

王钦,何萍,徐杰,等. 2012. 北京市河流沉水植物水环境适应性研究[J]. 环境科学学报, 32(1): 30-36

Wang Q, He P, Xu J, et al. 2012. Adaptability of submerged macrophytes to water environment in Beijing rivers[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 32(1): 30-36

北京市河流沉水植物水环境适应性研究

王钦^{1,2}, 何萍^{1,*}, 徐杰¹, 韩力强¹

1. 中国环境科学研究院国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012

2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875

收稿日期: 2011-04-19

修回日期: 2011-06-02

录用日期: 2011-06-09

摘要: 沉水植物是退化水体生态系统恢复过程中的重要奠基者. 调查研究沉水植物的水环境适应性, 对于制定不同污染程度水体的植被恢复对策具有重要指导意义. 通过对北京市主要河流水系有沉水植物的 36 个样地进行了群落结构调查, 共发现 15 个沉水植物物种. 主成分分析结果表明, 氨氮、总氮、总磷是影响沉水植物分布的主要因素; 典范对应分析结果表明, 沉水植物的分布主要受水体中化学营养盐含量和透明度的影响. 综合分析判定, 沉水植物有不同的水质适应区间, 轮藻、黑藻、马来眼子菜等物种是清洁种, 金鱼藻属于广布物种, 而菹齿眼子菜、菹草为耐污种.

关键词: 北京河流; 沉水植物; 环境因子; 典范对应分析

文章编号: 0253-2468(2012)01-30-07

中图分类号: X522

文献标识码: A

Adaptability of submerged macrophytes to water environment in Beijing rivers

WANG Qin^{1,2}, HE Ping^{1,*}, XU Jie¹, HAN Liqiang¹

1. State Environmental Protection Key Laboratory of Regional Eco-process and Function Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875

Received 19 April 2011;

received in revised form 2 June 2011;

accepted 9 June 2011

Abstract: Submerged macrophytes are important ecosystem founders for the restoration of degraded aquatic environment. The investigation of submerged macrophytes adaptabilities to the environment in rivers with different pollution degrees is of great value for the establishment of vegetation restoration strategies. Field surveys for submerged macrophytes were carried out at 36 different rivers sites in Beijing. A total of 15 submerged macrophytes species was recorded. Principal component analysis (PCA) indicated that ammonia nitrogen, total nitrogen and total phosphorus in the water body were the most important influence factors for the distribution of submerged macrophytes. Canonical correspondence analysis (CCA) illustrated that the distributions of submerged macrophytes was mainly influenced by the chemical nutrients concentration and the transparency of water body. Comprehensive analysis determined that submerged macrophytes had different adaptation ranges to water quality. *Charophyceae*, *Hydrilla verticillata* and *Potamogeton malaianus* were usually adaptive to clean water, *Ceratophyllum demersum* was widely distributed species, and *Potamogeton pectinatus* and *Potamogeton crispus* were tolerant species.

Keywords: rivers in Beijing; submerged macrophytes; environmental factors; canonical correspondence analysis

1 引言 (Introduction)

沉水植物是水生生态系统的关键类群, 作为水体中主要的初级生产者, 可通过有效增加空间生态位、改善溶氧条件, 直接为水生动物提供食物、栖息生境和繁殖及避难场所. 沉水植物的正常生长有利于维持整个水域生态系统的稳定 (吴振斌等, 2003; 金相灿, 1990). 沉水植物群落的组成与分布依赖于

一系列的生物和非生物因子. 由于沉水植物与周围的水环境密切接触, 因此深受周围水文过程和水体的理化性质影响. 近年来, 沉水植物与其栖息地环境因子之间的关系受到很多学者的关注. 雷泽湘等 (2006) 通过分析太湖不同湖区沉水植物群落特征与理化指标的关系, 得出沉水植物会降低水体营养盐含量、同时抑制藻类密度. 郭晓丽等 (2010) 通过对广西钦州市河流及池塘进行沉水植物现存状况

基金项目: 国家水体污染控制与治理重大科技专项 (No. 2009ZX07209-005)

Supported by the National Key Technologies R & D Program on Water Pollution Control and Management of China (No. 2009ZX07209-005)

作者简介: 王钦 (1985—), 女, E-mail: wangqin198534@163.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: heping18@sohu.com

