



水葫芦修复富营养化水体的 机制与工程化技术

◎ 严少华 高岩 郭俊尧 等 著



科学出版社

水葫芦修复富营养化水体的 机制与工程化技术

严少华 高 岩 郭俊尧 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在研阅国内外大量关于水葫芦研究成果的基础上,介绍了水葫芦净化污染水体的功能和巨大潜力,分析归纳水葫芦用于污水治理的关键难题和建设水葫芦治理污水工程面临的挑战。同时结合研究团队利用水葫芦净化水体研究工作十多年的成果,通过实例和丰富的技术参数介绍水葫芦治污的工程的水体净化效果和水葫芦控制、收获、处置、利用等关键技术、装备,为有效解决水葫芦净化水质和修复富营养化水体技术工程化面临的问题和挑战提供了良好的思路和实用技术方案。

本书可以为应用水葫芦净化水质的项目工程规划设计提供科学依据、科技支撑和决策参考。本书适用于从事环境保护、水生态修复、农业等领域的行政管理、工程技术人员和从事污水净化、富营养化湖泊治理的研究机构、环保企业,也可作为高等院校环境专业教师教学、学生阅读的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水葫芦修复富营养化水体的机制与工程化技术/严少华等著. —北京:科学出版社, 2018.8

ISBN 978-7-03-058353-6

I. ①水… II. ①严… III. ①凤眼莲-侵入种-富营养化-污染防治-研究-中国 IV. ①X52②S555

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 165816 号

责任编辑:周 丹 梅靛雅 沈 旭/责任校对:彭 涛

责任印制:张 伟/封面设计:许 瑞

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2018 年 8 月第一次印刷 印张:18

字数:427 000

定价:99.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

编辑委员会

主 编： 严少华 高 岩 郭俊尧

参编作者（按姓氏拼音排序）：

白云峰 杜 静 高 岩 郭俊尧

亢志华 刘海琴 卢 信 秦红杰

王 智 徐 蓉 严少华 叶小梅

易 能 张维国 张迎颖 张振华

张志勇

前 言

水葫芦 (*Eichhornia crassipes*) 是一种热带大型维管束漂浮植物, 对环境的适应能力强, 生长、繁殖旺盛, 生物学产量高, 已在全球几十个国家水域泛滥。水葫芦在其入侵的水体快速生长导致严重的生态灾害。河道、湖泊被水葫芦覆盖会影响阳光进入水层, 降低水体溶氧和水温, 影响藻类、沉水植物生存, 从而破坏水生动物的食物链, 影响水生生态。水葫芦泛滥严重影响社会经济发展, 阻碍运输、渔业和水上娱乐, 堵塞管道、渠道, 影响工业生产用水和农田灌溉。正是由于它的这些特性, 水葫芦被认为是世界上十大恶性杂草之一。

相反, 同样因为水葫芦的上述特性, 水葫芦吸收水中营养物质和污染物的能力特别强, 也比较容易种植和收获, 所以它又是治理污水、修复富营养化水体的优势植物, 是污水治理生态工程的优选植物材料。

用水葫芦治污是极具争议和挑战的项目。水葫芦净化水体的能力在全世界学术界是不争的事实, 但为什么至今仍只见试验研究报道而不见水葫芦治污生态工程实例? 本书作者研读了国内外大量的水葫芦研究资料, 分析归纳水葫芦未能实用于污水治理的关键难题和建设水葫芦治理污水工程要面临的三大挑战:

一是存在生态风险。引种或利用自然水域已经存在的水葫芦修复富营养化水体, 如其水面覆盖度过大或围栏控制失败造成逃逸泛滥, 会影响流域水生生态, 甚至影响当地的社会经济发展。要破解的难题是能否对水葫芦种群进行安全有效的控制与管理。

二是在富营养化水域, 水葫芦鲜草产量高达每公顷 900t, 植株含水量高达 93%~95%, 收获、运输、处置成本高, 难度大。如不及时收获, 水葫芦在水中死亡腐烂, 会导致水质进一步恶化; 若打捞上岸不能及时处置利用, 不但需要大面积堆场, 还会给堆放地及周边环境带来新的污染。要解决的关键问题是必须在水葫芦收获、脱水技术和专用装备研发上取得突破。

