

# 水生态基准大型水生植物受试生物筛选

刘婷婷, 郑欣\*, 闫振广, 刘征涛

(中国环境科学研究院 环境基准与风险评估国家重点实验室 国家环境保护化学品生态效应与风险评估重点实验室, 北京 100012)

**摘要:** 为完善保护我国淡水生物的水质基准, 从 44 种国内主要水生植物中筛选了浮萍、紫萍、槐叶苹、金鱼藻、穗状狐尾藻、黑藻、菹草和篦齿眼子菜 8 种代表性本土大型水生植物, 进而参照美国水质基准数据筛选原则, 从 ECOTOX 等数据库中搜集相关毒性数据, 通过数据分析筛选出对大型水生植物毒性最大的 3 种重金属污染物和 12 种除草剂污染物。这 15 种污染物的物种敏感度分布分析显示, 7 种大型水生植物对污染物表现出高敏感性(累积概率<15%), 其中: 浮萍对砷和利谷隆的累积概率分别为 4.3% 和 6.4%, 紫萍对百草枯和甲磺隆的累积概率分别为 7.8% 和 11.5%, 槐叶苹对 2,4-滴二甲胺盐和异丙甲草胺的累积概率分别为 8.5% 和 14.8%, 篦齿眼子菜对 2,4-滴、利谷隆和异丙甲草胺的累积概率分别为 1.2%、2.1% 和 1.9%, 菹草对 2,4-滴和甲磺隆的累积概率分别为 10.8% 和 7.7%, 黑藻对苄嘧磺隆和氟啶酮的累积概率分别为 12.5% 和 7.4%, 金鱼藻对利谷隆、氯化铜和异丙甲草胺的累积概率分别为 8.5%、7.4% 和 11.1%。这 7 种大型水生植物可作为相关污染物水质基准研究的受试生物。

**关键词:** 大型水生植物; 水质基准; 受试生物; 物种敏感度分布; 污染物

中图分类号: X171.5 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)11-2204-09 doi:10.11654/jaes.2014.11.019

## Screening of Native Aquatic Macrophytes for Establishing Aquatic Life Criteria

LIU Ting-ting, ZHENG Xin\*, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao

(State Key Laboratory for Environmental Criteria and Risk Assessment, State Environment Protection Key Laboratory of Ecological Effects and Risk Assessment of Chinese, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Screening of sensitive test aquatic organisms is critical to water quality criteria for aquatic life. Aquatic macrophytes are one of the most important objects for water quality criteria. In the present study, eight native aquatic macrophytes, *Lemna minor*, *Spirodela polyrrhiza*, *Salvinia natans*, *Ceratophyllum demersum*, *Myriophyllum spicatum*, *Hydrilla verticillata*, *Potamogeton crispus*, and *Potamogeton pectinatus*, were obtained based on their geographical locations, availability of toxicity data, and economical and ecological significance. According to the USEPA principles for aquatic life criteria, top 15 pollutants (3 heavy metals and 12 herbicides) were ranked per their toxicities to aquatic macrophytes from the ECOTOX database. Seven aquatic macrophytes showed high sensitivities to pollutants (the cumulative probability was less than 15%). The cumulative probability of *Lemna minor* to thallium and Linuron was 4.3% and 6.4%; that of *Spirodela polyrrhiza* to paraquat and metsulfuron methyl 7.8% and 11.5%; that of *Salvinia natans* to N-Methylmethanamine and metolachlor 8.5% and 14.8%; that of *Potamogeton pectinatus* to 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid, linuron and metolachlor 1.2%, 2.1% and 1.9%; that of *Potamogeton crispus* to 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid and metsulfuron methyl 10.8% and 7.7%; that of *Hydrilla verticillata* to bensulfuron methyl and fluridone 12.5% and 7.4%; and that of *Ceratophyllum demersum* to linuron, copper chloride and metolachlor 8.5%, 7.4% and 11.1%, respectively. These species could be used as test organisms for development of water quality criteria.

**Keywords:** aquatic macrophytes; aquatic life criteria; test organisms; species sensitivity distribution; pollutants

水环境污染是影响人类生存和发展的严重问题<sup>[1-2]</sup>。我国水环境污染问题由来已久, 水体中氮磷过

量、重金属及农药等污染都较为严重<sup>[3-4]</sup>。为了保护水环境, 欧美国家从 20 世纪中后期就相继开始建立适宜自身特点的水质基准技术体系, 拥有比较完善的理论研究方法<sup>[5-7]</sup>。近年来, 我国也开始了本土水质基准的研究, 借鉴发达国家水质基准技术方法探讨了适用于我国的部分污染物的水质基准阈值, 如: 张彤和金洪均<sup>[8-10]</sup>通过毒性实验研究推导出烯腈、硫氰酸钠和乙腈的基准最大浓度和基准连续浓度; Yin 等<sup>[11-12]</sup>推

收稿日期: 2014-04-17

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07501-003-06); 科技部科技基础性工作专项(2014FY120600)

作者简介: 刘婷婷(1988—), 女, 河北保定人, 硕士研究生, 从事水质基准与标准研究。E-mail: tingting1308@163.com

\* 通信作者: 郑欣 E-mail: Zhengxin@craes.org.cn

导了2,4-二氯苯酚和2,4,6-三氯苯酚的基准;闫振广等<sup>[13-18]</sup>采用SSR法(Species sensitivity rank)推导了镉、氨氮、铅和硝基苯的淡水水生生物基准;吴丰昌等<sup>[19]</sup>研究了锌的淡水生物毒性特征并对其水质基准进行了推导;杜东阳<sup>[20]</sup>对重金属铬和镍的淡水水质基准进行了研究。此外,水质基准技术方法的研究也取得了一定的进展。闫振广等<sup>[21]</sup>探索了基因表达效应的物种敏感性;刘征涛等<sup>[22]</sup>提出在我国生物毒性数据缺乏的情况下,“三门六科”的最少毒性数据需求具有一定的可行性。但总体来说,我国对水质基准的研究尚属于初步阶段,很多技术方法问题仍需积极探索。对于水生生物基准的研究,美国规定至少选择“三门八科”的水生生物,其中要求至少有一种水生植物的毒性数据<sup>[23]</sup>。虽然各国都规定了水质基准受试生物的种类,但对于敏感受试生物的筛选研究国内外却很少有报道。本土物种的筛选和毒性测试是水生生物基准推导的关键要素之一,对我国水质基准的研究有着重要的意义。近期,有研究对鱼类、两栖类、甲壳类、环节动物和昆虫等类别的受试生物开展了筛选研究<sup>[24-27]</sup>,但对水生植物受试生物筛选的研究还未见报道。

