水盾草入侵群落及其生境特征研究

于明坚¹ 丁炳扬¹ 俞建¹ 金孝锋¹ 周宏¹ 叶万辉²

(1 浙江大学生命科学院 杭州 310012) (2 中国科学院华南植物研究所 广州 510650)

摘要 水盾草(*Cabomba caroliniana*)是原产南北美洲的沉水植物,常被作为水族馆植物引种至世界各地,近年来开始入侵我国沉水植物群落。该文通过对其入侵水域 19 个代表性地点的群落学调查和水质测试,研究其入侵生态系统的基本特征。结果表明,水盾草入侵群落的水域类型均为水流平缓的中小型河流和湖泊,水质大多属中营养化和富营养化。水盾草在所调查的大部分沉水植物群落中基本上为优势种或共优种,并且其重要值与物种数呈显著负相关。群落间相似性系数(Spatz 指数)大部分在 15% ~ 40% 之间,其大小主要与群落种类组成差异有关。水盾草的生物量与水体透明度呈显著正相关,生物量和优势度与溶解氧呈显著负相关,频度和生物量在 0.4 ~ 1.2 m 的水深处最高。水盾草入侵群落的共存种主要为金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、苦草(*Vallisneria spiralis*)、黑藻(*Hydrilla verticillata*)以及菹草(*Potamogeton crispus*)、穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)等,它在群落中的优势度与金鱼藻无显著的相关性,但与黑藻和苦草呈显著负相关。估计水盾草在我国尚有较大扩散空间,水域众多、营养化程度较高的亚热带平原地区是其最适入侵区,应加强基础和防除研究。

关键词 水盾草 生物入侵 沉水植物群落 生境 水质 共存种

BASIC CHARACTERISTICS OF SUBMERGED PLANT COMMUNITIES INVADED BY *CABOMBA CAROLINIANA* AND ITS HABITAT IN CHINA

YU Ming-Jian¹ DING Bing-Yang¹ YU Jian¹ JIN Xiao-Feng¹ ZHOU Hong¹ and YE Wan-Hui²

(1 College of Life Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310012, China)

(2 South China Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract *Cabomba caroliniana* (common names: Cabomba, Fanwort) is a submerged plant from the USA and South America that was introduced into China in the 1980s as an aquarium plant for its beautiful and finely dissected submerged foliage. Cabomba is now distributed widely throughout the Changjiang River Delta in East China and has become a dominant species in many submerged plant communities in this region. In order to better understand the ecology of Cabomba, we investigated 19 communities dominated by Cabomba and measured the species composition, habitat characteristics, and water quality parameters during the summers of 2001 and 2002.

Our results showed that Cabomba was an aggressive invader of slow flowing, small to middle-sized rivers and lakes with silt substrates, particularly in waters that were nutrient rich. The average water quality characteristics of these ecosystems were: transparency = 0.60 m – 1.45 m, pH value = 6.19 – 7.51, total nitrogen = 0.14 – 3.27 mg·L⁻¹, total phosphorus = 0.044 – 0.838 mg·L⁻¹, COD_{Cr} = 1.96 – 8.15 mg·L⁻¹, DO = 1.23 – 7.32 mg·L⁻¹. These habitat characteristics are similar to those measured in its habitat in the USA and Australia. Suitable water depth was 0.4 – 1.2 m and varied among the study sites. Cabomba was the dominant or co-dominant species in most communities investigated, and its dominance was strongly negatively correlated with the total number of species in the community. It is highly probable that the species diversity decreased after invasion by Cabomba. The biomass of Cabomba had a significant positive correlation with water transparency, and its biomass and dominance had a strong negative relationship with dissolved oxygen in the water. This indicated that Cabomba preferred high light conditions like most other submerged plants but can tolerate lower dissolved oxygen concentrations. Most similarity coefficients as put forward by Spatz were 15% – 40% for the 19 communities and were related to the number and composition ratio of the various species. The main co-dominant plants of the communities were *Ceratophyllum demersum*, *Hydrilla verticillata*, *Vallisneria spiralis*, *Potamogeton crispus* and *Myriophyllum spicatum* were somewhat common as well. It was noteworthy

收稿日期: 2003-03-17 接受日期: 2003-11-03

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G2000046803)和国家自然科学基金项目(39970145)

绍兴文理学院的沈海铭副教授、浙江大学符翔、盛文龙、陈苍松、方杰、王鹏等同学参加了部分野外工作,特此致谢!

E-mail: ymj918@mail.hz.zj.cn

that these species are dominant in many submerged plant communities in the subtropics of China. The dominance of *Cabomba* was negatively correlated with *H. verticillata* and *V. natans*. This indicates that the invasion of *Cabomba* influenced the existence of the two species.

In conclusion, *Cabomba* invaded the Changjiang River Delta, a relatively developed region in P. R. China, by escaping from aquaria. It quickly became widespread because of its comparatively better adaptability to these habitats and its stronger ability to spread vegetatively than many native submerged plants. The preferred habitat of *Cabomba* was slow flowing subtropical waters with high to moderate nutrient levels. The waters *Cabomba* inhabited were mostly polluted from industrial, agricultural, and domestic sewage runoff. *Cabomba* most easily invaded communities dominated by *Ceratophyllum demersum*, *Hydrilla verticillata* and *Vallisneria natans*; thus, these three species can be regarded as indicators of easily invasible communities. The invasion of *Cabomba* requires more basic research in order to establish effective measures to control the spread of this species in China.

