ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第4期

Vol.33 No.4

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

环境科学 (HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE 第33卷 第4期 2012年4月15日

目 次

潮白河周丛生物群落元素组成与水质变化的生态计量学关系研究

崔经国[1],单保庆[1*],王帅[2]

(1. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室,北京 100085; 2. 青岛市环保局城阳分局,青岛 266109)

摘要:研究了潮白河流域中污染水体对周丛生物群落的碳(C)、氮(N)、磷(P)元素含量以及生态计量组成的影响.结果表明,下游潮白河NH_4^+-N、NO_x^--N 分别占 TN 的 52% 和 28%;上游白河则分别占 1.6% 和 38%.潮白河 TP 含量(0.104 mg·L^{-1})为白河 TP 含量(0.005 mg·L^{-1})的 21 倍.白河和潮白河周丛生物 C、N、P 元素的变异系数分别为 0.55、0.41、0.62 和 0.24、0.13、0.18,表明生长于白河周丛生物的元素结构变化更大.无周丛生物的水体NH_4^+-N和 TP 的浓度分别为有周丛生物的 21 倍和 11 倍.通过对 TOC、TN、NO_x^--N、NH_4^+-N、TP、pH、氧化还原电位(ORP)和电导率(conductivity)等水质指标进行二元 Logistic 回归分析得知,水体 TP 为影响潮白河周丛生物生存的主要因素,其预测正确率为 87.3%.周丛生物 C、N、P 元素间有强相关性,其中 N 起了"桥梁"作用.生态计量学分析进一步显示周丛生物的 N∶P 的比值追随水体 TN∶TP 的变化;并且该比值主要受水体 TP 浓度影响.周丛生物 N∶P 可用于水体 TN∶TP 变化的生态计量学的指示因子.本研究为进一步探究周丛生物群落结构变化,以及对高一级营养级生物群落结构和元素循环的影响奠定了基础.

关键词:周丛生物;生态计量学;N∶P 比率;潮白河;氮磷失衡

中图分类号:X171.1 **文献标识码**:A **文章编号**:0250-3301(2012)04-1108-06

Ecological Stoichiometric Relationships of Periphyton Community Elemental Composition and Variations of Water Quality in the Chaobai River

CUI Jing-guo[1], SHAN Bao-qing[1], WANG Shuai[2]

(1. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Chengyang Branch of Qingdao Environmental Protection Bureau, Qingdao 266109, China)

Abstract: Carbon (C), Nitrogen (N) and Phosphorus (P) of water and periphyton were analyzed in the Chaobai River to investigate how anthropogenic river pollution affected the periphyton community and its elemental composition. The results of this study showed that NH_4^+-N and NO_x^--N accounted for 52%, 28% of TN in the Chaobai River, respectively, while 1.6%, 38% of TN in the Baihe River. TP concentration in the former (0.104 mg·L^{-1}) was 21 times higher than the latter (0.005 mg·L^{-1}). Coefficient of variation (CV) of periphyton C, N and P in the Chaobai River and Baihe River were 0.55, 0.41, 0.62 and 0.24, 0.13, 0.18, respectively. This indicated great variations of periphyton elemental composition in the Bai River than in the Chaobai River. Binary logistic analysis was used to determine factors that affect periphyton distribution. TOC, TN, NO_x^--N, NH_4^+-N, TP, pH, ORP and conductivity were used in this analysis and the result showed that TP was the key factor which can interpret 87.3% of the correct ratio. Periphyton C, N and P had strong correlations and N was the key element of periphyton composition. N∶P can track variations of water TN∶TP and this periphyton stoichiometric characteristic can be used as indicators of water pollution. TP was the key pollution factor that determined changes of periphyton N∶P. This study laid the foundations of investigating variations of the periphyton community and its effect on structure and elemental cycling of higher trophic levels.

Key words: periphyton; ecological stoichiometry; N∶P ratios; Chaobai River; N-P imbalance

海河流域是我国污染严重的流域之一,2009 年污水排放总量为 49 亿 t,流域内劣Ⅴ类水体占评价河流长度的 51.5%[1].由于气候变化和过量开采地下水等原因,流域内河流天然水资源量补给量又严重不足,河流不同养分元素如氮(N)、磷(P)之间的比例失衡情况较严重,这种不平衡将进一步影响生态系统的元素循环.通常研究养分的输入输出都是单一尺度手段,对于多尺度研究,如同时研究 N 和 P 的变化,其主要研究手段为生态计量法[2].曾德慧等[3]曾于 2005 年对生态计量学有过详细论述,但国内外对于生态计量学的研究尚较少涉及河流生态系统[4],尤其国内的研究多集中于陆地的森林[5~8]、草原生态系统[9].