Biography: WANG Qin (1985—), female, E-mail: wangqin198534@163.com; * Corresponding author, E-mail: heping18@sohu.com

分析,发现不同水质状态区域内的沉水植物群落分布、生物量及多样性也有较大差异.国外也有很多学者进行了此类研究,认为水生植物可以作为水体富营养化或酸化的指标 (Carbiener *et al.*, 1990; Robach *et al.*, 1996; Probst *et al.*, 1995). 随着研究重点的转变,越来越多的科学家 (Palmer *et al.*, 1992; Holmes *et al.*, 1998) 将生物评价的重点转移到利用水生植物,尤其是沉水植物来对水体质量状况进行评级,从而制定相应的治理及恢复措施.水生生物的种类组成、数量变动、生物量以及群落结构与功能的变化是反映河流水质状况的重要指标,也是预测其发展趋势的重要依据.生物指标与水质的其它指标综析,能够更全面、准确的以生态学观点来评价和预测河流的水环境状况.但这些沉水植物与水环境之间关联的研究通常都集中于湖泊中,而对河流生态系统中沉水植物的研究相对较少,例如,河流沉水植物群落组成与水质之间的相互关系、河流沉水植物分布与环境因子的具体关系等缺

乏深入的研究.

北京市河流水质,从山区到平原具有较大的差异性和变化梯度,北部潮白河流域河流以及京密引水渠水质较好,基本都达到地表水环境质量国家标准 (GB3838—2002) II 类标准.平原河流各河段水体氮磷值含量差异性较大,从 IV 类到劣 V 类以下都有所分布.

本文调查了北京市主要水系存在沉水植物的河段,通过典范对应分析研究沉水植物群落分布与环境因子的对应关系,阐明不同水环境因子对沉水植物群落影响的程度,以明确主要物种的水质适应性范围,一方面可为河流评价提供直观的方法,另一方面可为河流生态系统的管理和水质监测以及沉水植物恢复提供科学依据.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 样点布设

