着生藻类群落具有明显的空间异质性 ( $P < 0.0001$ )，且各组间 (Group 1 ~ 4) 的着生藻类群落也具有明显差异 ( $P_{\text{Group 1-2}} = 0.00005$ ,  $P_{\text{Group 1-3}} = 0.00002$ ,  $P_{\text{Group 1-4}} = 0.000004$ ,  $P_{\text{Group 2-3}} = 0.000001$ ,  $P_{\text{Group 2-4}} = 0.000002$ ,  $P_{\text{Group 3-4}} = 0.0196$ )。

浑河中上游地区的着生藻类的种类较多，其中以苏子河的种类为最多 (图 2A)，最高值可达 55 种，

平均值为 38 种；而在蒲河和浑河干流沈阳段藻类的种类数量较少，在某些样点 (蒲河沈阳段) 物种数量小于 5 种，在这些区域着生藻类种类数的平均值为 25 种；在浑河全流域尺度上，着生藻类物种数量的平均值为 28 种，且在 4 个组间差异显著 (Kruskal-Wallis 检验,  $\chi^2 = 17.74$ ,  $P < 0.001$ )。着生藻类密度较高的区域集中在苏子河中上游地区和浑河干流大伙房水库坝下至抚顺市河段 (图 2B)，密度最高值可达  $160 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，平均值  $6.67 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{cm}^{-2}$ ；而密度较低的区域则集中在蒲河和浑河干流沈阳段，密度最低值为  $200 \text{ cells} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，平均值为  $1 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{cm}^{-2}$ ；全水系着生藻类密度的平均值为  $2.6 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，且在 4 个组间差异显著 (Kruskal-Wallis 检验,  $\chi^2 = 19.11$ ,  $P < 0.001$ )。着生藻类香农多样性指数在全水系的分布没有明显的规律可循 (图 2C)；最高值为 4.6，出现在苏子河上游；最低值为 0.9，多出现在英额河上游河段，全水系着生藻类香农多样性指数平均值为 3.2，在 4 个组间差异不显著 (Kruskal-Wallis 检验,  $\chi^2 = 7.787$ ,  $P = 0.051$ )。