Key words *Cabomba caroliniana*, Biological invasion, Submerged plant communities, Habitat, Water quality, Coexisting species

生物入侵是生物多样性丧失的重要原因和 21 世纪最棘手的全球生态问题之一,并已备受国际社会的关注(彭少麟等,1999;Mack *et al.*,2000;徐承远等,2001;Guo,2002)。由于经济发展和贸易增长,我国的外来种入侵问题也日趋严重,对本地生物多样性和农业生产造成了巨大威胁,部分入侵种的危害已经到了难以控制的局面,生物入侵造成的“生物污染”已严重威胁着我国的生物安全(李博等,2001;吴世捷等,2002;万方浩等,2002)。外来种入侵、扩散并造成危害的机制受到了普遍关注,其中了解入侵生态系统的特征是相关研究的基础工作之一(Mack *et al.*,2000;Shea & Chesson,2002;徐汝梅等,2003)。

水盾草(*Cabomba caroliniana* Gray, *Cabomba*, Fanwort)为多年生沉水植物,原产美国和南美(Hanlon,1990;Ørgaard,1991;Madsen,1994),常被作为水族馆植物引种至世界各地(澳大利亚、日本、加拿大、马来西亚、印度、新几内亚等),并已很早在澳大利亚和日本等国归化为难以防除的杂草(Mackey & Swarbrick,1997)。在美国,除了佛罗里达州等东南部几个州外,其它包括东北部各州均作为外来种进行防治,佛罗里达州已将水盾草列入 19 种禁止被运送、引入、培养、采集和出售的物种之一。在澳大利亚,水盾草已大范围入侵,有大规模取代本土水生植物的趋势。例如,1992 年 4 月它在昆士兰州东南部的 Macdonald 湖首次被报道,到 1995 年已侵袭了整个湖的沿岸地带,并取代了本土沉水植物(Mackey & Swarbrick,1997)。

我国于 1993 年在宁波首次发现该种,目前已广泛分布于浙江的杭嘉湖平原和宁绍平原水域、江苏的太湖及其附近水域、上海淀山湖及附近水域等地,并已在许多沉水植物群落中成为优势种(万志刚等,

1999;丁炳扬等,2003)。水盾草入侵我国的时间较短,在我国淡水生态系统的扩散趋势尚不能下定论。但若仅从气候条件考虑,它在我国尚有很大的扩散空间,因其在原产地南北美洲的分布范围为 20°~35°S,27°~47°N。此外,据我们的观察,其无性繁殖能力和在我国目前分布区内的越冬能力均很强。因此,对水盾草入侵的生态系统基本特征进行分析,探讨其在沉水植物群落中的地位及与种类组成、水质因子等的关系,将为预测其在我国的扩散机制和趋势、阐明其入侵对我国水生生态系统的影响及其相应的控制对策等研究奠定基础。

1 样地概况

踏查了浙、苏、沪、皖、赣、闽、粤、桂、湘、鄂等 10 个省、市、自治区的 83 个县(市)300 多个点,发现水盾草仅分布于江苏太湖流域、上海淀山湖附近、浙江杭嘉湖平原和宁绍平原,其中分布点密度最高的为绍兴的水网地带。此外,在浙江建德富春江水库(梅城镇附近)也有分布。分布的水域类型主要是平原水网的中小型河流、小型湖泊,水位较稳定,水流速度缓慢,水深不超过 3 m,仅梅城这一分布点为水库尾部,水较深,但水流缓慢,故水盾草能在此定居,并在水浅处占优势。根据水盾草的分布现状(丁炳扬等,2003),我们选择了 19 个点设置代表性样地进行群落学调查,其中苏州 3 个、湖州和嘉兴 3 个、杭州 4 个(含梅城)、绍兴 6 个(最密集分布区)、宁波 3 个(图 1)。

2 研究方法

2.1 野外群落学调查

课题组于 2000 年和 2001 年夏季对上述 19 个地点进行了群落学调查。具体方法是,在某一地点,选

图 1 水盾草入侵群落调查样地布置图

Fig.1 The allocation of plots for research on the communities invaded by *Cabomba caroliniana*

各样地号所处地点为 The No. of sites/plots means : 1. 东钱湖镇 Dongqianhu 2. 方桥镇 Fangqiao 3. 陶堰镇 Taoyan 4. 仁让堰 Renrangyan 5. 兰亭镇 Lanting 6. 斗门镇 Doumen 7. 湖塘镇 Hutang 8. 鉴湖镇 Jianhu 9. 南湖 Nanhu 10. 阳澄湖镇 Yangchenghu 11. 太湖乡 Taihu 12. 庙港镇 Miaogang 13. 道场乡 Daochang 14. 梅城镇 Meicheng 15. 河姆渡 Hemudu 16. 雷甸镇 Leidian 17. 三墩镇 Sandun 18. 五常乡 Wuchang 19. 城厢镇 Chengxiang

