

目 录

引言.....	1
1 沙湖生态现状及水环境状况调查研究.....	2
1.1 沙湖生态现状调查研究.....	2
1.1.1 沙湖维管植物多样性.....	2
1.1.2 沙湖浮游生物多样性.....	6
1.2 2014 年沙湖水环境现状调查研究.....	8
2 沙湖水生植被构建及基于植物的生态净化技术研究.....	10
2.1 宁夏水生植物调查研究.....	10
2.1.1 宁夏本地水生植物物种多样性.....	10
2.1.2 宁夏外来水生植物物种多样性.....	11
2.2 美人蕉、鸢尾、千屈菜和黄菖蒲对富营养化水体净化效果研究.....	13
2.3 水生植物配置清污优化技术的研究.....	16
2.4 人工浮岛技术研究.....	18
2.4.1 人工浮岛设计.....	18
2.4.2 人工浮岛试验.....	20
2.5 水耕植物筛选及水耕植物过滤技术研究.....	22
2.6 水生滤床植物对富营养化水体净化效果研究.....	23
3 基于植被净化的沙湖湿地水体生态净化关键技术集成.....	29
3.1 基于植被净化的沙湖湿地水体生态净化关键技术集成.....	29
3.2 基于植被净化的沙湖湿地水体生态净化关键技术效益评价.....	30
3.2.1 基于植被净化的沙湖湿地水体生态净化关键技术生态效益评价.....	30
3.2.2 基于植被净化的沙湖湿地水体生态净化关键技术生态效益评价.....	30
4 结论.....	31
参考文献.....	32

插图清单

图 2-1 PVC 管和螺杆制作的人工浮岛.....	19
图 2-2 PVC 板和塑料瓶制作的人工浮岛.....	19
图 2-3 泡沫板和塑料花盆制作的人工浮岛.....	20
图 2-4 方形人工浮岛单元体.....	20
图 2-5 圆形人工浮岛单元体.....	20
图 2-6 制作人工浮岛试验.....	21
图 2-7 购置人工浮岛试验.....	22
图 2-8 沙湖实施的人工浮岛及植物发达的根系.....	22
图 2-9 不同植物组合对水体总氮含量的影响.....	23
图 2-10 不同植物组合对水体总磷含量的影响.....	23
图 2-11 三种不同植物培养下富营养化水体 TN 去除率变化.....	24
图 2-12 三种不同植物培养下富营养化水体 TP 去除率变化.....	25
图 2-13 三种不同植物培养下富营养化水体 pH 值变化.....	25
图 2-14 三种不同植物培养下富营养化水体 DO 值变化.....	26
图 2-15 三种不同植物培养下富营养化水体叶绿素 A 含量变化.....	26
图 2-16 三种植物组合培养下富营养化水体 TN 去除率变化.....	27
图 2-17 三种植物组合培养下富营养化水体 TP 去除率变化.....	27
图 2-18 三种植物组合培养下富营养化水体 pH.....	28
图 2-19 三种植物组合培养下富营养化水体 DO 值变化.....	28
图 2-20 三种植物组合培养下富营养化水体叶绿素 A 含量变化.....	28
图 3-1 沙湖湿地水体生态净化关键技术集成图.....	30

附表清单

表 1-1 沙湖浮游植物种类组成.....	6
表 1-2 沙湖浮游植物优势种.....	6
表 1-3 沙湖主要水质指标季节性变动情况表.....	8
表 1-4 沙湖水体营养状态综合评价.....	9
表 1-5 关联度计算结果.....	9
表 1-6 2014 年水质综合评分值 (WPI)	9
表 1-7 沙湖水体富营养状态综合评价结果.....	9
表 2-1 宁夏本地水生植物名录.....	10
表 2-2 宁夏外来水生植物名录.....	11
表 2-3 美人蕉、鸢尾、千屈菜和黄菖蒲对富营养化水体 TN 去除率比较.....	13
表 2-4 美人蕉、鸢尾、千屈菜和黄菖蒲对富营养化水体 TP 去除率比较.....	13
表 2-5 美人蕉、鸢尾、千屈菜和黄菖蒲对富营养化水体 CODMn 值比较.....	14
表 2-6 美人蕉、鸢尾、千屈菜和黄菖蒲对富营养化水体 DO 值比较.....	14
表 2-7 美人蕉、鸢尾、千屈菜和黄菖蒲对富营养化水体叶绿素 A 含量比较.....	15
表 2-8 美人蕉、鸢尾、千屈菜和黄菖蒲对富营养化水体 pH 值比较.....	15
表 2-9 美人蕉对水体 TN 去除率、TP 去除率和 CODMn 相关性分析.....	15
表 2-10 植物组合培养下富营养化水体 TN 去除率比较.....	16
表 2-11 植物组合培养下富营养化水体 TP 去除率比较.....	16
表 2-12 植物组合培养下富营养化水体 CODMn 值比较.....	16
表 2-13 植物组合培养下富营养化水体 DO 值比较.....	17
表 2-14 植物组合培养下富营养化水体叶绿素 A 含量比较.....	17
表 2-15 植物组合培养下富营养化水体 pH 值比较.....	18
表 2-16 美人蕉+鸢尾组合对水体 TN 去除率、TP 去除率和 CODMn 相关性分析.....	18

引言

沙湖位于宁夏回族自治区石嘴山市平罗县西南部，地理坐标为：东经 $106^{\circ}19'6''\sim 106^{\circ}24'10''$ ，北纬 $38^{\circ}45'17''\sim 38^{\circ}49'42''$ ，海拔在 1093~1102 m 之间，是宁夏最大的天然半咸水湖泊。沙湖水域总面积为 3498.39 hm^2 ，其中沙湖元宝湖（大湖）面积为 1348.52 hm^2 ，沙湖南岸沙丘南侧地下水溢出形成 1 个小型湖沼，面积为 159.21 hm^2 ，保护区东部被公路、乡间道路、排水沟、堤岸分隔形成 6 个小型湖沼，统称为湖东湿地，面积为 1990.66 hm^2 。沙湖湿地总容水量 $5800\times 10^4 \text{ m}^3$ ，沙湖湖泊容水量 $3933.68\times 10^4 \text{ m}^3$ ，含盐量 4.3g/L。沙湖是荒漠化区域内典型湿地类型的生态系统和半荒漠化区域内荒漠化生态系统的自然综合体，是荒漠化区域内典型湿地生态系统的天然“本底”和生物物种质资源库、濒危、珍贵、稀有水禽类迁徙的“中转站”，代表荒漠化区域内典型湿地类型的生态系统和半荒漠化区域内荒漠化生态系统的自然特征。沙湖自然景观秀丽独特，风光绮丽宜人，湖水、沙山、芦苇、飞鸟、游鱼有机组合，融江南水乡与大漠风光为一体，已成为我国西部地区著名的风景名胜。1997 年沙湖被列为全国 35 个王牌景点之一，同年，沙湖被列为自治区级自然保护区，1998 年被列为国家级自然风景保护区。在沙湖旅游资源的构成要素中，水域风光是最重要的资源要素，旅游项目主要围绕水域风光而进行。

沙湖地处银川平原的中-北部河湖平原上，地势低洼，坡度平缓，沟渠纵横，土壤沼泽化、浅育化和盐渍化现象普遍。沙湖湖体外形受洼地形状的控制，地势低洼，地下水位埋藏浅，而且沙湖及其周边地带属于地下水停滞带，径流不畅，地下水几乎无法排泄。同时，沙湖水源补给主要来自于引黄渠道补水和少量农业灌溉退水，由于农业生产大量施肥且结构不合理，农田退水中富含大量的氮、磷等营养物质，对沙湖及其流域水体水质、水域生态系统造成威胁。此外，随着沙湖旅游人数逐年增加，各种生活污染物大量排放造成水体污染。由于沙湖补水有限，循环不畅，外源营养物质及污染物的长期积累，导致沙湖水环境容量减小、环境压力增大、富营养程度逐渐加重，生物多样性和生态系统均受到一定程度的干扰，如 1990 年沙湖水水质中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的监测值只有 0.06 mg/L，2014 年增至 0.702 mg/L，增加近 12 倍；总磷 1990 年为 0.152 mg/L，2014 年时为 0.329 mg/L，增加近 2.15 倍。尤其是沙湖 2014 年 7、8、9 月连续出现 V 类水质，2013 年和 2014 年连续出现大范围死鱼现象，引起了社会各界人士的广泛关注。目前，沙湖水水质已经进入中度污染阶段，并且呈现出轻度富营养化向中度富营养化过渡阶段。

湿地生态修复和水体净化是在充分认识湿地生物多样性和地区生态环境的基础上，采用现代水保技术和生态修复技术，实现湿地的有效恢复。目前利用水生植物净化富营养化水体已经在部分景观湿地、湖泊和水库地等得到应用并取得了良好的经济和社会效益。基于这一思路，研发和集成符合沙湖湿地实际情况的基于植被净化的水体生态净化技术，为沙湖提供