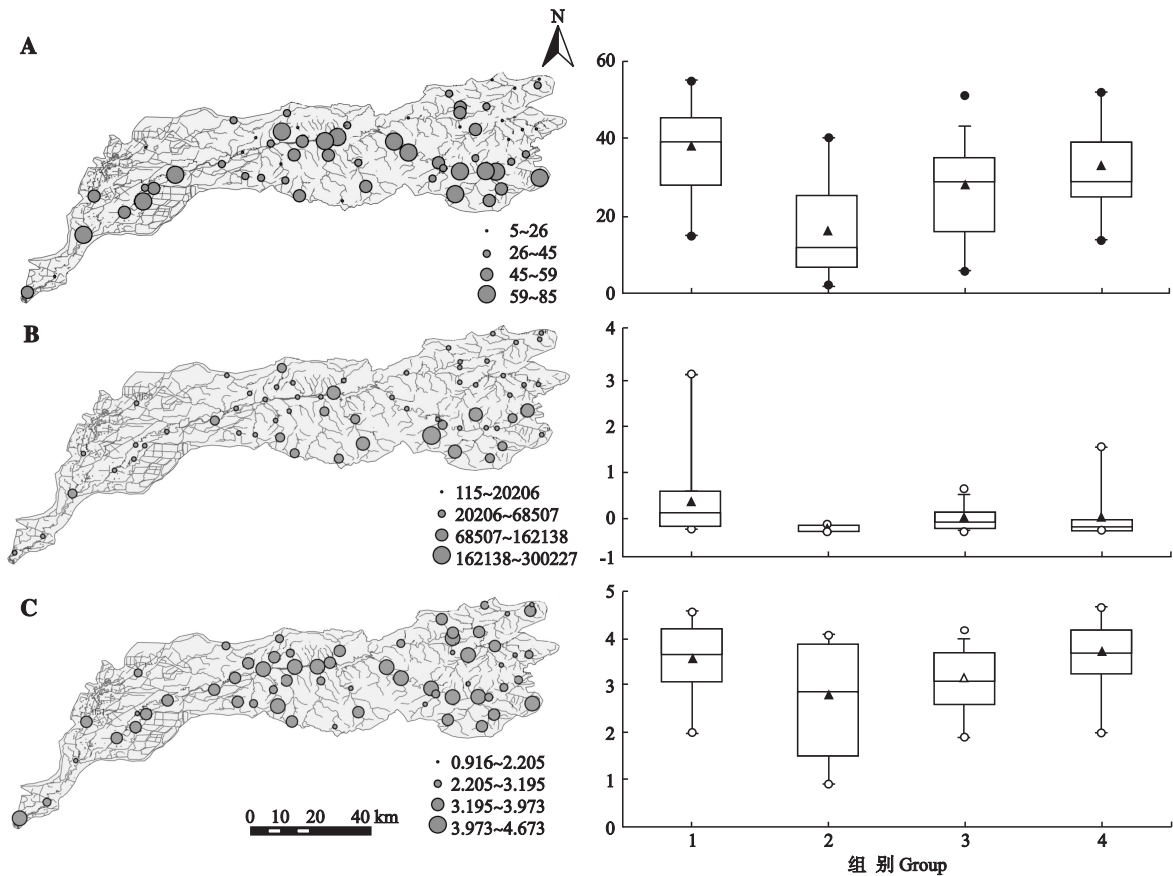


图 2 浑河水系着生藻类群落空间结构及各组参数箱体图

Fig. 2 Spatial community structure of periphyton and box-plots of each parameter of four groups in the Hunhe River.

A: 物种多度 Species richness; B: 密度 Density ( $\text{cells} \cdot \text{cm}^{-2}$ ); C: 香农多样性指数 Shannon diversity index.

表 1 浑河水系各类群的着生藻类指示种  
Table 1 Indicator species in each group in the Hunhe River

指示种 Indicator species	指示值 Indicator value				P 值 P value
	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	
变异直链藻 <i>M. varians</i>	35	9	16	10	0.0068
环状扇形藻 <i>M. circulare</i>	46	6	5	2	0.0002
环状扇形藻缢缩变种 <i>M. circulare</i> var. <i>constricta</i>	40	15	8	3	0.0013
沃切里脆杆藻 <i>F. vaucheriae</i>	42	14	8	4	0.0006
膨大桥弯藻 <i>C. turgida</i>	40	2	7	4	0.0011
弯曲桥弯藻 <i>C. pusilla</i>	44	9	2	0	0.0002
胡斯特桥弯藻 <i>C. hustedtii</i>	41	16	12	6	0.0001
弧形蛾眉藻 <i>Ceratoneis arcus</i>	47	3	2	0	0.0001
扁圆卵形藻 <i>Cocconeis placentula</i>	37	2	2	9	0.0034
最细丝藻 <i>U. tenuissima</i>	41	1	2	0	0.0004
环丝藻 <i>U. zonata</i>	35	2	4	0	0.0019
针形菱形藻 <i>N. acicularis</i>	3	0	44	21	0.0004
颗粒直链藻 <i>M. granulata</i>	5	1	1	40	0.0008
梅尼小环藻 <i>C. meneghiniana</i>	20	3	11	29	0.0021
短小舟形藻 <i>N. exigua</i>	0	0	0	25	0.0057
隐头舟形藻威蓝变种 <i>N. cryptocephala</i> var. <i>veneta</i>	10	6	2	35	0.0043
系带舟形藻休弗变种 <i>N. cincta</i> var. <i>heufleri</i>	0	1	0	28	0.0039
窄异极藻 <i>G. angustatum</i>	6	2	11	52	0.0001
池生菱形藻 <i>N. stagnorum</i>	10	0	6	32	0.0079
霍弗里菱形藻 <i>N. heuflerana</i>	17	3	18	39	0.0009
指示种数量 Number of indicator species	22	0	4	15	<0.05

表中仅列出极显著的指示种 Only the most dominant indicator species were presented.

IVA 结果表明,除 Group 2(浑河)以外其他组均检测出指示性着生藻类物种(表 1),其中 Group 1(苏子河)的指示性物种以扇形藻、桥弯藻和绿丝藻为主,Group 3(浑河中下游各支流)的指示性物种均为菱形藻,Group 4(浑河干流)的指示性物种以舟形藻和菱形藻为主。

浑河水系水环境理化因子 PCA 结果表明,随着特征值曲线的递减,两个因子轴被保留下来,它们解释了总体变量的 50.4%(图 3),起主要影响作用的环境因子包括: TSS、Cl<sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、TP、COD<sub>Cr</sub>、COD<sub>Mn</sub>和 N:P(溶解性元素化学计量比)。依据 PCA 的结果,对以上 8 个水环境理化因子进行 PCT(表 2),筛选出 TSS、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、COD<sub>Cr</sub>和 N:P 4 个环境因子进入 CCA。