择有代表性的地段确定样地范围 ,然后间隔一定距离 (20~50 m 不等 ,视其在该地的分布范围大小而定)选择 5~10 个 (绝大部分为 10 个 ,极少数分布范围很小的选 5 个)代表性的剖面。剖面确定后 ,从岸边开始到水体中央 ,每间隔 0.4 m 左右的水深用 0.5 m×0.5 m 的铁夹子采样 (每一次采样作为一个样方)采样至肯定没有沉水植物的水深处为止。每次采样将铁夹内的植物连根拔起 ,马上洗净 ,分种类 ,称其鲜重 ,然后取每一种植物的一定重量的样品带回 ,在 80 ℃ 条件下烘干至恒重 ,以此换算每一种植物的干重。

2.2 水样采集和水质测试

在进行群落学调查时 ,选择中午时分 ,用透明度盘测定水体的透明度 ;并先在野外用便携式 pH 计测定水体的 pH 值。各地点的调查结束后 ,集中时间采集水样。水质测试方法为 :pH 值用玻璃电极法 ,总氮用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法 ,总磷用过硫酸盐消解法 ,COD 用重铬酸钾法 ,DO 用碘量法。

2.3 数据处理

2.3.1 优势度

根据沉水植物的特性 ,各种类的优势度用生物

量和频度推算 (陈洪达 ,1980 ;崔心红等 ,1999) :优势度 (重要值) = [(相对频度 + 相对生物量) × 100%] / 2。

2.3.2 各种相关和回归分析

常规计算在 Excel 上进行 ,相关和回归分析用大型统计分析软件 SPSS。

用 SPSS 计算水盾草优势度、生物量等参数与各水质因子的 Pearson 相关系数。

种间相关分析 :计算水盾草、金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum*)、黑藻 (*Hydrilla verticillata*) 和苦草 (*Vallisneria spiralis*) 的重要值和生物量之间的相关系数。种间联结 (AC) :以各种群共同出现百分率计算。群落相似性系数 :采用考虑了定性和定量两方面而信息量较大的 Spatz 指数 ,它是 Jaccard 指数的修正式 (宋永昌 ,2000)。

3 结果和分析

3.1 各群落的生境条件

由表 1 可见 ,各样地的水域类型以中小型河流为主 ,水库和湖泊的各 1 个 ,水流慢 ,河岸处水深一般都小于 0.5 m ,底质大多为淤泥。各点水体的透明度为 0.60~1.45 m ,pH 值 6.19~7.51 ,总氮 0.14~3.27 mg·L⁻¹ ,总磷 0.044~0.838 mg·L⁻¹ ,COD_{Cr} 为 1.96~8.15 mg·L⁻¹ ,DO 为 1.23~7.32 mg·L⁻¹ ,水质大多属中营养化和富营养化。

以上各生境特点基本上与其原产地及澳大利亚、日本等地相近 ,但略有差异。在这些地区 ,还发现水盾草分布于渠道、沼泽中的小溪 ,能在水深 10 m 处生长 ,适合生长的 pH 值酸性至中性、COD 为 3.2~8.23 mg·L⁻¹ (Mackey & Swarbrick ,1997 ; Keith Turnbull Research Institute (Frankston) ,1999 ; Ministry of Ontario Natural Resource ,1999)。我国水盾草分布水体类型和水深、pH 值范围较小 ,估计与水盾草入侵我国时间不长 ,尚未大范围扩散有关。

3.2 群落的种类组成

图 2 是除宁波东钱湖镇外 18 个样地中各种类的重要值。东钱湖镇的群落中只有水盾草 ,该镇有不少锌、镍电镀厂 ,估计在这种生境下除水盾草外其它本地沉水植物无法生长。水盾草在所调查的大部分样地中基本上为优势种或共优种 ,除东钱湖镇外 ,其重要值大于 50% 的有 11 个样地 ,另有 3 个样地其重要值在 48%~50% 之间。方桥镇、三墩镇、阳澄湖镇、城厢镇、五常乡、河姆渡等样地中水盾草已成为绝对优势种。而道场乡和太湖乡的优势种为苦

表 1 调查样地的沉水植物群落类型和生境概况
Table 1 The submerged plant community types and habitat condition of the plots