2010年8月,以北京中心城区北运河水系、北

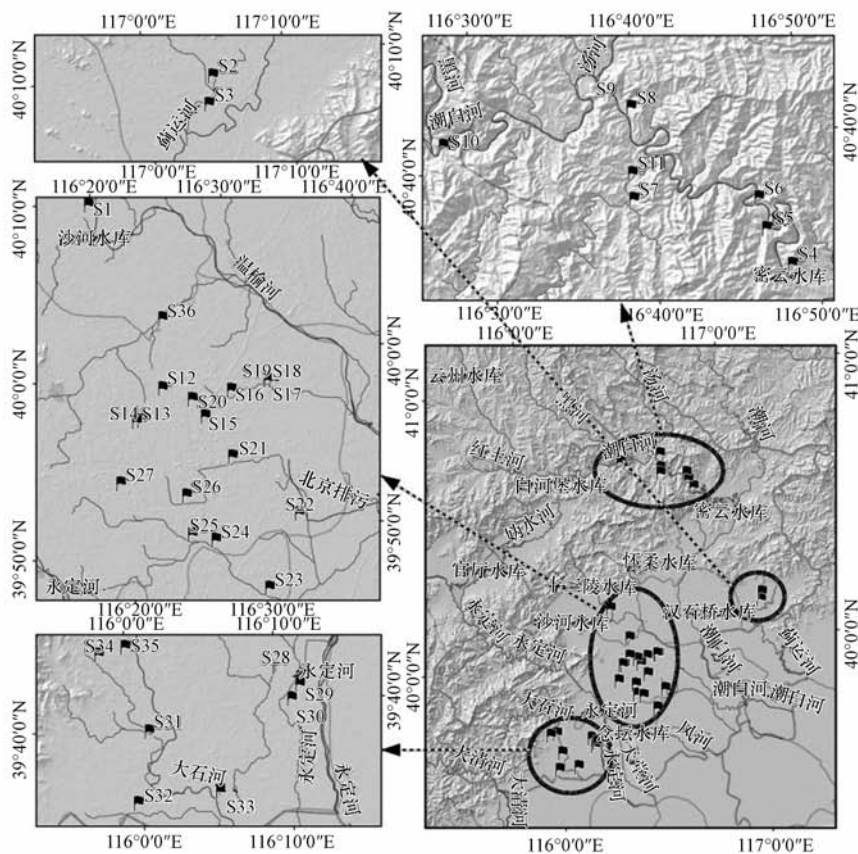


图 1 北京市河流调查点位示意图

(注: S1. 京密引水渠, S2. 洳河, S3. 洳河 2, S4. 黑龙潭, S5. 第一瀑, S6. 张家坟, S7. 琉璃庙, S8. 汤河口湿地, S9. 东帽湾, S10. 滴水壶, S11. 安州坝, S12. 小月河, S13. 长河, S14. 积水潭, S15. 亮马河, S16. 坝河, S17. 坝河下段, S18. 亮马河末端, S19. 坝亮汇后, S20. 土城沟, S21. 通惠河, S22. 萧太后河, S23. 亦庄桥, S24. 小红门, S25. 光彩路, S26. 天坛南门, S27. 莲花河, S28. 刺猬河, S29. 小清河, S30. 刺清汇, S31. 马刨泉河, S32. 挟括河, S33. 大石河下段, S34. 东沙河, S35. 丁家洼水库, S36. 清河)

Fig. 1 Sampling sites of Beijing Rivers

部山区潮白河水系、房山区内大清河水系以及平谷县蓟运河水系各支流为调查对象,主要有京密引水渠、清河、坝河、亮马河、通惠河、凉水河、莲花河、小月河、潮河、白河、刺猬河、挟括河、小清河、泃河等,进行为期 8 d 的河流调查. 选取各支流流经北京城区和郊区,河段生境具有一定的差异,各河流的调查样点均设置在存在沉水植物的河段,在一定程度上排除了由于河道结构等人为原因造成的沉水植物缺失的情况. 共调查了 36 个采样点(图 1),用 GPS 标记样点位置.

2.2 采样方法

2.2.1 沉水植物群落结构调查

采样时依据每个采样点的植物盖度和多样性,各设立具有代表性的 3 个样方,每个样方均使用特制的打草器将固定面积(0.2 m²)内的沉水植物打捞上来,测量并记录各物种鲜质量、分盖度及沉水植物总重量、总盖度. 为保证测量的准确性,将捞取后的植物放置沥水 5 min 后再称量其鲜质量.

2.2.2 水样的采集和测定

使用 Multi 340i 便携式多参数测试仪(德国 WTW 公司)现场测定水温、pH 值、电导率、溶解氧. 使用 Stalker II SVR 电波流速仪测定流速(美国 ACI 公司),水深及透明度采用萨氏透明度盘. 采集水样,在实验室采用国际通用标准方法分析测定水样的总磷、总氮、氨氮等指标(国家环境保护总局,2002).

2.3 数据统计与分析

为了研究多个变量之间的相关性,充分利用现有数据,筛选出对沉水植物分布影响较大的因子,采用 SPSS17.0 进行沉水植物主要影响因子主成分分析(PCA). 典范对应分析(CCA)图能够清楚表达不同沉水植物物种分布及研究区域与环境因子之间的关系,采用国际通用软件 CANOCO (Version 4.5)进行典范对应分析.

3 结果与讨论(Results and discussion)

3.1 不同河流中沉水植物种类及丰富度

不同河流中沉水植物物种组成有所差别,北部山区河流沉水植物物种种类和生物量都相对较高,常见物种有黑藻(*Hydrilla verticillata*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、马来眼子菜(*Potamogeton malaianus*)、大茨藻(*Najas marina*)等. 此区域由于受到人为干扰较少,水体多为原生状态,河流中沉水植物盖度相对较高,观测河段中基本能达到 80%

左右. 其余河流以菹草(*Potamogeton crispus*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、篦齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)为主. 另有泃河、萧太后河等河流由于氮磷含量值超高,不适宜植物生存. 不同河流记录的沉水植物物种及其出现频度见表 1.