收稿日期:2011-05-18;**修订日期**:2011-07-21

基金项目:中国科学院对外合作重点项目(GJHZ0908);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07209)

作者简介:崔经国(1980~),男,博士研究生,主要研究方向为河流生态系统的周丛生物生态计量学,E-mail:jingguo.tsui@gmail.com

* 通讯联系人,E-mail:bqshan@rcees.ac.cn

周丛生物(periphyton)又名着生藻类、着生生物或者周丛藻类,包括藻类、细菌、真菌、动物、有机或无机碎屑等,附着在基质上生长的生物群落,其着生基质可以是有机、无机的,或是有生命、无生命的[10].周丛生物是河流生态系统的重要组成部分[11],它位于生物群落与外界物理、化学环境之间的界面之处[12].利用周丛生物作为环境变化[13,14],以及河流[15]、湖泊[16]和湿地[17]生态系统修复的指示物已有多年历史.周丛生物与大多数植物一样,其元素组成可随环境变化而产生较大范围改变[18].曾有室内模拟实验表明,其 N∶P 计量比可随水体 TN∶TP变化而变化[19].本研究利用生态计量学手段,探索海河流域氮磷失衡条件下,周丛生物元素计量比对水质变化的响应规律,以期为今后进一步研究人类污染对整个生态系统元素循环的影响做出初步研究依据.

1　材料与方法

1.1　采样点选择与水体采集

潮白河发源于密云水库,水库上游为潮河和白河.由于潮河部分河段水资源短缺,断流严重,因此选取白河和密云水库下游的潮白河以及各自相应的支流作为研究对象.根据河流地理地貌特征,研究共布设55个采样点(图1),白河采样点间隔5 km左右,潮白河间隔10 km左右.共有36个采样点发现周丛生物,其中白河所有采样点均发现周丛生物生存,而在潮白河只有4个点采集到.有周丛生物的采样点采集水体样品以及3~5个周丛生物平行样,没有周丛生物的采样点则只采集水样.

