

水生植物对氮磷及重金属污染水体的净化作用

刘伸伸¹, 张震^{1,3}, 何金铃², 马友华¹, 胡宏祥¹, 张春格¹

(1. 安徽农业大学 资源与环境学院, 安徽 合肥 230036; 2. 安徽农业大学 生命科学学院, 安徽 合肥 230036; 3. 农业部农业环境试验站(合肥), 安徽 合肥 230036)

摘要: 为了治理氮、磷浓度过高造成的水体富营养化和工业过程中产生的重金属污染问题, 水生植物有去除效果较显著、易于获得、有良好景观改善作用等优势而被广泛地应用于水体净化中。通过文献查阅和野外调查, 综述了不同生活型水生植物的常见种类, 阐释了其对于氮、磷及重金属等消减作用的机制和差异性表现。在此基础上, 分析了水生植物在水体净化研究中存在的问题, 并提出了研究展望。文章对于农业面源污染防治中水生植物的应用具有一定的指导意义和理论价值。表 1 参 60

关键词: 环境生物学; 水生植物; 氮磷; 重金属; 水体净化; 综述

中图分类号: S7-05; X52 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2016)05-0910-10

Purification effect of aquatic plants on nitrogen, phosphorus and heavy metal polluted water

LIU Shenshen¹, ZHANG Zhen^{1,3}, HE Jinling², MA Youhua¹, HU Hongxiang¹, ZHANG Chungel¹

(1. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, Anhui, China; 2. School of Life Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, Anhui, China; 3. Hefei Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment, Ministry of Agriculture, Hefei 230036, Anhui, China)

Abstract: In order to control the excessive eutrophication which caused by concentration of nitrogen and phosphorus, and heavy metal pollution produced in industrial process, aquatic plants are widely used in water purification due to their remarkable removal effect, easy availability, good landscape effect and other advantages. Based on literature review and field investigation, this paper reviewed the common species of different life forms of aquatic plants, explained their mechanisms of reducing nitrogen, phosphorus, heavy metals and the differences of their performance. On the basis of review, we analyzed the existing problems in the research of the water purification effect of aquatic plants, and put forward the research prospect. This paper is of certain directive significance and theoretical value in terms of applying aquatic plants to the pollution control of agricultural non-point sources. [Ch, 1 tab. 60 ref.]

Key words: environmental biology; aquatic plants; nitrogen and phosphorus; heavy metals; water purification; review

中国环境问题较为突出, 包括由氮、磷浓度过高所引起的水体富营养化和工业化工程中产生的重金属污染等。水体富营养化会影响水质, 降低水的透明度, 影响水中植物的光合作用, 导致溶解氧的过饱和和状态, 从而对水生动物产生危害, 严重时可导致鱼类大量死亡等^[1]。由于重金属在水体中不能被微生物降解, 当重金属在水体中积累到一定程度时就会对水生动植物和水体生态系统产生危害。当生物体内

收稿日期: 2015-09-17; 修回日期: 2016-02-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31540051); 安徽国土资源厅科技项目(2015-K-14, 2013-K-06); 安徽农业大学学科骨干培育项目(2014XKPY-48)

作者简介: 刘伸伸, 从事生态工程研究。E-mail: 694376819@qq.com。通信作者: 张震, 副教授, 博士, 从事植物生态学和生态恢复等研究。E-mail: xjzhangzhen@163.com

重金属含量达一定限度时,将出现生理受阻、发育停滞等受害症状,严重时导致死亡。目前,针对水体富营养化和重金属污染的治理主要有物理、化学和生物方法。水体富营养化的物理处理方法包括截污、调水冲污、膜过滤法及人工曝气等;化学方法主要是添加化学药剂和吸附剂以去除水中的悬浮物和有机质,如氧化法、非氧化法和物化法等;生物方法包括人工湿地、生物膜法、人工浮岛等^[2-4]。水体重金属污染的物理处理方法有蒸发法、换水法和稀释法等;化学方法包括电解法和化学沉淀法等;生物方法有微生物絮凝法和生物吸附法等^[5-7]。在处理富营养化和重金属污染水体时,传统的物理方法难以达到根治目的,如引水冲污和稀释的效果不能长期保持,且在缺水地区的可行性较差^[2]。化学方法虽效果明显但易产生残留和造成二次污染,如沉淀和絮凝可应用于常规的污水处理,治理程度小的污染,对程度大的污染有一定的局限性^[8]。生物方法主要通过利用微生物、水生动植物及其构成的生态系统对污染物进行迁移、转化和降解,达到水体净化的目的。相对于物理化学方法而言,生物方法具有处理效果好、能耗少、成本低和污染小等优点,能够与绿化环境及景观改善相结合,实现生态修复的最大效益。因此,利用生物方法修复受污染水体受到越来越多的关注。本文通过文献查阅与野外调查,整理了不同生活型水生植物的常见种类,阐释了其降氮除磷及消减重金属等的差异性表现,以期对农业面源污染防治提供理论依据。

1 水生植物的概念及分类

水生植物是指能够长期在水中正常生活并顺利繁殖下一代的植物,对水的依赖性较大,具有分布广、生长速度快、病害少等特点。根据水生植物的生态习性,一般分为 4 类,即挺水植物、漂浮植物、浮叶植物和沉水植物^[9-10]。

1.1 挺水植物

挺水植物的根或地下茎生长于泥土中,下部或基部沉于水中,茎和叶绝大部分挺立水面。其茎秆一般直立,通气组织发达,能有效行使疏导作用。常见挺水植物有禾本科 Gramineae 的芦苇 *Phragmites australis*, 茭白 *Zizania latifolia*, 莎草科 Cyperaceae 的荸荠 *Eleocharis dulcis*, 荆三棱 *Scirpus fluviatilis*, 香蒲科 Typhaceae 的香蒲 *Typha orientalis*, 天南星科 Araceae 的菖蒲 *Acorus calamus* 及其他科的一些种类。

1.2 漂浮植物

漂浮植物的根沉于水中,但不接触基底,株体漂浮于水面。常见漂浮植物中蕨类植物占绝大多数,如浮萍科 Lemnaceae 浮萍 *Lemna minor*, 紫萍 *Spirodela polyrhiza*, 满江红科 Azollaceae 满江红 *Azolla imbricate*, 槐叶萍科 Salviniaceae 槐叶萍 *Salvinia natans* 等,还有部分水鳖科 Hydrocharitaceae 的植物等^[9-10]。