三是水葫芦资源化利用技术难度大, 产品价值低, 通过产品销售收入难以维持水葫芦治污工程的市场化和可持续运行。从技术层面上要研发高附加值水葫芦产品, 提高项目的经济效益; 从政策支撑层面上要根据项目的环境治理功能, 建立生态补偿机制。

解决上述问题, 有挑战, 也有希望。不能因为水环境污染治理的迫切性就盲目引进外来入侵生物, 也不能对水葫芦超强的净化污水能力视而不见。科学的态度应该是实事求是地研究用水葫芦治污可能存在的生态风险, 找出解决问题的办法, 正确发挥水葫芦净化水体的功能。作者坚信, 随着科学技术的快速发展和生态文明建设的巨大需求, 水葫芦净化水质和修复富营养化水体技术工程化面临的问题和挑战肯定能得到有效解决。水葫芦这一被认为是“环境杀手”的植物将转变成“环境卫士”, 在污水治理和富营养化水体生态修复工程中发挥重要作用, 同时有效防范生态风险。

作者所在研究团队经过 2007~2016 年十年的深入研究和 2009~2011 年三年的集中

攻关,在国家科技支撑计划项目“水葫芦安全种养和机械化采收技术集成研究与示范”(2009BAC63B00)、江苏省太湖专项“基于水体修复的水葫芦控制性种植及资源化技术研究”与示范”(BS2007117)、云南省滇池治理专项“水葫芦治污试验性工程”和7项国家自然科学基金的支持下,开展了水葫芦治污效果及机制和生态风险防范研究、水葫芦收获处置、资源化利用技术攻关和水葫芦修复富营养化湖泊工程示范。从保证生态安全和解决水葫芦资源化利用关键技术难题入手,解决了水葫芦安全控制种养管理、机械化收获、固液分离处置、资源化利用等关键技术;开展对“水葫芦控制性种植—收获转运—加工处置—资源化利用”关键环节专用设备的研发、优化与集成,实现了专用设备的衔接配套,提高了设备的作业效率,降低了生产成本,同时建立了资源化利用技术体系。在江苏太湖和云南滇池建设了水葫芦治污技术的试验示范工程。截至本书编写时,已发表水葫芦修复富营养化水体相关的研究论文135篇,获相关专利授权33项。2011~2014年,在太湖、滇池水污染治理过程中,示范种植水葫芦面积累计83.53km²,打捞处置水葫芦530万t,利用水葫芦生产有机肥11万t,水葫芦修复富营养化湖泊研究与工程示范取得初步成果。

本书在研阅国内外大量关于水葫芦研究成果的基础上,结合研究团队用水葫芦净化水体的研究成果,通过实例和丰富的技术参数介绍水葫芦治污的试验性工程,试图为应用水葫芦净化水质的项目工程规划设计提供科学依据、科技支撑和决策参考。

本书分为三个部分,共13章。第一部分,从第一章至第六章,主要介绍水葫芦的生物学特征和净化水质的效果与机制。第二部分,从第七章至第十一章,介绍国家科技支撑计划项目,太湖、滇池治理示范项目相关水葫芦治污工程及水葫芦的处置利用研究进展和技术成果。第三部分,第十二、十三章,介绍水葫芦治污生态工程的技术经济评价和相关技术成果工程化应用展望及进一步研究工作的建议。

本书由严少华、高岩、郭俊尧主编。各章节编写者是:第一章(张振华、郭俊尧),第二章(高岩、易能、严少华),第三章(张迎颖、严少华),第四章(卢信),第五章(高岩、秦红杰、张维国、易能),第六章(王智、严少华),第七章(张志勇、严少华),第八章(王智、严少华),第九章(叶小梅、杜静、徐蓉),第十章(白云峰、郭俊尧),第十一章(刘海琴、严少华),第十二章(亢志华、刘海琴),第十三章(严少华、郭俊尧)。

