

doi: 10.7541/2017.29

基于附石藻类生物完整性指数对汝溪河水生态系统健康的评价

杨燕君¹ 徐 沙¹ 刘 瑞² 许金铸¹ 施军琼¹ 吴忠兴¹

(1. 西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆市三峡库区植物生态与资源重点实验室, 北碚 400715; 2. 武汉市环境监测中心, 武汉 430015)

摘要: 以三峡库区支流-汝溪河自然河段为研究区域, 调查了自然河段内9个样点的附石藻类群落和水环境理化特征, 并在此基础上应用生物完整性评价指数(Index of Biotic Integrity, *IBI*), 对汝溪河水生态系统进行健康评价。结果表明, 汝溪河自然河段附石藻类群落结构具有明显的空间和时间异质性, 驱动附石藻类群落结构形成的水环境因子为电导率、浊度、硝态氮和溶解氧。*IBI*结果表明, 上游生物完整性较高; 中下游和下游生物完整性较差; 枯水期生物完整性较高, 而平水期和丰水期生物完整性较低。由此可见, 汝溪河自然河段生物完整性一般, 表明汝溪河水生态系统已处于亚健康程度。

关键词: 附石藻类; 生物完整性指数; 群落结构; 水生态系统; 健康评价

中图分类号: Q143

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2017)01-0228-10

随着人类对河流水资源开发和利用, 河流生态系统产生了许多问题如: 河道断流、枯竭、生物多样性退化以及水环境污染等, 导致了河流生态系统受到严重破坏^[1], 因此, 开展河流生态系统健康评价已受到广泛关注。

着生藻类(Periphyton)是河流生态系统食物链的起点, 也是最重要的初级生产者。其可将无机营养元素转移至更高级的有机生命体, 担负着物质循环和能量流动的重要任务^[2]。由于其群落的更新时间较短、物种多样性较高、群落快速响应环境变化及采集方便等特点, 因而着生藻类已被广泛应用于河流生态系统环境评价^[3]。近年来, 利用着生藻类群落完整性指数(Index of Biotic Integrity, *IBI*)对河流生态系统的进行健康评价已受国际学者的关注^[4-7], 然而国内针对其相关的研究相对较少^[8-10]。

为探讨三峡库区重点支流-汝溪河自然河段的水生态系统健康, 本研究调查了附石藻类的群落结构特征, 并在此基础上应用单因子评价(硅藻生物评价指数)和生物完整性评价体系对汝溪河自然河段水生态系统进行健康评价, 旨在为我国河流附石藻类健康评价指标的选择和方法的建立提供参考, 还为汝溪河流域水生态系统健康的维护及管理提

供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

汝溪河位于库区的腹心地带, 是三峡库区长江重要一级支流之一。其发源于重庆万州区分水镇三角凼, 流经培文镇, 在梁平县境内和汝溪河另一支流交汇, 流经忠县汝溪镇, 在汝溪河下游与池溪沟、郭河以及纳溪沟3条二级支流汇合后经忠县涂井乡注入长江。全流域面积720 km², 主河道长54.5 km, 在忠县境内流域面积272.9 km², 主河道长25.4 km。多年平均径流总量达1.49×10⁹ km³^[11]。

1.2 样点设置

在本研究中, 在汝溪河自然河段布设了9个样点(图1)进行研究, 范围为北纬30°27'35"—30°31'58", 东经108°01'11"—108°06'15"。参照位点以人类干扰较少, 水环境理化质量较高, 且流域生境保持较为完整的区域为原则^[12], 选定样点S1为控制样点。分别于2013年4月(平水期)、8月(丰水期)、12月(枯水期)以及2014年4月进行样品采集和理化指标的测定。为便于比较, 每次采样均在当月中旬, 尽量选晴天进行。

收稿日期: 2016-01-16; 修订日期: 2016-04-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(31170372)资助 [Supported by National Natural Science Foundation of China (31170372)]

作者简介: 杨燕君(1991—), 女, 四川广安人; 硕士; 主要从事藻类生理生态学研究。E-mail: 18883341908@163.com

通信作者: 吴忠兴(1975—), 男, 福建邵武人; 教授; 主要从事藻类生理生态学研究。E-mail: wuzhx@swu.edu.cn

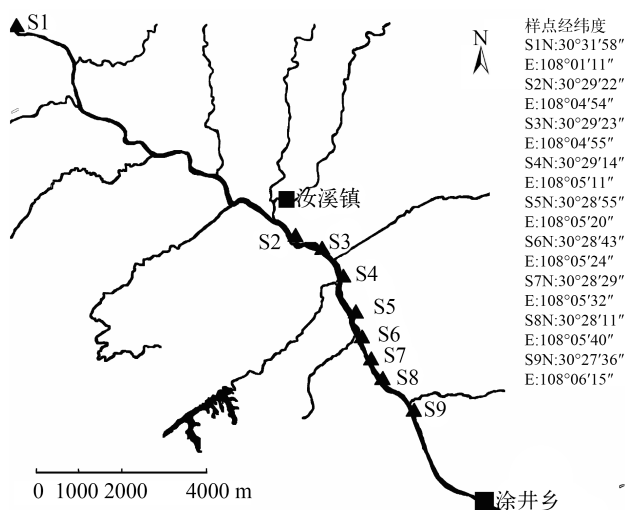


图1 样点分布图

Fig. 1 Sampling stations in the Ruxi River

1.3 附石藻类采集、处理及定性、定量分析

附石藻类采集依据美国环保署(EPA)的采样方法^[13]。将采集的附石藻类样品混匀,分两份进行保存,一份取50 mL加入鲁哥式固定液固定,在400倍显微镜下观察和统计,得到蓝绿藻等藻类定性定量数据。另一份取50 mL藻液加入福尔马林固定,经酸处理后分别在1000倍油镜下和扫描电子显微镜下对硅藻进行鉴定。藻类鉴定参考《中国淡水藻类》^[14]、《中国淡水藻类-系统、分类及生态》^[15]及《欧洲硅藻鉴定系统》^[16]。最后计算各样点的藻类个体数总和,并换算为单位面积石块上的藻类密度(单位: ind./m²)。