水体净化的技术选项,这与自治区生态环境保护发展战略和科技发展优先领域的规划与思路是一致的。因此,开展基于植被净化的沙湖湿地水体生态净化和修复关键技术的研究,对于推进沙湖湿地生态建设,保护生态环境,加快旅游业发展有着十分重要的作用。

本研究积极探索我区湖泊湿地水体生态净化关键技术,保护湖泊湿地生物多样性,保护湿地生态环境,推动我区生态建设发展战略的实施。本研究所取得的成果,为基本解决沙湖湿地水环境逐年恶化的问题提供科学对策,对保护湖泊湿地生态环境和生物多样性以及推动我区生态建设具有重要的意义。

本研究的主要内容如下:

(1) 沙湖生态现状及水体状况调查研究。

沙湖生态现状调查、沙湖水质状况调查、沙湖湿地水生生物调查、沙湖水体富营养化分析与水质评价。

(2) 沙湖水生植被构建及基于植被净化的生态净化技术研究。

宁夏水生植物种类调查、不同水生植物对水质净化效果的研究、水生植物配置清污优化关键技术的研究;沙湖人工浮岛的设计及人工浮岛净化技术的研究;食用或观赏型水生植物的筛选和配置及水耕植物过滤技术研究;用于滤床的水生植物的筛选及水生植物滤床净化效果研究。

(3) 基于植被净化的沙湖湿地水体生态净化关键技术集成与评价。

基于植被净化的沙湖湿地水体生态净化关键技术集成、生态效益评价和经济效益评价。

1 沙湖生态现状及水环境状况调查研究

1.1 沙湖生态现状调查研究

1.1.1 沙湖维管植物多样性

(1) 沙湖植物的物种多样性

沙湖共有野生维管植物 162 种,隶属于 48 科 124 属。在这 162 种野生维管植物中,仅有节节草 (*Equisetum ramosissimum* Desf.) 属于蕨类植物,其余均为种子植物。其中裸子植物 2 科 5 属 6 种,其他 155 种植物则均为被子植物,包括双子叶植物 37 科 96 属 126 种,单子叶植物 8 科 22 属 29 种。相对于宁夏全区植物资源而言,分别占宁夏植物总科数的 36.9%,总属数的 19.2%,总种数的 8.5%。(据《宁夏植物志》第 2 版记载,宁夏现有维管植物 130 科 645 属 1909 种)。

(2) 沙湖植物区系类型

① 种子植物科分布区类型

按照吴征镒对我国种子植物科的划分,沙湖 47 科种子植物可划分为 5 个分布区类型和

2个变型。其中，世界分布科有26科；泛热带分布科有12科，占总科数的57.1%（除世界分布）；温带分布型有9科，占总科数的42.9%。其中泛热带分布型包括泛热带（热带分布）、热带亚洲至热带澳洲洲际连续或间断分布2个分布区类型，以及热带亚洲-热带非洲-热带美洲一个变型。温带分布型包括北温带分布、旧世界温带2个分布区类型，以及北温带和南温带间断分布一个变型。

② 种子植物属分布区类型

按吴征镒对我国种子植物属的分布区类型划分，沙湖123属种子植物可划分为13个类型 and 9个变型。除世界分布的24属外，热带分布及其变型共19属，占总属数的19.2%（不计世界分布）；温带分布及其变型共60属，占总属数的60.6%，其中北温带分布及其变型有37属，东亚和北美洲间断及其变型有8属，旧世界温带及其变型有13属，温带亚洲有2属；地中海区-中亚分布区变型有18属，占总属数的18.2%，其中地中海区、西亚至中亚分布及其变型有12属，中亚分布及其变型有6属；东亚分布有2属，占总属数的2.0%。

（3）沙湖植物群落类型多样性

沙湖因其自然环境的限制，主要以沙生、旱生以及水生植被为主。根据《中国植被》植被分类系统，将沙湖自然保护区植被分为荒漠植被、沼泽和水生植被、阔叶林植被3个植被型组，盐生植被、沙生植被、水生植被和落叶阔叶林4个植被型，以及13个群系，35个群丛。

① 荒漠（植被型组）

盐生植被（植被型）

碱茅群系：碱茅群丛，碱茅+沙芦草+花花柴群丛。

茄叶碱蓬群系：茄叶碱蓬+沙蓬+白茎盐生草群丛，雾冰藜+沙蓬群丛。

柽柳群系：柽柳+花花柴+盐爪爪群丛，柽柳+沙芦草群丛，獐毛群丛，柽柳+獐毛群丛，柽柳+花花柴+芦苇群丛，柽柳+芦苇+沙蓬群丛。

紫穗槐群系：紫穗槐+灰绿藜群丛，紫穗槐+盐爪爪群丛。

花花柴群系：花花柴+苦豆子群丛，芦苇+花花柴群丛，茄叶碱蓬+芦苇群丛，花花柴+雾冰藜+沙蓬群丛，芨芨草群丛。

沙生植被（植被型）

黑沙蒿群系：黑沙蒿+藜子朴群丛，黑沙蒿+沙蓬群丛。

沙芦草群系：沙芦草群丛，沙芦草+芦苇+盐爪爪群丛，沙芦草+苦马豆群丛，蓼子朴群丛，苦豆子+蓼子朴群丛。

白刺群系：白刺群丛，白刺+盐爪爪群丛。

② 沼泽和水生植被（植被型组）

该植被型组在沙湖的植被型为水生植被。

睡莲群系：睡莲群丛。

莲群系：莲+蓴草群丛，水葱群丛。

芦苇群系：芦苇群丛，芦苇+蓴草群丛，香蒲群丛，香蒲+水葱+蓴草群丛。

③ 阔叶林（植被型组）

该植被型组在沙湖自然保护区的植被型为落叶阔叶林植被型。

沙枣群系：沙枣+细枝岩黄芪+怪柳群丛

旱柳群系：旱柳+刺槐+杨树群丛

（4）沙湖植物生活型多样性

生活型是植物对其生态环境长期适应而具有的一定的形态外貌、结构和习性，为生态学中的分类单位。与分类学的单位无关，不同种、甚至不同属科的植物在相同的环境中可能形成同一生活型。用形态、生态学的方法，将沙湖自然保护区的植物生活型类型划分为乔木、灌木与半灌木、多年生草本以及一年生或两年生草本四类。

乔木类的种子植物主要有：青海云杉 *Picea crassifolia* Kom.、樟子松 *Pinus sylvestris* L.、油松 *Pinus tabulaeformis* Carr.、侧柏 *Platycladus arentalis* (L.) Franch .、圆柏 *Sabina chinensis* (L.)Ant.、刺柏 *Juniperus formosana* Hayata.、毛白杨 *Populus tomentosa* Carr.、新疆杨 *Populus bolleana* Lauche .、垂柳 *Salix babylonica* L.、旱柳 *Salix matsudana* Koidz.、榆 *Ulmus pumila*、桑 *Morus alba* L.、红叶李 *Prunus cerasifera* cv. *Pissardii*.、桃 *Prunus persica* (L.)Batsch.、杏 *Prunus armeniaca* L.、槐树 *Sophora japonica* L.、龙爪槐（变种） *var.pendula* Loud.、刺槐 *Robinia pseudocacia* L.、白蜡树 *Fraxinus chinensis* Roxb.、臭椿 *Ailanthus altissima* (Mill.)Swingle.、沙枣 *Elaeagnus angustifolia* L.共 21 种。

灌木与半灌木的有：紫翅猪毛菜 *Salsola passerina* Bunge、尖叶盐爪爪 *Kalidium cuspidatum*、白梭梭 *Haloxylon persicum* Bunge ex Boiss et Buhse、盐爪爪 *Kalidium foliatum* (Pall.)Moq.、珍珠梅 *Sorbaria kirilowii*(Regel) Maxim.、月季 *Rosa chinensis*.、苦豆子 *Sophora*

alopecuroides L.、沙冬青 *Ammopiptanthus mongolicus* (Maxim)Cheng f.、苦马豆 *Swainsonia salsula* (Pall.)Taub.、细枝岩黄芪 *Hedysarum scoparium* Fisch.et Mey.、达乌里胡枝子 *Lespedeza davurica* (Laxm.)Schindl.、小果白刺 *Nitraria sibirica* Pall.、白刺 *Nitraria tangutorun* Bobr.、红砂 *Reaumuria soongorica* (Pall.)Maxim.、怪柳 *Tamarix chinensis* Lour.(*T.juniperina* Bge.)、细穗怪柳 *Tamarix leptostachys* Bge.、短穗怪柳 *Tamarix laxa* Willd.、罗布麻 *Apocynum venetum* L.、华北紫丁香 *Syringa oblata* Lindl.、紫花醉鱼草 *Buddleja 'Lochin'*、白麻 *Poacynum pictum* (Schrenk)Baill.、北京丁香 *Syringa pekinensis* Rupr.、黑沙蒿 *Artemisia ordosica* Krasch.、黑果枸杞 *Lycium ruthenicum* Murr.、金银木 *Lonicera maackii*(Rupr.)Maxim.、红瑞木 *Cornus alba* L.、枸杞 *Lycium chinense* Mill, 共 27 种。