参加本书编写的主要完成人和共同作者都参加了国家科学技术部和江苏省太湖、云南省滇池治理的重大科技项目。编委会要求作者围绕水葫芦治污工程实际,结合自己科研工作,参考国内外关于水葫芦的研究进展,分工合作完成编写。写作中参阅、引用了国内外从1946年以来发表的关于水葫芦的主要研究论文、报告(专著)2000多篇(部)。本书适用于环境、生态、农业学科领域的广大科研工作者,也可从事污水净化、富营养化湖泊治理的企业和科研机构提供参考。

严少华 高岩 郭俊尧

2017年8月

目 录

前言

第一部分 水葫芦生物学特征和水葫芦净化水质的效果与机制

第一章 水葫芦快速繁殖、吸收养分的生物学基础	3
第一节 概述	3
第二节 形态适应性	3
一、水葫芦形态学特征	3
二、茎叶-根比例	5
三、海绵状组织	6
第三节 水葫芦的繁殖特性	6
一、水葫芦的无性繁殖	7
二、水葫芦的有性繁殖	10
第四节 水葫芦组织的化学成分、含水量及对养分需求特性	19
一、水葫芦组织的化学成分、含水量	19
二、水葫芦对养分(氮和磷)的需求特性	20
第五节 生态位、光照和温度环境因子对水葫芦生长的影响	20
参考文献	27
第二章 水葫芦净化水体氮的规律及机制	31
第一节 概述	31
一、氮与水体富营养化	31
二、水葫芦修复富营养化水体	32
三、多维集成技术	34
第二节 水葫芦与氮动力学	34
一、氮是水葫芦生长的必需大量元素	34
二、氮在水葫芦植株内分布	34
第三节 水葫芦与水体氮素的相关性	35
一、氮素形态与水葫芦的生长	35
二、氮浓度与水葫芦吸收	36
三、水葫芦对氮的吸收同化与存储	37
第四节 水葫芦修复富营养化水体氮素消减效果	38
一、水葫芦净化氮的效率	38
二、水葫芦吸收同化的贡献率	42

第五节 水体非水葫芦吸收脱氮研究	42
一、水葫芦对水体中氮素平衡的影响	42
二、N-15 示踪研究氮素归趋	43
三、水葫芦对反硝化微生物群落的影响	44
参考文献	46
第三章 水葫芦净化水体磷的规律及机制	50
第一节 水生生态系统中的磷	50
一、磷是水体富营养化的关键因素	50
二、水生生态系统中磷的赋存形态	51
三、水生生态系统中磷的迁移转化	52
第二节 磷对水葫芦生长的影响	53
一、水葫芦器官的磷含量	53
二、水环境中可获取磷浓度对水葫芦生长的影响	55
三、水环境中氮浓度对水葫芦吸收同化磷的影响	57
第三节 水葫芦对磷的去除	58
一、水葫芦对溶解态磷的吸收作用	58
二、水葫芦对颗粒磷的利用	59
三、在污水处理厂尾水净化中水葫芦对磷去除的影响	61
第四节 水葫芦除磷策略	62
一、静态水体的磷去除	62
二、流动水体的磷去除	63
第五节 小结	66
参考文献	66
第四章 水葫芦对水体微量污染物的去除效果和作用机制	71
第一节 概述	71
第二节 水葫芦去除重金属和类金属的规律及其机制	71
一、水体环境中重金属和类金属的来源与污染现状	71
二、水葫芦对去除水环境中重金属的影响	73
三、影响水葫芦修复重金属效果的主要因素	77
四、水葫芦去除水环境中重金属的机制	77
五、水葫芦修复水体重金属和类金属后的资源化利用	80
第三节 水葫芦对去除有机污染的影响及其机制	82
一、水环境中有机污染物种类、来源和污染现状	82
二、水葫芦对去除水环境中有机污染的影响	85
三、水葫芦对有机污染物的净化（修复）机理	86
参考文献	89
第五章 水葫芦拦截蓝藻及藻体养分的分解与转化	97
第一节 概述	97