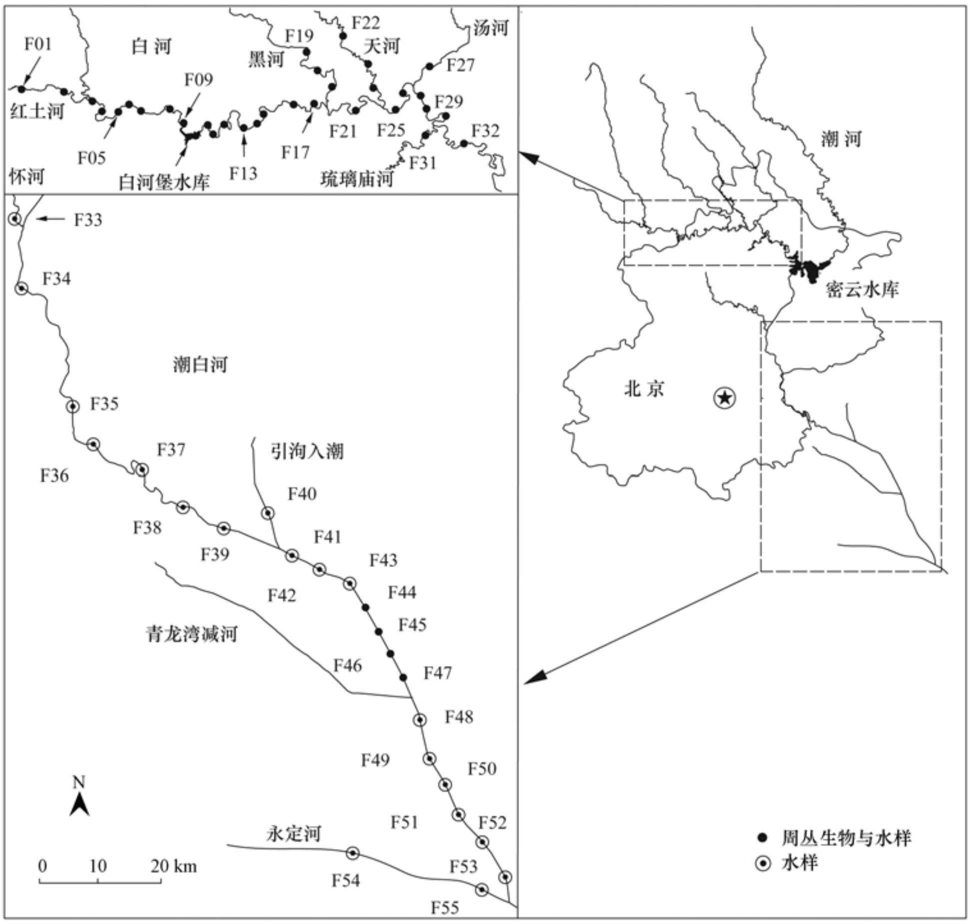


图1　潮白河位置及采样地点示意

Fig. 1　Location of the Chaobai River and distribution of sampling sites

1.2　周丛生物样品采集

除了养分等化学因素以外,影响周丛生物分布的因素还有光照、温度、基质、流速、水深、浊度和食植者取食[20]等物理环境因素.在研究养分对周丛生物的影响时,需避免采集地之间的物理环境存在较大差异的因素.本研究采用的环境条件如下:水深:0.1~0.3 m;流速:0.05~0.2 $m\cdot s^{-1}$;浊度:<5 NTU;基质:石块.采用尼龙刷将周丛生物从石块表

面刷洗下来,用去离子水冲洗至样品瓶内[21]. 采集的样品保存在 < -16℃的车载冰箱(Mobicool)内,随后转移至实验室进行元素分析.

1.3 样品分析

1.3.1 水体成分分析

pH 值、氧化还原电位(ORP)和电导率采用 YSI PRO 1020 水质分析仪现场测定. 其余指标需保存后带回实验室分析. 保存方法采用优级纯硫酸酸化至 pH <2 并于 72 h 内测定[22]. 用于氨氮(NH_4^+-N)、硝氮(NO_x^--N,包括硝态氮NO_3^--N和亚硝态氮NO_2^--N)测定的水样经过 0.45 μm 的玻璃纤维滤膜过滤;而用于总氮(TN)、总磷(TP)测定的水样则不过滤. 使用 SKALAR San + + 连续流动分析仪分析水体NH_4^+-N和NO_x^--N含量. TN 测定采用碱性过硫酸钾法消解水样后,再经流动分析测试并按以下公式计算获得:TN = NH_4^+-N + NO_x^--N. TP 采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析获得. TOC 则采用 Tekmar Phoenix 8000 分析.

1.3.2 周丛生物 C、N 和 P 含量分析

样品用真空冷冻干燥机于 -50℃冷冻干燥后,在水晶研钵中研磨至可通过 100 目尼龙筛的粉末. 从中取出 0.15 g 用 3∶1比例的优级纯浓硝酸和双氧水浸泡过夜后,在 CEM MARS 5 的微波消解装置中消解,定容后用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)测定 P 含量. 另取 10 mg 左右样品,于 Elementar Vario EL Ⅲ元素分析仪下,分析 C 元素和 N 元素含量. 以上标准样品均采用 GBW10025 螺旋藻作为基准物.

1.3.3 统计分析与绘图

统计分析采用 IBM PASW Statistics 18 软件,图形绘制采用 Origin 8.0 软件. 均值分析用于比较有、无周丛生物生存水体的理化指标差异. 采用二元 Logistic 回归分析的方法分析影响周丛生物存在与否的水质理化因素. 相关分析用于研究影响周丛生物生态计量变化的内在关系,以及受水体影响的因素. 数据首先进行探索分析(explorer analysis),结果表明,其数据结构不符合正态分布,因此不能采用 Pearson 相关分析,而是采用非参数相关分析(spearman correlation)[23].