水生植物作为水生生态系统重要组成部分,是保持水体良性发展的关键生态类群,其中大型水生植物是水生植物中的一个重要类群,主要包括水生维管束植物和高等藻类,一般将其按生活型分为挺水植物、沉水植物、浮叶植物与漂浮植物<sup>[28]</sup>。大型水生植物在水生生态系统中具有重要的作用:一方面大型水生植物可以改善水下的光照和溶氧条件,为水生动物提供栖息地和食物,是水体生物多样性赖以维持的基础<sup>[29]</sup>;另一方面,大型水生植物在净化水体及水环境监测等方面也具有重要作用<sup>[30-39]</sup>。因此,以大型水生植物作为受试物种来开展水环境中污染物的毒性效应研究,可增强对水生植物的保护,并减少污染物通过食物链的生物放大作用对高营养级生物的危害。但是,长期以来关于大型水生植物的毒性试验远少于动物,特别是国内大型水生植物毒性试验的资料极为欠缺,主要是由于在很多情况下大型水生植物对污染物的敏感性要低于水生动物<sup>[40]</sup>。可是还有不少水生植物对许多重金属、杀虫剂、表面活性剂、污水、部分有机物的敏感性要比水生动物强<sup>[41]</sup>,以水生动物毒性试验推导的水生态基准,并不能有效地保护大型水生植物。因此,研究我国本土大型水生植物的基准研究受试生物,对完善我国水环境基准技术体系有重要的作用。

本文选择在我国分布广泛、具有代表性的大型水

生植物,搜集其毒性数据,从中筛选出对大型水生植物毒性最大的污染物,并通过对各污染物进行物种敏感度分析,提出本土大型水生植物的基准受试生物名单,为完善我国水生生物基准体系提供参考,也为进一步明确水生生态保护物种提供重要依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 本土受试大型水生植物的选择

依据《中国植物志》<sup>[42]</sup>、《水生生物学》<sup>[28]</sup>及公开发表的相关文献,对我国本土常见大型水生植物的分布进行整理,并筛选出具有代表性的本土大型水生植物,筛选原则为:①在我国本土分布或在我国自然水域有分布的外来物种;②对污染物较敏感、毒性数据较多的物种,且毒性数据至少包含3种污染物;③在我国分布较为广泛,一般要求分布于我国多省(5省及以上),具有充分的本土代表性和生态学意义;④在经济上具有重要的价值,且具有良好的可获得性,易于在实验室条件下培养。

### 1.2 数据的来源、筛选与分析

水生植物毒性试验数据主要来源于ECOTOX数据库(<http://cfpub.epa.gov/ecotox>)以及公开发表的文献,按照基准数据筛选原则<sup>[23]</sup>进行毒性试验数据的搜集和筛选:水生植物的急性试验测试终点主要包括LC<sub>50</sub>、EC<sub>50</sub>和IC<sub>50</sub>(LC<sub>50</sub>是指半数致死浓度,EC<sub>50</sub>是指半数效应浓度,IC<sub>50</sub>为半抑制浓度);要有明确的测试终点、暴露时间及试验条件的相关描述;优先选择流水式及对试验溶液浓度有监控的毒性试验数据,并且试验设计不科学的、生物曾暴露于污染物中的毒性数据均不采用;若同物种急性毒性数据差异过大(超出1个数量级),应被判断为有疑点的数据而谨慎使用;同一物种或同一终点有多个毒性值可用时,使用其几何平均值。

经过筛选获得合格的毒性数据后,对毒性数据进行整理和排序。大致步骤为:利用同一物种的毒性值的几何平均值求出SMV(Species mean values,种平均毒性值),即同物种的EC<sub>50</sub>和IC<sub>50</sub>求得的几何平均值为种平均急性毒性值;对污染物的全部SMV从小到大进行排序。数据分析软件为Origin9.0。

筛选过程中关于物种敏感性数值的分级,根据水质基准技术惯例<sup>[23-43]</sup>,能保护95%生物的污染物浓度为水质基准值,因此如果某生物敏感性排序小于5%,则可将该生物界定为非常敏感。已有研究显示<sup>[44]</sup>,当受胁迫的生物分别超过15%和30%时,污染物引起

的生态风险可定义为具有明显风险和一定风险,因此可将物种敏感性排序达到此限值的生物分类为敏感和较敏感。此外,根据荷兰公共卫生和环境研究院(RIVM)风险评估技术导则,当受危害生物超过50%时,生态风险等级为“严重”<sup>[45]</sup>,可将物种敏感性排序超过50%的物种定为不敏感。

同时,根据《生物监测技术规范(水环境部分)》<sup>[46]</sup>中污染物的毒性分级标准,将目标污染物质对水生植物的毒性进行分级,即: $LC_{50} < 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  为剧毒; $1 \leq LC_{50} < 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  为高毒; $100 \leq LC_{50} < 1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  为中等毒性; $1000 \leq LC_{50} < 10\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  为低毒; $LC_{50} \geq 10\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  为微毒或无毒。

## 2 结果与分析

### 2.1 本土大型水生植物

我国水系众多,水生植物资源丰富,分布于我国各类淡水水体中的维管束植物有近200种,主要隶属蕨类植物门和被子植物门。其中,一些常见种类(44种)在我国的分布如表1所示。