1.4 水体理化参数的测定

各采样点的水温、pH、电导率、溶解氧(DO)、氧化还原电位及浊度用多参数水质分析仪DS5/DS5X (Hydrolab, 美国)现场测定;透明度(SD)用塞氏盘测量,水体流速用国产LS45A型旋杯式流速仪现场测定。每个样点,取混合水样,用500 mL白色塑料瓶装,于48h内带回实验室,根据标准方法^[17]测定水体中碱度和叶绿素 a ;总氮、总磷、正磷酸盐、铵态氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、可溶性二氧化硅、高锰酸盐指数(COD_{Mn})等化学指标通过Flowsys连续流动分析仪(SYSTEA, 意大利)进行测定。

1.5 数据分析和处理

附石藻类群落结构特征和水环境因子分析

各样点的附石藻类计算以下群落特征参数:物种多度、密度、均匀度指数(Margalef指数)和香农多样性指数(Shannon-wiener指数)。

为了研究采样月份对环境因子的影响以及采

样点空间变化对环境因子的影响,以18项环境因子为观测变量,分别以时间和空间为控制变量进行单因素方差分析,研究汝溪河水环境因子时空变化的显著性。再分别用主成分分析(Principal component analysis, PCA)和偏相关分析(Partial correlation test, PCT)对各样点水环境理化因子进行筛选,以判定显著影响附石藻类群落空间分布特征的水环境因子($P < 0.05$)。进行PCA和PCT分析时,除pH外的所有水体理化参数和附石藻类相对多度均进行对数转换 $[\lg(x+1)]$ 。

附石藻类生物完整性(IBM)评价指标体系 选取对干扰响应较为敏感的30个特征参数作为候选指标,这些特征参数属于6类属性:现存量、硅藻评价参数、多样性指数、生长型指数、相似度指数、物种组成参数(表1)。对30个候选指标分别进行分布范围、判别能力和相关性分析的筛选^[12, 18, 19]。具体包括如下:(1)分布范围的筛选:若某指标超过95%分位数时,则放弃该指标;(2)判别能力的筛选:利用箱体图比较受损点和参照点各候选指标在25%—75%分位数内重叠的情况,初步筛选出判别能力强的指标;(3)对判别能力强的指标进行Pearson相关性检验,若两个指标显著相关($R > 0.80$)则取其中一个能含大部分信息的指标。

对上述确定的核心参数用比值法进行赋分^[20],累加得到最终的IBM得分。然后,以参照样点IBM得分值的25%分位数作为健康评价的期望值^[18],若某一样点的IBM分值大于期望值,则表示该样点评价结果为健康;当样点分值小于期望值时,将其分布范围进行四等分,确定出亚健康、一般、较差、极差4个等级的划分标准。

此外,为了甄别IBM体系的可靠性,将各调查样点的IBM分值与筛选出的主要环境因子(流速、总氮、电导率、DO、COD_{Mn}、碱度等)进行相关性分析。

数据分析 应用SPSS 16.0 进行单因素方差(One-way ANOVA)、PCT和Pearson相关性分析;PCA分析在Statistica 8.0上进行,各个评价参数及干扰指数得分值在各生境的变化箱形图由Origin 8.6完成。

2 结果

2.1 附石藻类群落结构特征

汝溪河自然河流段共观察到硅藻32属179种,其中舟形藻属(*Navicula*)(31种)、异极藻属(*Gomphonema*)(20种)、菱形藻属(*Nitzschia*)(27种)、桥弯藻(*Cymbella*)(13种)以及双菱藻(*Surirella*)(10种)为

表 1 附石藻类群落参数
Tab. 1 Community attributes of epilithic algae

序号Serial number	参数Parameter	意义Significance
现存量指数		
M1	叶绿素 <i>a</i> 浓度	附石藻类叶绿素 <i>a</i> 含量
硅藻评价参数		
M2	硅藻耐污指数PTI	各硅藻耐污值的加权平均值
M3	硅藻属指数GDI	清洁水体偏好型硅藻与污染水体偏好型硅藻含量的比值
M4	pH指数(R)	
M5	盐度指数(H)	
M6	湿度指数(M)	
M7	氮代谢指数(N)	硅藻对各参数耐受值的加权平均值
M8	需氧指数(O)	
M9	腐殖度指数 (S)	
M10	营养状态指数(T)	
多样性指数		
M11	香农-威纳多样性指数	度量均匀度和丰富度的综合指数
M12	Margalef多样性指数	度量丰富度的指数
M13	Pielou均匀度指数	反映物种分布均匀度
M14	物种数	所观测到的物种数目
M15	属数目	所观测到的属数目
生长型指数		
M16	俯伏型相对含量%	俯伏生长型属的相对丰富度
M17	直立型相对含量%	直立生长型属的相对丰富度
M18	有柄型相对含量%	有柄生长型属的相对丰富度
M19	非附石型相对含量%	非附石生长型属的相对丰富度
M20	活动型相对含量%	活动生长型属的相对丰富度
相似度指数		
M21	群落相似性指数PSc	硅藻群落相似性百分比
物种组成参数		
M22	硅藻总密度	单位面积的硅藻总数目
M23	优势种密度	单位面积的优势种数目
M24	优势种的相对丰富度	优势种数目相对总数目的百分比
M25	曲壳藻属相对曲壳藻属、舟形藻属总和的百分含量	曲壳藻属密度与曲壳藻属、舟形藻属和的比值
M26	桥弯藻属相对桥弯藻属、舟形藻属总和的百分含量	桥弯藻属密度与桥弯藻属、舟形藻属和的比值
M27	属的相对丰富度	某个属密度相对总密度的百分比
M28	属内物种数	某个属的物种数
M29	属内物种数的相对含量	某个属的物种数占总物种数的百分含量
M30	运动型硅藻百分数	运动型硅藻属的相对丰富度

主要优势属, 分别占总种数的17.9%、14.5%、11.7%、7.3%和5.6%。

附石硅藻总密度和叶绿素*a* (Chl. *a*)含量都能在一定程度上表明附石藻类的生物量。从图 2 可以看到, 就Chl. *a*而言, 平水期(4月份)含量最低, 丰水期(8月份)含量最高, 而枯水期居中。藻密度与Chl. *a*含量趋势具有较大差异, 丰水期时(8月份), 硅藻总密度为最低, 整体低于 6.5×10^5 ind./cm², 枯水期时

(12月份)则相对较高, 部分样点(S8)甚至达到 3.8×10^6 ind./cm²。而根据采样点的不同, 丰水期和平水期各样点之间无明显差异, 枯水期时位于下游的样点S8、S9相对较高。无论是丰富度(Margalef指数)还是多样性(Shannon-wiener指数), 参考样点的附石藻类丰富度和多样性均高于其他样点。而枯水期时, 最下游样点(S8, S9)硅藻多样性和丰富度则低于其他样点。