2 结果与分析

2.1 水体理化指标

从图 2 中可以看出,上游白河水体中 TOC、TN、NO_x^--N、NH_4^+-N和 TP 明显低于下游潮白河,表明下游水体受人为污染较严重. 白河 TN 的结构主要以NO_x^--N(2.4 mg·L^{-1})为主,占 TN 的 38%,NH_4^+-N(0.1 mg·L^{-1})仅占 1.6%;潮白河则以NH_4^+-N(5.5 mg·L^{-1})为主,占 TN 的 52%,而NO_x^--N(2.9 mg·L^{-1})含量与白河差距不大,占潮白河 TN 的 28%. 因此在氮污染结构上,引起下游 TN 增高的主要因素是NH_4^+-N排放量的增加. 对于 TP,潮白河(0.104 mg·L^{-1})平均浓度比白河(0.005 mg·L^{-1})增加了约 21 倍. pH 变化范围在 7.9 ~10.4 之间,水体略呈碱性. 在潮白河接近入海口河段处,电导率有大幅度上升,显示出盐度的上升. 氧化还原电位自上游向下游逐步下降,表明水体氧化性逐渐降低,还原性物质如有机物等升高,并且 TOC 的大幅升高验证了该推测.

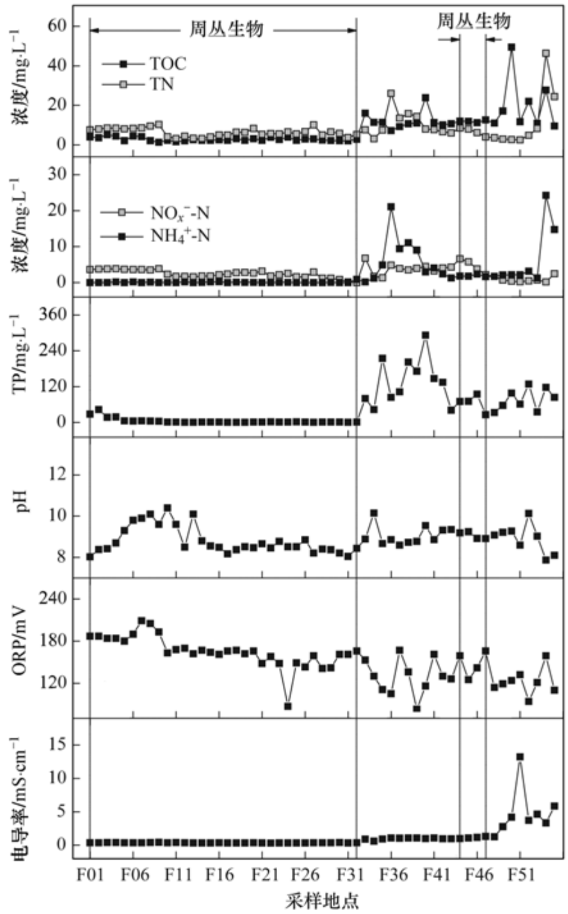


图 2 白河、潮白河水体理化性质空间分布

Fig. 2 Spacial distributions of water quality parameters in the Baihe and Chaobai River

2.2 周丛生物元素含量分布

周丛生物 C、N、P 元素含量的变化趋势非常相似(图 3). 从空间分布来看,潮白河周丛生物的 P 含量明显增加(F44 ~ F48). 将 3 种元素做均值分析,

潮白河周丛生物的 C、N、P 含量(碳:1.8 mmol·g^{-1};氮:16.4 mmol·g^{-1};磷:0.11 mmol·g^{-1})比白河周丛生物相应元素含量(碳:1.3 mmol·g^{-1};氮:13.5 mmol·g^{-1};磷:0.06 mmol·g^{-1})均有上升. 白河和潮白河周丛生物 C、N、P 的变异系数分别为:0.55、0.41、0.62 和 0.24、0.13、0.18. 白河周丛生物元素含量变化较大,表明其养分限制情况较严重,水体处于贫营养化的养分状态. 而潮白河的人为干扰较为严重,水质养分供给则比较充足,因此其元素含量变化较小.