表 1 不同河流记录的沉水植物物种及其出现频度

Table 1 Submerged macrophyte species and their frequency in 36 sites of Beijing rivers

物种名称	拉丁文	频度
黑藻	<i>Hydrilla verticillata</i>	50.00%
金鱼藻	<i>Ceratophyllum demersum</i>	50.00%
篦齿眼子菜	<i>Potamogeton pectinatus</i>	41.67%
菹草	<i>Potamogeton crispus</i>	38.89%
水网	<i>Hydrodictyon</i>	30.56%
小眼子菜	<i>Potamogeton pusillus</i>	19.44%
穗花狐尾藻	<i>Myriophyllum spicatum</i>	13.89%
马来眼子菜	<i>Potamogeton malaianus</i>	13.89%
水绵	<i>Spirogyra</i>	13.89%
小茨藻	<i>Najas minor</i>	13.89%
穿叶眼子菜	<i>Potamogeton perfoliatus</i>	11.11%
大茨藻	<i>Najas marina</i>	11.11%
刚毛藻	<i>Cladophora</i>	5.56%
苦草	<i>Vallisneria natans</i>	2.78%
浮叶眼子菜	<i>Potamogeton natans</i>	2.78%
轮藻	<i>Charophyceae</i>	2.78%

北京河流沉水植物基本都为多种植物共生存在,主要共生群落有 4 个,群落名称、伴生物种及适应水体范围见表 2.

表 2 北京市河流主要沉水植物群落特征

Table 2 Community characteristics of Beijing rivers

群落类型	常见伴生种	存在河段	适应水体状况
金鱼藻群落	黑藻、穗花狐尾藻、篦齿眼子菜、菹草	泃河,小月河,长河,小清河	IV ~ V ₃
篦齿眼子菜群落	黑藻、金鱼藻、菹草、小眼子菜	凉水河,刺猬河,马刨泉河,莲花河	V ~ V ₃
马来眼子菜群落	穿叶眼子菜、篦齿眼子菜、大茨藻	潮白河	III ~ IV
穿叶眼子菜群落	穗花狐尾藻、黑藻、大茨藻	潮白河	III ~ IV

3.2 沉水植物分布与水体理化性质相关性

3.2.1 水体透明度、水深、电导率

综合考虑各河段沉水植物盖度与环境因子的关系,可以明显看出

各河段沉水植物总盖度与该区域水体透明度基本呈正相关趋势(图 2a)。京密引水渠和潮白河水系流水体质量相对较好,水体在采样季节基本为 III 类,水体大多清澈见底,沉水植物盖度相对较高。而泃河上两个采样点以及坝河、萧太后河、大清河水系部分河流水体透明度相对较低,水生植物稀少或绝迹。总体来说,透明度高的地方,沉水植物生长达到的最大光补偿深度越大,因此沉水植物生物量相

对较高。

通过 SPSS 进行进一步检验得出,36 个采样点中,沉水植物的总盖度、物种数都与水体透明度显著相关(在 $p < 0.01$ 和 $p < 0.05$ 显著性水平下,相关系数 r 分别为 0.592 和 0.416),总盖度与物种数之间也显著相关(在 $p < 0.01$ 显著性水平下, $r = 0.634$),印证了被普遍认为的“沉水植物的生长与透明度相关”的观点。