在沙湖地区还分布了多种水生植物, 主要有: 水蓼 *Polygonum sibiricum* Laxm.、莲 *Nelumbo mucifera* Gaertn.、睡莲 *Nymphaea alba*.、金鱼藻 *Ceratophyllaceae demersum* L.、水葫芦苗 *Halerpestes cymbalaria*(Pursh)Green.、长苞香蒲 *Typha angustata* Bory et Chaub.、小香蒲 *Typha minima* Funk.-Hoppe.、蒙古香蒲 *Typha davidiana* Hand.-Mazz.、龙须眼子菜 *Potamogetonaceae pectinatus* L.、泽泻 *Alisma plantago-aqualica* L.、芦苇 *Phragmites australis*.、水莎草 *Juncellus serotinus* (Rottb..) C.B.Clarke.、剑苞蔗草 *Scirpus ehrnbergii* Bochl.、蔗草 *Scirpus triqueter* L.、水葱 *Scirpus tabernaemontani* Gmel.等, 共 15 种。

(5) 沙湖资源植物种类的多样性

资源植物是指具有一定用途的植物, 主要包括药用、食用、材用、芳香油、油料、淀粉、纤维及具有其它用途的植物。资源植物不仅与人类的生活息息相关, 而且在人类生产和历史进程中起着十分重要的作用, 其种类、数量和分布情况是制约区域经济发展的关键因素。

根据资源植物不同的用途, 将沙湖现有的资源植物分为 5 大类: 食用植物资源、饲用植物资源、药用植物资源、工业用植物资源、观赏植物资源。

(6) 保护和改造环境的植物资源

沙湖分布的主要为防风固沙植物和水土保持植物。

防风固沙植物: 沙湖分布的主要有沙冬青、黑沙蒿、梭梭、白梭梭、细枝岩黄芪、小果白刺、沙芥、苦豆子、怪柳、芨芨草、芦苇、紫穗槐、刺柏、红砂等优良的防风固沙植物。

水土保持植物: 主要有芦苇、水莎草等单子叶植物以及达乌里胡枝子、黑沙蒿、白刺等水土保持能力较为突出的植物。

(7) 防污绿化植物

沙湖分布的防污绿化植物不多，主要有臭椿、紫穗槐、沙枣、侧柏、刺槐、垂柳、榆、旱柳等。

1.1.2 沙湖浮游生物多样性

浮游生物不仅在湖泊生态系统的结构组成、物质循环和能量传递过程中均具有重要的作用，而且对水环境的变化十分敏感。水体中浮游生物的数量消长除了与环境因素有关外，与水质污染的程度密切相关，利用浮游生物群落结构生态特征的综合指标可以评价水质及变化趋势。

(1) 浮游植物

沙湖共采到浮游植物 117 个种（仅鉴定到属的按一个种计算，余同），隶属于 8 门 94 属。其中以绿藻门种类最多，44 属 62 种，占总种类数的 49.6%；硅藻门次之，19 属 27 种，占 21.6%；蓝藻门 14 属 20 种，占 16%；裸藻门 5 属 7 种，占 5.6%；金藻门 4 属 4 种，占 3.2%；甲藻门 3 属 3 种，占 2.4%；隐藻门 2 属 2 种，占 1.6%；黄藻门 1 属 1 种，占 0.8%。沙湖各季节浮游植物各门组成比例见表 1-1。

表 1-1 沙湖浮游植物种类组成

时间	项目	合计	绿藻	硅藻	蓝藻	裸藻	金藻	甲藻	隐藻	黄藻
春季	种数	89	45	23	11	7	2	0	0	1
	比例(%)	100	50.6	25.8	12.4	7.9	2.2	0	0	1.1
夏季	种数	79	40	20	16	1	0	1	1	0
	比例(%)	100	50.6	25.3	20.3	1.3	0	1.3	1.3	0
秋季	种数	100	45	26	13	7	4	2	2	1
	比例(%)	100	45	26	13	7	4	2	2	1
冬季	种数	70	32	20	5	6	3	1	2	1
	比例(%)	100	45.7	28.6	7.1	8.6	4.3	1.4	2.9	1.4

沙湖浮游植物在四季中变化很大，秋季种类数最多，冬季最少。在同一季节中绿藻门的种类数最多，其次是硅藻门和蓝藻门。

沙湖浮游植物的优势种主要以蓝藻门的色球藻 (*Chroococcus sp.*)、针状蓝纤维藻 (*Dactylocopsis acicularis*)、针晶蓝纤维藻 (*Dactylocopsis raphidioides*) 和绿藻门的小球藻 (*Chlorella pyrenoidosa*)、衣藻 (*Amydomonas sp.*) 以及硅藻门的尖针杆藻 (*Synedra amphicephala*) 为主 (表 1-2)。

表 1-2 沙湖浮游植物优势种

种类		春季	夏季	秋季	冬季
蓝藻门 Cyanophyta	色球藻 <i>Chroococcus sp.</i>	+	+	+	
	针晶蓝纤维藻 <i>Dactylococopsis raphidioides</i>	+			
	针状蓝纤维藻 <i>Dactylococopsis acicularis</i>	+	+	+	
	弯形尖头藻 <i>Raphidiopsis curvata</i>		+	+	
	小席藻 <i>Phormidium tenue</i>			+	
	水华束丝藻 <i>Aphanizomenon flosaquae</i>		+		
	为首螺旋藻 <i>Spirulina princeps</i>			+	
隐藻门 Cryptophyta	啮蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i>				+
	尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i>				+
金藻门 Chrysophyta	棕鞭藻 <i>Ochromonas sp.</i>				+
硅藻 Bacillariophyta	梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>	+			
	颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>				+
	尖针杆藻 <i>Synedra amphicephala</i>	+	+		+
	连结脆杆藻 <i>Fragilaria construens</i>	+			
	波形羽纹藻 <i>Pinnularia undulata</i>	+			
	美丽星杆藻 <i>Asterionella formosa</i>	+			
绿藻门 Chlorophyta	小球藻 <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	+			+
	镰形纤维藻 <i>Ankistrodesmus falcatus</i>	+			
	膨胀四角藻 <i>Tetraedron tumidulum</i>	+	+		
	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i>				+
	衣藻 <i>Amydomonas sp.</i>	+		+	+

(2) 浮游动物

沙湖共检出后生浮游动物 34 种，其中轮虫 8 科 16 属 23 种，占 67.7%；枝角类 6 科 7 属 8 种，占 23.5%；桡足类 1 科 3 属 3 种，占 8.8%。冬、春、夏、秋四个季节的检出种类分别是 12 种、28 种、15 种、17 种，春季出现的种类最多，冬季最少。常见种类角突臂尾轮虫 (*Brachionus angularis*)、萼花臂尾轮虫 (*B. calyciflorus*)、矩形龟甲轮虫 (*Keratella quadriata*)、曲腿龟甲轮虫 (*K. vaigavalga*)、月形腔轮虫 (*Lecane luna*)、前节晶囊轮虫 (*A. priodonta*)、异尾轮虫 (*Trichocera sp.*)、长肢多肢轮虫 (*Polyarthra trigla*)、长三肢轮虫

(*Filinia longiseta*)、近邻剑水蚤 (*Cyclops vicinus*)、桡足类无节幼体 (*Nauplius*)，前额犀轮虫 (*Rhinoglena frontalis*) 是冬季的优势种，枝角类出现在春、秋季，常见种为直额裸腹溞 (*Moina rectirostris*)。总体来说，沙湖浮游动物出现的种类数不多，以轮虫为主，枝角类和桡足类出现的种类较少，浮游动物个体趋向小型化。

1.2 2014 年沙湖水环境现状调查研究

(1) 沙湖季节性水环境质量变化

① 单因子分析

对沙湖 2014 年的水质进行季节调查结果表明，TN、TP、COD_{Mn}、Chl.a 指标在夏季为全年最高，秋季、春季高于冬季，夏季水体 SD 为全年最小，秋、春季低于冬季。

根据 OECD 关于湖泊富营养化总氮 (TN) 标准 (TN>1.875 mg/L 为富营养)，沙湖水体 TN 含量在各季度未超过 1.875 mg/L，但水体已趋富营养化；根据 OECD 湖泊富营养化总磷 (TP) 标准 (0.03~0.10 mg/L 为富营养，>0.10 mg/L 为超富营养)，沙湖水体 TP 含量各季度均超过 0.10 mg/L，均达富营养化水平；根据 OECD 湖泊富营养化叶绿素 (Chl.a) 标准 (平均浓度大于 8 μg/L)，沙湖水体夏、秋季达到富营养化水平；根据 OECD 湖泊富营养化透明度 (SD) 标准 (平均透明度小于 3m)，沙湖水体全年均达到富营养化水平。

按照中国湖泊 (水库) 富营养化评分与分级标准，对照调查数据，春、夏、秋季沙湖水体营养水平达到富营养化 (表 1-3)。

表 1-3 沙湖主要水质指标季节性变动情况表

季节	Chl.a(μg/L)	TN(mg/L)	TP(mg/L)	COD _{Mn} (mg/L)	SD (m)
春季	7.540±1.142	1.396±0.111	0.206±0.021	8.176±0.273	0.59±0.11
夏季	18.600±3.255	1.852±0.113	0.253±0.022	16.394±1.311	0.37±0.08
秋季	8.780±1.270	1.384±0.167	0.188±0.013	7.081±0.421	0.42±0.09
冬季	5.322±0.869	1.167±0.187	0.150±0.013	5.832±0.121	0.73±0.13