1.3 浮叶植物

浮叶植物植株扎根基底、根状茎发达,无明显的地上茎或茎细弱不能直立,叶片漂浮于水面上。常见浮叶植物有睡莲科 Nymphaeaceae 睡莲 *Nymphaea tetragona*, 菱科 Trapaceae 菱 *Trapa bispinosa* 和龙胆科 Gentianaceae 荇菜 *Nymphoides peltatum* 等。

1.4 沉水植物

沉水植物根茎生于泥中,整个植株沉入水中,具发达的通气组织。该类植物的有性繁殖部分可沉水、浮水或挺立于水面。常见沉水植物主要包括眼子菜科 Potamogetonaceae 的马来眼子菜 *Potamogeton wrightii* 和微齿眼子菜 *Potamogeton maackianus*, 金鱼藻科 Ceratophyllaceae 金鱼藻 *Ceratophyllum demersum*, 水鳖科 Hydrocharitaceae 的黑藻 *Hydrilla verticillata* 和苦草 *Vallisneria natans*, 茨藻科 Najadaceae 的大茨藻 *Najas marina*, 水马齿科 Callitricheaceae, 小二仙草科 Haloragidaceae, 轮藻科 Characeae 等植物。

1.5 常见水生植物分析

通过查阅文献和野外调查,发现 55 种水生植物在污水防控中经常使用(表 1)。其中,挺水植物有 24 种,漂浮植物 9 种,浮水植物 8 种,沉水植物 14 种。在这 55 种水生植物中,1 年生草本植物有 8 种,多年生草本植物 43 种,多年生或稀 1 年生植物 4 种,无木本植物。沉水植物与浮叶植物中 1 年生草本数量多于挺水植物与漂浮植物。

表1 常见水生植物

Table 1 Analysis of common aquatic plants

| 生态类型 | 科 | 属 | 种名 | 生活型 | 实际应用 |
|------|-------|-----------------------------|--|------------------------------|------------------------------|
| 挺水植物 | 伞形科 | 天胡荽属 | 香菇草 <i>Hydrocotyle vulgaris</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水 |
| | | 水芹菜属 | 水芹 <i>Oenanthe javanica</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水, 低浓度铅、铬 |
| | 小二仙草科 | 狐尾藻属 | 聚草 <i>Myriophyllum spicatum</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水 |
| | 蓼科 | 蓼属 | 水蓼 <i>Polygonum hydropiper</i> | 1年生草本 | 锰(超积累)、汞等 |
| | 苋科 | 莲子草属 | 喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> | 多年生草本 | 高氮污水, 铜、铅和锌 |
| | 水蕹属 | 水蕹属 | 水蕹 <i>Ipomoea aquatica</i> | 多年生草本 | 锌、铜、铬、镉和砷等 |
| | 千屈菜科 | 千屈菜属 | 千屈菜 <i>Lythrum salicaria</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水 |
| | 禾本科 | 芦苇属 | 芦苇 <i>Phragmites australis</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水, 铜、锌、铅、铬、镉等 |
| | | 菰属 | 茭白 <i>Zizania caduciflora</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水, 铅、镉等 |
| | | 芦竹属 | 芦竹 <i>Arundo donax</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水, 铜、锌、铅、铬等 |
| | 天南星科 | 天南星属 | 水芋 <i>Calla palustris</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水 |
| | | 菖蒲属 | 石菖蒲 <i>Acorus tatarinowii</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水 |
| | | | 菖蒲 <i>A. calamus</i> | 多年生草木 | 氮、磷污水, 镉富集强, 铅、锌较弱 |
| | 鸢尾科 | 鸢尾属 | 鸢尾 <i>Iris tectorum</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水 |
| | | | 黄菖蒲 <i>I. pseudacorus</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水 |
| | 莎草科 | 荸荠属 | 荸荠 <i>Eleocharis dulcis</i> | 多年生草本 | 抑制藻类生长 |
| | | 蔗草属 | 荆三棱 <i>Scirpus yagra</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水 |
| | | | 水葱 <i>S. lacustris</i> var. <i>tabernaemontani</i> | 多年生草本 | 镉富集量高 |
| | | 莎草属 | 荇苳 <i>Cyperus malaccensis</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水, 铬、镉等 |
| | | | 风车草 <i>C. alternifolius</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水, 磷去除率高 |
| 泽泻科 | 慈菇属 | 慈菇 <i>Asarum sagittaria</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水, 铜、铅、锌等 | |
| 香蒲科 | 香蒲属 | 香蒲 <i>Typha orientalis</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水, 总氮去除率高, 铬的去除 | |
| | | 灯芯草科 | 灯心草属 | 灯芯草 <i>Juncus effusus</i> | 多年生或稀 1年生草本 |
| 漂浮植物 | 天南星科 | 大藻属 | 大藻 <i>Pistia stratiotes</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水 |
| | 雨久花科 | 凤眼蓝属 | 凤眼莲 <i>Eichhornia crassipes</i> | 多年生或1 年生草本 | 氮、磷污水, 锌、铅、汞、镉、铜等 |
| | | | 浮萍科 | 浮萍属 | 浮萍 <i>Lemna minor</i> |
| | 满江红科 | 紫萍属 | 紫萍 <i>Spirodela polyrhiza</i> | 1年生草本 | 富集硼、铬、镍、硒等 |
| | | | 满江红属 | 满江红 <i>Azolla imbricate</i> | 1年生草本 |
| | 水鳖科 | 水鳖属 | 水鳖 <i>Hydrocharis asiaticus</i> | 多年生或稀 1年生草本 | 铜、铅、锌等 |
| | | | 睡莲科 | 莼属 | 莼菜 <i>Nymphoides peltata</i> |
| | 槐叶苹科 | 槐叶苹属 | 槐叶苹 <i>Salvinia natans</i> | 1年生草本 | 富集铬、镍、硒等 |
| | 柳叶菜科 | 水龙属 | 水龙 <i>Lussieuia repens</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水 |
| | 浮叶植物 | 蓼科 | 两栖蓼 <i>Polygenum amphibium</i> | 多年生草本 | 锌净化能力较强 |
| | | | 菱属 | 菱 <i>Trapa quadrispinosa</i> | 1年生草本 |
| | | 睡莲科 | 莲属 | 荷花 <i>Nelumbo nucifera</i> | 多年生草本 |
| 睡莲属 | | | 睡莲 <i>Nymphaea albalinna</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水, 铬、铜、锌等 |
| 龙胆科 | | 苔菜属 | 苔菜 <i>Nymphoides peltatum</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水, 锌、铜、铅、镍、铬去除 率相对弱 |
| | | | 金银莲花 <i>N. indica</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水 |
| 柳叶菜科 | | 丁香蓼属 | 黄花水龙 <i>Ludwigia peploides</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水, 抑制藻类生长 |
| 花蔺科 | | 水薹粟属 | 水薹粟 <i>Hydrocleys nymphoides</i> | 多年生草本 | 低浓度氮、磷污水 |