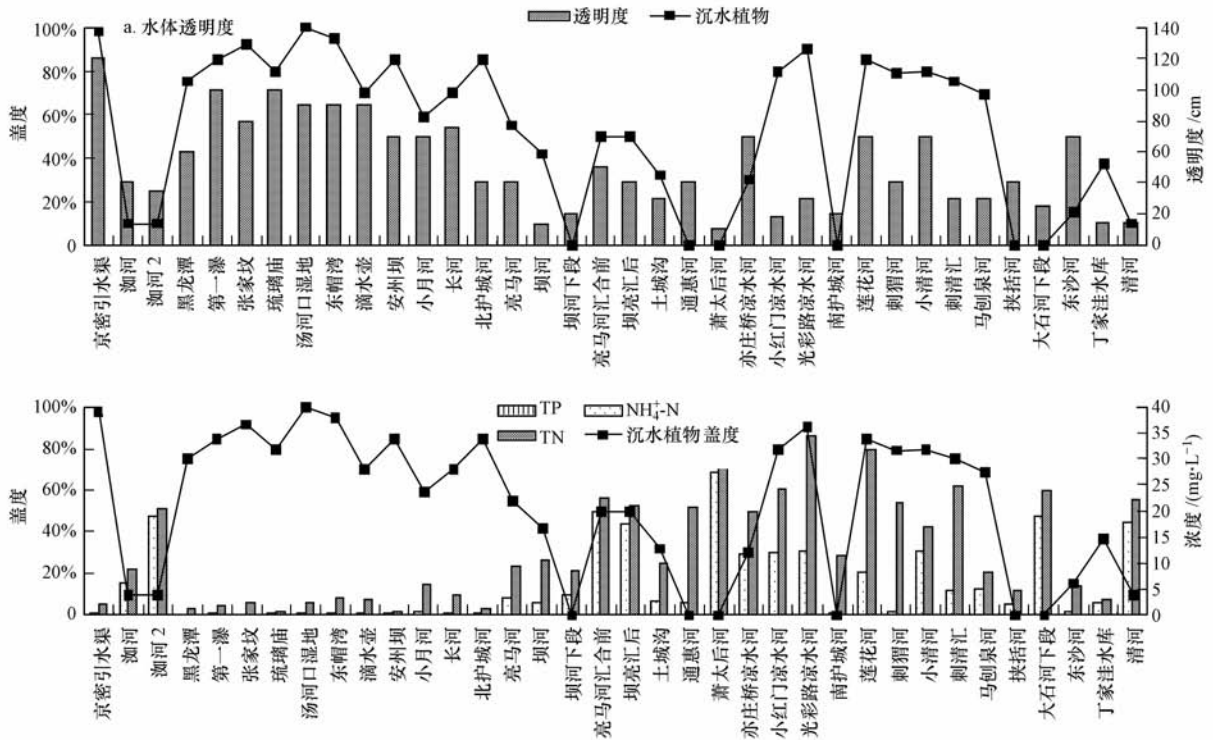


图 2 北京河流沉水植物盖度与水体透明度及水体氮磷含量关系

Fig. 2 Relationships between submerged macrophyte coverage and water transparency, N, P concentrations

3.2.2 总氮、总磷、氨氮 沉水植物在生长过程中,可吸收营养盐合成自身物质,从而减少水体中的氮、磷营养物。通过各采样点总氮、总磷、氨氮含量与沉水植物盖度关系可以看出:在不考虑采样点由于人工衬砌等物理因素的影响下,沉水植物的存在会对水体中氮磷等营养物质的含量产生一定影响(图 2b),即沉水植物盖度高的地方,总氮、总磷、氨氮含量都相对较低,北部潮白河水系中氮磷含量在全部河流中为最低,相应的沉水植物盖度最高,基本每条河流中沉水植物在现场观察时都处于极高生物量和丰富度。通过 SPSS 进行相关程度检验得出,沉水植物总盖度与样点中氨氮有着很强的负相关性,其 Pearson 相关系数达到了 -0.625 ,说明氨氮

是影响沉水植物生长的最重要营养指标。

3.3 影响沉水植物分布的主要环境因子

为识别北京市河流水质污染状况的主导因子,对测定的 10 项水质指标进行主成分分析。相关性检验(KMO and Bartlett's Test)结果为 0.716,说明现有数据适合进行因子分析。特征值大于 1 的主成分共有 3 个,第一主成分(F1)特征值为 3.947,贡献率为 39.47%;第二主成分(F2)特征值为 2.256,贡献率为 22.56%;第三主成分(F3)特征值为 1.146,贡献率为 11.46%,前三个主成分累计方差贡献率达到 73.49%,能够表征整体的水质状况,表 3 给出了几个主要因子的载荷矩阵。

表 3 因子载荷矩阵

Table 3 Component Matrix

因子	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	TN	TP	Cond	透明度 (Trans)	流速(v)	pH	水深(d)	DO	T
因子 1	0.892	0.889	0.833	0.823	-0.709	0.007	-0.139	-0.272	-0.115	0.482
因子 2	-0.059	-0.183	-0.08	-0.224	0.841	0.801	0.734	0.556	0.097	0.445
因子 3	-0.288	0.035	-0.365	0.217	-0.395	0.118	0.363	0.129	0.914	0.583

由 Thomson 回归法得到因子得分系数矩阵后,将得到的特征向量与标准化后的数据相乘,计算每个主成分的各个因子系数然后就可以得出主成分表达式:

$$F1 = 0.02\text{pH} + 0.157T - 0.054[\text{DO}] + 0.199[\text{Cond}] + 0.252[\text{NH}_4^+ - \text{N}] + 0.228[\text{TN}] + 0.236[\text{TP}] - 0.026d - 0.179[\text{Trans}] - 0.079v \quad (1)$$

$$F2 = 0.39\text{pH} + 0.14T - 0.141[\text{DO}] - 0.114[\text{Cond}] + 0.108[\text{NH}_4^+ - \text{N}] - 0.042[\text{TN}] + 0.105[\text{TP}] + 0.311d - 0.042[\text{Trans}] - 0.548v \quad (2)$$

$$F3 = 0.08\text{pH} + 0.261T + 0.566[\text{DO}] + 0.158[\text{Cond}] - 0.201[\text{NH}_4^+ - \text{N}] + 0.031[\text{TN}] - 0.244[\text{TP}] - 0.027d - 0.236[\text{Trans}] + 0.245v \quad (3)$$