样地号 No. of plots	群落类型(优势种) Community type (Dominant species)	水域类型 Water area type	水流速 Flowing rate	透明度 Transparency (m)	pH	总氮 TN (mg·L ⁻¹)	总磷 TP (mg·L ⁻¹)	化学耗氧量 COD _{Cr} (mg·L ⁻¹)	溶解氧 DO (mg·L ⁻¹)
1	水盾草 Cc	镇边小河 SR	慢 Very slow	0.65	6.81	2.32	0.261	5.85	3.14
2	水盾草 Cc	镇边小河 SR	慢 Slow	1.45	6.77	1.69	0.131	3.06	1.41
3	水盾草 Cc	村边中河 MR	很慢 Very slow	1.28	7.51	1.59	0.083	7.21	4.12
4	水盾草-金鱼藻 Cc-Cd	田边小河 SR	很慢 Very slow	0.93	7.19	1.28	0.079	5.25	4.04
5	黑藻-水盾草-金鱼藻 Hv-Cc-Cd	村边小河 SR	很慢 Very slow	1.22	7.14	0.14	0.838	2.79	1.23
6	水盾草 Cc	镇边小河 SR	很慢 Very slow	0.75	7.36	2.83	0.309	8.15	3.81
7	水盾草-黑藻-苦草 Cc-Hv-Vn	镇边中河 MR	慢 Slow	0.79	7.27	0.87	0.079	4.75	5.27
8	水盾草-苦草 Cc-Vn	镇边小河 SR	慢 Slow	0.78	7.36	1.07	0.119	7.44	3.91
9	水盾草-金鱼藻 Cc-Cd	镇边湖泊 L	静止 Stillness	0.58	7.21	3.27	0.253	7.08	2.48
10	水盾草 Cc	湖边小河 SR	很慢 Very slow	1.18	7.32	2.21	0.083	6.05	3.12
11	苦草-水盾草 Vn-Cc	湖边小河 SR	很慢 Very slow	1.05	6.78	0.61	0.050	4.78	4.80
12	水盾草-金鱼藻 Cc-Cd	镇边小河 SR	很慢 Very slow	1.03	6.19	0.93	0.044	4.78	3.01
13	苦草-水盾草-金鱼藻 Vn-Cc-Cd	田边小河 SR	慢 Slow	0.75	6.83	0.98	0.044	4.62	7.32
14	苦草 Vn	镇边水库 SL	慢 Slow	1.20	7.20	1.63	0.280	4.12	5.71
15	水盾草-金鱼藻 Cc-Cd	村边小河 SR	很慢 Very slow	0.65	7.10	2.22	0.101	3.88	5.88
16	水盾草-金鱼藻 Cc-Cd	村边小河 SR	很慢 Very slow	1.20	7.20	1.04	0.080	1.96	3.54
17	水盾草 Cc	镇边小河 SR	慢 Slow	1.10	7.22	0.85	0.090	3.40	3.67
18	水盾草 Cc	镇边小河 SR	很慢 Very slow	1.30	7.30	1.31	0.119	2.40	1.37
19	水盾草 Cc	镇边中河 MR	慢 Slow	1.11	7.50	1.32	0.110	3.14	3.67

* Cc 水盾草 *Cabomba caroliniana* Cd 金鱼藻 *Ceratophyllum demersum* Hv :黑藻 *Hydrilla verticillata* Vn :苦草 *Vallisneria natans* SR :Small river
LR : Large river MR : Middle river. L : Lake 1 ~ 19 : 同图 1 See Fig. 1

草,估计与这两个群落中物种数较多、水质较好有关。

梅城镇的群落是唯一一个在中型水库内的群落,处于新安江、兰江与富春江水库的交汇处,群落生境与其它群落不同;并且梅城镇的水盾草分布至今无法明确与其它群落间的关系,在水盾草分布图上呈孤岛(图1),群落中苦草占绝对优势,水盾草可分布于2 m以下,但深水处苦草长得更好。

该文统计了水盾草重要值与物种数的相关性,

其 Pearson 相关系数为 - 0.532($p < 0.05$),反映水盾草入侵后,随着其优势度增加,群落的物种多样性明显下降。

3.3 群落间的相似性

表2为19个群落间的相似性系数(Spatz指数),所有群落间相似性系数的均值为25.38($SD = \pm 13.78$),大部分Spatz指数在15% ~ 40%之间。其中相似性最高的是斗门镇(样地6)和阳澄湖镇(样地10)两个群落,Spatz指数达到了61.37%,这两个群

图 2 各样地沉水植物群落中不同种类的重要值

Fig. 2 The important value of species in the submerged plant communities of the plots

1. 水盾草 *Cabomba caroliniana* 2. 金鱼藻 *Ceratophyllum demersum* 3. 黑藻 *Hydrilla verticillata* 4. 苦草 *Vallisneria natans* 5. 密齿苦草 *V. denseserrulata* 6. 道草 *Potamogeton crispus* 7. 穗花狐尾藻 *Myriophyllum spicatum* 8. 黄花狸藻 *Utricularia aurea* 9. 轮藻 *Chara* 10. 水蓼衣 *Hydrophila* sp. 11. 小茨藻 *Najas minor* 12. 马来眼子菜 *P. malaianus* 13. 水车前 *Ottelia alismoides* 14. 澳古茨藻 *N. oguraensis* 15. 大茨藻 *N. marina* 16. 弯果茨藻 *N. ancistrocarpa*

表 2 各群落间相似性系数(% Spatz 指数,以重要值计算)	
Table 2 The similarity coefficient of the communities put forward by Spatz(%)	
Plot	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
1	
2	19.09
3	8.90 20.33
4	7.03 45.81 29.80
5	5.01 8.76 28.74 28.22
6	11.36 47.83 39.62 50.89 21.54
7	4.32 20.80 31.75 40.11 30.26 2.92
8	5.02 18.61 27.06 26.22 13.33 39.23 34.01
9	9.02 32.07 55.18 49.49 41.15 46.87 39.16 33.13
10	9.99 41.59 35.03 43.04 18.47 61.37 37.29 30.24 42.66
11	2.10 18.05 9.65 24.94 6.99 19.59 14.09 17.88 10.23 18.18
12	8.67 37.88 41.70 43.19 25.16 51.47 30.53 39.55 54.09 51.19 11.54
13	0.91 7.53 12.85 10.99 7.57 16.20 12.22 21.52 8.33 14.84 28.97 15.09
14	1.47 18.34 15.07 15.37 10.52 25.48 20.45 39.53 20.40 22.66 16.92 36.02 14.7
15	12.19 19.69 37.79 30.10 36.93 36.64 21.28 20.47 44.01 33.43 6.71 40.45 9.38 12.7
16	6.41 25.64 30.48 45.26 15.83 28.94 22.88 13.98 25.84 25.43 11.37 27.07 9.09 7.86 34.60
17	14.28 33.52 26.78 29.70 13.34 43.67 26.36 20.57 33.84 43.67 6.64 35.19 10.70 8.49 38.60 30.10
18	12.25 29.03 30.03 34.19 16.67 37.06 21.18 17.50 23.43 34.84 5.97 42.96 6.47 7.10 27.40 21.70 45.02
19	7.41 31.16 24.36 42.62 12.49 48.23 38.50 22.40 28.08 43.95 14.78 34.43 14.40 14.90 39.70 43.20 45.09 25.57