② 综合营养状态指数 (TLI)

依据《湖泊 (水库) 富营养化评价方法及分级技术规定》，采用综合营养状态指数法对沙湖水水质现状进行评价。湖泊水体平均综合营养状态指数季度变化见表 1-4。综合营养状态指数分别在夏季出现最高值，在冬季出现最低值。在调查期间，夏季营养程度最高，各站点的营养状态指数都超过了 60，根据湖泊富营养化状态分级标准 (TLI (Σ) <30，贫营养；30≤TLI (Σ) ≤50，中营养；50<TLI (Σ) ≤60，轻度富营养；60<TLI (Σ) ≤70，中度富营养；TLI (Σ) >70，重度富营养)，属中度富营养；其次是秋、春季，为轻度富营养化；冬季营养水平最低，但即使是冬季，营养状态指数也超过了 50，属于轻度富营养状态。

表 1-4 沙湖水体营养状态综合评价

季节	TLI (TN)	TLI (TP)	TLI (COD _{Mn})	TLI (Chl.a)	TLI (SD)	TLI (Σ)	营养水平
春季	60.18	68.70	57.00	46.94	61.42	57.95	轻度富营养
夏季	64.97	72.04	75.52	56.75	70.47	65.30	中度富营养
秋季	60.04	67.22	53.18	48.59	68.01	60.30	轻度富营养
冬季	57.15	63.55	48.01	43.16	57.29	53.26	轻度富营养

(2) 2014 年沙湖水环境质量综合评价

① 灰关联法评价

沙湖 2014 年水体实测值与各水质级别的关联度见表 1-5，依据最大隶属度原则，沙湖 2014 年水质级别为 IV 类。

表 1-5 关联度计算结果

年度	I	II	III	IV	V	水质级别判定
2014	0.2430	0.3895	0.5024	0.5427	0.5303	IV

② 水质单因子评价与水质综合评分值 (WPI)

沙湖 2014 年 4、5 月份为 IV 类，主要污染物为 F，7、8 月份为 V 类，主要污染物为 COD，其它月份均为 IV 类，主要污染物为 COD，全年综合评价为 IV 类，主要污染物为 COD (表 1-6)。

表 1-6 2014 年水质综合评分值 (WPI)

月份	污染物	单因子浓度 (mg/L)	WPI 值	水质类别	定性评价
4	F	1.69	67.6	IV 类	轻度污染
5	F	1.58	63.2	IV 类	轻度污染
6	COD	37.60	75.2	IV 类	轻度污染
7	COD	40.20	80.4	V 类	中度污染
8	COD	41.80	83.6	V 类	中度污染
9	COD	34.20	68.4	IV 类	轻度污染
10	COD	33.80	67.6	IV 类	轻度污染
平均	COD	33.90	67.8	IV 类	轻度污染

③ 综合营养状态指数评析

沙湖 2014 年平均综合营养状态指数变化情况见表 1-7。沙湖综合营养状态指数为 57.15，达到轻度富营养水平。

表 1-7 沙湖水体富营养状态综合评价结果

年度	$TLI_{(TN)}$	$TLI_{(TP)}$	$TLI_{(COD_{Mn})}$	$TLI_{(chla)}$	$TLI_{(SD)}$	TLI	营养水平
2014	54.49	52.68	58.16	53.92	68.01	57.15	轻度富营养

④ 2014 年沙湖水质评价结论

在分析沙湖水环境因子时空分布特征的基础上,运用主成分分析法研究确定影响沙湖水质的主要因子之后,再对沙湖的水质进行分析评价。对沙湖 2014 年水质评价结果为 IV 类水。沙湖综合营养状态指数均在 57.15, 达到轻度富营养水平。

2 沙湖水生植被构建及基于植物的生态净化技术研究

2.1 宁夏水生植物调查研究

通过对宁夏本地水生植物的调查和外来水生植物的调查,获得了适宜宁夏湿地生长且具有水质净化作用的水生或湿生植物的生物学特性及栽植方法,为开展沙湖湿地水生植被构建奠定了基础。

2.1.1 宁夏本地水生植物物种多样性

通过调查,宁夏水生植物有蕨类植物 1 科 1 种, 双子叶植物 9 科 13 种, 单子叶植物 11 科 40 种(表 2-1)。

表 2-1 宁夏本地水生植物名录

门	纲	科名	种名
蕨类植物		槐叶苹科	槐叶苹 <i>Salvinia natans</i> (L.) All.
被子植物	双子叶植物	蓼科	水蓼 <i>Polygonum hydropiper</i> L.
			红蓼 <i>Polygonum orientale</i> L.
		睡莲科	莲 <i>Nelumbo nucifera</i> Gaertn.
		金鱼藻科	金鱼藻 <i>Ceratophyllum demersum</i> L.
			东北金鱼藻 <i>Ceratophyllum manschuricum</i> (Miki) Kitag.
			五刺金鱼藻 <i>Ceratophyllum oryzetorum</i> Kom.
		千屈菜科	千屈菜 <i>Lythrum salicaria</i> L.
		小二仙草科	狐尾藻 <i>Myriophyllum verticillatum</i> L.
			穗状狐尾藻 <i>Myriophyllum spicatum</i> L.
		杉叶藻科	杉叶藻 <i>Hippuris vulgaris</i> L.
		伞形科	水芹 <i>Oenanthe javanica</i> (Bl.) DC.
	龙胆科	苻菜 <i>Nymphoides peltatum</i> (Gmel.) O. Kuntze	
	狸藻科	狸藻 <i>Utricularia vulgaris</i> L.	
	单子叶植物	香蒲科	长苞香蒲 <i>Typha angustata</i> Bory. et Chaub.
			蒙古香蒲 <i>Typha davidiana</i> Hand.-Mazz.
小香蒲 <i>Typha minima</i> Funck.-Hoppe			
狭叶香蒲 <i>Typha angustifolia</i> L.			
宽叶香蒲 <i>Typha latifolia</i>			

		眼子菜科	浮叶眼子菜 <i>Potamogeton natans</i> L.
			穿叶眼子菜 <i>Potamogeton perfoliatus</i> L.
			菹草 <i>Potamogeton crispus</i> L.
			眼子菜 <i>Potamogeton distinctus</i> A. Benn.
			竹叶眼子菜 <i>Potamogeton malaianus</i> Miq.
			线叶眼子菜 <i>Potamogeton pusillus</i> L.
			光叶眼子菜 <i>Potamogeton lucens</i> L.
		茨藻科	角果藻 <i>Zannichellia palustris</i> L.
			茨藻 <i>Najas marina</i> L.
			小茨藻 <i>Najas minor</i> All.
			草茨藻 <i>Najas graminea</i> Del.
		泽泻科	慈姑 <i>Sagittaria trifolia</i> var. <i>sinensis</i> (Sims.) Makino
			泽泻 <i>Alisma plantago-aquatica</i> Linn.
			草泽泻 <i>Alisma gramineum</i> Gmelin
		花蔺科	花蔺 <i>Butomus umbellatus</i> L.
		禾本科	芦苇 <i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud.
			稗 <i>Echinochloa crusgalli</i> (L.) Beauv.
			茭白 <i>Zizania latifolia</i> (Griseb.) Stapf
			稻 <i>Oryza sativa</i> L.
		莎草科	水葱 <i>Scirpus validus</i> Vahl
			蔗草 <i>Scirpus triqueter</i> L.
			双柱头蔗草 <i>Scirpus distigmaticus</i> (Kukenth.) Tang et Wang
			褐穗莎草 <i>Cyperus fuscus</i> L.
			异型莎草 <i>Cyperus difformis</i> L.
			刚毛槽秆针蔺 <i>Heleocharis valleculosa</i> Ohwi t. <i>setosa</i> Kitag
			扁秆蔗草 <i>Scirpus planiculmis</i> Fr. Schmidt
			剑苞蔗草 <i>Scirpus ehrenbergii</i> Bocklr.
			水莎草 <i>Juncellus serotinus</i> (Rottb.) C. B. Clarke
			荸荠 <i>Heleocharis dulcis</i> (Burm. f.) Trin.
		天南星科	菖蒲 <i>Acorus calamus</i> L.
		紫萍科	紫萍 <i>Spirodela polyrrhiza</i> (L.) Schleid.
浮萍科	浮萍 <i>Lemna minor</i> L.		
灯心草科	细灯心草 <i>Juncus gracillimus</i> (Buch.)Krecz.et Gontsch		
	灯心草 <i>Juncus effusus</i> L.		
	小花灯心草 <i>Juncus articulatus</i> L.		

2.1.2 宁夏外来水生植物物种多样性

宁夏外来水生植物有双子叶植物 15 科 29 种，单子叶植物 13 科 29 种（表 2-2）。

表 2-2 宁夏外来水生植物名录

纲	科名	种名
双子叶植物	蓼科	长鬃蓼 <i>Polygonum longisetum</i> De Br.