第一主成分中氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、总氮(TN)、总磷(TP)的系数绝对值较大,分别为 0.252、0.226 和 0.236,是决定第一主成分的 3 个主要因子. TN、TP 反映了水体氮、磷元素含量的总和,是水体营养水平评价的重要指标. pH 值、水深(d)和流速(v)是决定第二主成分的主要因子. 溶解氧(DO)是决定第三主成分的主要因子,溶解氧是水生生物生存的必要条件之一,可将此称为生存因子.

3.4 主要沉水植物盖度与环境因子的典范对应分析(CCA)

利用 Canoco4.5 软件中提供的典范对应分析来探讨沉水植物群落组成与环境因子之间的对应关系. 排序图中,前两个排序轴的特征值分别为 0.043 和 0.021,环境因子轴与物种排序轴之间的相关系数分别为 0.788 和 0.584. 两个物种排序轴近似垂直,相关系数为 0.017,两个环境排序轴的相关系数为 0,说明排序轴与环境因子间线性结合的程度较好地反映了物种与环境之间的关系,排序的结果是可靠的(Ter Braak *et al.*, 2002). 研究发现,不同环境因子对 CCA 轴的贡献不同(见表 4). 前 4 条轴总共表达了环境因子 98.5% 的信息,其中第一轴最高,为 61.9%,前两轴共表达了 92.2% 的信息. 通过对环境因子进行 t 检验,各因子之间无显著性差异. 对 CCA 的第一排序轴进行蒙卡显著检验, F 值为

12.454, $p = 0.001$ 达到显著水平;对所有排序轴进行蒙卡显著检验, F 值为 4.961, $p = 0.001$ 达到显著水平,进一步表明 CCA 排序可以很好地解释植物群落与环境之间的关系.

表 4 北京河流沉水植物 CCA 分析中各轴的重要值,环境因子与各轴的相关系数以及物种变量和物种-环境因子累计百分数

Table 4 Results of canonical correspondence analysis; Eigen values, the total variance in species abundance data, the species-environmental correlations describe the strength of the relationship between species and environment for the axes

Axes	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4
重要值	0.043	0.021	0.003	0.001
物种-环境因子相关性	0.788	0.584	0.713	0.645
物种变量累计百分数	29.0%	43.2%	45.4%	46.1%
物种-环境变量累计百分数	61.9%	92.2%	97.1%	98.5%

沉水植物的生长会受到一系列因素的影响. 典范对应分析排序图中由主轴 1 和主轴 2 构成,环境因子用带有箭头的线段表示,向量长短代表了其在主轴中的作用,箭头所处象限表示环境因子与排序轴之间相关性的正负. 分析时,可以做出某一种类(或样点)与环境因子连线的垂直线,垂直线与环境因子连线相交点离箭头越近,表示该物种(或该样点)与该类生境因子的正相关性越大,处于另一端的则表示与该类环境因子具有的负相关性越大. 对沉水植物的优势种(或采样点)在主轴上排序,则可反映这些沉水植物与环境因子之间的对应关系.

从排序图上明显反映出不同沉水植物及河流对环境条件的不同适应特点,对于环境因子来讲,第一、第二排序轴间的相关系数都为 0,说明排序结果是有效可信的. 第一排序轴与总氮、总磷、氨氮、溶解氧及温度都呈明显正相关,与透明度呈负相关(-0.438);第二排序轴与流速呈正相关(0.481),与 pH 值呈负相关(-0.764).

图 3a 反映了各采样点与环境因子的相关关系. 随着第一轴由左向右,水体透明度逐渐降低,水体中各营养物质含量逐渐增加. 第三象限内的河流主要为潮白河水系的山区河流,此类河流透明度整体

都较高,沉水植物丰富度在所有河流中为最大.从第三象限进入第四象限,河流种类过渡为北京市区内沉水植物丰富度较高的河流.进入第一象限后,在此区域内的河流水体中氮磷值含量都较高,这些河流的分布基本都与氮磷含量呈正相关,其中有若干条河流中无沉水植物存在,其余河流中分布的沉水植物基本也为单一的菹齿眼子菜群落.