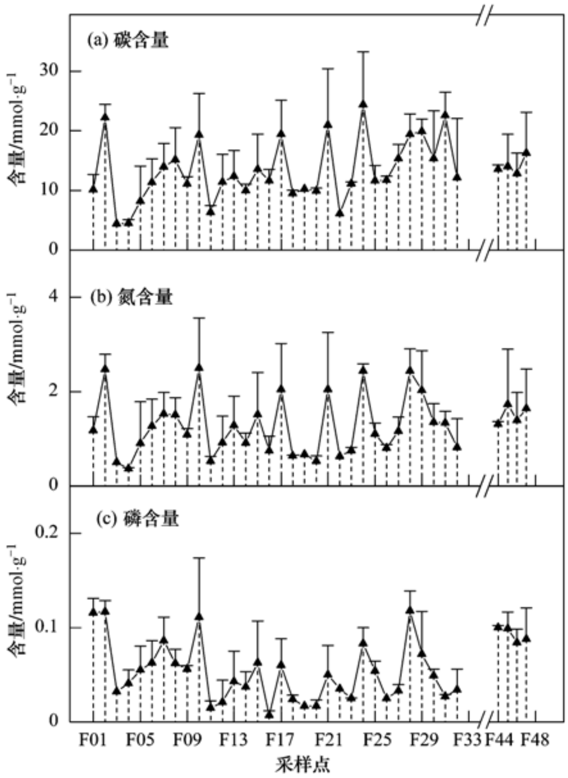


图 3　不同地点周丛生物碳氮磷元素含量

Fig. 3　Carbon, nitrogen and phosphorus content of periphyton in different locations

3　讨论

3.1　影响周丛生物分布的因素

均值分析理化参数 TOC、TN、NO_x^--N、NH_4^+-N、TP、pH、ORP 和电导率表明,没有周丛生物生存的水体养分浓度要高于有生存的(表 1). 其中NH_4^+-N和TP 分别高达21 倍和11 倍; 其次则是电导率和 TOC 的含量明显不同. 从养分浓度均值分布可以初步看出,随着水体富营养化的加剧,周丛生物出现灭绝.

为进一步分析影响周丛生物分布的因素,将上述理化参数作自变量,将是否有周丛生物这一现象做因变量(有为 1,没有为 0),进行做二元 Logistic 回归分析,方法采用“向前: 条件”. 分析结果表明,Cox & Snell 决定系数和 Nagelkerke 决定系数分别为 0.601 和 0.829, Hosmer 与 Lemeshow 检验显著性 Sig. = 0.911,均显示模型的拟合度非常好; 分类表显示周丛生物在水体中有、无的预测正确率分别为 91.7% 和 94.7%. 回归模型分析表明 TP 可以预测 87.3% 的正确率(Chi-square = 42.321, $P < 0.001$). 因此,结合以上的均值分析可以得出 TP 成为影响周丛生物生存与否的关键因素.

白河水体 TP 含量位于国家 I 类水质标准(≤0.02 mg·L^{-1})范围内,而潮白河水质则属于 II ~ IV 类水(0.02 ~ 0.3 mg·L^{-1}). TP 的增加导致水体富营养化,使得浮游藻类的繁殖大量增加,减少了河流底部的光照,使得河流初级生产力由周丛生物向浮游生物演替.

3.2　周丛生物 C、N、P 元素间关系

C、N、P 元素之间均有较强相关关系(表 2),按照 C-N、N-P、C-P 顺序逐渐降低. 从细胞的元素组成上来看,核酸(DNA、mRNA、rRNA)和核苷酸(ATP、磷酸肌酸)含有CNP元素;其他细胞组成部分如碳水化合物、叶绿素以及绝大多数蛋白质含有 CN,不含 P; 细胞的胞外分泌物(extracellular organic matters, EOM)只含 C,不含 NP[24]. N 元素不会单独存在,必定与C或P同时存在,因此N在C和P之

表 1　有无周丛生物的水体指标差异

Table 1　Differences of water pollutants in water containing periphyton or not

状态	项目[1)]	TOC /mg·L^{-1}	TN /mg·L^{-1}	NO_x^--N /mg·L^{-1}	NH_4^+-N /mg·L^{-1}	TP /mg·L^{-1}	pH	ORP /mV	电导率 /μS·cm^{-1}
有 1	Mean ± SD	3.8 ± 3.0	6.4 ± 2.0	2.6 ± 1.4	0.3 ± 0.6	0.01 ± 0.02	8.83 ± 0.63	164 ± 22	0.5 ± 0.3
	Min ~ Max	1.3 ~ 12.7	3.2 ~ 1.4	0.0 ~ 6.6	0.0 ~ 2.4	0.0 ~ 0.09	8.03 ~ 10.40	87 ~ 209	0.3 ~ 1.3
无 0	Mean ± SD	15.4 ± 9.9	11.2 ± 10.9	2.6 ± 1.9	6.3 ± 7.0	0.11 ± 0.07	9.00 ± 0.58	126 ± 22	2.6 ± 3.0
	Min ~ Max	7.2 ~ 49.5	2.5 ~ 46.4	0.2 ~ 6.8	0.2 ~ 24.3	0.03 ~ 0.29	7.87 ~ 10.15	83 ~ 167	0.6 ~ 13.2
无周丛生物生存的水体参数为有生存的倍数值		4	2	1	21	11	1	1	6