本文按照物种筛选标准,结合毒性数据的初步评估,筛选出8种具有我国本土代表性的大型水生植物。包括漂浮植物浮萍(*Lemna minor*)、紫萍(*Spirodela polyrhiza*)和槐叶苹(*Salvinia natans*);沉水植物金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)、黑藻(*Hydrilla verticillata*)、菹草(*Potamogeton crispus*)和篦齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)。分别属于浮萍科、槐叶苹科、小二仙草科、水鳖科、金鱼藻科和眼子菜科。大部分物种在全国广泛分布,具有良好的本土代表性。

### 2.2 对水生植物毒性最大的污染物

依据毒性数据筛选原则获得8种大型水生植物的毒性数据后,对化学物质的毒性值进行排序,得到针对每种大型水生植物毒性最大的3种污染物(即毒性值最小),结果如表2所示。对8种大型水生植物毒性最大的污染物共有15种,其中包括3种重金属(铊、镉和铜)以及12种除草剂(甲磺隆、利谷隆、百草枯、特丁净、扑草净、特丁津、异丙甲草胺、2,4-滴二甲胺盐、氟啶酮、敌草隆、2,4-滴和苄嘧磺隆),其中2,4-滴二甲胺盐和氯化镉对槐叶苹属于高毒物质,其他污染物对相应大型水生植物的毒性值均小于 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,属剧毒物质。

### 2.3 大型水生植物对重金属污染物敏感性

根据上述数据原则对表2中15种化学物质的毒

性数据进行搜集筛选,绘制物种敏感度分布曲线,如图1所示(毒性数据中涉及到的大型水生植物在散点图中以箭头标示);计算大型水生植物对不同污染物的累积概率并对其敏感性进行评价,如表3所示。

由图1和表3可知,在15种化学物质的物种敏感度分布中,表现不敏感的包括:浮萍对2,4-滴;穗状狐尾藻和浮萍对特丁净;浮萍对百草枯和敌草隆;紫萍对氯化铜;浮萍、紫萍对扑草净;菹草和紫萍对特丁津。敏感的包括:菹草对2,4-滴;槐叶苹对2,4-滴二甲胺盐;紫萍对百草枯;黑藻对苄嘧磺隆和氟啶酮;菹草、紫萍对甲磺隆;浮萍和金鱼藻对利谷隆;金鱼藻对氯化铜;金鱼藻和槐叶苹对异丙甲草胺。非常敏感的包括:篦齿眼子菜对2,4-滴、利谷隆和异丙甲草胺;浮萍对铊。

上述表现出敏感及非常敏感的物种可作为相应污染物的敏感性受试物种。由此,得出我国水生态基准的7种本土受试大型水生植物及其对应的10种污染物(表4)。

## 3 讨论

由于各类大型水生植物的特点不同,易获得性等因素不同,毒性数据丰度也存在一定的差异性。其中,数据丰度最大的是浮萍,有68种污染物毒性数据;而丰度最小的槐叶苹仅有3种污染物的毒性数据。在有毒性数据的污染物中,部分大型水生植物只有1个毒性数据。数据丰度的欠缺为筛选结果带来了一定的不确定性,需要在后续的研究中进一步验证。

许多国家和地区在制定水生生物基准时,通常要求至少使用1种淡水藻类或淡水维管束植物。浮游藻类是水生态系统中重要的水生植物类群,与大型水生植物具有同样重要的地位,但是在水质基准研究中关于浮游藻类的筛选研究较少。梁丽君等<sup>[51]</sup>筛选出6种对水生植物毒性较大的优控污染物,且对其敏感性较高的物种几乎都是浮游藻类。本研究也发现,筛选的15种对大型水生植物毒性较大的污染物中,有6种污染物(特丁净、百草枯、敌草隆、镉、扑草净、特丁津)在其物种敏感性排序中,浮游藻类的敏感性排序位于大型水生植物之前,如:对百草枯最为敏感的生物为四尾栅藻,在敏感性排序中位于首位,而最为敏感的大型水生植物紫萍则位于第四位。表明对于这些污染物,浮游藻类比大型水生植物更加敏感,可作为相应污染物基准研究的浮游藻类受试生物,并且在污染物的水生生物基准制定过程中,可能将替换相应的

表1 中国常见大型水生植物  
Table 1 Species and distribution of widespread aquatic macrophytes in China