表 1 (续)

Table 1 (Continued)

| 生态类型 | 科 | 属 | 种名 | 生活型 | 实际应用 |
|-------|------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------|---------------------|
| 沉水植物 | 水鳖科 | 水筛属 | 水筛 <i>Blxa japonica</i> | 1 年生草本 | 砷、锌、铜、镉、铅等 |
| | | 伊乐藻属 | 伊乐藻 <i>Elodes canadensis</i> | 多年生或稀 1 年生草本 | 氮、磷污水，总氮去除率高，镉去除率好 |
| | | 苦草属 | 苦草 <i>Vallisneria spiralis</i> | 多年生草本 | 铜、镉、锌、汞等 |
| | | 黑藻属 | 黑藻 <i>Hydrilla verticillata</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水，砷、锌、铜、镉、铅等 |
| | 眼子菜科 | 眼子菜属 | 菹草 <i>Potamogeton crispus</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水，总磷去除率高，铜、铅、锌等 |
| | | | 微齿眼子菜 <i>P. maackianus</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水 |
| | | | 马来眼子菜 <i>P. malaianus</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水 |
| | | | 篦齿眼子菜 <i>P. pectinatus</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水 |
| | 泽泻科 | 慈菇属 | 矮慈菇 <i>Sagittaria pygmaea</i> | 1 年生草本 | 铜、铅和锌等 |
| | 金鱼藻科 | 金鱼藻属 | 金鱼藻 <i>Ceratophyllum demersum</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水，砷、锌、铜、镉、铅 |
| 轮藻科 | 轮藻属 | 轮藻 <i>Chara vaillant</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水 | |
| 茨藻科 | 茨藻属 | 大茨藻 <i>Najas marina</i> | 1 年生草本 | 氮、磷污水 | |
| 小二仙草科 | 狐尾藻属 | 狐尾藻 <i>Myriophyllum</i> sp. | 多年生草本 | 氮、磷污水，锌、铅和铜 | |
| | | 大聚藻 <i>M. aquaticum</i> | 多年生草本 | 氮、磷污水，耐低温 | |

2 水生植物对氮、磷及重金属的吸附

2.1 水生植物对氮磷的吸收

水生植物在生长过程中可直接吸收污水中的氮、磷等营养物质来维持自身生长发育，其根际为微生物的生存和营养物质的降解提供了必要场所和好氧、厌氧条件，有利于加速污染物的降解^[11]。氮在水体中有 2 种存在方式：有机形态、无机形态，前者包括氨基酸、尿素、尿酸、嘌呤和嘧啶等，后者主要包括铵态氮(NH₄⁺)，亚硝酸盐(NO₂⁻)，硝酸盐(NO₃⁻)，一氧化二氮(N₂O)及溶解于水中的氮气或其他氮元素^[12]。植物主要通过氨化作用、硝化和反硝化作用、生物量同化等方式去除水体中的氮。当总氮进入水体后，先经过微生物的氨化作用转化为氨态氮，然后直接被植物吸收或挥发；铵态氮则通过硝化作用氧化成硝态氮才能被植物吸收利用^[13]。一些根系发达的挺水植物，不仅可以大量吸收无机态的氮，还通过发生硝化与反硝化作用将水体中的氮转化成氮气逸出。水体中的磷主要包括元素磷、正磷酸盐、缩合磷酸盐和有机团结合的磷等，其存在形式主要为正磷酸盐，可溶性总磷(包括溶解有机态磷、溶解无机态磷)、颗粒态总磷(包括有机胶体结合磷、颗粒有机态磷和颗粒无机态磷)^[14]。磷是植物生长必需的营养元素，植物庞大的网状根系促进了其对水中磷酸盐和滞留颗粒态磷的直接吸收，并合成自身所需的核酸、卵磷脂及三磷酸腺苷等，然后通过植物的收割而移除^[15]。不同水生植物的生长特性和氮、磷吸收能力各异，因而其水质净化能力存在较大的差异。

2.1.1 挺水植物 目前，挺水植物用于处理氮磷污染水体的实例较多，常见的有芦苇、菖蒲、香蒲、美人蕉、慈菇、千屈菜等。在氮磷去除效果上，香蒲、空心莲子草、千屈菜、野慈菇和黄菖蒲等对总磷的去除率较高，菖蒲则对总氮的净化效果良好。芦竹、金边石菖蒲和香菇草的氮磷综合去除效果较好。大聚藻、香菇草、水芹和美人蕉等水质净化能力良好，可作为氮磷去除的优选植物使用。汤显强等^[16]对芦苇、香蒲等 7 种水生植物去氮除磷效果进行了比较分析，发现水葱、香蒲和芦苇可作为有效去除氮磷的北方人工湿地备选植物。金边石菖蒲和香菇草对总氮的去除率分别为 86.22%和 91.13%，对总磷的去除率分别为 87.94% 和 92.09%，可作为人工湿地的首选植物^[17]。在模拟的轻度、中度和高度富营养污水中，空心莲子草对磷的去除效果最佳(79.50%~94.00%)^[18]。何娜等^[19]研究发现，菖蒲和水葱对污染水体中的铵态氮具有较好的去除能力，香蒲对总磷的去除率最高，慈菇则对硝态氮的去除率最高。COOPER 等^[20]研究发现，种植有水烛和灯芯草的人工湿地中氮、磷的量分别比无植物的对照基质中的量低 18%~28%和 20%~31%。孙譞等^[21]对 12 种挺水植物净化模拟污水的研究中发现，千屈菜对总磷的净化效果最