Spatz 指数 $IS_{Sp} = [\sum (M_m/M_g)(a+b+c)] \times [M_a / (M_a + M_b + M_c)]$ 式中 a 为两样地共有种数, b 为样地 1 独有数, c 为样地 2 独有数, M_m 为两样地共有种的重要值较小值, M_g 为两样地共有种的重要值较大值, M_a 为两样地共有种的重要值之和, M_b 为样地一独有数的重要值之和, M_c 为样地二独有数的重要值之和 The similarity coefficient put forward by Spatz was calculated as : $IS_{Sp} = [\sum (M_m/M_g)(a+b+c)] \times [M_a / (M_a + M_b + M_c)]$, a was numbers of species appeared in both plots , b was species only appeared in one plot , c was species only appeared in another plot , M_m was the smaller important value of species appeared in both plots , M_g was the bigger important value of species appeared in both plots , M_a was the sum of important value of species appeared in both plots , M_b was the sum of important value of species only appeared in one plot , M_c was the sum of important value of species only appeared in another plot 1 ~ 19 同图 1 See Fig. 1

落在生境、种类组成上均较相似,而东钱湖镇(样地 1)与道场乡(样地 13)两个群落的相似性最小,其 Spatz 指数只有 0.21%,这两个群落中沉水植物分别为 1 种和 13 种。东钱湖镇(样地 1)、太湖乡(样地 11)、道场乡(样地 13)和梅城镇(样地 14)与其它群落之间的相似性系数都很小。

3.4 水盾草在水深剖面上的分布

分别用水盾草在某一水深处的频度(图 3a、b)和生物量(图 3c、d)来分析水盾草在不同水深的分布情况。水盾草的频度在水深剖面上呈两种分布特点,其一随着水深增加而下降(图 3a),其二在中等水深处分布频度较高,较浅或较深时分布稀少(图 3b)。水盾草生物量在水深剖面上的分布基本上与频度相似,仅样地 3 和 17 有所不同(图 3c,生物量随水深增加而增加,原因有待分析)。据野外观察,图 3b 和图 3d 中的情况估计与水浅处底质较硬或人为挖淤泥有关。

3.5 水盾草重要值和生物量与水质因子间的关系

在探讨水盾草的生长与水质因子间关系时仅引用 18 个样地的数据,而将兰亭镇的样地排除。原因是该样地设在村中小河道,村民常年在此洗衣服,故其水体总 P 含量过高(达 $0.838\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。

根据 18 个样地的数据计算了水盾草重要值、生

物量与各水质因子间的 Pearson 相关系数,水盾草重要值仅与溶解氧的相关性达到显著水平($R = -0.682, p < 0.01$),而其生物量则与溶解氧($R = -0.492, p < 0.05$)和透明度($R = 0.600, p < 0.01$)呈显著相关。从统计分析的结果看,水盾草喜在溶解氧较低但透明度较高的水体中生长。

3.6 水盾草与其它种类间的种间关系

水盾草与金鱼藻的共同出现百分率最高,与苦草、黑藻的联结性也很高,而与水蓼衣(*Hygrophila* sp.)、澳古茨藻(*Najas oguraensis*)、大茨藻(*N. marina*)、弯果茨藻(*N. ancistrocarpa*)的相遇率则很低。我们曾根据踏查结果计算了水盾草与其它种类的共同出现百分率(丁炳扬等,2003),两种情况下与水盾草相遇率最高的 5 个种均为金鱼藻、苦草、黑藻、茆草和穗花狐尾藻,但数值大小有差异,主要原因是本文调查的群落均含水盾草,而踏查则统计了所有的点。

表 4 列出了水盾草及与其联结性较高的金鱼藻、黑藻、苦草的重要值和生物量之间的 Pearson 相关系数。水盾草的重要值与黑藻的重要值、苦草的重要值和生物量之间表现为显著负相关。说明水盾草在群落中的地位与苦草、黑藻之间是一种消长关系,原因是它们对水质条件和水深的要求有差异,与

图 3 水盾草频度和生物量在样地水深剖面上的分布
Fig.3 Distribution of frequency and biomass of *Cabomba caroliniana* in different depth of water in the various plots
1 ~ 19 : 同图 1 See Fig. 1

表 3 水盾草与其它沉水植物的共同出现百分率
Table 3 Percentage of co-appearance between *Cabomba caroliniana* and other aquatic plants in the communities