图 3b 反映了沉水植物与环境因子间的关系.从图中可以看出,随着环境因子的变化,植物种群分布也随之产生变化.根据 10 个主要环境因子的分布特征,CCA 排序分析可将 15 种沉水植物种类分为几组.第一组只包括刚毛藻 1 种沉水植物,其分布与总磷和总氮浓度呈明显正相关.第二组包括菹草、

穗花狐尾藻、小眼子菜、金鱼藻 4 种沉水植物,其分布格局受水体氮磷含量以及透明度共同影响,基本都生活在中营养或富营养状态水体中;第三组包括穿叶眼子菜、马来眼子菜、小茨藻、大茨藻、苦草、黑藻这几种沉水植物,在排序图中,这几种沉水植物与河流透明度相关性很高,属于清洁物种;第四组包括水网、水绵和菹齿眼子菜,对这几种植物影响最大的环境因素是流速,同时它们的分布也受到氮磷等水体营养盐含量的影响.整体来看,各种沉水植物的分布与营养盐指标有着极大的相关性,不同植物受到物理化学因子影响程度不同,其适应的区间也存在差异性,但是主要决定因子仍然是营养盐含量.

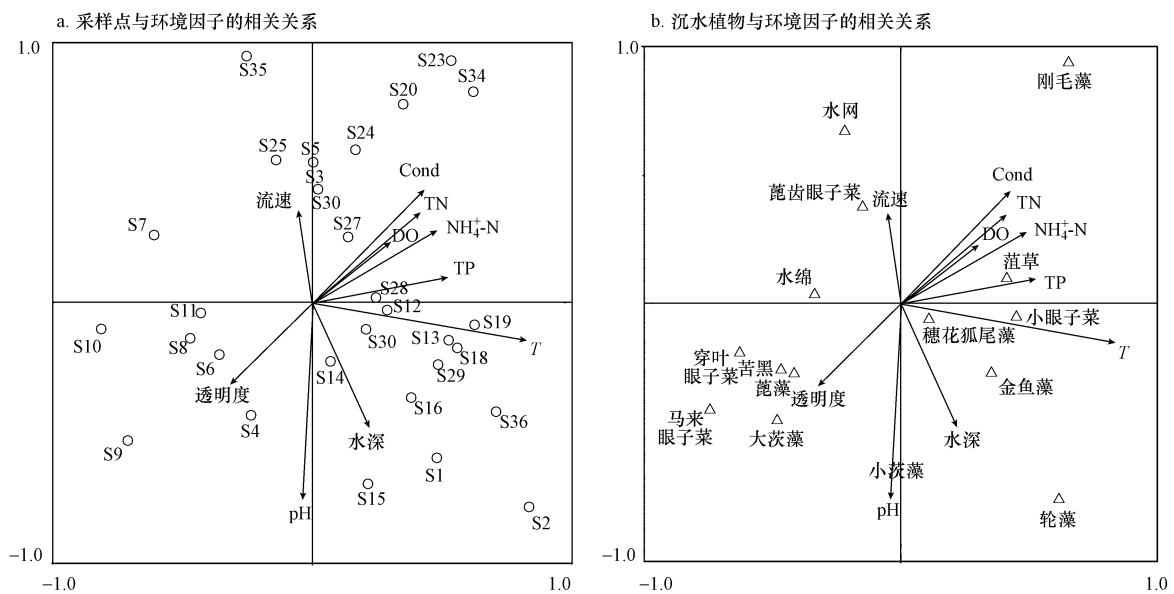


图 3 同河流及不同沉水植物与环境因子的 CCA 排序图

Fig. 3 CCA ordination diagrams of samples- environmental factor and species- environmental factor

4 结论 (Conclusions)

1) 北京市各水系河流中沉水植物的分布及生物量都会受到一系列物理化学环境因子的影响,与水体中氮磷等常规营养元素含量以及透明度等物理指标具有很强的相关性,同时也会对环境因子产生反作用.