第二节 水葫芦拦截蓝藻的效率与效果	98
第三节 富营养化湖泊中水葫芦拦截蓝藻的效果	100
一、水葫芦对蓝藻的拦截作用	101
二、水葫芦对蓝藻的拦截量	102
三、水葫芦根系对蓝藻的吸附情况	104
四、项目实施期间滇池外海北部水域蓝藻变化状况	104
第四节 水葫芦-蓝藻-微生物交互作用对水体氮归趋的影响	105
一、蓝藻被水葫芦拦截后生物量以及细胞形态变化	105
二、蓝藻被水葫芦拦截降解后细胞氮素归趋途径	106
第五节 小结	108
参考文献	108
第六章 水葫芦对水域生物群落的影响概述	111
第一节 概述	111
第二节 水葫芦对浮游植物(藻类)的影响	111
第三节 水葫芦对水生维管束植物的影响	114
第四节 水葫芦对浮游动物的影响	115
第五节 水葫芦对大型无脊椎动物的影响	116
第六节 水葫芦对鱼类的影响	118
第七节 水葫芦对细菌和真菌的影响	120
第八节 小结	121
参考文献	121

第二部分 水葫芦治污工程及水葫芦的处置利用

第七章 水葫芦治污工程示范实例	129
第一节 概述	129
第二节 水葫芦对水体的净化功能研究	129
一、净化生活污水和工业废水	129
二、处理畜禽养殖废水	130
三、净化地表径流水	131
四、修复富营养化河流、湖泊、水库	131
第三节 水葫芦规模化应用在污水治理面临的挑战	132
一、潜在的生态安全性问题	132
二、水葫芦收获难度大、成本高	133
三、水葫芦处置、利用困难,商业化生产可行性小	133
第四节 规模化控养水葫芦修复富营养化水体的技术方案	134
一、种养安全控制工程	134
二、水葫芦收获	136

第五节 水葫芦生态修复富营养化水体示范工程	141
一、规模化控养水葫芦修复太湖水体示范工程	141
二、滇池水葫芦治理污染试验性工程	145
三、水葫芦深度净化生活污水处理厂尾水生态工程	151
参考文献	155
第八章 水葫芦修复富营养化湖泊试验工程的水体环境效应	160
第一节 概述	160
第二节 水葫芦种植对滇池水体理化性质的影响	161
一、滇池北山湾	161
二、滇池外海	165
三、滇池草海	167
第三节 水葫芦控养对滇池水生生物群落与多样性的影响	176
一、滇池北山湾-底栖动物群落	176
二、滇池北山湾-浮游动物群落	179
第四节 水葫芦控养对太湖水生生物群落与多样性的影响	183
一、太湖竺山湖-底栖动物群落	183
二、太湖竺山湖-浮游动物群落	186
第五节 讨论	189
一、滇池北山湾水质变化	190
二、滇池北山湾底栖动物特征	191
三、滇池北山湾浮游动物特征	191
四、太湖竺山湖底栖动物特征	192
五、太湖竺山湖浮游动物特征	193
第六节 小结	193
参考文献	194
第九章 水葫芦的能源化利用	197
第一节 概述	197
第二节 水葫芦生物质能源开发利用技术形态适应性	198
一、碳化	198
二、焚烧	198
三、压块	198
四、水解发酵产乙醇	199
五、厌氧发酵产氢	199
第三节 水葫芦厌氧发酵产甲烷	200
一、水葫芦产甲烷潜力	201
二、水葫芦发酵产甲烷生产工艺	203
第四节 水葫芦生产有机肥技术和应用	205
一、水葫芦直接用作绿肥	205