好,菖蒲对总氮的净化效果为佳,综合考虑净化速率和最终净化率,千屈菜、野慈菇和黄菖蒲对总氮、总磷的净化效果尤为突出。

2.1.2 漂浮植物 应用于处理氮磷污水的漂浮植物种类较少,主要有凤眼莲、大藻、浮萍等。其中,凤眼莲应用最为广泛,对氮磷的净化效果较为突出,优于大藻及浮萍等。浮萍对水体中磷的去除效果相对较差。何娜等^[19]对大藻、凤眼莲等6种水生植物氮磷去除效果进行研究,表明6种植物都能较好地吸收水中营养物质,其中漂浮植物大藻、凤眼莲对氮磷的吸收贡献率明显高于挺水植物慈菇、菖蒲、香蒲和水葱吸收贡献率。在废水的净化效果上,凤眼莲对氮磷的去除效果优于石莲花和大藻^[22]。另有研究表明,在高浓度氮磷污水中,与其他8种植物相比,凤眼莲对总氮和总磷的去除率均最高(分别为40.42%和69.58%)^[23]。浮萍对水体中的氮也有一定去除作用,去除率达到58.17%^[24]。

2.1.3 浮叶植物 与漂浮植物类似,浮叶植物在处理氮磷污染水体中的应用也相对较少,主要有水罌粟、睡莲、苔菜等。水罌粟景观效果好,可在富营养程度较低的水体中单独应用,或与其他植物配合应用^[25]。蔡佩英等^[23]发现,在3种浓度模拟污水中,9种水生植物对总氮的去除率差异较大,荷花对总氮的去除率最高。叶月等^[26]研究发现,菱角对富营养水体中总氮、总磷、化学需氧量的去除率分别为53.51%,33.86%和67.52%,水中溶氧量和透明度有较大增加,可有效改善富营养化水体的水质。另有研究表明,苔菜对水体中的氮也有一定去除作用,去除率可达64.43%^[24]。

2.1.4 沉水植物 应用于氮磷污染水体的沉水植物主要有眼子菜科的菹草、马来眼子菜、微齿眼子菜,水鳖科的伊乐藻、黑藻,金鱼藻科的金鱼藻及小二仙草科的狐尾藻等。其中,金鱼藻、黑藻、轮叶黑藻去氮除磷效果较为突出。大聚藻、水芹和微齿眼子菜可用于冬季的富营养化水体净化,菹草适用于高富营养条件下对总磷的去除。金鱼藻对氮、磷的去除率分别达到62.70%和60.10%以上,眼子菜对总氮去除率为65.51%,对总磷去除率为85.87%^[17-18]。与其他植物相比,大聚藻对总氮和总磷的净化增效较高,可作为冬季低温条件下生态净水工程的优选水生植物^[27]。菹草-伊乐藻群落对总氮、铵态氮、总磷的去除率达50.7%,83.2%和32.0%,且能有效缓解菹草死亡对水质产生的不利影响^[28]。5种能越冬的水生植物(伊乐藻、微齿眼子菜、竹叶眼子菜、石菖蒲和水芹菜)中,在不同的营养条件下,水芹和微齿眼子菜的脱氮除磷效果最好^[29]。在总磷的去除效率上,轮叶黑藻>狐尾藻>金鱼藻,在总氮的去除效率上,轮叶黑藻>金鱼藻>狐尾藻,轮叶黑藻对水体中的氮磷去除效率最好,是一种很好的水体净化植物^[30]。黑藻生长在水底,其根、茎叶全部与水接触,可以通过整株植物来吸收营养物质,因而对水体氮磷的净化能力较强^[31]。在净化氮磷污染水体中,挺水植物和沉水植物的多数种类已被广泛应用于高浓度氮磷污水治理。除少数种类(凤眼莲等)外,漂浮植物和浮叶植物多用于氮磷污染程度低的水体净化。与浮水植物相比,挺水植物和沉水植物的生长量较大、根系发达且输氧能力较强。该2类植物能够将大量氧气输送至根部区域,有利于好氧微生物的呼吸,使得其根区细菌群落可以更好地与污染物发生相互作用^[32-33]。在有挺水或者沉水植物为基础的生态系统,生化需氧量、化学需氧量、总氮和铵态氮都远低于以漂浮植物为基础的生态系统^[34]。

2.2 水生植物对重金属的吸附

水生植物对重金属污染水体的修复方式有:植物积累、植物挥发和植物固化等。为了适应水体中重金属的逆境胁迫,水生植物根系最先感应并迅速做出反应,通过分泌有机酸或植物螯合物(如植物螯合肽),使游离在根系周围的重金属离子发生螯合作用,根系具有的滞留效应可以帮助植物富集更多的重金属^[35]。此外,植物根系分泌物也能直接或间接影响金属离子的迁移率和毒性,植物庞大的根区及其产氧作用为微生物生长提供了适宜的环境,也促进了污水中重金属的氧化和沉降^[36-37]。目前,水生植物已广泛应用于重金属污染水体的生态修复。

2.2.1 挺水植物 谢辉等^[38]研究发现,水葱可以耐高质量分数镉和较广的pH值范围,其地上和地下部分镉富集量分别高达264.71 mg·kg⁻¹和234.39 mg·kg⁻¹。RAI等^[39]发现,水蕹对铜、铬、镉和砷具有较好的蓄积能力。3种植物中,积累锌的总量大小顺序为茭白>美人蕉>灯心草,茭白积累锌的总量是灯心草的1.79倍^[40]。在重金属污染地区,水芹地上部分锌质量分数为647.57 mg·kg⁻¹,且富集系数为0.81,转运系数大于1^[41]。水葱、菖蒲、芦苇均能有效吸收水体中的镉,对镉的去除最高分别可达10 074.17 mg·kg⁻¹,14 759.33 mg·kg⁻¹和4 620.00 mg·kg⁻¹,可用作重金属镉污染水体的植物修复^[42]。TÜRKER等^[43]

研究发现, 硼在芦苇根区富集的质量分数为 97.00~106.00 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 根区的质量分数范围是茎的 2 倍和叶子的 4 倍。AGUILAR 等^[44] 在湿地种植香蒲属植物, 在初始质量浓度高达 30.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的铬污水中, 取得了非常好的效果, 铬去除率达到 99%。挺水植物种类繁多, 已被广泛地运用于净化重金属污染水体。常见的有芦苇、菖蒲、灯芯草、水蕹、水葱及美人蕉等。其中, 芦苇的重金属吸附能力较强, 已较多地用于硼、铜、锌、铅、铬、镉等金属元素的去除。水葱、菖蒲对镉的富集系数较高, 水芹和茭白则对锌、具有高积累能力。水蕹可用于铜、铬、镉和砷等重金属污染水体的净化。