生态分类	物种名	拉丁名	系统分类	地理分布	
漂浮植物	浮萍	<i>Lemna minor</i>	浮萍科,浮萍属	天津、湖南、江西、广西、福建	
	稀脉浮萍	<i>Lemna perpusilla</i>	浮萍科,浮萍属	上海、福建、台湾(台北)	
	品藻	<i>Lemna trisulca</i>	浮萍科,浮萍属	南北各省区,已采到标本的有:新疆(塔城)、内蒙古、黑龙江(伊春)、陕西、山西、河北、安徽、江苏、云南(丽江、大理)、台湾(台东)	
	紫萍	<i>Spirodela polyrrhiza</i>	浮萍科,紫萍属	南北各地	
	少根紫萍	<i>Spirodela oligorrhiza</i>	浮萍科,紫萍属	台湾	
	芜萍	<i>Wolffia arrhiza</i>	浮萍科,芜萍属	南北各省区,已采到标本的有:天津、江苏(南京、无锡)、上海、台湾(台北)、广东、云南(昆明、宜良、景洪)	
	满江红	<i>Azolla imbricata</i>	满江红科,满江红属	长江流域和南北各省区	
	槐叶苹	<i>Salvinia natans</i>	槐叶苹科,槐叶苹属	长江流域和华北、东北以及新疆	
	大藻	<i>Pistia stratiotes</i>	天南星科,大藻属	福建、台湾、广东、广西、云南各省区热带地区野生,湖南、湖北、江苏、浙江、安徽、山东、四川等省都有栽培	
	凤眼蓝	<i>Eichhornia crassipes</i>	雨久花科,凤眼蓝属	长江、黄河流域及华南各省	
浮叶植物	粗梗水蕨	<i>Ceratopteris pteridoides</i>	水蕨科,水蕨属	长江以南包括安徽(黄山、东流)、湖北(武汉)、江苏(南京)	
	莼菜	<i>Brasenia schreberi</i>	睡莲科,莼属	江苏、浙江、江西、湖南、四川、云南	
	睡莲	<i>Nymphaea tetragona</i>	睡莲科,睡莲属	全国广泛分布	
	芡实	<i>Euryale ferox</i>	睡莲科,芡属	南北各省,从黑龙江至云南、广东	
	荇菜	<i>Nymphoides peltatum</i>	龙胆科,荇菜属	全国绝大多数省区	
	菱	<i>Trapa natans</i>	菱科,菱属	浙江、江西、湖北、四川、云南等省	
	眼子菜	<i>Potamogeton distinctus</i>	眼子菜科,眼子菜属	南北大多数省区	
	两栖蓼	<i>Polygonum amphibium</i>	蓼科,蓼属	东北、华北、西北、华东、华中和西南	
	挺水植物	荸荠	<i>Heleocharis dulcis</i>	莎草科,荸荠属	全国各地都有栽培
		水芹	<i>Oenanthe javanica</i>	伞形科,水芹属	全国各地
慈姑		<i>Sagittaria trifolia</i>	泽泻科,慈姑属	长江以南各省区广泛栽培	
鸭舌草		<i>Monochoria vaginalis</i>	雨久花科,雨久花属	南北各省区	
芦苇		<i>Phragmites australis</i>	禾本科,芦苇属	全国各地	
菰		<i>Zizania latifolia</i>	禾本科,菰属	黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、河北、甘肃、陕西、四川、湖北、湖南、江西、福建、广东、台湾	
矮慈姑		<i>Sagittaria pygmaea</i>	泽泻科,慈姑属	陕西、山东、江苏、安徽、浙江、江西、福建、台湾、河南、湖北、湖南、广东、海南、广西、四川、贵州、云南等省区	
水烛		<i>Typha angustifolia</i>	香蒲科,香蒲属	黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、河北、山东、河南、陕西、甘肃、新疆、江苏、湖北、云南、台湾等省区	
菖蒲		<i>Acorus calamus</i>	天南星科,菖蒲属	全国各地	
水葱		<i>Scirpus validus</i>	莎草科,蔗草属	东北各省、内蒙古、山西、陕西、甘肃、新疆、河北、江苏、贵州、四川、云南	
沉水植物	荆三稜	<i>Scirpus yagara</i>	莎草科,蔗草属	东北各省、江苏、浙江、贵州、台湾	
	黑三稜	<i>Sparganium stoloniferum</i>	黑三稜科,黑三稜属	黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、河北、山西、陕西、甘肃、新疆、江苏、江西、湖北、云南等省区	
	千屈菜	<i>Lythrum salicaria</i>	千屈菜科,千屈菜属	全国各地	
	芦竹	<i>Arundo donax</i>	禾本科,芦竹属	广东、海南、广西、贵州、云南、四川、湖南、江西、福建、台湾、浙江、江苏	
	金鱼藻	<i>Ceratophyllum demersum</i>	金鱼藻科,金鱼藻属	全国广泛分布	
	穗状狐尾藻	<i>Myriophyllum spicatum</i>	小二仙草科,狐尾藻属	南北各地均有分布	
	黄花狸藻	<i>Utricularia aurea</i>	狸藻科,狸藻属	江苏、安徽、浙江、江西、福建、台湾、湖北、湖南、广东、广西和云南	
	黑藻	<i>Hydrilla verticillata</i>	水鳖科,黑藻属	黑龙江、河北、陕西、山东、江苏、安徽、浙江、江西、福建、台湾、湖南、湖北、广东、海南、广西、四川、贵州、云南等省区	
	角果藻	<i>Zannichellia palustris</i>	茨藻科,角果藻属	南北各省区	
	水车前	<i>Ottelia alismoides</i>	水鳖科,水车前属	东北地区以及河北、河南、江苏、安徽、浙江、江西、福建、台湾、湖北、湖南、广东、海南、广西、四川、贵州、云南等省区	
沉水植物	大茨藻	<i>Najas marina</i>	茨藻科,茨藻属	辽宁、内蒙古、河北、山西、新疆、江苏、浙江、江西、河南、湖北、湖南、台湾、云南等省区	
	小茨藻	<i>Najas minor</i>	茨藻科,茨藻属	黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、河北、新疆、山东、江苏、浙江、江西、福建、台湾、河南、湖北、湖南、广东、海南、广西和云南等省区	
	竹叶眼子菜	<i>Potamogeton malaianus</i>	眼子菜科,眼子菜属	南北各省区	
	菹草	<i>Potamogeton crispus</i>	眼子菜科,眼子菜属	南北各省区	
	微齿眼子菜	<i>Potamogeton maackianus</i>	眼子菜科,眼子菜属	东北、华北、华东、华中以及西南各地	
	篳齿眼子菜	<i>Potamogeton pectinatus</i>	眼子菜科,眼子菜属	南北各省区	

表2 对8种代表性大型水生植物毒性最大的污染物

Table 2 The most toxic pollutants to eight aquatic macrophytes

水生植物	化学物质	SMV/ μg·L <sup>-1</sup>	毒性 数据量	毒性值范围/ μg·L <sup>-1</sup>	参考 文献
浮萍	铊	0.165	6	0.01~0.75	ECOTOX
	甲磺隆	1.06	23	0.100~12.661	ECOTOX
	利谷隆	7	1	7	ECOTOX
紫萍	甲磺隆	0.19~0.32	2	0.247	ECOTOX
	百草枯	3.81~17.37	2	8.135	[47~48]
	扑草净	85	1	85	ECOTOX
槐叶苹	异丙甲草胺	81.904	4	50~150	ECOTOX
	2,4-滴二甲胺盐	1 869.15	5	300~6500	ECOTOX
	氯化镉	2410	1	2410	[49]
金鱼藻	甲磺隆	0.909	2	0.20~4.13	ECOTOX
	利谷隆	8.7	1	1	ECOTOX
	氯化铜	13.479	12	8.4~39.0	ECOTOX
黑藻	氟啶酮	17.157	18	3.14~61.30	ECOTOX
	扑草净	20	1	20	[50]
	苄嘧磺隆	45.487	4	35.008~74.982	ECOTOX
穗状狐尾藻	甲磺隆	0.29	1	0.29	ECOTOX
	特丁净	2	2	2	ECOTOX
	敌草隆	5	2	5	ECOTOX
菹草	甲磺隆	0.23	1	0.23	ECOTOX
	利谷隆	12.9	1	12.9	ECOTOX
	特丁津	147.279	2	109~199	ECOTOX
篳齿眼子菜	利谷隆	0.07	1	0.07	ECOTOX
	百草枯	0.24	1	1	ECOTOX
	2,4-滴	10	1	10	ECOTOX