CCA 显示,第 1 轴特征值(λ)为 0.106,在第 1 轴上物种与环境因子的相关系数为 0.717;第 2 轴特征值为 0.056,在第 2 轴上物种与环境因子的相关系数为 0.759(图 4A)。显著影响浑河水系着生藻类群落的环境因子为 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P(MCT, *F* = 1.77, *P* = 0.004),而其他 3 个水化因子的影响不显著(MCT, *P*<sub>TSS</sub> = 0.081, *P*<sub>COD<sub>Cr</sub></sub> = 0.851, *P*<sub>N:P</sub> = 0.427)。相关分析表明, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 与 N:P 具有极显著的相关性(表 2),而 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 也是值得关注的水体中重要的环境

因子,因此,再对 TSS、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、COD<sub>Cr</sub>和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 4 个环境因子进行 CCA。结果(图 4B)表明, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 同样是显著影响浑河水系着生藻类群落的环境因子

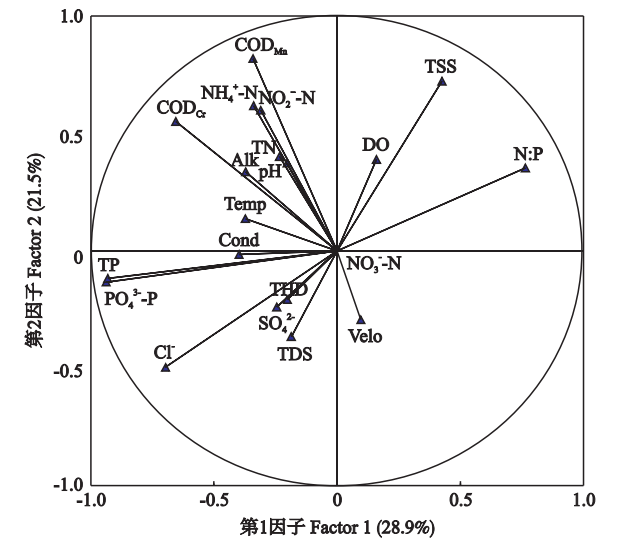


图 3 浑河水系水环境理化因子的主成分分析  
Fig. 3 Principal component analysis (PCA) of environmental factors of the Hunhe River.  
TSS:总悬浮物 Total suspended solid; TN:总氮 Total nitrogen; TP:总磷 Total phosphorus; Alk: 碱度 Alkalinity; THD: 硬度 Total hardness; COD<sub>Cr</sub>:化学耗氧量 Chemical oxygen demand; COD<sub>Mn</sub>:高锰酸盐指数 Permanganate index; DO:溶解氧 Dissolved oxygen; Velo:流速 Velocity; Cond:电导率 Conductivity; Temp:温度 Temperature. 下同 The same below.

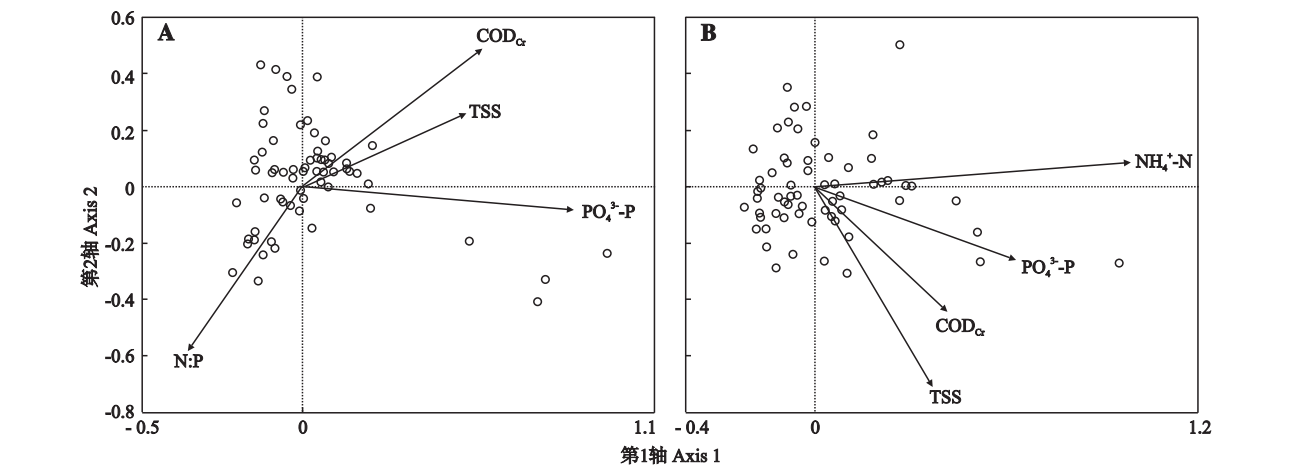


图 4 浑河水系水环境理化因子与着生藻类群落的典范对应分析

Fig. 4 Canonical correspondence analysis (CCA) of species-environmental relationships in the Hunhe River.