2.2.2 漂浮植物 陈明利等^[45] 研究发现, 凤眼莲与水蕹能明显去除污水中的锌与镉, 对镉去除率可以提高 65.30%, 锌去除率可提高 43.70%。NARAIN 等^[46] 研究了采用凤眼莲去除铬的实验, 在初始质量浓度为 0.006 2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下达到 80.26% 的铬去除率。在垃圾渗滤液中重金属的吸附研究中, 浮萍对铬和铅的吸附率最大, 适用于铬与铅量高的重金属废水处理^[47]。种云霄等^[48] 发现, 在污染物的去除潜力上, 除凤眼莲外, 大漂、浮萍、紫萍、槐叶萍和满江红等都可大量富集污水中的金属元素。与挺水植物相比, 应用于处理重金属污染水体的漂浮植物种类较少, 主要有雨久花科的凤眼莲, 其次为浮萍科的浮萍及天南星科的大藻等。其中, 凤眼莲对锌、铬、镉、铅、锰的吸附效果较好, 浮萍蓄积铬和铅的能力较佳。凤眼莲和大藻均适用于短期水体重金属汞、铅、镉、锌、铜等的复合污染。

2.2.3 浮叶植物 CHOO 等^[49] 研究表明, 利用睡莲处理铬污染废水, 发现其对 1.00 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铬去除率可达 93%。KUMAR 等^[50] 发现, 在镉、铅质量浓度分别为 0.11 和 0.71 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的水体中, 菱对这 2 种元素的蓄积分别可达 13.05 和 87.75 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 表明菱对镉和铅有很好的蓄积能力, 而莲则对铜和锌有很强的蓄积能力。浮萍已被公认为高潜力的硼积累品种, 其对废水中的镉、砷也有较好的积累能力^[51-52]。苕菜对镉和锌的耐受能力较小, 耐受范围值分别低于 0.50 和 1.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[45]。将金银莲花植株置于质量浓度为 16.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的汞培养液中 4 d, 其根部受害程度达到 8.1%^[53]。与漂浮植物类似, 应用于处理重金属污染水体的浮叶植物也较少, 仅有菱、莲、浮萍及两栖蓼等。其中, 菱对镉和铅吸附能力较强, 浮萍对硼有较高的蓄积能力。苕菜的重金属吸附能力则较弱, 莲适用于铜、锌、镉污染水体的生态修复。

2.2.4 沉水植物 潘义宏等^[54] 研究发现, 金鱼藻、黑藻、八药水筛、小眼子菜、穗状狐尾藻等 5 种水生植物同时对砷、锌、铜、镉、铅具有较强的吸收和富集能力, 在重金属复合污染水体修复中潜力较大。彭克俭等^[55] 研究发现, 龙须眼子菜对镉、铅有较强的吸收能力, 当镉、铅处理液浓度分别为 6.67 和 83.00 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 其对镉、铅的生物累积量分别达 496.00 和 10 800.00 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。KESKINKAN 等^[56] 的研究表明, 狐尾藻和金鱼藻能将重金属锌、铅和铜元素从溶液中移出, 可用于从水体中去除重金属。水蓼对重金属铜表现出耐性特征, 苦草、青箱、金鱼藻对铅、镉具有共富集特征^[57]。不同的沉水植物对周围环境反应能力的大小各异, 对重金属元素铜、镉、锌的富集能力顺序依次为菹草>黑藻>狐尾藻>苦草^[58]。在沉水植物中, 处理重金属污染水体应用较多的有苦草、金鱼藻、狐尾藻、黑藻及眼子菜等。其中, 龙须眼子菜对镉、铅的富集能力较强, 轮叶黑藻适用于较高浓度铜污染水体的治理, 伊乐藻对镉的抗性较大, 可用于镉污染废水的生态修复。金鱼藻、狐尾藻等对砷、铜、镉、锌、铅具有较强的吸附能力, 在修复重金属复合污染水体中潜力较大。由于水生植物的形态特征、生物学特性等不同, 其对重金属的蓄积能力也有较大差异, 沉水植物比其他生活型植物能更好的吸收和富集水体中的重金属^[59-60]。因为沉水植物的表皮细胞没有角质层和蜡质层, 可直接吸收水中的气体、水分及矿质营养, 这些表皮细胞逐渐取代根的机能, 根逐渐退化甚至消失^[54]。当水体受到重金属污染后, 沉水植物将依赖茎叶更多地吸收环境中的重金属元素。

3 问题与展望

水生植物对富营养化和重金属污染水体具有良好的净化效果, 加之材料易于获得且一般具有良好的景观提升作用, 被日益广泛地应用到实际当中。水生植物对污染水体的净化机制仍将是当前富营养化和重金属污染水体生态修复的研究重点。为了进一步开展水生植物在农业面源污染防控中的应用研究, 建议从以下几个方面开展相关研究: 不同生活型植物对同一污染类型水体的净化能力存在较大差异。现有的研究多局限于单一生活型植物对污染水体的净化效果对比研究及简单的植物筛选, 在水生植物的水体净化机制方面和不同生活型植物对同类型污染水体净化效果的对比研究相对较少。对于水生植物的水质

净化效果研究多数集中于室内静水条件,非静水条件下的研究实例较少,且缺乏不同季节水生植物水质净化效果的对比研究。由于水体的氮磷和重金属污染具有复合性,因此,应加强对不同生活型植物的混合种植来治理氮磷及重金属复合污染水体的相关研究。