大型水生植物做为受试生物。但由于分布范围不同,对同种污染物敏感的浮游藻类与大型水生植物可能不在同一水体,因此利用大型水生植物作为污染物基准受试生物是不可或缺的。

根据图1和表3可知,不同物种不仅敏感污染物的种类有差别,其所处的污染物敏感度分布的位置也不同。浮萍对重金属铊和镉及除草剂扑草净的敏感性大于其他所有水生植物;百草枯对紫萍和浮萍有毒性作用,且对紫萍的毒性作用远大于浮萍;穗状狐尾藻对特丁净、敌草隆和特丁津的敏感性大于其他水生植物;菹草对甲磺隆,及金鱼藻对氯化铜有较强的敏感性;篳齿眼子菜对2,4-滴、利谷隆、异丙甲草胺非常敏感,其敏感性排在第一位,强于所有水生生物。不同种群对同一污染物的敏感性不同,及其对不同污染物的敏感性,对进一步选择受试物种以及确定水生态重点保护对象有重要意义<sup>[52]</sup>。

物种对污染物敏感性的差异,还体现在污染物对水生植物的毒性值以及敏感物种数量上。筛选的15

表3 8种大型水生植物对污染物的累积概率及敏感性

Table 3 Cumulative probability and sensitivity of eight aquatic macrophytes to pollutants

水生植物	化学物质	累积概率/%	物种敏感性
篳齿眼子菜	2,4-滴	1.2	非常敏感
菹草	2,4-滴	10.8	敏感
浮萍	2,4-滴	53.0	不敏感
槐叶苹	2,4-滴二甲胺盐	8.5	敏感
穗状狐尾藻、浮萍	特丁净	55.3、76.3	不敏感
紫萍	百草枯	7.8	敏感
浮萍	百草枯	98.0	不敏感
黑藻	苄嘧磺隆	12.5	敏感
穗状狐尾藻	敌草隆	37.5	较不敏感
浮萍	敌草隆	68.8	不敏感
黑藻	氟啶酮	7.4	敏感
菹草、紫萍	甲磺隆	7.7、11.5	敏感
穗状狐尾藻、金鱼藻、浮萍	甲磺隆	15.4、23.1、26.9	较为敏感
篳齿眼子菜	利谷隆	2.1	非常敏感
浮萍、金鱼藻	利谷隆	6.4、8.5	敏感
菹草	利谷隆	17.0	较为敏感
金鱼藻	氯化铜	7.4	敏感
紫萍	氯化铜	92.6	不敏感
浮萍、紫萍	扑草净	55.2、58.6	不敏感
浮萍	铊	4.3	非常敏感
穗状狐尾藻	特丁津	27.6	较为敏感
金鱼藻、浮萍	特丁津	31.0、44.8	较不敏感
菹草、紫萍	特丁津	51.7、58.6	不敏感
篳齿眼子菜	异丙甲草胺	1.9	非常敏感
金鱼藻、槐叶苹	异丙甲草胺	11.1、14.8	敏感
浮萍	异丙甲草胺	22.2	较为敏感

种污染物中,氯化镉和2,4-滴二甲胺盐的毒性最低。重金属铊只表现出对浮萍有很强的毒性。除草剂甲磺隆、利谷隆和异丙甲草胺对所筛选的大型水生植物普遍具有较强的毒性,且所对应的敏感物种的数量也较多。此外,重金属污染物的SMV要普遍高于除草剂,本文筛选出的15种污染物中只有3种重金属污染物对大型水生植物有较强的毒性作用,说明大型水生植物对重金属污染物的耐受能力要高于除草剂,主要由于大型水生植物能够转移、富集水环境中一定的重金属污染物<sup>[53]</sup>。而绝大多数除草剂会抑制大型植物根、茎生长,其LC<sub>25</sub>和LC<sub>50</sub>在EEC以下,甚至比水生动物更为敏感<sup>[54]</sup>。因此,所筛选的大型水生植物对除草剂类污染物有较好的指示作用。我国自20世纪80年代中期以来,除草剂的使用范围大幅增长,其增长率居农药之首<sup>[55]</sup>,由此引发的生态效应受到越来越多的关注。大型水生植物对除草剂灵敏的指示作用,无疑



表4 我国水生态基准研究本土受试大型水生植物名单

Table 4 List of tested native aquatic macrophytes for aquatic life criteria

物种分类	物种名称	对应的污染物类别
浮萍科,浮萍属	浮萍 <i>Lemna minor</i>	铊、利谷隆
浮萍科,紫萍属	紫萍 <i>Spirodela polyrrhiza</i>	百草枯、甲磺隆
槐叶苹科,槐叶苹属	槐叶苹 <i>Salvinia natans</i>	2,4-滴二甲胺盐、异丙甲草胺
眼子菜科,眼子菜属	篦齿眼子菜 <i>Potamogeton pectinatus</i>	2,4-滴、利谷隆、异丙甲草胺
眼子菜科,眼子菜属	菹草 <i>Potamogeton crispus</i>	2,4-滴、甲磺隆
水鳖科,黑藻属	黑藻 <i>Hydrilla verticillata</i>	苄嘧磺隆、氟啶酮
金鱼藻科,金鱼藻属	金鱼藻 <i>Ceratophyllum demersum</i>	利谷隆、氯化铜、异丙甲草胺