2) 沉水植物的存在是由于所处环境各项指标处于适宜其生长的范围内,环境会影响沉水植物的分布及数量,轮藻、黑藻、马来眼子菜等物种通常仅能在清洁水体中生存,水质的恶化会造成此类物种的消失;金鱼藻属于广布物种,其生态幅宽度较大,广泛存在于各类水体中;而菹齿眼子菜、菹草等耐

污种能够适应较高的污染负荷.

3) 沉水植物的大量存在同样会对水体物理化学因子产生影响,大面积的沉水植物生长能降低水体浊度、抑制藻类生长,从而达到净化水体的作用.主成分分析和典范对应分析都表明,水体中的总氮、总磷和氨氮含量对北京市河流中沉水植物分布的作用比较大,其他环境因子也会对其生物多样性产生一定影响.

4) 控制水体中的氮磷含量是保护和恢复沉水植物多样性的可行手段之一.根据水质状况选择适应性的沉水植物作为先锋物种,能够启动河流生态系统的恢复.对于北京平原的重污染河流,可选择耐污的宽生态幅的物种菹齿眼子菜、菹草、金鱼藻

来启动水生生态系统修复.

责任作者简介:何萍,女,博士,研究员,从事流域水生生态系统研究. E-mail: heping18@sohu.com.

参考文献 (References):

- Carbiener R, Trémolières M, Mercier J L & Ortscheidt A. 1990. Aquatic macrophyte communities as bioindicators of eutrophication in calcareous oligosaprobe stream waters (Upper Rhine plain, Alsace) [J]. *Vegetatio*, 86: 71-88
- 郭晓丽,林清,李宁,等.2010.广西钦州市钦南区和钦北区沉水植物分布与多样性研究[J]. *安徽农业科学*, 38 (13): 6778-6780
- Guo X L, Lin Q, Li N, *et al.* 2010. Study on distribution and diversity of submerged plant in Qinnan District and Qinbei District of Qinzhou city in Guangxi [J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 38 (13): 6778-6780 (in Chinese)
- Holmes N T H, Boon P J, Rowell T A. 1998. A revised classification system for British rivers based on their aquatic plant communities [J]. *Aquatic Conservation; Marine and Freshwater Ecosystems*, 8: 555-578
- 金相灿,屠清瑛. 1990. 湖泊富营养化调查规范(2版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社. 158
- Jin X C, Tu Q Y. 1990. Lake eutrophication investigation standard (2nd ed) [M]. Beijing: Chinese Environment Science Press. 158
- 雷泽湘,徐德兰,黄沛生,等.2006.太湖沉水和浮叶植被及其水环境效应研究[J]. *生态环境*, 15(2): 239-243
- Lei Z X, Xu D L, Huang P S, *et al.* 2006. Submersed and floating-leaved macrophytes in Taihu Lake and their water environmental effect [J]. *Ecology and Environment*, 15(2): 239-243 (in Chinese)
- Palmer M A, Bell S L, Butterfield I. 1992. A botanical classification of standing waters in Britain: applications for conservation and monitoring [J]. *Aquatic Conservation; Marine and Freshwater Ecosystems*, 2: 125-143
- Probst A, Fritz B, Viville D. 1995. Mid-trends in acid precipitation, streamwater chemistry and elements budgets in the Strengbach catchment (Vosges mountains, France) [J]. *Wat Air Soil Pollut*, 79: 39-59
- Robach F, Thiébaud G, Trémolières M & Muller S. 1996. A reference system for continental running waters: plant communities as bioindicators of increasing eutrophication in alkaline and acidic waters in North East of France [J]. *Hydrobiologia*, 340: 67-76
- 国家环境保护总局.2002.水和废水监测分析方法(第4版) [M]. 北京:中国环境科学出版社. 32-70
- State Environmental Protection Administration. 2002. The Analyse Method of Water and Waste Water Survey (4th ed) [M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press. 32-70 (in Chinese)
- Ter Braak C J F, Similauer P. 2002. CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (version 4.5) [M]. Ithaca, NY USA: Microcomputer Power. 500
- 吴振斌,陈德强,邱东茹,等.2003.武汉东湖水生植被现状调查及群落演替分析[J]. *重庆环境科学*, 25(8): 54-59
- Wu Z B, Chen D Q, Qiu D R, *et al.* 2003. Investigation of the distribution of the aquatic vegetation in Lake Donghu, Wuhan [J]. *Journal of Chongqing Envi Sci*, 25(8): 54-59 (in Chinese)