种名 Species	共同出现百分率 PC (%)	种名 Species	共同出现百分率 PC (%)
金鱼藻 <i>C. demersum</i>	97.74	马来眼子菜 <i>P. malaianus</i>	15.79
苦草 <i>V. natans</i>	84.21	小茨藻 <i>N. minor</i>	15.79
黑藻 <i>H. verticillata</i>	84.21	水车前 <i>O. alismoides</i>	10.53
茳草 <i>P. crispus</i>	26.32	水蓼衣 <i>H. sp.</i>	5.26
穗花狐尾藻 <i>M. spicatum</i>	21.05	澳古茨藻 <i>N. oguraensis</i>	5.26
轮藻 <i>Chara</i>	21.05	大茨藻 <i>N. marina</i>	5.26
黄花狸藻 <i>U. aurea</i>	21.05	弯果茨藻 <i>N. ancistrocarpa</i>	5.26
密齿苦草 <i>V. denseserrulata</i>	15.79		

$PC = a / (a + b + c)$, 式中 a 为两个种均出现的样地数, b 为种一单独出现的样地数, c 为种二单独出现的样地数 PC (Percentage of co-occurrence) = $a / (a + b + c)$, a was No. of plots including both two species, b was no. of plots only including one species, c was no. of plots only including another species

表 4 水盾草与其常见共存种的 Pearson 相关系数(以生物量和重要值计算)
Table 4 Pearson correlation between *Cabomba caroliniana* and several coexisting aquatic plants based on their important value and biomass

种类 Species	重要值 Important value (IV, %)				生物量 Biomass (B, g·m ⁻²)			
	水盾草 ¹	金鱼藻 ²	黑藻 ³	苦草 ⁴	水盾草 ¹	金鱼藻 ²	黑藻 ³	苦草 ⁴
IV	1							
	2	-0.172						
	3	-0.478 *	0.361					
	4	-0.639 **	-0.528 *	-0.126				
B	1	0.522 *	-0.126	-0.221	-0.340			
	2	-0.312	0.654 **	0.717 **	-0.373	0.000		
	3	-0.359	0.339	0.884 **	-0.213	-0.093	0.867 **	
	4	-0.598 **	-0.545 **	-0.179	0.894 **	-0.209	-0.320	-0.191

树种序号同图 2 The means of No. of species is the same as Fig. 2 * : $p < 0.05$ ** : $p < 0.01$

另两者相比,水盾草更喜营养化程度较高的水体(Mackey & Swarbrick, 1997; Keith Turnbull Research Institute(Frankston), 1999),而苦草和黑藻在水质相对较好的群落中优势度更高,在这些水体中水盾草并无竞争优势。金鱼藻虽然是水盾草入侵群落最常见的种类,但它们的重要值和生物量之间几乎无任何相关性,反映了他们在群落中相互影响很少,基本上能够共存。

此外,金鱼藻的生物量与黑藻的重要值和生物量之间存在着显著的正相关,表明这两个本地种在群落中处于长期形成的共存关系。而金鱼藻的重要值则与苦草的重要值和生物量之间存在着显著的负相关,反映了它们在群落中的生长是互相消长的,处于群落近水面处的金鱼藻如果生长好了,则抑制下层的苦草生长,反之亦然,这与水盾草-苦草的关系相似。黑藻与苦草之间几乎无相关性,说明黑藻的生长不一定会显著抑制下层苦草的生长。

4 讨 论

4.1 水盾草入侵群落的非生物环境

水盾草估计于 20 世纪 80 年代入侵我国,其沉水叶十分精致漂亮,故人们生活水平提高后,常作为

水族管观赏植物引进而后逸生,至今基本上仅分布于长江三角洲这一经济相对发达地区的平原水网地带。

水盾草分布的水体类型主要是水网中的河流、湖泊和水库,这些水域水位较稳定、水流速度缓慢,底质多为淤泥,水质大多处于中营养化和富营养化水平。上述结果与美国、澳大利亚、日本等地基本一致,表明这些水体的非生物环境特征都有利于其在该地区定居并繁衍,并预示着水盾草可能入侵群落的生境特点。

当然,因水盾草入侵我国的时间较短,其分布范围还不小,生境类型较少,水质因子幅度也较小。它能不能在更多的水体类型、更广的生境特点中取得一定的生态位,有待做进一步观察和实验。

4.2 群落的共存种

从群落调查的结果看,我国水盾草入侵生态系统的沉水植物种类与澳大利亚昆士兰州相近,即其共存植物有黑藻以及苦草、水蓼衣、茨藻、眼子菜、狸藻(*Utricularia*)等属的植物(Mackey & Swarbrick, 1997)。金鱼藻、黑藻和苦草是长江三角洲诸水网中最常见的优势沉水植物,虽然水盾草与这三者的共同出现百分率均很高,但它似乎更易入侵金鱼藻占

优势的群落,因两者在群落中的位置有差异(金鱼藻的叶片以浮水为主),较易达成共存关系。反之,水盾草在黑藻和苦草占优势的群落可能得不到较快的发展,这与后两者在群落中的位置与水盾草相近,而其所处的水体较洁净使水盾草没有竞争优势有关。