将为水生生态系统提供重要的保护依据。

目前国内外对于大型水生植物研究比较匮乏,现有的毒性数据多为重金属污染物和除草剂一类有机化合污染物,数据量也不够丰富,特别是由于我国水生态基准的研究仍处于起步阶段。因此,基准研究受试生物的筛选仍然需要大量毒性数据的积累。另外,由于毒性数据的缺乏,大量本土大型水生植物未进行物种敏感性评价,因而未列入目前的受试大型水生植物名单中。随着大型水生植物毒性数据的不断积累,仍将有敏感的本土大型水生植物陆续加入到该名单中来。

#### 4 结论

(1)通过对本土代表性大型水生植物敏感性分析,筛选出5科7属7种大型水生植物作为相关污染物水质基准研究的受试生物,包括漂浮植物浮萍、紫萍和槐叶苹以及沉水植物金鱼藻、黑藻、菹草和篦齿眼子菜。

(2)大型水生植物对重金属有一定的敏感性,其中浮萍和金鱼藻分别对铊和铜敏感,可作为相应重金属的基准研究受试生物。

(3)大型水生植物对除草剂敏感,可作为其基准研究的受试生物,其中:浮萍可作为利谷隆的受试生物;紫萍可作为百草枯和甲磺隆的受试生物;槐叶苹可作为2,4-滴二甲胺盐和异丙甲草胺的受试生物;篦齿眼子菜对2,4-滴、利谷隆和异丙甲草胺非常敏感,可作为其基准研究的受试生物;菹草可作为2,4-滴和甲磺隆的受试生物;黑藻可作为苄嘧磺隆和氟啶酮的受试生物;金鱼藻可作为利谷隆、氯化铜和异丙甲草胺的受试生物。

#### 参考文献:

[1] 于晓曼,薛冰,耿涌,等. 中国农村水环境问题及其展望[J]. 农业环境与发展, 2013, 30(1):10-13.  
YU Xiao-man, XUE Bing, GENG Yong, et al. Water environmental

problems and its prospect in Chinese rural areas[J]. *Agro-Environment & Development*, 2013, 30(1):10-13.  
[2] 黄林泉. 中国水环境问题的思考[C]//陈厚群. 中国水利学会学术年会论文集. 北京:黄河水利出版社, 2001:174-179.  
HUANG Lin-quan. Some thoughts about the water environmental problems in China [C]//CHEN Hou-qun. Academic Annual Conference Proceedings of Chinese Hydraulic Engineering Society. Beijing: The Yellow River Water Conservancy Press, 2001:174-179.  
[3] 邓杰. 城市与水环境发展问题的现状和趋势 [C]//姜艳萍, 王国青. 中国环境科学学会学术年会论文集(第四卷). 北京:中国农业大学出版社, 2012:3087-3090.  
DENG Jie. Development status and trends of urban and water environment[C]//JIANG Yan-ping, WANG Guo-qing. Academic Annual Conference Proceedings of Chinese Society of Environmental Sciences (Vol. 4). Beijing: China Agricultural University Press, 2012:3087-3090.  
[4] 张桂杰,郑念发,李鹤. 我国水环境污染现状及其防治[J]. 科技资讯, 2010, 21:155.  
ZHANG Gui-jie, ZHENG Nian-fa, LI He. Pollution status and its control of water environment in China[J]. *Science & Technology Information*, 2010, 21:155.  
[5] EPA. Quality criteria for water[M]. Washington DC:Office of Water Regulations and Standards, 1986:1-477.  
[6] CCREM (Canadian Council of Resource and Environment Ministers). Canadian water quality guidelines[R]. Winnipeg, Manitoba: Canadian Council of Ministers of the Environment, 1999.  
[7] 张瑞卿,吴丰昌,李会仙,等. 中外水质基准发展趋势和存在的问题[J]. 生态学杂志, 2010, 29(10):2049-2056.  
ZHANG Rui-qing, WU Feng-chang, LI Hui-xian, et al. Water quality criteria at home and abroad: Development trend and existed problems[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(10):2049-2056.  
[8] 张彤,金洪钧. 丙烯腈水生态基准研究[J]. 环境科学学报, 1997, 17(1):75-81.  
ZHANG Tong, JIN Hong-jun. Water quality criteria of acrylonitrile[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1997, 17(1):75-81.  
[9] 张彤,金洪钧. 硫氰酸钠的水生态基准研究[J]. 应用生态学报, 1997, 8(1):99-103.  
ZHANG Tong, JIN Hong-jun. Water ecological criteria of NaSCN[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(1):99-103.  
[10] 张彤,金洪钧. 乙腈的水生态基准[J]. 水生生物学报, 1997, 21(3):226-233.