二、水葫芦堆肥·····	206
三、脱水水葫芦生产基质·····	207
第五节 （武进）水葫芦沼气、有机肥生产工程简介·····	208
一、水葫芦固液分离和沼气生产·····	208
二、有机肥生产·····	208
参考文献·····	210
第十章 水葫芦生物质的饲料化利用·····	214
第一节 概述·····	214
第二节 水葫芦饲料质量安全评价·····	215
一、水葫芦常规饲料营养成分及特点·····	215
二、水葫芦富集水体中有害重金属对饲料资源化利用的影响·····	216
三、不同水域来源水葫芦重金属含量及对畜产品安全影响·····	216
第三节 水葫芦青贮饲料的加工调制·····	217
第四节 水葫芦青贮饲料制作及饲喂试验·····	218
一、水葫芦饲喂量与山羊日粮养分利用率间关系·····	220
二、水葫芦养分及瘤胃降解率与常规粗饲料间的比较差异·····	220
三、水葫芦饲喂山羊的育肥效果·····	222
第五节 青贮水葫芦饲喂肉鹅·····	223
一、水葫芦饲喂量与鹅日粮养分利用率间关系·····	223
二、水葫芦育肥鹅方法及日粮适宜饲喂水平·····	224
第六节 水葫芦叶蛋白饲料的生产技术·····	224
一、水葫芦叶蛋白的提取·····	224
二、水葫芦叶蛋白中的营养组分及重金属含量·····	226
参考文献·····	227
第十一章 国家科技支撑计划项目研究成果简介·····	230
第一节 概述·····	230
第二节 主要科技创新·····	230
一、水葫芦净化水体效果·····	230
二、水葫芦种养采收技术·····	232
三、水葫芦加工利用技术·····	233
第三节 水葫芦治污运营模式·····	235
一、根据在太湖和滇池实施的水葫芦治理工程，测算了水葫芦去除氮磷成本和资源化利用收益，提出了生态补偿办法·····	235
二、实现了水葫芦消减富营养化水体氮磷的产业化生产、企业化运行·····	235
第四节 相关项目与成果·····	235
一、承担的项目来源、名称及编号·····	235
二、授权专利·····	236
三、编制的地方标准·····	238

四、发表的研究论文·····	238
五、出版专著·····	246
参考文献·····	247

第三部分 水葫芦治污生态工程的技术经济评价和对应用的展望

及进一步研究工作的建议

第十二章 水葫芦修复富营养化水体技术经济分析·····	255
第一节 概述·····	255
第二节 关键技术环节的成本收益分析·····	255
一、关键技术环节的成本分析·····	256
二、关键技术环节经济效益分析·····	261
第三节 水葫芦生态修复技术综合评价·····	262
一、经济效益·····	262
二、生态效益·····	263
三、社会效益·····	264
第四节 富营养化水体治理生态补偿政策探讨·····	264
一、富营养化水体治理生态补偿属于修复性补偿范畴·····	264
二、生态补偿的主客体·····	265
三、生态补偿标准的确定·····	265
四、生态补偿资金的来源·····	266
参考文献·····	266
第十三章 水葫芦治污技术工程化的挑战与研究展望·····	267
第一节 概述·····	267
第二节 水葫芦控制种养生态安全风险防范和净化工程技术参数·····	268
一、深入研究水葫芦治污工程的生态安全问题·····	268
二、解决大水面种植水葫芦对覆盖水域内生物多样性影响问题·····	268
三、最佳收获期和收获量研究·····	268
四、深入研究水葫芦净化水质的效率与效果的工程技术参数·····	269
第三节 水葫芦的收获、处置和利用技术研发·····	269
一、水葫芦的收获·····	269
二、水葫芦的处置·····	270
三、水葫芦的利用·····	270
第四节 关于水葫芦净化水质技术工程化可行性论证和政策支持体系研究·····	272
一、加强用水葫芦治污生态工程可行性论证·····	272
二、研究制定湿地建设运行的生态补偿机制·····	272
参考文献·····	273

第一部分 水葫芦生物学特征和水葫芦 净化水质的效果与机制

第一章 水葫芦快速繁殖、吸收养分的生物学基础

第一节 概 述

水葫芦快速繁殖的入侵特性以及快速吸污纳垢的治污特性均来源于其生物学特性。与此相关的主要生物学特点包括形态适应性、生长繁殖特性、组织化学成分、含水量及对养分需求特性。这些基本特性与水域环境条件的相互作用,包括温度、光、pH、溶解氧和营养盐浓度等,决定了水葫芦的繁殖速度、生物量累积速度及对养分的吸收存储能力等(Penfount and Earle, 1948)。全面把握水葫芦的生物学特性和生态行为,不仅能帮助我们更深入地了解这个大型水生植物,还可以帮助我们更好地应对环境挑战,进行水葫芦的管理和控制及其生物量的利用。