表 2 浑河水系水环境因子间的偏相关分析

Table 2 Partial correlation tests among environmental factors in the Hunhe River

	TSS	COD <sub>Cr</sub>	COD <sub>Mn</sub>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	TP	N : P
Cl <sup>-</sup>	0.22 <sup>ns</sup>	0.05 <sup>ns</sup>	-0.05 <sup>ns</sup>	0.60 <sup>***</sup>	-0.15 <sup>ns</sup>	0.15 <sup>ns</sup>	-0.18 <sup>ns</sup>
TSS	1	-0.12 <sup>ns</sup>	0.19 <sup>ns</sup>	0.24 <sup>ns</sup>	0.16 <sup>ns</sup>	-0.20 <sup>ns</sup>	0.14 <sup>ns</sup>
COD <sub>Cr</sub>		1	0.58 <sup>***</sup>	0.15 <sup>ns</sup>	0.23 <sup>ns</sup>	-0.23 <sup>ns</sup>	-0.10 <sup>ns</sup>
COD <sub>Mn</sub>			1	-0.08 <sup>ns</sup>	-0.31 <sup>*</sup>	0.37 <sup>**</sup>	-0.27 <sup>*</sup>
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N				1	0.04 <sup>ns</sup>	0.03 <sup>ns</sup>	0.47 <sup>***</sup>
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P					1	0.99 <sup>***</sup>	-0.05 <sup>ns</sup>
TP						1	-0.05 <sup>ns</sup>

TSS:总悬浮物 Total suspended solid; TN:总氮 Total nitrogen; TP:总磷 Total phosphorus; Alk:碱度 Alkalinity; THD:硬度 Total hardness; COD<sub>Cr</sub>:化学耗氧量 Chemical oxygen demand; COD<sub>Mn</sub>:高锰酸盐指数 Permanganate index; DO:溶解氧 Dissolved oxygen; Velo:流速 Velocity; Cond:电导率 Conductivity; Temp:温度 Temperature. ns; $P>0.05$ ; \*  $P<0.05$ ; \*\*  $P<0.01$ ; \*\*\*  $P<0.001$ .

表 3 浑河水系着生藻类生物完整性核心参数的分布范围及其赋分标准

Table 3 Distribution and scoring ranges of core P-IBI metrics in the Hunhe River

核心参数 Core metrics	参数赋分 Score of metrics				参数分布 Distribution of metrics			
	10	7	4	1	最大值 Max. value	最小值 Min. value	95 <sup>th</sup> 分位数 95 <sup>th</sup> percentile	5 <sup>th</sup> 分位数 5 <sup>th</sup> percentile
A7	0	1	1~3	>3	12	0	10	0
A9	>10.2	10.2~4.2	4.2~0	=0	68.3	0	33.7	0
A12	>0.92	0.92~0.88	0.87~0.81	<0.8	1.00	0.61	1.00	0.69
A13	<0.03	0.03~0.04	0.05~0.06	>0.07	0.19	0	0.09	0
A17	<0.01	0.01~0.05	0.06~0.12	>0.13	0.63	0	0.34	0
A20	>0.4	0.4~0.11	0.11~0	=0	0.95	0	0.68	0
A25	<0.06	0.06~0.22	0.22~0.35	>0.35	0.89	0	0.66	0.01
A26	>0.03	0.03~0.02	0.02~0.004	<0.004	0.27	0	0.11	0
A27	>1.0	1.0~0.41	0.41~0.14	<0.14	8.57	0.01	5.68	0.02
A28	>3.3×10 <sup>4</sup>	3.3×10 <sup>4</sup> ~1.1×10 <sup>4</sup>	1.1×10 <sup>4</sup> ~0.3×10 <sup>4</sup>	<0.3×10 <sup>4</sup>	3×10 <sup>5</sup>	120	1×10 <sup>5</sup>	300

A7:绿藻属的总数 Total genera of green algae; A9:敏感性物种相对多度 Relative species richness of sensitive diatoms; A12:硅藻分类单元相对多度 Relative richness of diatom taxa; A13:蓝藻分类单元相对多度 Relative richness of blue-green algae taxa; A17:菱形藻百分比 Percent of *Nitzschia*; A20:颤藻百分比 Percent of *Oscillatoria*; A25:可运动硅藻百分比 Percent of motile diatoms; A26:具柄硅藻百分比 Percent of diatoms with handle; A27:着生藻类叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content of periphyton; A28:着生藻类密度 Cell density of periphyton.