以相对丰富度大于5%划分优势属, 汝溪河不同时期附石藻类优势属相对丰富度变化较大(图 3) *Gomphonema*、*Navicula*、*Nitzschia*及*Cymbella*为主要优势属, 采样期间大部分样点其相对丰富度均大于5%。*Cyclotella*仅在平水期时为优势属, 除参考样点外*Cyclotella*在其他样点相对丰富度均大于5%(10.18%—36.70%), *Cocconeis* sp.在平水期和丰水期为优势种, 平水期时, 除样点S6与S9(分别为4.74%和4.36%)外, 相对丰富度为10.86%—44.04%。

Melosira sp.在丰水期和枯水期时均为优势种, *Fragilaria*和*Synedra*仅在丰水期部分样点为优势属。就空间分布而言, *Melosira* sp.、*Cyclotella* sp.以及*Achnanthes* sp.倾向与分布在汝溪河上游, 而*Fragilaria* sp.与*Synedra* sp.则主要倾向于分布在下游的采样点。

2.2 水环境因子分析

水环境理化因子One-way ANOVA分析表明: 光照(PAR)、水温(Tem)、 NO_2^- -N、TN、 SiO_2 、

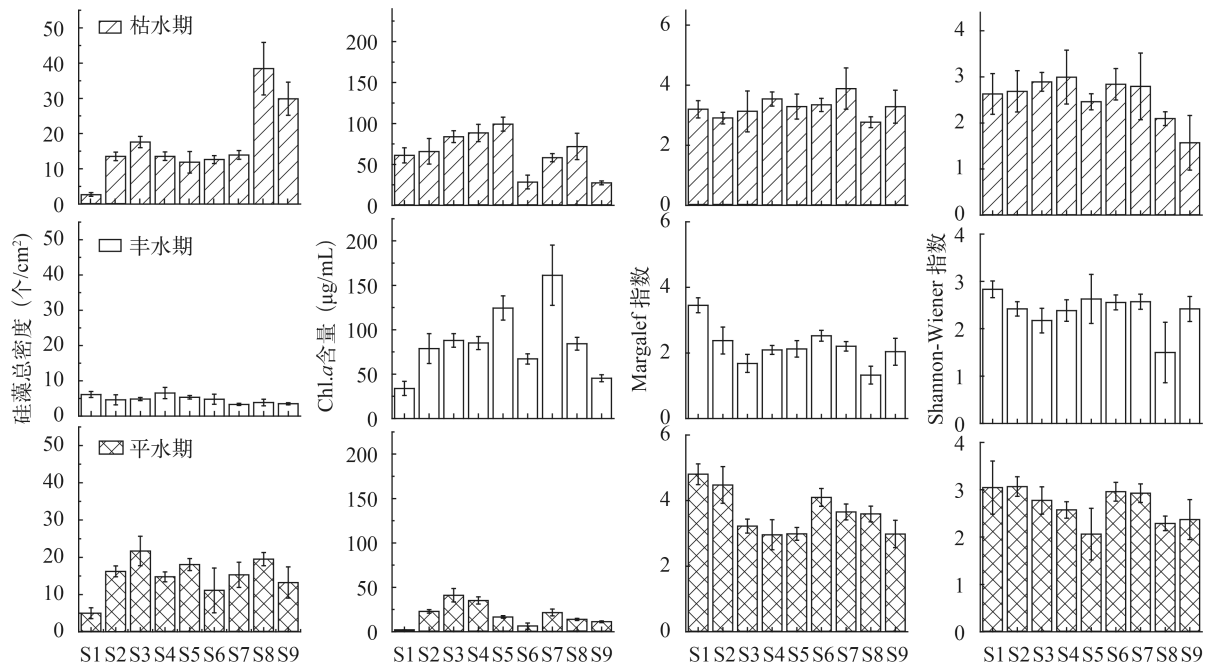


图 2 汝溪河附石藻类群落结构特征

Fig. 2 Community structure of epilithic algae in the Ruxi River

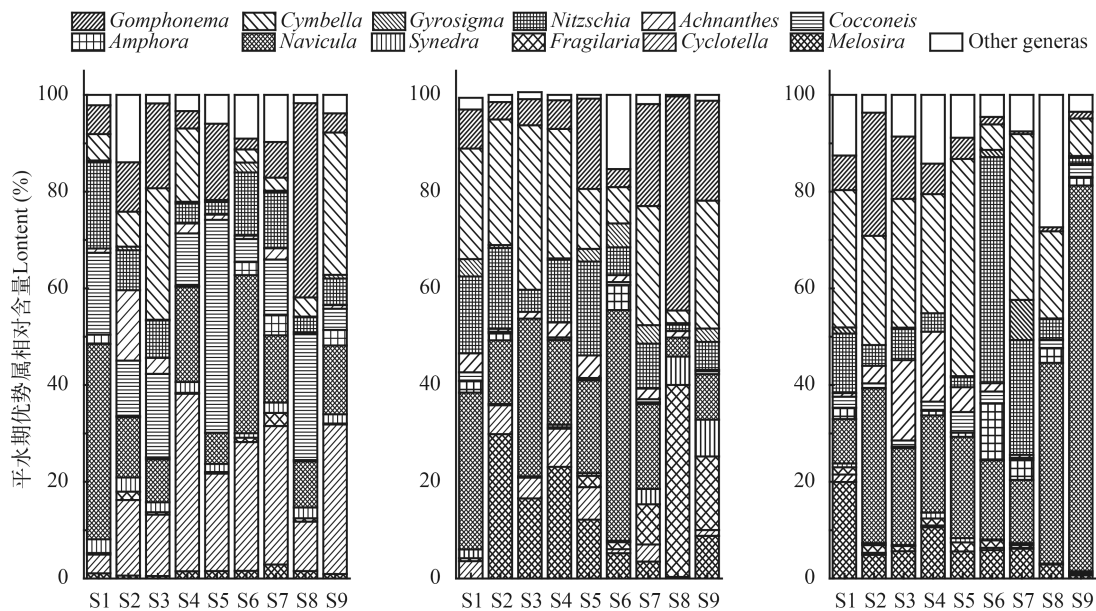


图 3 汝溪河附石藻类优势属不同时期相对丰富度

Fig. 3 The relative abundance of epilithic algae dominant genera in different seasons of the Ruxi River

pH、浊度以及总碱度等指标随采样时间的变化有显著差异($P<0.05$), 而 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P、TP、流速、氧化还原电位(ORP)、电导率(SPC)、 COD_{Mn} 等则根据采样点的不同, 具有显著的空间差异($P<0.05$)。如图4所示, 自上游至下游, NO_3^- -N含量上升, 而 NH_4^+ -N含量逐渐下降。 PO_4^{3-} -P、TP趋势一致, 自上游向下, 两者均有上升趋势, 最下游样点分别高达0.11和0.20 mg/L。氧化还原电位与电导率最大值出现在参考样点S1, 分别为389.3 mV和528.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 两者整体趋势一致, 自上游向下, 逐渐降低, 最下游样点S9稍有不同, 较与之邻近的样点高, 分别达到354.7 mV和416.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