4 参考文献

- [1] 钱大富,马静颖. 水体富营养化及其防治技术研究进展[J]. 青海大学学报, 2002, **20**(1): 28 – 30.
QIAN Dafu, MA Jingying. Progress in the eutrophication in water and its control technique [J]. *J Qinghai Univ*, 2002, **20**(1): 28 – 30.
- [2] 李安峰,潘涛,杨冲,等. 水体富营养化治理与控制技术综述[J]. 安徽农业科学, 2012, **40**(16): 9041 – 9044.
LI Anfeng, PAN Tao, YANG Chong, et al. Review of the treatment and control technologies of water eutrophication [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2012, **40**(16): 9041 – 9044.
- [3] 冯天国,万新南. 富营养化对湖泊的危害及修复技术探讨[J]. 水土保持研究, 2006, **13**(2): 145 – 146.
FENG Taiguo, WAN Xinnan. The harms of eutrophication and analysis of restoration method to lake [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2006, **13**(2): 145 – 146.
- [4] REITZEL K, HANSEN J, JENSEN H S, et al. Testing aluminum addition as a tool for lake restoration in shallow, eutrophic Lake Sønderby, Denmark [J]. *Hydrobiologia*, 2003, **506**(1/3): 781 – 787.
- [5] CHIN K K, TAY J H. Laboratory scale treatment of nickel-bearing industrial effluent [G]//EL-BASSAM N, TIETJEN C, ESSER J. *Management and Control of Heavy Metals in the Environment*. London: CEP Consultants Ltd., 1979: 567 – 571.
- [6] 朱映川,刘雯,周遗品,等. 水体重金属污染现状及其治理方法研究进展[J]. 广东农业科学, 2008(8): 143 – 146.
ZHU Yingchuan, LIU Wen, ZHOU Yipin, et al. Reused path of heavy metal pollution in hydro-environment and its research advance [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2008(8): 143 – 146.
- [7] 许秀琴,朱勇,杨挺,等. 水体重金属的污染危害及其修复技术[J]. 污染防治技术, 2007, **20**(4): 67 – 69.
XU Xiuqin, ZHU Yong, YANG Ting, et al. Harm and remediation of water pollution of heavy metals [J]. *Poll Control Technol*, 2007, **20**(4): 67 – 69.
- [8] 何刚,耿晨光,罗睿. 重金属污染的治理及重金属对水生植物的影响[J]. 贵州农业科学, 2008, **36**(3): 147 – 150.
HE Gang, GENG Chenguang, LUO Rui. The effect of heavy metals on water plants and its control [J]. *Guizhou Agric Sci*, 2008, **36**(3): 147 – 150.
- [9] 包满珠. 花卉学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [10] 吴振斌. 水生植物与水体生态修复[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [11] 徐红灯,席北斗,王京刚,等. 水生植物对农田排水沟渠中氮,磷的截留效应[J]. 环境科学研究, 2007, **20**(2): 84 – 88.
XU Hongdeng, XI Beidou, WANG Jinggang, et al. Study on the interception of nitrogen and phosphorus by macrophyte in agriculture drainage ditch [J]. *Res Environ Sci*, 2007, **20**(2): 84 – 88.
- [12] SAEED T, SUN Guangzhi. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media [J]. *J Environ Manage*, 2012, **112**(24): 429 – 448.
- [13] 陈海生,王光华,宋仿根,等. 生态沟渠对农业面源污染物的截留效应研究[J]. 江西农业学报, 2010, **22**(7): 121 – 124.
CHEN Haisheng, WANG Guanghua, SONG Fanggen, et al. Retention and removal effects of ecological ditch on agricultural non-point source pollutants [J]. *Acta Agric Jiangxi*, 2010, **22**(7): 121 – 124.
- [14] 王华,吴佳,冯文波,等. 滇池及流域环境水中磷与悬浮物的相关性分析[J]. 环境科学与技术, 2015, **38**(5): 84 – 88.
WANG Hua, WU Jia, FENG Wenbo, et al. Correlation of phosphorus and suspended solids in environmental water of Dianchi Lake watershed [J]. *Environ Sci Technol*, 2015, **38**(5): 84 – 88.
- [15] 李强坤,胡亚伟,孙娟. 农业非点源污染物在排水沟渠中的迁移转化研究进展[J]. 中国生态农业学报,

- 2010, **18**(1): 210 – 214.
- LI Qiangkun, HU Yawei, SUN Juan. Migration and transformation of agricultural non-point source pollutants in drainage ditches [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2010, **18**(1): 210 – 214.
- [16] 汤显强, 李金中, 李学菊, 等. 7 种水生植物对富营养化水体中氮磷去除效果的比较研究[J]. 亚热带资源与环境学报, 2007, **2**(2): 8 – 14.
- TANG Xianqiang, LI Jinzhong, LI Xueju, *et al.* Research on seven hydrophytes removal effect on nitrogen and phosphorus in eutrophic water [J]. *J Subtrop Resour Environ*, 2007, **2**(2): 8 – 14.
- [17] 方焰星, 何池全, 梁霞, 等. 水生植物对污染水体氮磷的净化效果研究[J]. 水生态学杂志, 2010, **3**(6): 36 – 40.
- FANG Yanxing, HE Chiquan, LIANG Xia, *et al.* The purifying effect of polluted water by the aquatic plants [J]. *J Hydroecol*, 2010, **3**(6): 36 – 40.
- [18] 王斌, 周亚平. 3 种水生植物对模拟污水中氮、磷的生物净化效果[J]. 湖北农业科学, 2014, **53**(20): 4835 – 4837.
- WANG Bin, ZHOU Yaping. Biological purification effects of three aquatic plants on N and P in simulated wastewater [J]. *Hubei Agric Sci*, 2014, **53**(20): 4835 – 4837.
- [19] 何娜, 孙占祥, 张玉龙, 等. 不同水生植物去除水体氮磷的效果[J]. 环境工程学报, 2013, **7**(4): 1295 – 1300.
- HE Na, SUN Zhanxiang, ZHANG Yulong, *et al.* Efficiency of removing nitrogen and phosphorus from simulated wastewater using hydrophytes [J]. *Chin J Environ Eng*, 2013, **7**(4): 1295 – 1300.
- [20] COOPER P, SMITH M, MAYNARD H. The design and performance of a nitrifying vertical-flow reed bed treatment system [J]. *Water Sci Technol*, 1997, **35**(5): 215 – 221.
- [21] 孙譔, 郁东宁, 赵慧, 等. 12 种挺水植物对模拟污水的净化作用[J]. 北京农学院学报, 2010, **25**(2): 62 – 66.
- SUN Xuan, YU Dongning, ZHAO Hui, *et al.* Studies on simulated sewage purification by means of twelve emerging hydrophytes [J]. *J Beijing Univ Agric*, 2010, **25**(2): 62 – 66.
- [22] SOOKNAH R D, WILKIE A C. Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed dairy manure wastewater [J]. *Ecol Eng*, 2004, **22**(1): 27 – 42.
- [23] 蔡佩英, 刘爱琴, 侯晓龙, 等. 9 种水生植物对模拟污水中氮、磷的生物净化效果[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2010, **39**(3): 313 – 318.
- CAI Peiying, LIU Aiqin, HOU Xiaolong, *et al.* Biological purification effect of nine aquatic plants on N and P from simulation wastewater [J]. *J Fujian Agric For Univ Nat Sci Ed*, 2010, **39**(3): 313 – 318.
- [24] 刘燕, 万福绪, 王瀚起. 不同水生植物对富营养化水体氮磷的去除效果[J]. 林业科技开发, 2013, **27**(3): 72 – 75.
- LIU Yan, WAN Fuxu, WANG Hanqi. Removal effects on phosphorus and nitrogen in eutrophic water with different kinds of hydrophytes [J]. *China For Sci Technol*, 2013, **27**(3): 72 – 75.
- [25] 田如男, 朱敏, 孙欣欣, 等. 不同水生植物组合对水体氮磷去除效果的模拟研究[J]. 北京林业大学学报, 2011, **33**(6): 191 – 195.
- TIAN Runan, ZHU Min, SUN Xinxin, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal effects of different hydrophyte combinations under simulated eutrophic conditions [J]. *J Beijing For Univ*, 2011, **33**(6): 191 – 195.
- [26] 叶月, 徐文娟, 戚鹏, 等. 菱角对富营养化水体净化效果的研究[J]. 长江蔬菜: 学术版, 2012(16): 63 – 65.
- YE Yue, XU Wenjuan, QI Peng, *et al.* Purification of eutrophic water by *Trapa bicornis* L. F. [J]. *J Changjiang Veget*, 2012(16): 63 – 65.
- [27] 周金波, 金树权, 姚永如, 等. 冬季低温条件下 6 种水生植物水质氮、磷净化能力比较[J]. 浙江农业学报, 2011, **23**(2): 369 – 372.
- ZHOU Jinbo, JIN Shuquan, YAO Yongru, *et al.* Comparison of nitrogen and phosphorus purification ability of six aquatic macrophytes under low temperature in winter [J]. *Acta Agric Zhejiang*, 2011, **23**(2): 369 – 372.
- [28] 王文林, 王国祥, 李强, 等. 菹草-伊乐藻群落对富营养化水体水质的净化效果[J]. 南京师大学报: 自然科学版, 2006, **29**(4): 111 – 116.
- WANG Wenlin, WANG Guoxiang, LI Qiang, *et al.* Purification effect of *Potamogeton crispus-Elodea nuttallii* commu-