4.3 群落间的相似性

群落间的相似性系数主要反映不同群落间生境条件、原有种类组成以及水盾草入侵时间的差异。水盾草入侵的水体类型较单一,生境条件也相似且都未超过水盾草生长的极限,而水盾草侵入时间很难推算,故从现有结果看相似性系数主要是原有种类组成差异的反映,种类组成越相近,群落间相似性系数越高。而种类组成体现在种类数和优势度比例两个方面。比如,斗门镇和阳澄湖镇两个群落间的相似性系数最高,除了因其种类基本上为水盾草、苦草、金鱼藻、黑藻外(阳澄湖镇虽有小茨藻但重要值极小),还因这几个种类的重要值和生物量也很接近。绝大多数样地种类数均在3~7之间,仅东钱湖镇为1种、太湖乡为9种、道场乡为13种,且东钱湖镇水盾草重要值为100%、太湖乡和道场乡的优势种均为苦草,因而这3个群落与其它群落间的相似性系数都很小,梅城镇群落与其它群落间的差异也主要源于苦草占绝对优势。而太湖乡和道场乡群落间的相似性系数高于它们与梅城镇的,也主要因种类组成的差异。因此,种类组成是预测水盾草入侵和扩散趋势的一项重要指标。

4.4 水盾草的竞争优势与扩散趋势

水盾草在我国已入侵群落的生长和扩散过程大致为:首先从水族箱中逃逸,然后在某一较平缓水体中定居并建立种群,继而通过断枝漂移扩散(丁炳扬等,2003)。它比金鱼藻、黑藻和苦草等优势种具有更强的越冬能力,在早春能更快地占据位置,并且其断枝的营养繁殖能力也很强。水盾草基本具备入侵种传播能力、对环境的适应性和生命力强等入侵种的特点,这是今后其可能大规模扩散的基础。

水盾草喜在平缓、营养化较高的水体中生存,其生长与溶解氧呈显著负相关,这对我国很多水体富营养化日趋严重的平原地区而言,是一个十分危险的信号。另一方面,本地大型植物是预测外来种适宜生境的好指标(Nichols & Buchan, 1997),而水盾草入侵群落的共存种如金鱼藻、黑藻、苦草、穗花狐尾藻、密齿苦草、菹草、黄花狸藻、轮藻、马来眼子菜、大茨藻等是我国亚热带地区很多沉水植物群落的主要组成种类(陈洪达, 1980; 于丹等, 1996; 严国安等,

1997; 李伟等, 2000; 詹存卫等, 2001),这些群落都有可能被水盾草入侵。此外,水盾草的提取物中在高浓度下有化学他感的作用,而化学他感是决定高等植物分布的一个重要因素(Elakovich & Wooten, 1989),该研究也发现水盾草的优势度与群落物种数呈显著负相关。

从上面的结果和讨论可知,水盾草在我国具备扩散和进一步危害的潜力和趋势。我们认为,水盾草至今尚未在我国其它相似生境的地区定居成功,或有些群落中优势度不高很有可能是时间问题,在其大规模爆发之前就应重视基础研究和防除工作,澳大利亚的水盾草已几乎无法根除就是一个教训。澳大利亚曾试图用多种方法如除草剂、降低水位、应用天敌等方法控制水盾草,但并不成功,原因主要有两个:第一,新的入侵很难被发现,除非受影响的面积很大;第二,水盾草生长迅速,除非在早期进行控制,否则水盾草将在整个生态系统定居,根除希望很小(Mackey & Swarbrick, 1997)。当然,要深入了解一个入侵种的特性及对生态系统影响的机制,预测其扩散趋势,还需做许多工作(Madsen, 1998; Callaway & Aschehoug, 2000; Shea & Chesson, 2002)。

参 考 文 献

- Callaway, R. M. & E. T. Aschehoug. 2000. Invasive plants versus their new and old neighbors: a mechanism for exotic invasion. *Science*, **290**: 521 ~ 523.
- Cui, X. H. (崔心红), J. K. Chen (陈家宽) & W. Li (李伟). 1999. Survey methods on aquatic macrophyte vegetation in lakes in the middle and lower reaches of Chang-jiang River. *Journal of Wuhan Botanical Research (武汉植物学研究)*, **17**: 356 ~ 357. (in Chinese with English abstract)
- Chen, H. D. (陈洪达). 1980. The structure and dynamics of aquatic vascular plant communities in Dong Lake, Wuhan. *Oceanologia et Limnologia Sinica (海洋与湖沼)*, **11**: 277 ~ 283. (in Chinese with English abstract)
- Ding, B. Y. (丁炳扬), M. J. Yu (于明坚), X. F. Jin (金孝锋), J. Yu (俞建), W. M. Jiang (姜维梅) & K. F. Dong (董柯锋). 2003. The distribution characteristics and invasive route of *Cabomba caroliniana* in China. *Biodiversity Science (生物多样性)*, **11**: 223 ~ 230. (in Chinese with English abstract)
- Elakovich, S. D. & J. W. Wooten. 1989. Allelopathic potential of sixteen aquatic and wetland plants. *Journal of Aquatic Plant Management*, **27**: 78 ~ 84.
- Guo, Q. F. 2002. Perspectives on trans-Pacific biological invasions. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, **26**: 724 ~ 730.
- Hanlon, C. 1990. A Florida native-cabomba (Fanwort). *Aquatics*, **12**: 4 ~ 6.
- Keith Turnbull Research Institute (Frankston). 1999. Cabomba. (<http://dir.yahoo.com/Society-and-Culture/Environment-and-Nature/Invasive-Species/>)
- Li, B. (李博), P. S. Hsu (徐炳声) & J. K. Chen (陈家宽).