		水生酸模 <i>Rumex aquaticus</i> L.
	睡莲科	芡实 <i>Euryale ferox</i>
		萍蓬草 <i>Nuphar pumilum</i>
		白睡莲 <i>Nymphaea alba</i>
	毛茛科	云南毛茛 <i>Ranunculus yunnanensis</i> Franch.
		石龙芮 <i>Ranunculus sceleratus</i> L.
	十字花科	沼生蔊菜 <i>Rorippa islandica</i> (Oed.) Borb.
	芸香科	九里香 <i>Murraya exotica</i> L.
	菱科	菱 <i>Trapa bispinosa</i> Roxb.
	柳叶菜科	沼生柳叶菜 <i>Epilobium palustre</i> L.
		柳叶菜 <i>Epilobium hirsutum</i> L.
		柳兰 <i>Epilobium angustifolium</i> L.
	伞形科	泽芹 <i>Sium suave</i> Walt.
		中华胡天荽 <i>Hydrocotyle chinensis</i> (Dunn) Craib
	旋花科	马蹄金 <i>Dichondra repens</i> Forst.
	报春花科	樱草 <i>Primula sieboldii</i> E. Morren
	唇形科	毛水苏 <i>Stachys baicalensis</i> Fisch. ex Benth
		水苏 <i>Stachys japonica</i> Miq.
	玄参科	藓生马先蒿 <i>Pedicularis muscicola</i> Maxim.
		北水苦苣 <i>Veronica anagallisaquatica</i> L.
		有柄水苦苣 <i>Veronica beccabunga</i> L.
		小婆婆纳 <i>Veronica serpyllifolia</i> L.
	胡椒科	豆瓣绿 <i>Peperomia tetraphylla</i> (Forst. f.) Hook. et Arn.
	菊科	鬼针草 <i>Bidens pilosa</i> L.
		鳢肠 <i>Eclipta prostrata</i> (L.) L.
		旋覆花 <i>Inula japonica</i> Thunb.
		蟛蜞菊 <i>Wedelia chinensis</i> (Osbeck.) Merr.
	三白草科	蕺菜 <i>Houttuynia cordata</i> Thunb
单子叶植物	茨藻科	大茨藻 <i>Najas marina</i> L.
	水麦冬科	水麦冬 <i>Triglochin palustre</i>
		海韭菜 <i>Triglochin maritimum</i>
	泽泻科	野慈姑 <i>Sagittaria trifolia</i>
	禾本科	芦竹 <i>Arundo donax</i>
		凤尾竹 <i>Bambusa multiplex</i> (Lour.) Raeusch. ex Schult. cv. Fernleaf R. A. Young
	水鳖科	水鳖 <i>Blyxa japonica</i>
		黑藻 <i>Hydrilla verticillata</i>
		龙舌草 <i>Ottelia alismoides</i>
		苦草 <i>Vallisneria natans</i>
莎草科	碎米莎草 <i>Cyperus iria</i> L.	
	牛毛毡 <i>Heleocharis yokoscensis</i> (Franch. et Savat.) Tang et Wang	

		萤蔺 <i>Scirpus juncooides</i> Roxb.
		水毛花 <i>Scirpus triangulatus</i> Roxb.
	天南星科	马蹄莲 <i>Zantedeschia aethiopica</i>
		绿萝 <i>Epipremnum aureum</i>
		红掌 <i>Anthurium andraeanu</i>
	雨久花科	凤眼莲 <i>Eichhornia crassipes</i>
		鸭舌草 <i>Monochoria vaginalis</i>
	百合科	万寿竹 <i>Disporum cantoniense</i> (Lour.) Merr.
		文竹 <i>Asparagus setaceus</i>
	石蒜科	水仙 <i>Narcissus tazetta</i> var. <i>chinensis</i> Roem
	鸢尾科	花菖蒲 <i>Iris ensata</i> var. <i>hortensis</i> Makino et Nemoto
		黄花鸢尾 <i>Iris wilsonii</i>
		溪荪 <i>Iris sanguinea</i> Donn ex Horn.
		黄菖蒲 <i>Iris pseudacorus</i>
	美人蕉科	美人蕉 <i>Canna indica</i> L.
黄花美人蕉 <i>Canna indica</i> L. var. <i>flava</i> Roxb.		
芭蕉科	鹤望兰 <i>Strelitzia reginae</i>	

2.2 美人蕉、鸢尾、千屈菜和黄菖蒲对富营养化水体净化效果研究

(1) 美人蕉、鸢尾、千屈菜和黄菖蒲对富营养化水体的净化效果比较

① 总氮去除率

不同处理时期各植物的总氮去除率均显著高于对照，且各植物间均有显著差异 ($P < 0.05$)。各时期氮素去除率均表现为美人蕉>鸢尾 > 黄菖蒲>千屈菜，它们在处理 35 d 时对其水体中总氮去除率分别达到 64.83%，61.52%，52.7%和 49.76%。上述结果表明，美人蕉对水体中氮素的去除效果最好，去除速率也最快，而千屈菜效果最差（表 2-3）。

表 2-3 美人蕉、鸢尾、千屈菜和黄菖蒲对富营养化水体 TN 去除率比较

测定项目	处理时间 (d)	美人蕉	鸢尾	黄菖蒲	千屈菜	CK
TN 去除率 (%)	7	8.87a	4.48b	3.09c	2.06d	1.5e
	14	15.54a	12.08b	11.92b	11.37c	4.5d
	21	37.04a	32.40b	28.20c	24.40d	7.1e
	28	41.27a	40.33b	35.61c	33.29d	20.4e
	35	64.83a	61.52b	52.70c	49.76d	27.60e

② 总磷去除率

不同植物间以及植物与对照间的总磷含量均存在显著差异 ($P < 0.05$)，处理 7d 及以后各处理的总磷去除率表现为美人蕉>鸢尾 > 黄菖蒲>千屈菜>对照。对总磷去除效果最明显的是美人蕉，14 d 的去除率约是 7d 的两倍。处理 35 d 时，美人蕉、鸢尾、黄菖蒲和千屈菜的总磷去除率分别达到 91.38%、90.73%、87.60%和 87.24%（表 2-4）。

表 2-4 美人蕉、鸢尾、千屈菜和黄菖蒲对富营养化水体 TP 去除率比较

测定项目	处理时间 (d)	美人蕉	鸢尾	黄菖蒲	千屈菜	CK
TP 去除率 (%)	7	37.52a	27.04b	24.03c	23.18d	12.90e
	14	62.17a	55.40b	54.65b	41.52c	24.63d
	21	64.79a	59.53b	59.21b	55.20c	28.49d
	28	86.09a	80.67b	76.29c	72.57d	35.09e
	35	91.38a	90.73b	87.60c	87.24d	37.46e

③ COD_{Mn} 去除效果

4种植物对模拟富营养化水体中 COD_{Mn} 的去除效果明显, 并达到显著水平 ($P < 0.05$)。7-28d 时, 美人蕉、鸢尾和黄菖蒲所在的水体中 COD_{Mn} 含量呈逐步下降的趋势, 且始终低于对照; 而千屈菜所在水体中 COD_{Mn} 始终高于对照组。处理 35d 时, 4种植物所在水体中 COD_{Mn} 含量最低, 并且显著低于对照组, 美人蕉、鸢尾、黄菖蒲和千屈菜 COD_{Mn} 含量分别为 9.25 mg/L、10.24 mg/L、11.42 mg/L 和 12.08 mg/L。上述结果表明, 美人蕉去除 COD_{Mn} 效果最好, 鸢尾次之, 千屈菜最低, 且植物间存在显著差异 (表 2-5)。

表 2-5 美人蕉、鸢尾、千屈菜和黄菖蒲对富营养化水体 COD_{Mn} 值比较

测定项目	处理时间 (d)	美人蕉	鸢尾	黄菖蒲	千屈菜	CK
COD _{Mn} (mg/L)	0	18.20ab	18.24ab	18.75a	18.50ab	18.00b
	7	15.25c	15.75c	15.50c	18.92a	17.08b
	14	13.75d	13.58d	16.33c	17.92a	16.92b
	21	11.92d	12.42c	12.50c	17.00a	15.93b
	28	13.43d	13.69c	13.92c	16.80a	15.67b
	35	9.25e	10.24d	11.42c	12.08b	15.00a

④ 溶解氧含量的变化

4种植物在各处理时间的溶解氧含量均显著高于对照组。其中, 美人蕉、鸢尾和黄菖蒲在试验期间对模拟富营养化水体中 DO 含量呈现逐步上升的趋势; 千屈菜在所在水体 DO 含量呈现先增加后降低的趋势。在 35d 时, 美人蕉、鸢尾、黄菖蒲和千屈菜所在水体的 DO 含量分别为 24.60 mg/L、22.4 mg/L、19.40 mg/L 和 12.6 mg/L。因此, 美人蕉对水体中 DO 含量增加效果最显著 (表 2-6)。