- ZHANG Tong, JIN Hong-jun. The water ecological criteria of acetoni-tril[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1997, 21(3):226-233.
- [11] Yin D Q, Hu S Q, Jin H J, et al. Deriving freshwater quality criteria for 2, 4, 6-trichlorophenol for protection of aquatic life in China[J]. *Chemosphere*, 2003, 52:67-73.
- [12] Yin D Q, Jin H J, Yu L W, et al. Deriving freshwater quality criteria for 2, 4-dichlorophenol for protection of aquatic life in China[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 122:217-222.
- [13] 闫振广, 孟伟, 刘征涛, 等. 我国淡水水生生物镉基准研究[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(11):2393-2406.
- YAN Zhen-guang, MENG Wei, LIU Zheng-tao, et al. Biological criteria for freshwater Cd in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(11):2393-2406.
- [14] 闫振广, 孟伟, 刘征涛, 等. 我国典型流域镉水质基准研究[J]. *环境科学研究*, 2010, 23(10):1221-1228.
- YAN Zhen-guang, MENG Wei, LIU Zheng-tao, et al. Development of aquatic criteria for cadmium for typical basins in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(10):1221-1228.
- [15] 闫振广, 孟伟, 刘征涛, 等. 辽河流域氨氮水质基准与应急标准探讨[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(11):1829-1835.
- YAN Zhen-guang, MENG Wei, LIU Zheng-tao, et al. Development of aquatic life criteria and lash-up standard for ammonia in Liao River basin[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(11):1829-1835.
- [16] 闫振广, 孟伟, 刘征涛, 等. 我国淡水水生生物氨氮基准研究[J]. *环境科学*, 2011, 32(6):1564-1570.
- YAN Zhen-guang, MENG Wei, LIU Zheng-tao, et al. Development of freshwater aquatic life criteria for ammonia in China[J]. *Environment Science*, 2011, 32(6):1564-1570.
- [17] Yan Z G, Zhang Z S, Wang H, et al. Development of aquatic life criteria for nitrobenzene in China[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 162:86-90.
- [18] 闫振广, 何丽, 高富, 等. 铅水生生物水质基准研究与初步应用[C]//环境安全与生态学基准/标准国际研讨会、中国环境科学学会环境标准与基准专业委员会2013年学术研讨会、中国毒理学会环境与生态毒理专业委员会第三届学术研讨会会议论文集. 南京:中国环境科学学会环境标准与基准专业委员会, 2013:20-31.
- YAN Zhen-guang, HE Li, GAO Fu, et al. Development and preliminary applications of freshwater aquatic life water quality criteria for lead in China[C]//Proceedings of conference on Environmental Standards & Criteria, Environmental & Ecology Toxicology. Nanjing:Committee of Environmental Standards & Criteria, 2013:20-31.
- [19] 吴丰昌, 冯承莲, 曹宇静, 等. 锌对淡水生物的毒性特征及水质基准的研究[J]. *生态毒理学报*, 2011, 6(4):367-382.
- WU Feng-chang, FENG Cheng-lian, CAO Yu-jing, et al. Toxicity characteristic of zinc to freshwater biota and its water quality criteria[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2011, 6(4):367-382.
- [20] 杜东阳. 中国重金属铬和镍的淡水水质基准研究[D]. 北京:中国地质大学, 2012:1-77.
- DU Dong-yang. The study on water quality criteria of heavy metals chromium and nickel in China[D]. Beijing:China University of Geosciences, 2012:1-77.
- [21] 闫振广, 杨霓云, 王晓南, 等. 基于基因表达效应的物种敏感度分
- 析初探[J]. *中国科学(地球科学)*, 2012, 42(5):673-679.
- YAN Zhen-guang, YANG Ni-yun, WANG Xiao-nan, et al. Preliminary study on the species sensitivity analysis based on gene expression[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2012, 42(5):673-679.
- [22] 刘征涛, 王晓南, 闫振广, 等. “三门六科”水质基准最少毒性数据需求原则[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(12):1364-1369.
- LIU Zheng-tao, WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, et al. Discussion of minimum “3 phyla and 6 families” toxicity data requirements for deriving water quality criteria[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(12):1364-1369.
- [23] USEPA. Guidelines for deriving numerical national water quality criteria for the protection of aquatic organisms and their uses (PB85-227049) [R]. Washington DC:USEPA, 1985:1-98.
- [24] 王晓南, 郑欣, 闫振广, 等. 水质基准鱼类受试生物筛选[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(4):341-348.
- WANG Xiao-nan, ZHENG Xin, YAN Zhen-guang, et al. Screening of native fishes for deriving aquatic life criteria[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(4):341-348.
- [25] 蔡靳, 闫振广, 何丽, 等. 水质基准两栖类受试生物筛选[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(4):349-355.
- CAI Jin, YAN Zhen-guang, HE Li, et al. Screening of native amphibians for deriving aquatic life criteria[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(4):349-355.
- [26] 郑欣, 闫振广, 王晓南, 等. 水质基准甲壳类受试生物筛选[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(4):356-364.
- ZHENG Xin, YAN Zhen-guang, WANG Xiao-nan, et al. Screening of native crustaceans for deriving aquatic life criteria[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(4):356-364.
- [27] 王伟莉, 闫振广, 刘征涛, 等. 水质基准本土环节动物与水生昆虫受试生物筛选[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(4):365-372.
- WANG Wei-li, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, et al. Screening of native annelids and aquatic insects for deriving aquatic life criteria[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(4):365-372.
- [28] 赵文. 水生生物学[M]. 北京:中国农业出版社, 2005:1-528.
- Zhao Wen. Hydrobiology[M]. Beijing:China Agriculture Press, 2005:1-528.
- [29] 宋碧玉, 王建, 曹明, 等. 利用人工围隔研究沉水植被恢复的生态效应[J]. *生态学杂志*, 1999, 18(5):21-24.
- SONG Bi-yu, WANG Jian, CAO Ming, et al. Ecological effects of submerged macrophytes restoration by using the mesocosm enclosure[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(5):21-24.
- [30] 种云霄, 胡洪营, 钱易. 环境及营养条件对稀脉浮萍和紫背浮萍氮磷含量的影响[J]. *环境科学*, 2005, 26(5):67-71.
- ZHONG Yun-xiao, HU Hong-ying, QIAN Yi. Effect of environment and nutrient factors on the content of nitrogen and phosphorus in two duckweeds species: *Spirodela polyrrhiza* and *Lemna aequinoctialis* [J]. *Environmental Science*, 2005, 26(5):67-71.
- [31] 沈根祥, 姚芳, 胡宏, 等. 浮萍吸收不同形态氮的动力学特性研究[J]. *土壤通报*, 2006, 37(3):505-508.
- SHEN Gen-xiang, YAO Fang, HU Hong, et al. The kinetics of ammonium and nitrate uptake by duckweed (*Spirodela oligorrhiza*) plant[J].

- Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(3):505-508.
- [32] 黄 辉. 冬季浮萍放养体系对养猪场废水的处理效果[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(9):27-31.  
HUANG Hui. Treatment of swine wastewater by duckweed-based system under winter condition[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 32(9):27-31.
- [33] Sen A K, Mondal N G. *Salvinia natans*-as the scavenger of Hg( II ) [J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 1987, 34(4):439-446.
- [34] Sen A K, Mondal N G. Removal and uptake of copper( II ) by *Salvinia natans* from waste water[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 1990, 49(1-2):1-6.
- [35] Sen A K, Bhattacharyya M. Studies of uptake and toxic effects of Ni ( II ) on *Salvinia natans*[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 1994, 78(1-2):141-152.
- [36] Mukherjee S, Kumar S. Adsorptive uptake of arsenic(V) from water by aquatic fern *Salvinia natans*[J]. *Journal of Water Supply Research and Technology*, 2005, 54(1):47-53.
- [37] Joseph B, Hughes J. Transformation of TNT by aquatic plants and plant tissue cultures[J]. *Environment Science and Technology*, 1997, 31(1):266-271.
- [38] 赵大君, 郑师章. 无菌凤眼莲的降酚研究[J]. 生态学杂志, 1994, 13(3):25-29.  
ZHAO Da-jun, ZHENG Shi-zhang. Phenol-degradation capacity of abacterial *Eichhornia crassipes*[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1994, 13(3):25-29.
- [39] 胡肄慧, 陈章龙, 陈灵芝, 等. 凤眼莲等水生植物对重金属污水监测和净化作用的研究[J]. 植物生态学报, 1981, 5(3):187-192.  
HU Yi-hui, CHEN Zhang-long, CHEN Ling-zhi, et al. Studies of the monitoring and purifying process on the heavy metals in wastewater by the water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and some vascular plants[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 1981, 5(3):187-192.
- [40] Blaylock B, Frank M, McCarthy J. Comparative toxicity of copper and acridine to fish, daphnia and algae[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1985, 4:63-71.
- [41] Lewis M A. Use of freshwater plants for phytotoxicity testing: A review [J]. *Environmental Pollution*, 1995, 87:319-336.
- [42] 中科院“中国植物志”编辑委员会. 中国在线植物志[EB/OL]. [2014-3-11]. <http://frps.eflora.cn/>.  
Chinese Academy of Sciences "Flora Reipublicae Popularis Sinicae" Editorial Board. Flora Reipublicae Popularis Sinicae[EB/OL]. [2014-3-11]. <http://frps.eflora.cn/>.
- [43] CCME. A protocol for the derivation of water quality guidelines for the protection of aquatic life 2007[R]. Ottawa, Canada: Canadian Council of Ministers of the Environment, 2007:1-37.
- [44] 闫振广, 刘征涛, 孟 伟. 辽河流域六价铬和无机汞应急水质标准研究[J]. 中国工程科学, 2013, 15(3):26-32.  
YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, MENG Wei. Development of emergency water quality standards for Cr<sup>6+</sup> and Hg<sup>2+</sup> in Liaoh River basin[J]. *Chinese Engineering Science*, 2013, 15(3):26-32.
- [45] Van Vlaardingen P L A, Verbruggen E M J. Guidance for the derivation of environmental risk limits within the framework of "international and national environmental quality standards for substances in the Netherlands"(INS)[R]. Netherlands: National Institute for Public Health and the Environment, 2007:1-146.
- [46] 国家环境保护局. 环境监测技术规范(生物监测, 水环境部分) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1986.  
State Department of Environmental Conservation. Technical specifications for environmental monitoring of groundwater (Biological monitoring for water quality)[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1986.
- [47] 李 玲. 长三角地区农药百草枯对水生高等植物的水生态基准研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2012:1-84.  
LI Ling. Studies on water ecological criteria of paraquat by aquatic higher plants in the Yangtze Delta[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2012:1-84.
- [48] 王林林, 张光富, 何 谐, 等. 除草剂百草枯对浮萍科不同植物的毒性效应比较[J]. 生态学杂志, 2013, 32(6):1551-1556.  
WANG Lin-lin, ZHANG Guang-fu, HE Xie, et al. Toxic effects of herbicide paraquat on different species of Lemnaceae[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(6):1551-1556.
- [49] 徐勤松, 计汪栋, 杨海燕, 等. 镉在槐叶苹叶片中的蓄积及其生态毒理学分析[J]. 生态学报, 2009, 29(6):3019-3027.  
XU Qin-song, JI Wang-dong, YANG Hai-yan, et al. Cadmium accumulation and phytotoxicity in an aquatic fern, *Salvinia natans* (Linn.) [J]. *Acta Ecologia Sinica*, 2009, 29(6):3019-3027.
- [50] 谢 剑, 戴习林, 臧维玲, 等. 扑草净对两种虾和两种水草的毒性研究[J]. 湖南农业科学, 2010, 23:147-150.  
XIE Jian, DAI Xi-lin, ZANG Wei-ling, et al. The toxicity of prometryne on two varieties of shrimp and two varieties of aquatic-weed[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2010, 23:147-150.
- [51] 梁丽君, 闫振广, 王婉华, 等. 高水生植物毒性污染物的初步筛选[J]. 环境科学研究, 2012, 25(4):467-473.  
LIANG Li-jun, YAN Zhen-guang, WANG Wan-hua, et al. Preliminary screening of aquatic plant sensitive pollutants[J]. *Research of Environmental Science*, 2012, 25(4):467-473.
- [52] Maltby L, Blake N, Brock T, et al. Insecticide species sensitivity distributions: Importance of test species selection and relevance to aquatic ecosystems[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2005, 24:379-388.
- [53] 潘义宏, 王宏镛, 谷兆萍, 等. 大型水生植物对重金属的富集与转移 [J]. 生态学报, 2010, 30(23):6430-6441.  
PAN Yi-hong, WANG Hong-bin, GU Zhao-ping, et al. Accumulation and translocation of heavy metals by macrophytes[J]. *Acta Ecologia Sinica*, 2010, 30(23):6430-6441.
- [54] Thompson D G, Wagner R G, Campbell R A, et al. Proceedings of the third international conference on forest vegetation management[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1999, 29(7):1-10.
- [55] 吴晓霞, 吴进才, 金银根, 等. 除草剂对水生植物的生理生态效应[J]. 生态学报, 2004, 24(9):2037-2042.  
WU Xiao-xia, WU Jin-cai, JIN Yin-gen, et al. Impact of herbicides on physiology and ecology of hydrophytes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9):2037-2042.