2001. Perspectives on general trends of plant invasions with special reference to alien weed flora of Shanghai. *Biodiversity Science(生物多样性)*, **9**: 446 ~ 457. (in Chinese with English abstract)
- Li, W. (李伟) & Y. Cheng (程玉). 2000. Quantitative analysis on the main submerged communities in Hong-Hu Lake. III. *Ceratophyllum demersum* + *Potamogeton Maackianus* + *Myriophyllum spicatum* Community. *Acta Hydrobiologica Sinica (水生生物学报)*, **24**: 30 ~ 35. (in Chinese with English abstract)
- Mack, R. N., D. Simberloff, W. M. Lonsdale, H. Evans, M. Clout & F. A. Bazzaz. 2000. Biotic invasions: causes, epidemiology, global consequences, and control. *Ecological Applications*, **10**: 689 ~ 710.
- Mackey, A. P. & J. T. Swarbrick. 1997. The biology of Australian weeds: 32. *Cabomba caroliniana* Gray. *Plant Protection Quarterly*, **12**: 154 ~ 165.
- Madsen, J. D. 1994. Invasions and declines of submersed macrophytes in Lake George and other Adirondack lakes. *Lake and Reservoir Management*, **10**: 19 ~ 23.
- Madsen, J. D. 1998. Predicting invasion success of Eurasian water-milfoil. *Journal of Aquatic Plant Management*, **36**: 28 ~ 32.
- Ministry of Ontario Natural Resource. 1999. Fanwort invades ontario waters. (<http://dir.yahoo.com/Society-and-Culture/Environment-and-Nature/Invasive-Species/>)
- Nichols, S. A. & A. J. Buchan. 1997. Use of native macrophytes as indicators of suitable Eurasian watermilfoil habitat in Wisconsin lakes. *Journal of Aquatic Plant Management*, **35**: 21 ~ 24.
- Ng, S. C. (吴世捷) & C. Richard (高力行). 2002. The bad biodiversity: alien plant species in Hong Kong. *Biodiversity Science(生物多样性)*, **10**: 109 ~ 118. (in Chinese with English abstract)
- Ørgaard, M. 1991. The genus *Cabomba* (Cabombaceae) — a taxonomic study. *Nordic Journal of Botany*, **11**: 179 ~ 203.
- Peng, S. L. (彭少麟) & Y. C. Xiang (向言词). 1999. The invasion of exotic plants and effects of ecosystems. *Acta Ecologica Sinica(生态学报)*, **19**: 560 ~ 569. (in Chinese with English abstract)
- Shea, K. & P. Chesson. 2002. Community ecology theory as a framework for biological invasions. *Trends in Ecology & Evolution*, **17**: 170 ~ 176.
- Song, Y. C. (宋永昌). 2000. Vegetation ecology. Shanghai: East China Normal University Press. (in Chinese)
- Wan, F. H. (万方浩), J. Y. Guo (郭建英) & D. H. Wang (王德辉). 2002. Alien species in China: their damages and management strategies. *Biodiversity Science(生物多样性)*, **10**: 119 ~ 125. (in Chinese with English abstract)
- Wan, Z. G. (万志刚), Y. J. Gu (顾咏洁) & S. X. Qian (钱士心). 1999. *Cabomba aublet* of Nymphaeaceae — a new record genera from China. *Journal of Wuhan Botanical Research (武汉植物学研究)*, **17**: 215 ~ 216. (in Chinese with English abstract)
- Xu, C. Y. (徐承远), W. J. Zhang (张文驹), B. R. Lu (卢宝荣) & J. K. Chen (陈家宽). 2001. Progress in studies on mechanisms of biological invasion. *Biodiversity Science(生物多样性)*, **9**: 430 ~ 438. (in Chinese with English abstract)
- Xu, R. M. (徐汝梅) & W. H. Ye (叶万辉). 2003. Biological invasion: theory and practice. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- Yan, G. A. (严国安), J. M. Ma (马建敏), D. R. Qiu (邱东茹) & Z. B. Wu (吴振斌). 1997. Succession and species replacement of aquatic plant community in East Lake. *Acta Phytocologica Sinica(植物生态学报)*, **21**: 319 ~ 327. (in Chinese with English abstract)
- Yu, D. (于丹), H. Kang (康辉), P. Xie (谢平) & Y. Y. Chen (陈宜瑜). 1996. A comparative analysis on the species diversity of aquatic plants in Qingling Lake and Huangjia Lake. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, **16**: 565 ~ 575. (in Chinese with English abstract)
- Zhan, C. W. (詹存卫), D. Yu (于丹), Z. H. Wu (吴中华), C. H. Liu (刘春花) & Z. Q. Li (李中强). 2001. The community ecology of aquatic plant in the water-land ecotone of Liangzi Lake. *Acta Phytocologica Sinica(植物生态学报)*, **25**: 573 ~ 580. (in Chinese with English abstract)

责任编委：于 丹 责任编辑：姜联合