- nity on eutrophic water body quality [J]. *J Nanjing Norm Univ Sci Sci*, 2006, **29**(4): 111 – 116.
- [29] 黄蕾, 翟建平, 聂荣, 等. 5种水生植物去污抗逆能力的试验研究[J]. 环境科学研究, 2005, **18**(3): 33 – 38.
HUANG Lei, ZHAI Jianping, NIE Rong, *et al.* Experimental study of decontamination and resistance ability of five hydrophytes [J]. *Res Environ Sci*, 2005, **18**(3): 33 – 38.
- [30] 潘保原, 杨国亭, 穆立蕃, 等. 3种沉水植物去除水体中氮磷能力研究[J]. 植物研究, 2015, **35**(1): 141 – 145.
PAN Baoyuan, YANG Guoting, MU Liqiang, *et al.* Removal ability of three submersed macrophytes on nitrogen and phosphorus from water [J]. *Bull Bot Res*, 2015, **35**(1): 141 – 145.
- [31] 胡萃, 刘强, 龙婉婉, 等. 水生植物对不同富营养化程度水体净化能力研究[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(10): 6 – 9.
HU Cui, LIU Qiang, LONG Wanwan, *et al.* Purification of eutrophic water of different degrees with hydrophytes [J]. *Environ Sci Technol*, 2011, **34**(10): 6 – 9.
- [32] BRIX H. Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants-the root-zone method [J]. *Water Sci Technol*, 1987, **19**(1/2): 107 – 118.
- [33] BEVEN K, GERMAN P. Macropores and water flow in soils [J]. *Water Resour Res*, 1982, **18**(5): 1311 – 1325.
- [34] 黄文成. 沉水植物在治理滇池草海污染中的作用[J]. 植物资源与环境, 1994, **3**(4): 29 – 33.
HUANG Wencheng. The effect of using submerged vegetation for the pollution treatment of Dianchi Caohai Lake [J]. *J Plant Resour Environ*, 1994, **3**(4): 29 – 33.
- [35] 李晶, 栾亚宁, 孙向阳, 等. 水生植物修复重金属污染水体研究进展[J]. 世界林业研究, 2015, **28**(2): 31 – 35.
LI Jing, LUAN Yanning, SUN Xiangyang, *et al.* Research advances in remediation of heavy metal contaminated water bodies by aquatic plants [J]. *World For Res*, 2015, **28**(2): 31 – 35.
- [36] CHENG Shuiping, GROSSE W, KARRENBROCK F, *et al.* Efficiency of constructed wetlands in decontamination of water polluted by heavy metals [J]. *Ecol Eng*, 2002, **18**(3): 317 – 325.
- [37] ZHANG Chongbang, WANG Jiang, LIU Wenli, *et al.* Effects of plant diversity on nutrient retention and enzyme activities in a full-scale constructed wetland [J]. *Bioresour Technol*, 2010, **101**(6): 1686 – 1692.
- [38] 谢辉, 谢光炎, 杜青平, 等. 湿地植物对矿山废水重金属去除的影响[J]. 环境科学与技术, 2010, **33**(12F): 476 – 480.
XIE Hui, XIE Guangyan, DU Qingping, *et al.* Impact of wetland plants on removal of heavy metals in mine wastewater [J]. *Environ Sci Technol*, 2010, **33**(12F): 476 – 480.
- [39] RAI U N, SINAH S. Distribution of metals in aquatic edible plants: *Trapa natans* (Roxb.) Makino and *Ipomoea aquatica* Forsk [J]. *Environ Monit Assessm*, 2001, **70**(3): 241 – 252.
- [40] 徐德福, 李映雪, 赵晓莉, 等. 3种湿地植物对锌的吸收分配及其与根表铁氧化物胶膜的关系[J]. 西北植物学报, 2009, **29**(1): 116 – 121.
XU Defu, LI Yingxue, ZHAO Xiaoli, *et al.* Relationship between zinc uptake and accumulation of wetland plant and iron plaque on the root surface [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2009, **29**(1): 116 – 121.
- [41] 李法云, 肖鹏飞, 侯伟, 等. 典型工业区杂草对土壤中重金属吸收特性研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, **26**(2): 300 – 303.
LI Fayun, XIAO Pengfei, HOU Wei, *et al.* Characteristics of heavy metals phytoextraction by weed species in industrial area [J]. *J Liaoning Tech Univ*, 2007, **26**(2): 300 – 303.
- [42] 任珺, 陶玲, 杨倩, 等. 芦苇、菖蒲和水葱对水体中Cd富集能力的研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(9): 1757 – 1762.
REN Jun, TAO Ling, YANG Qian, *et al.* Accumulation Ability of Cd in water for *Phragmites australis*, *Acorus calamus* and *Scirpus tabernaemontani* [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2010, **29**(9): 1757 – 1762.
- [43] TÜRKER O C, TÜRE C, BÖCÜK H, *et al.* Constructed wetlands as green tools for management of boron mine wastewater [J]. *Int J Phytorem*, 2014, **16**(6): 537 – 553.
- [44] AGUILAR J R P, CABRIALES J J P, VEGA M M. Identification and characterization of sulfur-oxidizing bacteria in an artificial wetland that treats wastewater from a tannery [J]. *Int J Phytorem*, 2008, **10**(5): 359 – 370.
- [45] 陈明利, 张艳丽, 吴晓芙, 等. 人工湿地植物处理含重金属生活废水的实验研究[J]. 环境科学与技术,