(MCT,  $F=2.99$ ,  $P<0.001$ ), 而其他 3 个水化因子的影响则不显著 (MCT,  $P_{\text{TSS}}=0.333$ ,  $P_{\text{COD}_{\text{Cr}}}=0.762$ ,  $P_{\text{PO}_4^{3-}\text{-P}}=0.498$ ).

## 2.2 栖息地环境质量和着生藻类生物完整性评价

构建浑河着生藻类生物完整性 (P-IBI) 的 10 个核心参数的分布范围和赋分标准见表 3, 基于 P-IBI

表 4 基于着生藻类生物完整性指数 (P-IBI) 的浑河水系水生态健康标准

Table 4 Assessment criteria for biological integrity of periphyton in the Hunhe River

健康 Excellent biological integrity	较好 Good biological integrity	一般 Moderate impairment	较差 Severe impairment
≥ 7.0	6.9 ~ 6.0	5.9 ~ 4.1	≤ 4.0

的浑河水系水生态系统健康标准见表 4. 浑河水系栖息地环境质量评价 (QHEI) 和着生藻类生物完整性评价 (P-IBI) 结果见图 5. QHEI 结果显示, 浑河生境质量较高的区域集中在上游的苏子河、浑河 (含红河和英额河) 和社河 (图 5A), 这 3 条支流也是大伙房水库的主要入库河流 (图 1); 大伙房水库以下浑河干流及相关支流生境质量较差. P-IBI 结果表明, 浑河水系上游的苏子河、浑河 (不含红河和英额河) 和社河着生藻类生物完整性较高, 但该区域内的红河和英额河着生藻类生物完整性较差 (图 5B); 与 QHEI 结果相类似, 大伙房水库以下浑河干流及相关支流着生藻类生物完整性较低. 浑河全流域范围内, 各调查样点的 QHEI 得分和 P-IBI 得分具有显著的正相关性 (Pearson 相关性检验,  $r = 0.444$ ,  $P < 0.001$ ); 此外, 各样点 P-IBI 得分与水体的  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  ( $r = -0.341$ ,  $P = 0.007$ ) 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的含量 ( $r = -0.309$ ,  $P = 0.014$ ) 均呈现显著的负相关性. 浑河

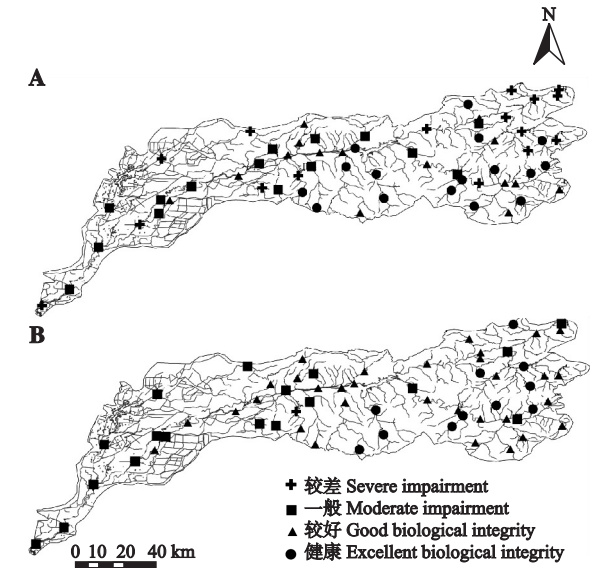


图 5 浑河水系栖息地环境质量评价及着生藻类生物完整性

Fig. 5 Environmental condition assessment and biological integrity of periphyton in the Hunhe River.

A: 栖息地环境质量评价 Assessment based on qualitative habitat evaluation index (QHEI); B: 着生藻类生物完整性评价 Assessment based on periphyton index of biological integrity (P-IBI).