PCA结果表明(图5), 不同时期对环境影响较大的主要水环境因子有所差别, 枯水期主要有 NH_4^+ -N、TN、 PO_4^{3-} -P、浊度(Tur)、溶解氧(DO)、

TP、 SiO_2 、 COD_{Mn} ; 丰水期影响流域的水环境因子主要有PAR、SPC、Tem、 SiO_2 、Tur、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N; 平水期主要有浊度、TP、 NO_3^- -N、 PO_4^{3-} -P、 SiO_2 、SPC、Tem、 COD_{Mn} 8个水环境因子。对这些水环境理化因子间的偏相关性分析(PCT)分析, 结果表明, 显著影响汝溪河附石藻类群落结构的环境因子为DO、Tur、SPC、 NO_3^- -N (MCT, $P<0.05$)。

2.3 IBI体系的建立和健康评价结果

经单因素方差(One-way ANOVA)分析剔除了Margalef指数、Shannon-Wiener指数、PTI耐污指数、pH、需氧指数等共计25个参数; 通过箱体图分析, 共有38个IBI参数进入Pearson相关性检验, 最终筛选出8个参数成为构建汝溪河IBI体系的核心参数(表2、图6), 即硅藻总密度(Total density)、物种数(Species)、直立型相对含量% (% erect individuals)、

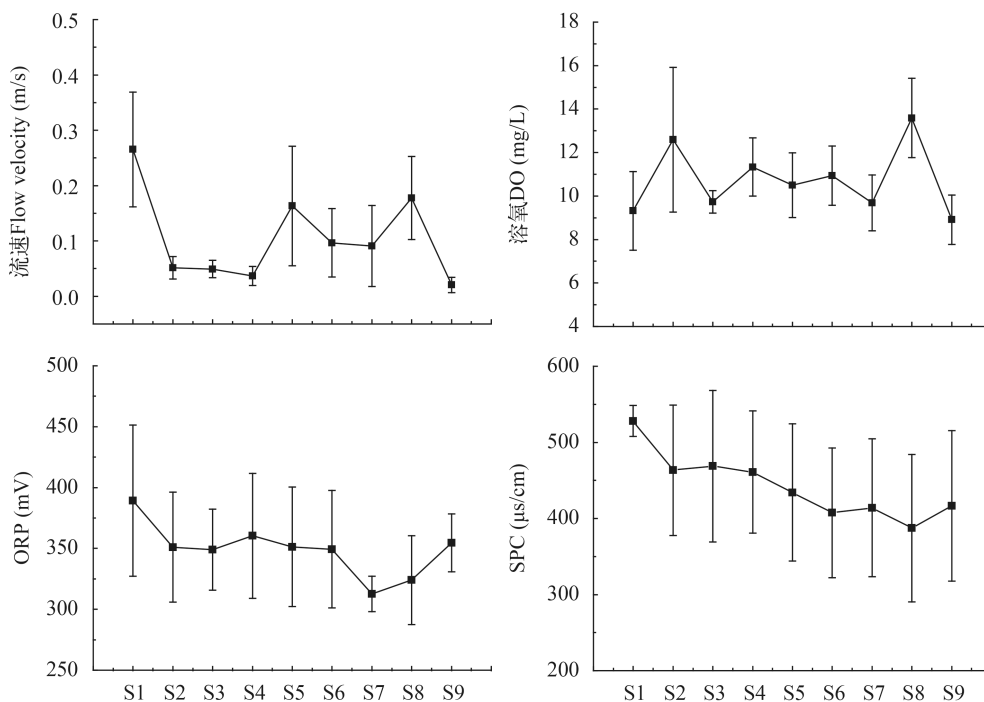


图4 汝溪河水环境因子含量年度变化

Fig. 4 Spatial fluctuation of environmental factors content in the Ruxi River

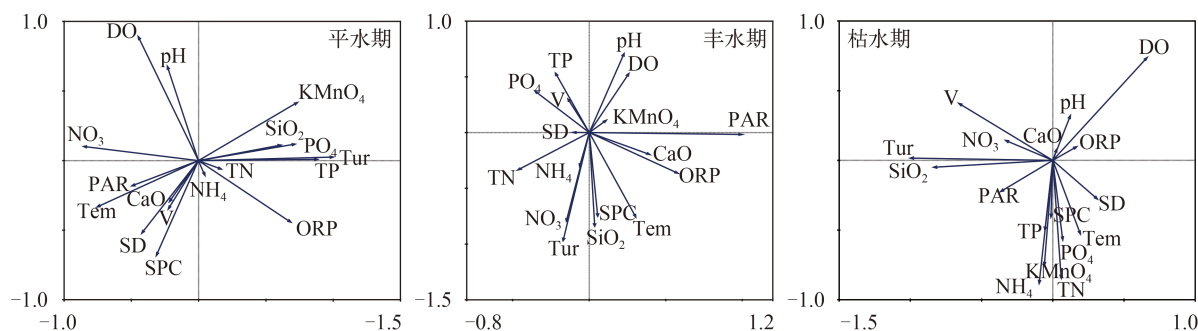


图5 汝溪河水环境因子的主成分分析(PCA)

Fig. 5 Principal component analysis of environmental factors of the Ruxi River

运动型硅藻所占比例(NNS%)、3种优势属的相对丰富度(*Cyclotella*、*Achnanthes*、*Gomphonema*)及营养状态指数(Trophic state), 这8项参数分别用A1—A8来表示。根据各核心参数值在所有样点中值的统计分布, 制定各核心参数的赋分标准(以枯水期数据为例, 表3)。