第二节 形态适应性

一、水葫芦形态学特征

水葫芦形态的变化被定义为对环境的广泛形态适应,体现了它在特定的栖息地成功地竞争和具有极强的侵入生态系统的能力的生物学特异性能。成熟的水葫芦在富营养的水体和相对稀疏的群落中生长时,它的外形如图 1-1 所示。当有宽敞的空间时,植物在水面上水平扩展以产生更多的新一代,以最大限度地利用光和可用的营养盐。当种群密度很大时,水葫芦往往垂直生长成细长的浮游物和大叶片,以积累营养和能量进一步发育有性繁殖。同时,在高密度种群中生长时,球型浮子变成细长的浮子,如图 1-1 和图 1-2 所示。

水葫芦的根是纤维状的,直径约为 1mm (Hadad et al., 2009);每个纤维根具有许多侧面的根毛,长约 2~3mm,并具有功能活跃的根尖。水葫芦的纤维状根在水中悬浮,可以有效地捕获悬浮碎屑,并促进微生物群落的发育(Yi et al., 2014)和形成活性生物膜。根据营养条件,水葫芦根长度可能从 200mm 到 2000mm 不等(李霞等, 2011b; Rodríguez et al., 2012);单棵水葫芦的根表面积可以从 30 m² 到 60m² 不等(周庆等, 2012)。水葫芦可以在低的营养盐浓度 (NH_4^+ 0.12mg · L⁻¹, NO_3^- 0.16mg · L⁻¹, PO_4^{3-} 0.09mg · L⁻¹) (张志勇等, 2011; 马涛等, 2013) 中生长和在高的氮浓度 160mg · L⁻¹ (李晨光, 2012) 及高磷酸盐浓度 40mg · L⁻¹ (Haller and Sutton, 1973) 的水中快速生长。虽然,水葫芦耐受铵的毒性浓度的上限不清楚,但当水中的铵浓度达到 370mg · L⁻¹ 时,水葫芦开始死亡(秦红杰等, 2015)。