- 2008, **31**(12): 164 – 168.
- CHEN Mingli, ZHANG Yanli, WU Xiaofu, *et al.* Characteristics of selected wetland plant species for removal of Zn^{2+} / Cd^{2+} from wastewater [J]. *Environ Sci Technol*, 2008, **31**(12): 164 – 168.
- [46] NARAIN S, OJHA C S P, MISHRA S K, *et al.* Cadmium and chromium removal by aquatic plant [J]. *Int J Environ Sci*, 2011, **1**(6): 1297 – 1304.
- [47] 侯晓龙, 马祥庆. 水生植物对垃圾渗滤液中重金属的吸附效果研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(6): 2262 – 2266.
- HOU Xiaolong, MA Xiangqing. Research on adsorption effect of heavy metal in landfill leachate by aquatic plants [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2007, **26**(6): 2262 – 2266.
- [48] 种云霄, 胡洪营, 钱易. 大型水生植物在水污染治理中的应用研究进展[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2003, **4**(2): 36 – 40.
- CHONG Yunxiao, HU Hongying, QIAN Yi. Advances in utilization of macrophytes in water pollution control [J]. *Tech Equip Environ Poll Control*, 2003, **4**(2): 36 – 40.
- [49] CHOO T P, LEE C K, LOW K S, *et al.* Accumulation of chromium (VI) from aqueous solutions using water lilies (*Nymphaea spontanea*) [J]. *Chemosphere*, 2006, **62**(6): 961 – 967.
- [50] KUMAR M, CHIKARA S, CHAND M K, *et al.* Accumulation of lead, cadmium, zinc, and copper in the edible aquatic plants *Trapa bispinosa* Roxb. and *Nelumbo nucifera* Gaertn [J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2002, **69**(5): 649 – 654.
- [51] MARIN C M D C, ORON G. Boron removal by the duckweed *Lemna gibba*: a potential method for the remediation of boron-polluted waters [J]. *Water Res*, 2007, **41**(20): 4579 – 4584.
- [52] ZAYED A, GOWTHAMAN S, TERRY N. Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants (I) duckweed [J]. *J Environ Qual*, 1998, **27**(3): 715 – 721.
- [53] 尤文鹏, 施国新, 杜开和, 等. 汞污染对金银莲花叶片细胞超微结构的影响[J]. *南京师大学报: 自然科学版*, 1999, **22**(4): 81 – 85.
- YOU Wenpeng, SHI Guoxin, DU Kaihe, *et al.* Injury of Hg^{2+} on roots and leaves of *Nymphoides indica* (L.) O. Kuntze [J]. *J Nanjing Norm Univ Nat Sci*, 1999, **22**(4): 81 – 85.
- [54] 潘义宏, 王宏斌, 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 Yihong, WANG Hongbin, GU Zhaoping, *et al.* Accumulation and translocation of heavy metals by macrophytes [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30**(23): 6430 – 6441.
- [55] 彭克俭, 刘益贵, 沈振国, 等. 镉、铅在沉水植物龙须眼子菜叶片中的分布[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(增刊): 69 – 74.
- PENG Kejian, LIU Yigui, SHEN Zhenguo, *et al.* Distribution of Cd and Pb in a submerged aquatic plant *Potamogeton pectinatus* [J]. *Chin Environ Sci*, 2010, **30**(supp): 69 – 74.
- [56] KESKINKAN O, GOKSU M Z L, BASIBUYUK M, *et al.* Heavy metal adsorption properties of a submerged aquatic plant (*Ceratophyllum demersum*) [J]. *Bioresour Technol*, 2004, **92**(2): 197 – 200.
- [57] 沈佳, 纪桂琴, 许文, 等. 沉水植物菹草在低温条件下对重金属 Cu, Pb, Zn 的吸附和富集[J]. *植物研究*, 2009, **29**(5): 585 – 591.
- SHEN Jia, JI Guiqin, XU Wen, *et al.* Biosorption and bioaccumulation of heavy metals copper, lead and zinc by a submerged aquatic plant *Potamogeton crispus* L. at low temperature [J]. *Bull Bot Res*, 2009, **29**(5): 585 – 591.
- [58] 陈国梁, 林清. 不同沉水植物对 Cu, Pb, Cd, Zn 元素吸收积累差异及规律研究[J]. *环境科技*, 2009, **22**(1): 9 – 12.
- CHEN Guoliang, LIN Qing. Research on accumulation of Cu, Pb, Cd, Zn in different submerged plants [J]. *Environ Sci Technol*, 2009, **22**(1): 9 – 12.
- [59] KESKINKAN O, GOKSU M Z L, BASIBUYUK M, *et al.* Heavy metal adsorption properties of a submerged aquatic plant (*Ceratophyllum demersum*) [J]. *Bioresour Technol*, 2004, **92**(2): 197 – 200.
- [60] CHANDRA P, KULSHRESHTHA K. Chromium accumulation and toxicity in aquatic vascular plants [J]. *Bot Rev*, 2004, **70**(3): 313 – 327.