全流域范围内, 4 个分组对于 QHEI 得分具有显著影响 (One-way ANOVA,  $P = 0.025$ ), 多重比较结果表明, Group 1 和 Group 2 的 QHEI 得分差异不显著 ( $P = 0.071$ ), Group 3 和 Group 4 的 QHEI 得分差异也不显著 ( $P = 0.55$ ), 但 Group 1、Group 2 和 Group 3、Group 4 间差异显著 ( $P < 0.05$ ); 同样, 4 个分组对于 P-IBI 得分具有显著影响 (One-way ANOVA,  $P = 0.024$ ), 多重比较结果表明, Group 1 和 Group 2 间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 而 Group 3 和 Group 4 间差异不显著 ( $P = 0.084$ ).

3 讨论

本研究中浑河水系着生藻类群落空间异质性显著, 经两次 CCA, 确定驱动因子主要为水环境中的可溶性营养元素: 活性磷 ( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ) 和铵氮 ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) (图 4). 尽管总悬浮物 (TSS) 和化学耗氧量 ( $\text{COD}_{\text{Cr}}$ ) 对着生藻类群落的影响不显著, 但它们仍旧是浑河水系主要的水环境因子 (图 3). 着生藻类是河流的初级生产者, 光合作用时需要氮、磷作为主要的营养元素<sup>[6]</sup>, 相关研究发现, 河流中氮和磷的含量对着生藻类群落有着显著的影响<sup>[9,20]</sup>, 这一现象在本研究中得到了验证. 不仅如此, 氮和磷对着生藻类群落的影响还与其供应量以及洪水频率有关<sup>[21]</sup>, 与洪水频发时期相比, 水文特征相对稳定的时期, 河流中着生藻类群落对氮、磷的供应量更为敏感<sup>[20-21]</sup>. 本次调查的采样时间为 5 月, 尚未进入浑河流域的雨季, 全流域范围内雨量相对较少, 河水的流量和流速较为稳定, 全流域范围内流速平均为  $0.465 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 此外, 活性磷和铵氮还是浑河水系主要的水环境因子 (图 3), 这些都为本研究中检验出活性磷和铵氮是驱动浑河水系着生藻类群落空间异质性的环境因子提供了条件.

尽管在本研究中 N : P 对着生藻类群落影响不显著, 但 N : P 与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  显著的相关性似乎暗示营养元素 (N、P) 对着生藻类的影响可能遵循生态化学计量定律<sup>[22]</sup>, 营养元素的化学计量比 (Stoichiometry) 通过影响着藻类的生长和繁殖, 进而决定了着生藻类的群落结构. 作为自养生命体的藻类, 其吸收和利用营养元素的方式受自身内禀元素计量比 (C : N : P) 的影响<sup>[23]</sup>, 特定元素计量比的环境中, 不同的藻类会有不同的生长和繁殖速率, 因而形成了不同的群落结构. 关于元素化学计量比对河流水生生物群落影响的研究已有报道<sup>[24]</sup>, 而在国内尚未开展相关方面的研究.



本研究中 4 个样点组 (Group) 的划分主要依靠浑河流域水系分布、地貌特征和水环境特征 (以  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  衡量). 苏子河 (Group 1) 为浑河主要支流, 流域内森林覆盖率较高, 人类干扰相对较少, 水质较为清澈, 基本达到国家地表 II 类水标准; 而同样位于水系上游区域的浑河 (Group 2), 由于人类活动的影响, 水环境明显劣于苏子河, 水质为 III ~ IV 类, 个别样点为 V 类水体; 大伙房水库以下浑河干流 (Group 4), 流域内城镇化明显, 河道两岸均筑有水泥堤坝, 水质较差, 均为 IV ~ V 类水体; 浑河干流的各条支流 (Group 3) 中, 位于城镇化明显区域内 (沈阳和抚顺以北) 的支流 (如蒲河), 水环境特征类似于 Group 4, 而位于城镇化程度较低的丘陵山地区域内的支流 (如社河、东洲河), 水环境特征类似于 Group 1.