2.4 汝溪河水生态系统健康评价结果

采用IBI值分布的25%分位数作为健康评价的标准值(4.740), 确定汝溪河水生态系统健康标准(表4)。结果表明, 汝溪河所有样点中IBI值的变化范围为1.85—6.29, 平均值为4.53, 平均值处于健康评价标准的亚健康水平, 表明汝溪河自然河段生物完整性一般, 水生态系统处于亚健康程度。就不同样点而言, IBI值具有明显的空间异质性, 最上游的参照位点(S1)和最下游的样点(S9)IBI得分明显高于其他样点, 中上游位点水环境状况最差, 都处于亚健康状态(表5)。而不同时期汝溪河的健康状况也不同, 在枯水期的样点中, 4个为健康, 4个为亚健康, 1个为较差; 丰水期有5个健康样点, 2个亚健康样点, 2个较差样点; 平水期有6个健康样点, 2个亚健康样点, 1个较差样点; 总体显示汝溪河平水期和丰水期的健康程度优于枯水期的趋势。

汝溪河自然河段各调查点位的IBI得分与主要水环境因子(SPC、 NO_3^- -N、Tur和DO)的相关性分析结果表明, 汝溪河全流域范围内, IBI得分与 NO_3^- -N和呈显著的负相关关系(Person correlation tests, $r=-0.735$, $P<0.05$), 与DO也是负相关($r=-0.723$, $P<0.05$), 但与SPC和Tur相关性不显著($P>0.05$)。

3 讨论

硅藻具有种类多、分布广等特点, 对水环境条

件如: 水体温度、pH、电导率、营养盐浓度等的变化极其敏感^[21], 尤其是那些在某种特定的环境下才能大量生存的藻类的种类和数量, 可直接反映出环境条件的改变和水质污染的程度^[22]。本研究中平水期和丰水期, 梅尼小环藻均为优势种(图3), 而丰水期颗粒直链藻(*Melosira granulata*)以及钝脆杆藻(*Fragilaria capucina*)为优势种, 一定程度上反映汝溪河水体已经达到中-富营养化水平。另外, 就污染指示种而言, 谷皮菱形藻(*Nitzschia palea*)为多污带指示生物, 且耐污性强。普通等片藻(*Diatoma vulgure*)为油污染的指示种。扁圆卵形藻(*Cocconeis placentula*)为中污带指示种^[23]。 α -中污带指示种类有谷皮菱形藻。 β -中污带的指示藻类主要有: 梅尼小环藻、变异直链藻(*Melosira varians*)、尖针杆藻(*Synedra acus*)、窄双菱藻(*Surirella angustata*)、小型异极藻(*Gomphonema parvulum*)^[24], 而以上藻类在汝溪河的各个样点或多或少的成为优势种, 说明汝溪河的水质已经受到了较严重的污染。

就营养盐含量(氮磷等营养盐)而言, 汝溪河的水质整体已经达到中-富营养化水平。单个从营养盐含量来看(图4), 磷含量自上游向下游有上升的趋势, 而氮含量总体变化不大, 但 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N含量具有相反的趋势, 说明自上游向下游虽然氮的总量变化不大, 但其存在形式发生了转变。水文指标的分析发现氧化还原电位(ORP)和电导率(SPC)自上游向下游有下降的趋势, 进一步说明上游水质较下游好, 但是没有明显的显著性($P>0.05$)。综合水文、水化和水生态三者的分析可以说明人类活动对汝溪河水体造成了较大的影响, 导致水体水质整体下降。

经PCA和PCT, 确定驱动因子主要为水环境中

表2 附石藻类评价参数的Pearson相关矩阵

Tab. 2 Pearson correlations among 8 component metrics of the epilithic algae communities

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
A1	1							
A2	0.404	1						
A3	-0.655**	0.612	1					
A4	0.694**	0.509	-0.607*	1				
A5	-0.722**	-0.656**	0.470	-0.511	1			
A6	0.048	0.227	0.186	-0.276	-0.418	1		
A7	-0.290	-0.419	0.114	-0.404	0.080	0.374	1	
A8	0.646**	0.054	-0.531*	0.396	-0.180	-0.374	-0.661**	1

注: A1. 硅藻总密度; A2. 物种数; A3. 直立型相对含量%; A4. 运动型硅藻所占比例; A5. 小环藻的相对丰富度; A6. 曲壳藻的相对丰富度; A7. 异极藻的相对丰富度; A8. 营养状态指数; *= $P<0.05$, **= $P<0.01$; 下同

Note: A1. Total density; A2. Species; A3. % erect individuals; A4. NNS%; A5. Relative abundance of *Cyclotella*; A6. Relative abundance of *Achnanthes*; A7. Relative abundance of *Gomphonema*; A8. Trophic state; *= $P<0.05$, **= $P<0.01$; The same applies below