表 2-6 美人蕉、鸢尾、千屈菜和黄菖蒲对富营养化水体 DO 值比较

测定项目	处理时间 (d)	美人蕉	鸢尾	黄菖蒲	千屈菜	CK
DO (mg/L)	0	8.80a	8.20b	7.40c	7.40c	8.60ab
	7	12.40a	9.20b	9.00b	7.60c	7.60c
	14	14.40a	13.40b	11.60c	9.20d	6.80e
	21	20.60a	20.80a	17.66b	13.20c	5.40d
	28	22.60a	21.00b	18.60c	13.20d	5.40e
	35	24.60a	22.40b	19.40c	12.60d	5.20e

⑤ 叶绿素 a 含量的变化

随着处理时间的延续,美人蕉、鸢尾和千屈菜所在水体叶绿素 a 含量呈逐渐升高的趋势。处理 35d 时,种植美人蕉的水体的叶绿素 a 含量显著低于其他三种植物所在水体,叶绿素 a 含量为 4.57mg/g,且与对照有显著差异 ($P < 0.05$) (表 2-7)。

表 2-7 美人蕉、鸢尾、千屈菜和黄菖蒲对富营养化水体叶绿素 a 含量比较

测定项目	处理时间 (d)	美人蕉	鸢尾	黄菖蒲	千屈菜	CK
叶绿素 a 含量 (mg/g)	0	0.74c	0.75c	0.78b	0.80a	0.67d
	7	1.17e	1.44d	1.48c	1.88b	2.34a
	14	2.78e	4.02d	5.22c	6.47a	6.20b
	21	3.80e	4.82d	5.04c	8.29a	5.09b
	28	4.32e	5.20d	6.38b	9.01a	5.81c
	35	4.57e	7.73c	8.12b	10.42a	5.99d

⑥ pH 值的变化

4 种植物所在水体中 pH 值下降趋势。处理 35d,种植 4 种植物的水体 pH 在 6.987.17 之间,美人蕉和鸢尾 pH 值显著低于黄菖蒲和千屈菜,且显著低于对照 (表 2-8)。以上结果说明,4 种水生植物对模拟富营养化水体 pH 有较好的调节作用。

表 2-8 美人蕉、鸢尾、千屈菜和黄菖蒲对富营养化水体 pH 值比较

测定项目	处理时间 (d)	美人蕉	鸢尾	黄菖蒲	千屈菜	CK
pH	0	7.88c	7.88c	7.95b	8.05a	7.85c
	7	7.62c	7.73b	7.76b	7.87a	7.63c
	14	7.40b	7.41b	7.50b	7.67a	7.52ab
	21	7.40c	7.47b	7.49b	7.51b	7.65a
	28	7.22c	7.27bc	7.31b	7.36ab	7.44a
	35	6.98c	7.03c	7.14b	7.17b	7.40a

(2) 相关性分析

上述研究结果表明,单种植物美人蕉对富营养化水体的净化效果最好。对美人蕉的 TN 去除率、TP 去除率、CODMn 含量和 DO 含量进行相关性分析。结果表明,单种美人蕉对富营养化水体 TN 去除率与 TP 去除率、DO 含量有很好的正相关性 ($P < 0.01$),分别达到 0.933 和 0.964,与 CODMn 含量有极显著负相关性 ($P < 0.01$); TP 去除率与 CODMn 含量具有极显著负相关性 (-0.771) ($P < 0.01$),与 DO 含量具有正相关性 (0.960); CODMn 含量与 DO 含量具有极显著负相关性 (-0.818) ($P < 0.01$) (表 2-9)。

表 2-9 美人蕉对水体 TN 去除率、TP 去除率和 COD_{Mn} 相关性分析

	TN 去除率	TP 去除率	COD _{Mn}
TP 去除率	0.933**		
COD _{Mn}	-0.921**	-0.771**	
DO	0.964**	0.960**	-0.818**

注: **:0.01 水平上显著相关。

2.3 水生植物配置清污优化技术的研究

(1) 不同植物组合配置对富营养化水体的净化效果比较

① 总氮去除率

随着处理时间的延续,不同植物组合对水体中总氮去除率呈逐渐升高的趋势,且显著高于对照 ($P < 0.05$)。各时期氮素去除率均表现为美人蕉+鸢尾+鸢尾+黄菖蒲 > 美人蕉+黄菖蒲 > 美人蕉+千屈菜 > 鸢尾+千屈菜,在处理 35 d 时对其水体中总氮去除率分别达到 64.08%, 60.49%, 58.68%, 58.21%, 48.71% (表 2-10)。上述结果表明,美人蕉+鸢尾对水中总氮去除效果最佳。

表 2-10 植物组合培养下富营养化水体 TN 去除率比较

测定项目	处理时间 (d)	美人蕉+鸢尾	鸢尾+黄菖蒲	美人蕉+黄菖蒲	美人蕉+千屈菜	鸢尾+千屈菜	CK
TN 去除率/%	7	10.16a	7.23b	7.03c	2.20d	1.79e	1.5f
	14	22.85a	20.87b	16.84c	12.62d	11.32e	4.5f
	21	39.13a	38.65b	35.39c	33.59d	16.15e	7.1f
	28	62.61a	57.76b	56.45b	44.00c	25.35d	20.4e
	35	64.08a	60.49b	58.68c	58.21d	48.71e	27.60f

② 总磷去除率

5 种不同水生植物组合对富营养化水体中总磷的去除率显著高于对照 ($P < 0.05$)。处理 35d 时,美人蕉+鸢尾,鸢尾+黄菖蒲,美人蕉+黄菖蒲,美人蕉+千屈菜和鸢尾+千屈菜总磷去除率分别为 88.44%、87.94%、86.87%、77.91%和 62.67%;其中,美人蕉+鸢尾,鸢尾+黄菖蒲,美人蕉+黄菖蒲总磷去除效果较好,且三种植物组合无明显差异 (表 2-11)。

表 2-11 植物组合培养下富营养化水体 TP 去除率比较

测定项目	处理时间 (d)	美人蕉+鸢尾	鸢尾+黄菖蒲	美人蕉+黄菖蒲	美人蕉+千屈菜	鸢尾+千屈菜	CK
TP 去除率/%	7	39.62a	38.44b	26.69c	24.60d	20.74e	12.90f
	14	57.23a	52.95b	49.87c	44.24d	39.56e	24.63f
	21	72.41a	69.69b	68.39c	68.28c	60.75d	28.49e
	28	85.70a	79.51b	77.00c	76.63d	73.81e	35.09f
	35	88.44a	87.94a	86.87a	77.91a	62.67b	37.46c

③ COD_{Mn} 去除效果

5 种植物组合对富营养化水体中 COD_{Mn} 的去除效果明显,并达到显著水平 ($P < 0.05$)。各植物组合 COD_{Mn} 呈逐渐下降的趋势。第 35d 时,美人蕉+鸢尾、鸢尾+黄菖蒲、美人蕉+黄菖蒲、美人蕉+千屈菜和鸢尾+千屈菜 COD_{Mn} 含量分别为 9.3 mg/L、10.17 mg/L、10.33 mg/L、11.50 mg/L 和 12.83 mg/L。其中,美人蕉+千屈菜去除效果最好 (表 2-12)。

表 2-12 植物组合培养下富营养化水体 COD_{Mn} 值比较

测定项目	处理时间 (d)	美人蕉+鸢尾	鸢尾+黄菖蒲	美人蕉+黄菖蒲	美人蕉+千屈菜	鸢尾+千屈菜	CK
COD _{Mn} (mg/L)	0	18.11ab	18.28ab	18.75a	18.67ab	18.24ab	18.00b
	7	15.84d	16.17cd	16.67b	16.25c	16.67b	17.08a
	14	12.17e	14.33c	13.33d	13.85cd	15.92b	16.92a
	21	12.00c	12.33c	12.83bc	14.25b	14.17b	15.93a
	28	11.50e	12.00d	12.50c	13.67b	13.83b	15.67a
	35	9.3e	10.17d	10.33d	11.50c	12.83b	15.00a

④ 溶解氧含量的变化

美人蕉+鸢尾，鸢尾+黄菖蒲，美人蕉+黄菖蒲和美人蕉+千屈菜 4 种植物组合在各处理时间的溶解氧含量均显著高于对照组 ($P < 0.05$)，呈现逐渐上升的趋势。而鸢尾+千屈菜在处理 35d 时，DO 值下降至 13.00 mg/L (表 2-13)。

表 2-13 植物组合培养下富营养化水体 DO 值比较

测定项目	处理时间 (d)	美人蕉+鸢尾	鸢尾+黄菖蒲	美人蕉+黄菖蒲	美人蕉+千屈菜	鸢尾+千屈菜	CK
DO 含量 (mg/L)	0	8.60a	8.40a	8.40a	7.40b	7.60b	8.60a
	7	12.40a	11.20b	10.81b	7.80c	7.60c	7.60c
	14	18.40a	14.60b	12.20c	8.60d	8.40d	6.80e
	21	16.40a	14.00b	13.80b	11.47c	6.20d	5.40e
	28	19.80a	19.13ab	18.60b	15.80c	14.60d	5.40e
	35	22.00a	20.40b	18.80c	16.20d	13.00e	5.20f