1) Mean ± SD 表示均值 ± 标准差(standard deviation); Min ~ Max:表示最小值(Minimum)到最大值(Maximum)范围

表 2 周丛生物 CNP 元素之间以及与水体养分、理化性质间的相关关系(Spearman)[1)]

Table 2 Spearman correlations coefficients for periphyton CNP and water pollutants

项目	碳 C	氮 N	磷 P	TN	NO_x^--N	NH_4^+-N	TP	TN∶TP	pH	ORP	电导率
氮 N	**0.913[a]**	1.000	**0.753[a]**	0.082	0.057	0.242	0.012	0.054	-0.136	-0.085	-0.052
磷 P	**0.552[a]**	**0.753[a]**	1.000	0.307	**0.427[a]**	**0.416[b]**	**0.486[a]**	**-0.458[a]**	0.027	0.212	0.305
N∶P	0.015	0.259	**-0.531[a]**	**-0.372[b]**	**-0.506[a]**	-0.329	**-0.720[a]**	**0.714[a]**	-0.257	-0.239	**-0.491[a]**

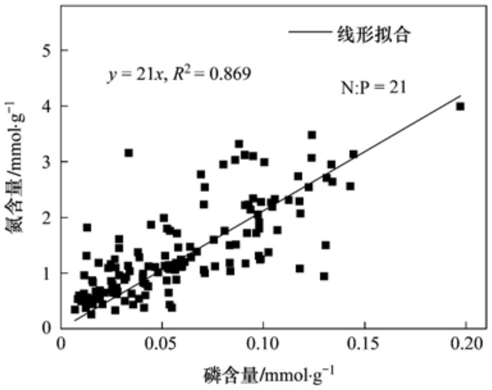
1)黑体表明显著相关,其中 a 代表在 0.01 水平下显著(双尾); b 代表在 0.05 水平下显著(双尾)

间起到了很强的“桥梁”作用.而由于 EOM 的存在,使得 C 的含量较难反映细胞组成的变化.藻类是周丛生物的主要构成部分,其 C 源主要来自水体溶解的 CO_2 参与的光合作用,因此与水体 TOC 的关联不大.综上所述,选取 N、P 作为研究对象,利用 N∶P 作为周丛生物的生态计量学指示,可以较好反映周丛生物的元素组成状态,并用于进一步分析水体养分对周丛生物群落的元素组成影响.

3.3 周丛生物元素 N∶P 比与水体养分的关系

尽管 Redfield[25] 的研究表明海洋与周丛生物 C∶N∶P都等于106∶16∶1,而对周丛生物的研究发现最大生长速率的 C∶N∶P 为119∶17∶1[26].白河周丛生物 N∶P 均值为28,而潮白河周丛生物 N∶P 为16.显示出上游周丛生物处于 P 限制状态,而下游养分则充足.

将所有周丛生物样品(含平行样)的 N、P 作如图 4 所示的点状分布图.从中可以看出,N、P 分布显著呈线性关系.线性拟合(强制截距为 0)表明整个潮白河流域的 N∶P 比例均值为21.将周丛生物的 N∶P与水体 TN∶TP 做双坐标图,显示其变化趋势相一致.表明周丛生物 N∶P 比率可以较好的反映水体 TN∶TP 的变化.统计分析显示其相关性达到 0.714 ($P < 0.01$).白河水体的 TN∶TP 比值明显要高于潮白河,主要由于白河较低的 TP 浓度所致.