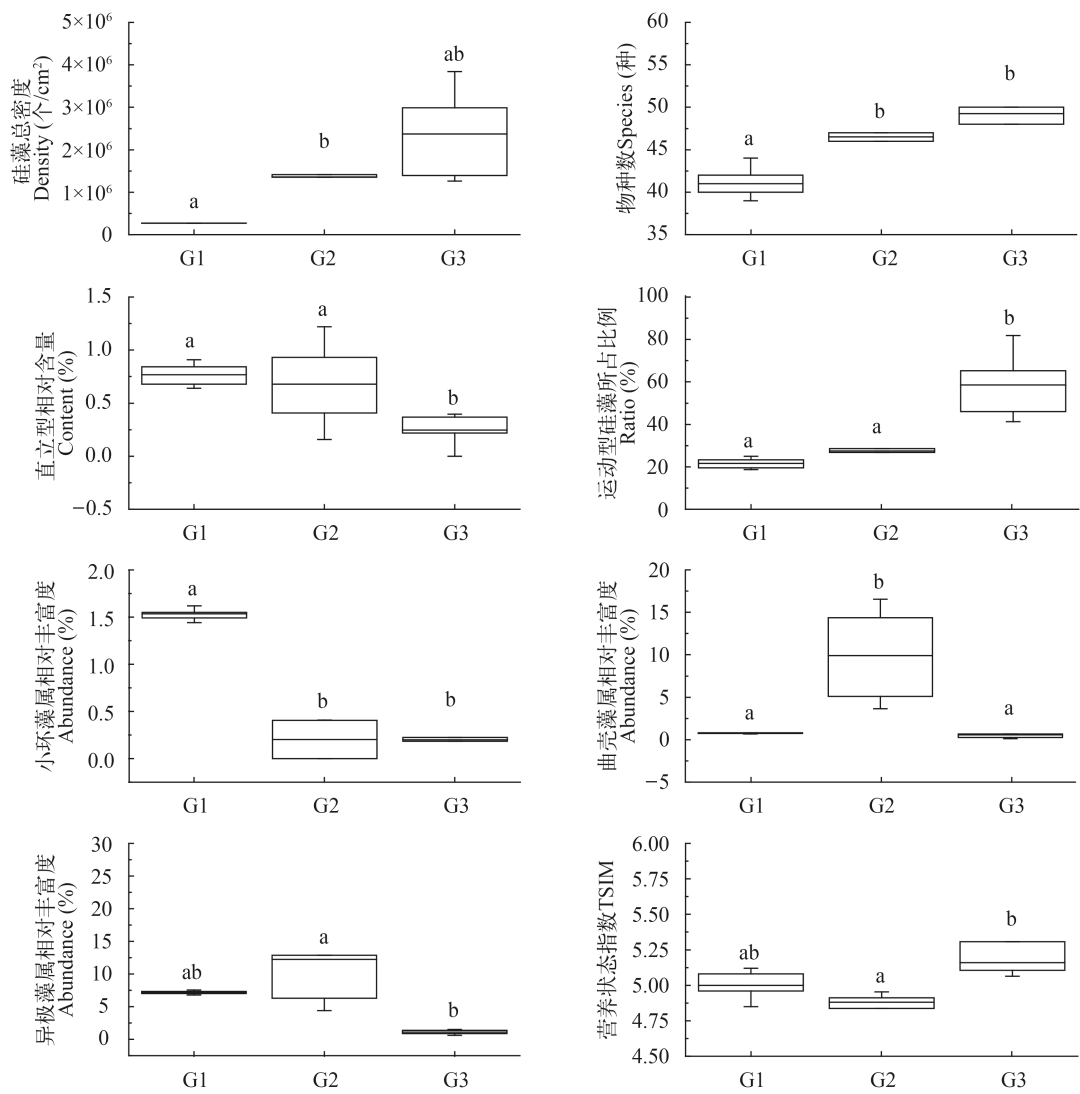


图 6 附石藻类8项参数在3组不同生境的箱形图

Fig. 6 Box plots of eight metrics of epilithic algae in 3 different habitats

图中大方框表示25%—75%位点范围, 中间的横线表示中位数, 不同字母表示差异显著, $P<0.05$; G1. 参考样点; G2. 中上游样点S2-S5; G3. 下游样点S6-S9

Boxes show interquartile ranges of 25th and 75th percentiles, middle lines are medians, and the dots are outliers. Values with different letters mean significant difference at 0.05 levels; G1. Reference site; G2. Upper and middle reaches, S2-S5; G3. Lower reaches, S6-S9

表 3 汝溪河IBI核心参数的分布范围及其赋分标准

Tab. 3 Scoring ranges of core IBI metrics in Ruxi River

核心参数 Core parameters	5%分位数 5 th percentiles	25%分位数 25 th percentiles	95%分位数 95 th percentiles	最大值 Maximum value	计算方法 Computational method
A1	476139	485954	528563	531934	(最大值-A1)/(最大值-5%分位数)
A2	59.5	61.5	70.3	71.0	(最大值-A2)/(最大值-5%分位数)
A3	2.63	2.72	2.88	3.24	A3/95%分位数
A4	49.83	53.71	64.07	68.24	(最大值-A4)/(最大值-5%分位数)
A5	3.41	3.49	3.85	4.86	A5/95%分位数
A6	0.65	0.75	0.97	1.30	(最大值-A6)/(最大值-5%分位数)
A7	0.00	0.00	0.01	0.01	(最大值-A7)/(最大值-5%分位数)
A8	4.85	4.92	5.21	5.23	(最大值-A8)/(最大值-5%分位数)

表 4 基于附石藻类生物完整性指数(IBM)的汝溪河水生态健康标准

Tab. 4 Assessment criteria for biological integrity of epilithic algae in the Ruxi River

分级Classification	健康Healthy	亚健康Subhealthy	一般Average	较差Relatively poor	极差Very poor
IBM分值IBM score	>4.740	3.555—4.740	2.370—3.555	1.185—2.370	0—1.185

表 5 汝溪河各调查样点IBM计算及评价结果

Tab. 5 IBM scores for the sampling sites of the reservoirs in Ruxi River

样点 Sampling point	采样时间 Sampling time	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	IBM分值 IBM score	IBM总分 IBM total score	健康评价 Health assessment
S1	枯水期	0.45	0.51	0.89	0.43	0.96	0.49	0.40	0.53	4.67	5.02	健康
	丰水期	0.61	0.12	0.82	0.41	0.91	0.58	0.66	0.70	4.81		
	平水期	0.48	0.65	0.94	0.64	0.95	0.53	0.75	0.62	5.57		
S2	枯水期	0.75	1.00	0.35	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	5.10	4.08	亚健康
	丰水期	1.00	0.00	0.00	1.00	0.79	1.00	1.00	0.00	4.79		
	平水期	0.36	0.00	1.00	0.20	0.47	0.00	0.00	0.33	2.36		
S3	枯水期	0.00	0.61	0.13	0.74	0.00	0.00	0.61	0.00	2.10	4.09	亚健康
	丰水期	0.91	0.28	0.25	0.20	0.56	0.82	0.89	0.90	4.82		
	平水期	0.00	0.80	0.70	1.00	0.38	0.82	1.00	0.67	5.37		
S4	枯水期	0.45	1.00	0.77	0.00	1.00	0.91	1.00	0.00	5.13	4.65	亚健康
	丰水期	0.00	0.09	0.49	0.92	1.00	0.40	0.86	0.19	3.95		
	平水期	0.75	0.00	1.00	0.80	1.00	0.17	0.93	0.24	4.88		
S5	枯水期	1.00	0.49	0.80	1.00	0.00	0.91	1.00	0.13	5.33	4.29	亚健康
	丰水期	0.64	0.09	0.45	0.00	0.89	0.00	0.00	0.02	2.09		
	平水期	0.24	0.99	0.58	1.00	0.60	0.98	1.00	0.07	5.46		
S6	枯水期	1.00	0.67	0.56	0.42	1.00	0.00	0.00	0.96	4.61	3.44	亚健康
	丰水期	0.00	0.00	0.04	0.00	0.25	0.55	1.00	0.00	1.85		
	平水期	1.00	0.00	0.40	0.00	0.87	0.89	0.25	0.47	3.88		
S7	枯水期	0.96	0.00	1.00	1.00	0.50	0.73	1.00	1.00	6.19	4.93	健康
	丰水期	1.00	0.35	0.44	0.60	1.00	0.00	0.57	0.18	4.15		
	平水期	0.52	0.38	0.96	0.64	0.94	0.00	0.00	1.00	4.44		
S8	枯水期	0.00	1.00	0.00	0.90	0.18	1.00	0.76	0.00	3.84	4.86	健康
	丰水期	0.67	1.00	0.81	1.00	0.10	0.65	0.00	1.00	5.23		
	平水期	0.00	0.38	1.00	1.00	0.33	1.00	1.00	0.82	5.53		
S9	丰水期	0.90	0.49	1.00	0.85	0.35	1.00	0.58	0.38	5.56	5.36	健康
	平水期	0.78	1.00	0.85	0.82	1.00	0.85	1.00	0.00	6.29		