这种根形态变化解释了为什么水葫芦可以在竞争中超过其他水生植物对营养物质的需求,可以在低营养浓度的水域生长良好。这一点很重要,因为人们期望再生水的质量

能满足特定的地表水标准，即使水质标准因国家而异（表 1-1）。

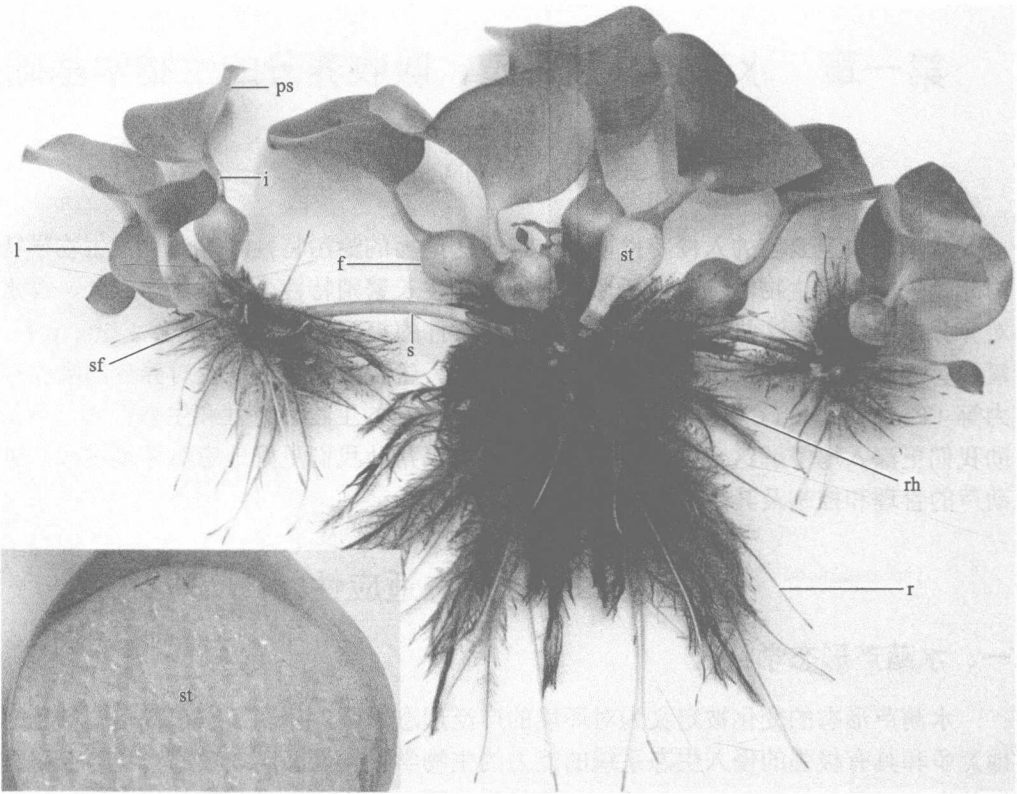


图 1-1 生长在富营养水体中的水葫芦形态（尚林摄，2015）

l: 假叶; sf: 浮柄; s: 匍匐茎; ps: 叶; i: 叶柄; f: 叶柄浮球; rh: 根茎; r: 根; st: 海绵状组织

表 1-1 适用于保护地和再生水源的饮用地表水水质标准（EPA，2007；MEP-PRC，2002；Rodríguez 等，2012）

项目	北美标准 / (mg · L ⁻¹)	中国标准 / (mg · L ⁻¹)	水葫芦处理回收水水质 / (mg · L ⁻¹)
总氮 (N)	≤ 0.90	≤ 1.0	1.0
铵 (N)	不需要	≤ 1.0	0.3
硝态氮 (N)	不需要	≤ 10	0.1
总磷 (P)	≤ 0.076	≤ 0.2	0.1
溶解氧	不需要	≥ 5	6
化学需氧量	不需要	≤ 20	12
叶绿素 a	≤ 0.004	不需要	没测定

注：仅列出营养盐和溶解氧。

表 1-1 中的比较显示，水葫芦处理所回收的水的质量（Rodríguez et al., 2012）与美国国家环境保护局（EPA，2007）和中华人民共和国环境保护部（MEP-PRC，2002）的

标准相似。



图 1-2 成熟水葫芦在富营养水体和高密度种群中生长时的形态变化（尚林摄，2015）

球型浮子变成细长的浮子

在适当条件下，正是水葫芦这种根系的形态和快速生长的特点，使得一公顷完全覆盖的水葫芦每天可以吸收 800 个人在一天内所排放的氮和磷的量（Wooten and Dodd, 1976）。水葫芦根也可以去除可能存在于污水中的重金属，如镉、铅、汞、铊、银、钴和锶，以及有机污染物，包括抗生素（Patel, 2012）。

二、茎叶-根比例

茎叶-根的比例（长度/长度）（表 1-2 中的范围为 7.1~0.4）随水体营养盐浓度的变化而变化，尤其是氮和磷的浓度及氮/磷的比例（Reddy and Tucker, 1983; 李霞等, 2011a）。在平均氮浓度为 $2.1\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和磷浓度为 $1.1\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ （Dellarossa et al., 2001）的条件下，茎叶-根的比例平均为 2.1~3.2。随着可用氮的连续供应大于 $2\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，可用磷大于 $0.3\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，温度在 $25\sim 30^{\circ}\text{C}$ 之间和种群密度大于 $40\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 时，可以获得高的茎叶-根比例。茎叶-根比例是在进行管理决策、设计收获机器以及生物质利用中的重要因素，因为增加茎叶-根的比例与粗蛋白质或碳水化合物含量相关。而根的比例过高，意味着纤