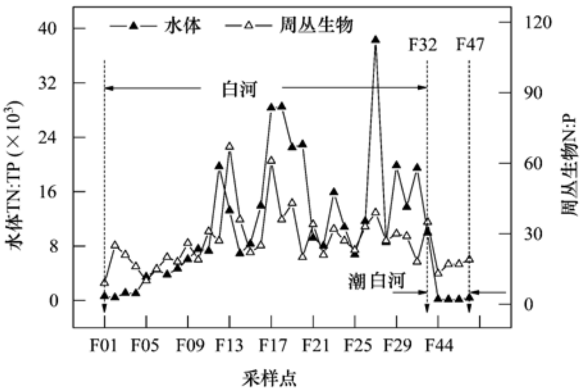


图 4 周丛生物 N∶P 分布与水体 TN∶TP 关系

Fig. 4 Relationships between N∶P of periphyton and TN∶TP of water

对于周丛生物群落结构组成来讲,引起其 N∶P 变化的方式有以下3种可能:① 由 N 变化引起; ② 由 P 变化引起; ③ 由 N 和 P 同时变化引起.前一小节对周丛生物内部元素关系分析的结果,实际上否定了①和②的可能性,因为 N 和 P 呈现较强的相关关系($r = 0.753$, $P < 0.01$).因此,需要进一步分析这两种元素谁对 N∶P 影响较大.表 2 的相关分析显示,P 对 N∶P 比率的影响最显著($r = -0.531$, $P < 0.01$).换句话说,对于任何影响周丛生物 P 含量的因素,将显著影响到其 N∶P 的比值.另外表 2 也显示NO_x^--N、NH_4^+-N、TP 都对 P 含量有显著影响.但由于NO_x^--N和 TP 之间存在较强相关性($r = -0.644$, $P < 0.01$),因此不能排除是由于 TP 造成的影响而得出NO_x^--N也能对 N∶P 产生影响.NH_4^+-N也可影响周丛生物 P 含量,但显著性较弱($r = 0.416$, $P < 0.05$).早期研究表明,氨氮的浓度超过 0.028 $mg \cdot L^{-1}$会阻止部分浮游生物的生长和光合作用[27].但周丛生物仍能够生存于该水体,表明其能够耐受相当浓度的NH_4^+-N胁迫,而这种在污染胁迫下的周丛生物群落的元素组成也发生了相应的改变.

由于电导率是反映水体离子浓度的大小的指标,而电导率与 N∶P 呈负相关,从表 2 可以看出随着离子浓度的增加,周丛生物 N∶P 比值变小,而离子中的 TP 实际上才是引发周丛生物 N∶P 变化的关

键污染因子.

周丛生物是浅水河流的主要初级生产力,是生态系统营养级的最低一层.由于潮白河水体氮、磷失衡导致周丛生物群落 N∶P 的比例发生变化,这种养分结构变化对于高一级营养级的生物如田螺、虾、鱼的生长速率、种群选择以及生态系统的元素循环都会产生影响.这种变化究竟引起周丛生物群落结构产生怎样的改变,以及这些影响对高一级营养级生物群落结构和元素循环产生什么影响,还有待于进一步研究来揭示.

4　结论

(1)影响潮白河流域周丛生物生存与否的关键因子是 TP.

(2)周丛生物的 CNP 元素间均存在相关性,其中 C-N 和 N-P 相关性较强,而 C-P 间相关关系较弱,N 在周丛生物群落的元素组成中起"桥梁"作用.

(3)周丛生物群落的 N∶P 会跟随水体 TN∶TP 的变化而变化.水体中影响周丛生物 N∶P 的主要因素仍然是 TP.

参考文献:

[1] 海河流域水资源公报[R].北京:海河流域水资源保护局,2009.19-20.

[2] Sterner R W, Elser J J, Sven Erik J, *et al*. Encyclopedia of ecology [M]. Oxford: Academic Press, 2008. 1101-1116.

[3] 曾德慧,陈广生.生态化学计量学:复杂生命系统奥秘的探索[J].植物生态学报,2005,**29**(6):1007-1019.

[4] Frost P C, Cross W F, Benstead J P. Ecological stoichiometry in freshwater benthic ecosystems: an introduction [J]. Freshwater Biology, 2005, **50**(11): 1781-1785.

[5] 阎恩荣,王希华,周武.天童常绿阔叶林演替系列植物群落的 N∶P 化学计量特征[J].植物生态学报,2008,**32**(1):13-22.