的可溶性营养元素: 硝酸盐氮(NO_3^- -N) 和溶解氧(DO)。营养盐浓度(氨氮、硝态氮等)是反映人类活动强度的水环境因子, IBM与 NO_3^- -N的显著负相关性显示, 进一步支持了上述结论。尽管电导率(SPC)对附石藻类群落的影响不显著, 但它们仍旧是汝溪河流域主要的水环境因子(图 5)。有研究指出, 电导率和土地利用类型改变后而引发的可溶性营养盐含量有着明显的相关性^[25, 26], 汝溪河流域的电导率与总氮、总磷和硝酸盐氮的显著的相关性($P<0.05$)为其提供了证据。

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^[27, 28], 然而, 河流的生物完整性并不等同于河流的生态系统健康^[29], 健康的生态系统不仅包含生物完整性, 还应包括生境栖息地的化学完整性和物理完整性^[2]。本研究中构建 IBM体系的8个核心参数, 均能很好的反映出参照点

位和受损点位的状况(表 2、图 6), IBM评价结果基本反映了汝溪河流域水环境理化特征和流域生境质量特征。基于附石藻类群落构建的IBM评价体系有明显的空间异质性。从汝溪河全流域的尺度上看, 上游和下游河流健康状况较好, 中游河流健康状况较差, 水生态系统整体呈现出亚健康的状态(表 5)。这是因为上游和下游山地区域人类开发较少, 河流两岸以森林为主, 点源污染和面源污染较少, 而中游区域城镇化程度较高, 土地利用和小水电站的分布以及人类活动造成的附石藻类群落结构显著改变, 尽管无明显的化学污染, 但是附石藻类IBM仍然较低, 从而反映出生境的丧失对于附石藻类群落的显著影响。

从时间尺度上看, 汝溪河的生物完整性具有明显的季节变化, 表现出春夏季(3月—8月)高于秋冬季(10月—翌年2月)的趋势(表 5), 这主要与各样点所

受外界干扰程度有关。平水期时, 水体流速相对较缓, 环境不会发生剧烈的变化。丰水期时, 水体总量大, 河流对污染的自净能力较其他时期要强。而冬季(枯水期), 河流流速降低, 河流中的有机物质沉积于河底, 水体自净能力下降, 水质变差; 而且水体温度仅9.67—11.10℃, 此时许多藻类已经停止生长繁殖, 温度成为限制藻类群落的一大重要因子^[30, 31]。

综上所述, 汝溪河自然河段共计采集附石硅藻32属179种, 水文、水化和水生态特征都反映汝溪河水体已经达到中-富营养化水平。附石藻类生物完整性指数表明, 上游和下游生物完整性较高, 中游生物完整性一般; 平水期和丰水期生物完整性较高, 而枯水期生物完整性较低。影响汝溪河自然河段附石藻类生物完整性的主要水环境因子为溶解氧和硝态氮。建议加强对汝溪河氮源特别是硝态氮的控制, 保持流域生态系统健康。

参考文献:

- [1] Zhao Y W, Yang Z F. Preliminary study on assessment of urban river ecosystem health [J]. *Advances in Water Science*, 2005, **16**(3): 349—356 [赵彦伟, 杨志峰. 城市河流生态系统健康评价初探. 水科学进展, 2005, **16**(3): 349—356]
- [2] Stevenson R J, Pan Y D, Van Dam H. Assessing environmental conditions in rivers and streams with diatoms. In: Stoermer E F, Smol J P (Eds.), *The Diatom: Applications for the Environmental and Earth Sciences* [M]. Cambridge: Cambridge University Press. 1999, 57—85
- [3] Yin X W, Zhang Y, Qu X, *et al.* Community structure and biological integrity of periphyton in Hunhe River water system of Liaoning Province, Northeast China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(10): 2732—2740 [殷旭旺, 张远, 渠晓东, 等. 浑河水系附石藻类的群落结构与生物完整性. 应用生态学报, 2011, **22**(10): 2732—2740]
- [4] Descy J P. A new approach to water quality estimation using diatoms [J]. *Nova Hedwigia*, 1979, **64**: 305—323
- [5] Potapova M G, Charles D F. Benthic diatoms in USA rivers: distributions along spatial and environmental gradients [J]. *Journal of Biogeography*, 2002, **29**(2): 167—187
- [6] Bate G, Smailes P, Adams J. A water quality index for use with diatoms in the assessment of rivers [J]. *Water S A*, 2004, **30**(4): 493—498
- [7] Coste M, Boutry S, Rosebery J T, *et al.* Improvements of the biological diatom index (BDI): description and efficiency of the new version (BDI-2006) [J]. *Ecological Indicators*, 2009, **9**(4): 621—650
- [8] Tang T, Cai Q H, Liu R Q, *et al.* Distribution of epilithic algae in the Xiangxi River system and their relationships with environmental factors [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2002, **17**(3): 345—352
- [9] Yin X W, Xu Z X, Yan N, *et al.* Community structure and biological integrity of periphyton in the Weihe River Basin, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(2): 518—527 [殷旭旺, 徐宗学, 鄢娜, 等. 渭河流域河流着生藻类的群落结构与生物完整性研究. 环境科学学报, 2013, **33**(2): 518—527]
- [10] Wu N C, Tang T, Qu X D, *et al.* Spatial distribution of benthic algae in the Gangqu River, Shangrila, China [J]. *Aquatic Ecology*, 2009, **43**(1): 37—49
- [11] Li R F, Zhang X W. Investigation on water quality of the Ruxi River in Zhong county of Chongqing municipality [J]. *Environment and Ecology in the Three Gorges*, 2011, **33**(2): 10—12 [李仁芳, 张信伟. 忠县汝溪河流域水质现状调查. 三峡环境与生态, 2011, **33**(2): 10—12]
- [12] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, *et al.* Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish [M]. 2nd Edition. EPA 84-B-99-002. U.S. Environmental Protection Agency; Office of Water; Washington, D. C. 1999, 1—5, 6—17
- [13] Lazorchak J M, Klemm D, Peck DV. Environmental monitoring and assessment program - surface waters: field operations and methods for measuring the ecological condition of wadeable streams [R]. EPA/620/R-94/004F, 1998, 119—132
- [14] Hu H J, Li Y Y, Wei Y X, *et al.* Freshwater Algae in China [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press. 1980, 130—199 [胡鸿钧, 李尧英, 魏印心, 等. 中国淡水藻类. 上海: 上海科学技术出版社. 1980, 130—199]
- [15] Hu H J, Wei Y X. Freshwater Algae in China - Systems, Classification and Ecology [M]. The Science Publishing Company. 2006, 300—416 [胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类—系统、分类及生态. 科学出版社. 2006, 300—416]
- [16] Krammer K, Lange B H. Bacillariophyceae, 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae [M]. Berlin: Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg. 1997, 1—576
- [17] National Environmental Protection Bureau. The method of water and wastewater monitoring and analysis, Fourth Edition [M]. Beijing: China Environmental Science Press. 2002, 120—285 [国家环保局编. 水和废水监测分析方法, 第4版. 北京: 中国环境科学出版社. 2002, 120—285]
- [18] Wang B X, Yang L F, Hu B J, *et al.* A preliminary study on the assessment of stream ecosystem health in south of Anhui Province using benthic-index of biotic integrity [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(6): 1481—1490 [王备新, 杨莲芳, 胡本进, 等. 应用底栖动物完整性指数B-IBI评价溪流健康. 生态学报, 2005, **25**(6): 1481—1490]
- [19] Pei X J, Niu C J, Gao X, *et al.* The ecological health assessment of Liao River Basin, China, based on biotic integrity index of fish [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(21): 5736—5746 [裴雪姣, 牛翠娟, 高欣, 等. 应用鱼