由于流域内土地利用方式和水环境理化特征的不同, Group 1 ~ 4 的着生藻类群落差异显著. 驱动河流着生藻类群落结构形成空间格局的环境因子会因流域的外源性营养盐类型<sup>[9]</sup>、土地利用模式<sup>[20,25]</sup>和人类活动强度<sup>[4,26]</sup>的不同而不同, 而这些因素主要是通过改变河流生态系统的生物地球化学循环和生境质量, 从而进一步影响藻类群落的物种组成和相对多度<sup>[4]</sup>. 指示种分析结果同样支持以上论断 (表 1), 可以看出 Group 1 的指示性硅藻物种以扇形藻和桥弯藻为主, 这两类藻中大多数种类均为敏感性物种, 对氮的利用等级为 1 ~ 2 级<sup>[27]</sup>; 而 Group 3 和 Group 4 的指示性物种多为菱形藻, 该类群喜好高氮的环境, 对氮的利用等级为 3 ~ 4 级<sup>[27]</sup>. 不同流域环境内指示性物种的差异, 进一步验证了在浑河水系内, 铵氮是驱动着生藻类群落空间差异的主要水环境因子.

由于同处于一个水生态一级分区<sup>[15]</sup>, 本研究中浑河水系着生藻类生物完整性评价体系应用的是太子河水系筛选出了 10 个着生藻类参数 (表 3). 尽管在特定区域内, QHEI 与 P-IBI 的评价结果出现矛盾 (如英额河和红河, 图 5), 但相关性分析显示, 浑河全流域范围内, QHEI 得分和 P-IBI 得分具有显著的正相关性, 表明 P-IBI 评价结果具可靠性; 而 P-IBI 得分与水体  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量呈显著的负相关性, 则进一步支持了以上论断. 尽管着生藻类生物完整性评价被认为是一种高效、灵敏和简便的河流健康评价方法<sup>[13]</sup>, 但由于该类群物种数量较大, 且样品处理与分析过程繁杂<sup>[5]</sup>, 因而没有得以广泛应用. 本研究结果表明, 在较大的流域尺度上 (如一级

分区), 应用同一套 P-IBI 评价指标体系并不会影响评价的实际效果; 此外, 本研究中 P-IBI 核心参数体系中大多反映的是着生藻类群落属一级的信息, 而属一级信息的获得要远比种一级的更简便和高效, 这些都为今后在全国范围内推广应用着生藻类评价河流生态状况提供了基础.

P-IBI 和 QHEI 的评价结果基本反映了浑河流域水环境理化特征和流域生境质量特征 (图 5). 浑河水系上游的苏子河, 森林覆盖率较高, 点源和面源污染较少, 流域自然生境保存较为完整, 挖沙、采矿等破坏着生藻类生境质量的情况相对较少, 因而 P-IBI 和 QHEI 的评价为健康. 而同位于该区域的浑河, 出现大规模采矿和挖沙等人类活动, 着生藻类生境破坏严重; 上游清原县及周边县市有大量污水注入, 水环境质量相对较差; 尽管该区域生境质量相对较好 (QHEI 评价为健康较好), 但着生藻类生物完整性较低, 从而反映出生境的丧失和水体污染对于着生藻类群落的显著影响. 城镇化程度较高的浑河干流及周边支流, 河流健康等级普遍较低, 该区域分布有抚顺和沈阳两座大型工业城市, 人类活动造成的水环境污染严重, 河底淤积大量泥沙, 着生藻类生境基本丧失, 因而 P-IBI 和 QHEI 得分较低. 由于城镇化以及人类活动造成的着生藻类群落结构显著改变, 进而反映河流不同健康等级的例证在国内外的相关研究中普遍存在<sup>[4,6,20,28]</sup>. 本研究中, 浑河全流域范围内的 P-IBI 得分与反映城镇化及人类活动强度的水环境因子 (铵氮和活性磷) 具有显著的负相关性, 从而支持了以上论断.

## 参考文献

- [1] Hughes DL, Gore JA, Brossett MP, *et al.* Rapid Bioassessment of Stream Health. New York: CRC Press, 2010
- [2] Stevenson RJ, Pan YD. Assessing environmental conditions in rivers and streams with diatoms// Stoermer EF, Smol JP, eds. The Diatom: Applications for the Environmental and Earth Sciences. Cambridge: Cambridge University Press, 2004
- [3] Hill BH, Stevenson RJ, Pan YD, *et al.* Comparison of correlation between environmental characteristics and stream diatom assemblages characterized at genus and species levels. *Journal of the North American Benthological Society*, 2001, **20**: 299~310
- [4] Walker CE, Pan YD. Using diatom assemblages to assess urban stream conditions. *Hydrobiologia*, 2006, **561**: 179~189
- [5] Kelly MG, Penny CJ, Whitton BA. Comparative performance of benthic diatom indices used to assess river