⑤ 叶绿素 a 含量的变化

美人蕉+鸢尾，鸢尾+黄菖蒲，美人蕉+黄菖蒲，美人蕉+千屈菜和鸢尾+千屈菜 5 种植物组合叶绿素 a 含量呈波动趋势，但在处理 35d 时，美人蕉+黄菖蒲，美人蕉+千屈菜和鸢尾+千屈菜组合所在水体叶绿素 a 含量显著高于对照，而美人蕉+鸢尾和鸢尾+黄菖蒲显著低于对照，分别是 3.68mg/g 和 5.11mg/g (表 2-14)。

表 2-14 植物组合培养下富营养化水体叶绿素 a 含量比较

测定项目	处理时间 (d)	美人蕉+鸢尾	鸢尾+黄菖蒲	美人蕉+黄菖蒲	美人蕉+千屈菜	鸢尾+千屈菜	CK
叶绿素 a 含量 (mg/g)	0	0.69d	0.70d	0.71c	0.73b	0.75a	0.67e
	7	1.15f	1.31e	1.93d	2.51b	2.79a	2.34c
	14	3.32f	3.64e	4.40d	5.39c	6.09b	6.20a
	21	2.53f	4.20e	5.39c	6.13b	6.49a	5.08d
	28	3.16f	5.62e	5.83c	7.29b	8.44a	5.81d
	35	3.68f	5.11e	9.92c	10.04b	11.78a	5.99d

⑥ pH 值的变化

5 种植物组合对水体 pH 均有降低的作用。处理 35d，各处理的水体 pH 呈中性，在 6.94~

7.16 之间，显著小于对照（表 2-15）。以上结果说明，5 种水生植物组合对富营养化水体 pH 有较好的调节作用。

表 2-15 植物组合培养下富营养化水体 pH 值比较

测定项目	处理时间 (d)	美人蕉+鸢尾	鸢尾+黄菖蒲	美人蕉+黄菖蒲	美人蕉+千屈菜	鸢尾+千屈菜	CK
pH	0	7.80c	7.81c	7.84b	7.87ab	7.89a	7.85b
	7	7.27d	7.42c	7.66b	7.69ab	7.83a	7.63b
	14	7.39b	7.56a	7.43ab	7.59a	7.57a	7.52ab
	21	7.34c	7.35c	7.35c	7.50b	7.53b	7.65a
	28	7.16d	7.26c	7.28bc	7.37ab	7.39a	7.44a
	35	6.97c	6.96c	6.94c	7.16b	7.12b	7.40a

(2) 相关性分析

上述研究结果表明，植物组合美人蕉+鸢尾对富营养化水体的净化效果最好。对美人蕉+鸢尾组合的 TN 去除率、TP 去除率、COD_{Mn} 含量和 DO 含量进行相关性分析。结果表明，美人蕉+鸢尾组合对富营养化水体 TN 去除率与 TP 去除率、DO 含量有极显著正相关性 ($P < 0.01$)，分别达到 0.985 和 0.853，与 COD_{Mn} 含量有极显著负相关性 (-0.861) ($P < 0.01$)；TP 去除率与 COD_{Mn} 含量具有极显著负相关性 (-0.910) ($P < 0.01$)，与 DO 含量有极显著正相关性 (0.875) ($P < 0.01$)；COD_{Mn} 含量与 DO 含量具有极显著负相关性 (-0.956) ($P < 0.01$) (表 2-16)。

表 2-16 美人蕉+鸢尾组合对水体 TN 去除率、TP 去除率和 COD_{Mn} 相关性分析

	TN 去除率	TP 去除率	COD _{Mn}
TP 去除率	0.985**		
COD _{Mn}	-0.861**	-0.910**	
DO	0.853**	0.875**	-0.956**

注：**：0.01 水平上显著相关。

2.4 人工浮岛技术研究

2.4.1 人工浮岛设计

方案一：PVC 管和螺杆制作的人工浮岛（图 2-1）

材料与方法：PVC 管、PVC 胶、弯头、地漏、锯条、螺杆、螺帽。

步骤：

- (1) 把 PVC 管锯成 1m 长（4 根）；
- (2) 把 PVC 管锯成 0.3m 长（16 根）；
- (3) 准备螺杆、螺帽：把买来的长螺杆锯成一样长；
- (4) 用胶把 1m 长的 PVC 管和弯头连起来；
- (5) 完善并连接中间的部分。

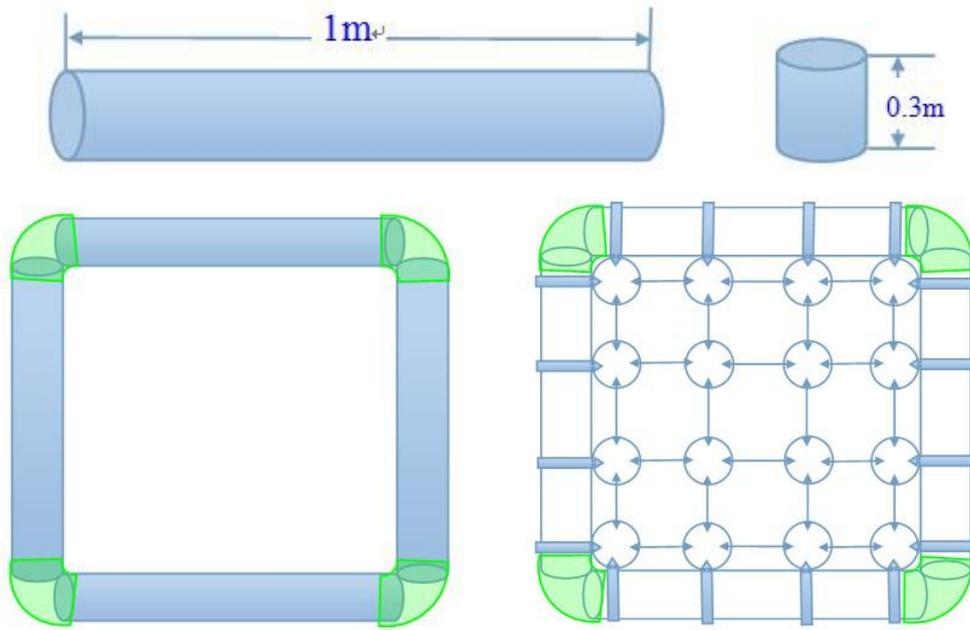


图 2-1 PVC 管和螺杆制作的人工浮岛

方案二：PVC 板和塑料瓶制作的人工浮岛（图 2-2）

材料与方法：1.2m×0.9m 的 PVC 板、空的矿泉水瓶、扎带

步骤：

- (1) 在 PVC 板上适合位置用扎带固定矿泉水瓶（500 mL）；
- (2) 在 PVC 板上适当位置打上孔；
- (3) 取九个 2.5L 的塑料瓶裁去上口；
- (4) 在打的孔处安装上裁好的 2.5L 塑料瓶；
- (5) 把植物种入 2.5L 的塑料瓶制成的的 9 个孔中。

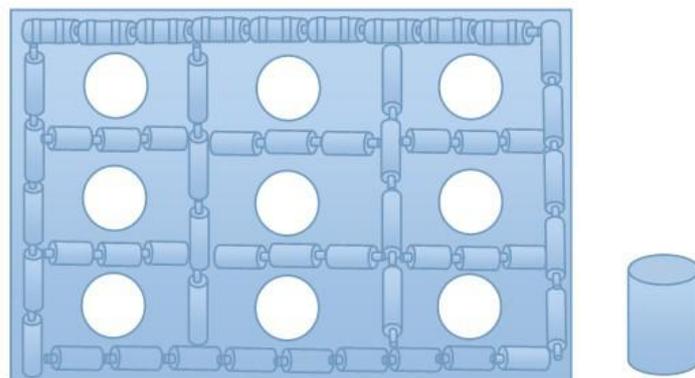


图 2-2 PVC 板和塑料瓶制作的人工浮岛

方案三：泡沫板和塑料花盆制作的人工浮岛（图 2-3）

材料与方法：0.6m×0.4m 的泡沫板、塑料花盆

步骤:

- (1) 在泡沫板上均匀地打六个洞;
- (2) 将塑料花盆固定在洞里, 植株栽种在花盆里。

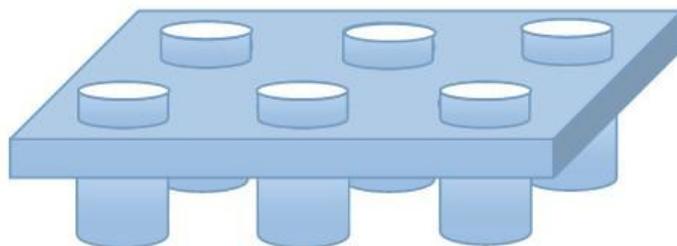


图 2-3 泡沫板和塑料花盆制作的人工浮岛

方案四: 购置的商品化的人工浮岛

根据沙湖人工浮岛技术研究的需要, 从市场上采购了 2 种类型的人工浮岛, 分别为方形 (30cm×30cm) 和圆形 (直径 30cm) 的浮岛 (图 2-4~图 2-5)。