- 类完整性评价体系评价辽河流域健康. 生态学报, 2010, **30**(21): 5736—5746]
- [20] Blocksom K A, Kurtenbach J P, Klemm D J, *et al.* Development and evaluation of the lake macroinvertebrate integrity index (LM II) for New Jersey lakes and reservoirs [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2002, **77**(3): 311—333
- [21] Bellinger B J, Cocquyt C, O'Reilly C M. Benthic diatoms as indicators of eutrophication in tropical streams [J]. *Hydrobiologia*, 2006, **573**(1): 75—87
- [22] Dai L L. Study on eutrophication algal characters and environmental factors effect of Three Gorge Reservoir [D]. Thesis for Master of Science. Chongqing University. Chongqing. 2007 [代玲玲. 三峡水库富营养化藻类特征及环境因素影响研究. 硕士学位论文, 重庆大学. 重庆. 2007]
- [23] Ding L. Study on community structure of benthic diatoms and its relationship with the environmental factors in Nanming River [D]. Thesis for Master of Science. Guiyang Normal University. Guizhou. 2007 [丁蕾. 贵阳南明河底栖硅藻群落结构及其与环境因子关系的研究. 硕士学位论文, 贵阳师范大学. 贵州. 2007]
- [24] Zelinka M, Marvan P. Zur Prazisierung der biologischen Klassifikation der Reinbeit fliessender Gewasser [J]. *Archiv fur Hydrobiologie*, 1961, **57**: 389—407
- [25] Walker C E, Pan Y D. Using diatom assemblages to assess urban stream conditions [J]. *Hydrobiologia*, 2006, **561**(1): 179—189
- [26] Leland H V. Distribution of phytobenthos in the Yakima River basin, Washington, in relation to geology, land use and other environmental factors [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1995, **52**(5): 1108—1129
- [27] Butcher J T, Stewart P M, Simon T P. A benthic community index for streams in the northern lakes and forests ecoregion [J]. *Ecological Indicators*, 2003, **3**(3): 181—193
- [28] Zhang F F, Zhang M, Liu Z G, *et al.* A health assessment using a benthic-index of biotic integrity in Ganjiang river basin [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2011, **35**(6): 963—971 [张方方, 张萌, 刘足根, 等. 基于底栖生物完整性指数的赣江流域河流健康评价. 水生生物学报, 2011, **35**(6): 963—971]
- [29] Karr J R. Ecological Integrity and Ecological Health are not the Same. In: Schulze P (Eds.), *Engineering within Ecological Constraints* [M]. Washington DC: National Academic Press. 1996, 97—109
- [30] State Environmental Protection Administration of China. The Yangtze River Three Gorges Project ecological and Environmental Monitoring Bulletin. 2014 [国家环境保护总局. 长江三峡工程生态与环境监测公报. 2014]
- [31] State Environmental Protection Administration of China. The Yangtze River Three Gorges Project ecological and Environmental Monitoring Bulletin. 2015 [国家环境保护总局. 长江三峡工程生态与环境监测公报. 2015]

USING EPILITHIC ALGAE ASSEMBLAGES TO ASSESS STREAM HEALTH OF THE RUXI RIVER, CHINA

YANG Yan-Jun¹, XU Sha¹, LIU Rui², XU Jin-Zhu¹, SHI Jun-Qiong¹ and WU Zhong-Xing¹

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), Chongqing Key Laboratory of Plant Ecology and Resources Research in Three Gorges Reservoir Region, Southwest University, Beipei 400715, China;

2. Wuhan Environmental Monitoring Center, Wuhan 430015, China)

Abstract: The present study investigated the community structure of epilithic algae and characteristics of environmental factors among 9 sample sites in Ruxi River, a tributary of the Three Gorges Reservoir. The health of freshwater ecosystem in the stream conditions of Ruxi River was assessed via Index of Biological Integrity (*IBI*). The results indicated that there were significant spatial and temporal differences in the epilithic algae community structure in Ruxi River and conductivity, dissolved oxygen, nitrate nitrogen and turbidity were the major environmental factors in Ruxi River. *IBI* result showed that the upstream area of Ruxi River were in excellent biological integrity, while the mid-stream and downstream area were in severe impairment. The biological integrity in dry season was preferable to the normal. Thus, the biological integrity in natural stream of Ruxi River showed a general level, suggesting that a sub-health aquatic ecosystem was found in Ruxi River.

Key words: Epilithic algae; Biotic integrity assessment index; Community structure; River ecosystem; Health assessment