- water quality. *Hydrobiologia*, 1995, **302**: 179–188
- [6] Stevenson RJ, Bothwell ML, Lowe RL. Algal Ecology: Freshwater Benthic Ecosystems. San Diego, USA: Academic Press, 1996
- [7] Tang T, Cai QH, Liu JK. Using epilithic diatom communities to assess ecological condition of Xiangxi River system. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, **112**: 347–361
- [8] Jia X-H (贾兴焕), Wu N-C (吴乃成), Tang T (唐涛), *et al.* Spatio-temporal variation of epilithic algae in Xiangxi River system. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(4): 881–886 (in Chinese)
- [9] Wu NC, Tang T, Qu XD, *et al.* Spatial distribution of benthic algae in the Gangqu River, Shangrila, China. *Aquatic Ecology*, 2009, **43**: 37–49
- [10] Zhu H-Z (朱惠忠), Chen J-Y (陈嘉佑). Bacillariophyta of the Tibet Plateau. Beijing: Science Press, 2000 (in Chinese)
- [11] Hu H-J (胡红军), Wei X-Y (魏心印). The Freshwater Algae of China: Systematics, Taxonomy and Ecology. Beijing: Science Press, 2006 (in Chinese)
- [12] State Environmental Protection Administration of China (国家环境保护总局). Monitoring and Determination Methods for Water and Wastewater. 4th Ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002 (in Chinese)
- [13] Barbour MT, Gerritsen J, Snyder BD, *et al.* Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish. 2nd Ed. Washington DC: Office of Water, U. S. Environmental Protection Agency, 1999
- [14] Zheng B-H (郑丙辉), Zhang Y (张远), Li Y-B (李英博). Study of indicators and methods for river habitat assessment of Liao River Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2007, **27**(6): 928–936 (in Chinese)
- [15] Meng W (孟伟), Zhang Y (张远), Zheng B-H (郑丙辉). Study of aquatic ecoregion in Liao River Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2007, **27**(6): 911–918 (in Chinese)
- [16] Abell R, Thieme ML, Revenga C, *et al.* Freshwater ecoregions of the world: A new map of biogeographic units for freshwater biodiversity conservation. *BioScience*, 2008, **58**: 403–414
- [17] Schmitz OJ. Ecology and Ecosystem Conservation. Washington, DC: Island Press, 2007
- [18] Wang B-X (王备新), Yang L-F (杨莲芳), Hu B-J (胡本进), *et al.* A preliminary study on the assessment of stream ecosystem health in south of Anhui Province using Benthic-Index of Biotic Integrity. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(6): 1481–1490 (in Chinese)
- [19] Zhang Y (张远), Xu C-B (徐成斌), Ma X-P (马溪平), *et al.* Biotic integrity index and criteria of benthic organisms in Liao River Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2007, **27**(6): 919–927 (in Chinese)
- [20] Leland HV, Porter SD. Distribution of benthic algae in the upper Illinois River basin in relation to geology and land use. *Freshwater Biology*, 2000, **44**: 279–301
- [21] Biggs CJF. The contribution of flood disturbance, catchment geology and land use to the habitat template of periphyton in stream ecosystem. *Freshwater Biology*, 1995, **33**: 419–438
- [22] Zeng D-H (曾德慧), Chen G-S (陈广生). Ecological stoichiometry: A science to explore the complexity of living systems. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2005, **9**(6): 1007–1019 (in Chinese)
- [23] Sterner RW, Elser JJ. Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecular to the Biosphere. Princeton: Princeton University Press, 2002
- [24] Evans-White MA, Lamberti GA. Stoichiometry of consumer-driven nutrient recycling across nutrient regimes in streams. *Ecology Letters*, 2006, **9**: 1186–1197
- [25] Leland HV. Distribution of phytobenthos in the Yakima River basin, Washington, in relation to geology, land use, and other environmental factors. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 1995, **52**: 1108–1129
- [26] Wu NC, Tang T, Zhou SC, *et al.* Changes in benthic algal communities following construction of a run-of-river dam. *Journal of the North American Benthological Society*, 2009, **28**: 69–79
- [27] Van Dam H, Mertens A, Sinkeldam J. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands. *Aquatic Ecology*, 1994, **28**: 117–133
- [28] Hui X-J (惠秀娟), Yang T (杨涛), Li F-Y (李法云), *et al.* Health assessment on aquatic ecosystem in Liaohe River of Liaoning Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(1): 181–188 (in Chinese)

---

作者简介 殷旭旺,男,1980年生,副教授. 主要从事水域生态学研究. E-mail: yinxuwang@dlou.edu.cn

责任编辑 肖红

---