[6] 吴福忠,包维楷,吴宁.外源施 N 对干旱河谷白刺花(*Sophora davidii*)幼苗生长,生物量及 C、N、P 积累与分配的影响[J].生态学报,2008,**28**(8):3817-3824.

[7] 甘露,陈伏生,胡小飞,等.南昌市不同植物类群叶片氮磷浓度及其化学计量比[J].生态学杂志,2008,**27**(3):344-348.

[8] 任书杰,于贵瑞,陶波,等.中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究[J].环境科学,2007,**28**(12):2665-2673.

[9] 万宏伟.内蒙古高原成熟和退化羊草草原群落物种功能特性与土壤微生物量 C、N、P 对氮素添加响应[D].北京:中国科学院研究生院(植物研究所),2006.

[10] Wetzel R G. Limnology [M]. (2nd ed). Philadelphia: Saunders College Publishing, 1983. 743.

[11] 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]. Washington DC 20460: Chris Faulkner Office of Water USEPA, 1998.

[12] Pringle C M, Triska F J. Methods in stream ecology [M]. San Diego: Academic Press, 2006. 743-744.

[13] McCormick PV, Cairns J. Algae as indicators of environmental change [J]. Journal of Applied Phycology, 1994, **6**(5-6): 509-526.

[14] Stevenson R J, Bothwell M L, Lowe R L. Algal ecology: freshwater benthic ecosystems [M]. San Diego: Academic Press, 1996. 341-373.

[15] Vis C, Hudon C, Cattaneo A, *et al*. Periphyton as an indicator of water quality in the St Lawrence River (Québec, Canada) [J]. Environmental Pollution, 1998, **101**(1): 13-24.

[16] Vinebrooke R D. Epilithic algae as indicators of biological recovery in acid-stressed lakes [D]. Canada: University of Toronto, 1994.

[17] Gaiser E. Periphyton as an indicator of restoration in the Florida Everglades [J]. Ecological Indicators, 2008, **9**(6): S37-S45.

[18] Elser J J, Sterner R W, Vitousek P M. Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere [M]. Princeton: Princeton University Press, 2002.

[19] Stelzer R S, Lamberti G A. Effects of N: P ratio and total nutrient concentration on stream periphyton community structure, biomass, and elemental composition [J]. Limonology and Oceanography, 2001, **46**(2): 356-367.

[20] Stevenson R, Bothwell M, Lowe R. Algal ecology: freshwater benthic ecosystems [M]. New York: Academic Press, 1996.

[21] Weitzel R L. Methods and measurements of periphyton communities: a review [M]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials International, 1979.

[22] 国家环境保护局.水和废水监测分析方法[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002.

[23] Conover W J. Practical nonparametric statistics [M]. Wiley, 1998. 592.

[24] Pivokonsky M, Kloucek O, Pivokonska L. Evaluation of the production, composition and aluminum and iron complexation of algogenic organic matter [J]. Water Research, 2006, **40**(16): 3045-3052.

[25] Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment [J]. American Scientist, 1958, **46**(3): 205-221.

[26] Hillebrand H, Sommer U. The nutrient stoichiometry of benthic microalgal growth: redfield proportions are optimal [J]. Limonology and Oceanography, 1999, **44**(2): 440-446.

[27] Abeliovich A, Azov Y. Toxicity of ammonia to algae in sewage oxidation ponds [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1976, **31**(6): 801-806.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 33 No. 4

Apr. 15, 2012

CONTENTS

环境科学

(HUANJING KEXUE)

(月刊　1976年8月创刊)

2012年4月15日　33卷　第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly　Started in 1976)

Vol. 33　No. 4　Apr. 15, 2012

主　管　中国科学院

主　办　中国科学院生态环境研究中心

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

主　编　欧阳自远

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

出　版　科学出版社
北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

印刷装订　北京北林印刷厂

发　行　科学出版社
电话:010-64017032
E-mail:journal@ mail. sciencep. com

订购处　全国各地邮电局

国外总发行　中国国际图书贸易总公司
(北京399信箱)

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences

Co-Sponsored by Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection
School of Environment, Tsinghua University

Editor-in -Chief OUYANG Zi-yuan

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

Published by Science Press
16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing　100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House

Distributed by Science Press
Tel:010-64017032
E-mail:journal@ mail. sciencep. com

Domestic All Local Post Offices in China

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：70.00元

国外发行代号：M 205

国内外公开发行