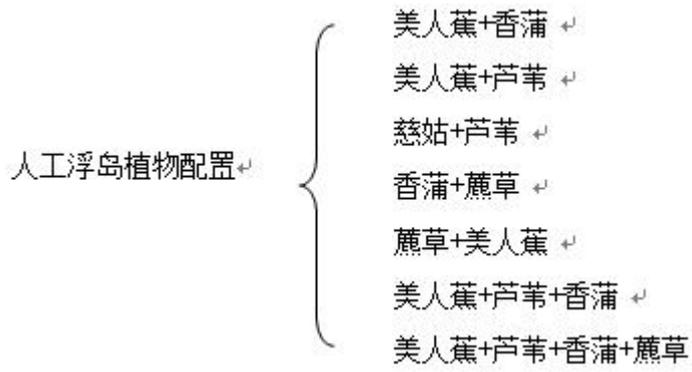
图 2-4 方形人工浮岛单元体



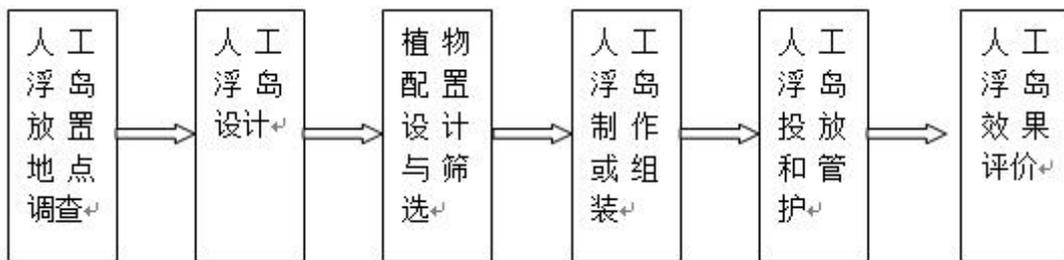
图 2-5 圆形人工浮岛单元体

2.4.2 人工浮岛试验

(1) 植物组合方式



(2) 人工浮岛技术程序



(3) 人工浮岛在沙湖的试验

在沙湖开展了人工浮岛试验（图 2-6~图 2-8）。



图 2-6 制作人工浮岛试验



图 2-7 购置人工浮岛试验

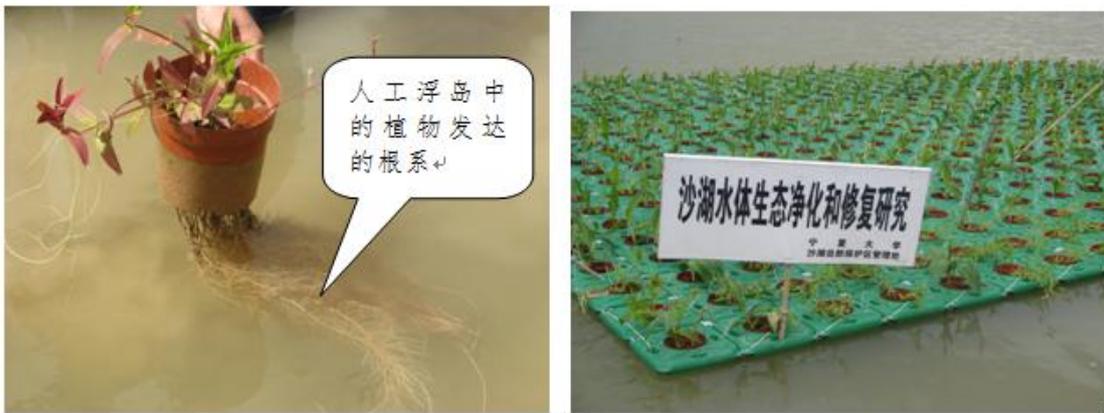


图 2-8 沙湖实施的人工浮岛及植物发达的根系

2.5 水耕植物筛选及水耕植物过滤技术研究

根据水耕植物生物学的特性、耐污性、对氮和磷的吸收去除能力，选取了适合沙湖气候、有较好去污净化能力的 3 种水生植物，分别为：豆苗、空心菜和慈姑，另考虑沙湖属于旅游景区，另选用两种花卉植物红酒白掌与荷叶竹进行组合。

组合方案 1：豆苗+空心菜+慈姑

组合方案 2：豆苗+红酒白掌+慈姑

组合方案 3：荷叶竹+空心菜+慈姑

选取长势良好、大小均匀的植株作为试验对象。试验采用 Hoagland, S 基本培养液模拟 N、P 的富营养化水质，扩大 5 倍进行处理。试验水体除 N、P 元素外，其它营养元素按照霍格兰培养液设置。并每隔十天取水样进行测定，测定指标有总氮（TN）、总磷（TP）与 COD 的含量变化。

实验结果表明，三种组合的水生植物滤床都能较好的吸收富营养水体中的总氮和总磷，随着植物生长越来越好，根系不断发展，不断吸收水质中的总磷、总氮。综合分析认为，荷叶竹+空心菜+慈姑组合吸收富营养水体中总氮、总磷的效果较好（图 2-9，图 2-10）。

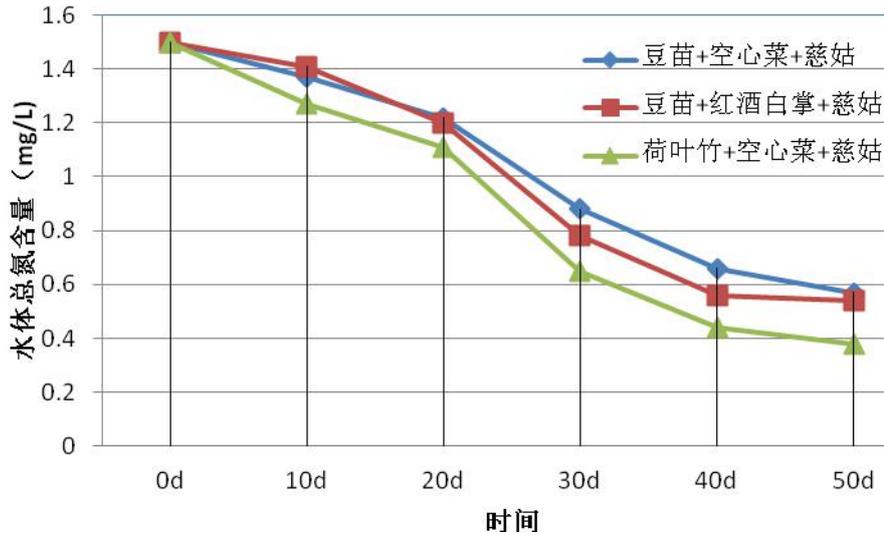


图 2-9 不同植物组合对水体总氮含量的影响

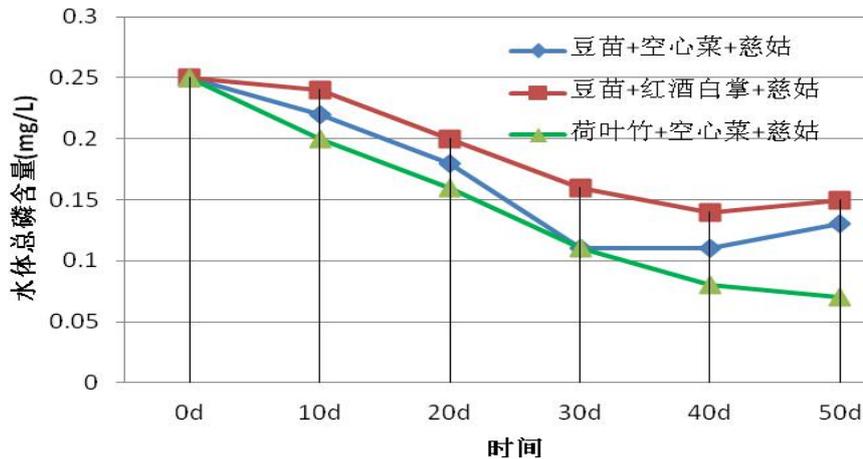


图 2-10 不同植物组合对水体总磷含量的影响

2.6 水生滤床植物对富营养化水体净化效果研究

选择观赏价值和经济价值较高的春羽、红掌和富贵竹作为供试材料。

春羽 (*Philodendron selloum* Koch), 天南星科, 喜林芋属, 多年生常绿草本观叶植物。株高可及 1 m, 茎粗壮直立, 茎上有明显叶痕及电线状的气根, 茎短, 叶柄坚挺且细长, 叶片呈粗大的羽状深裂, 浓绿有光泽, 为簇生型, 着生于茎端, 长达 60 cm, 宽 40 cm, 革质, 茎为直立性, 呈木质化, 生有很多气生根; 喜高温多湿环境, 耐阴暗, 喜肥沃, 微酸环境, 生长适温 18~25 °C, 冬季能耐 2 °C 低温。

红掌 (*Anthurium andraeanum*), 天南星科, 花烛属, 多年生常绿草本。半肉质须根系, 具气生根, 茎短, 近无茎, 花朵独特, 佛焰花序, 色泽鲜艳华丽, 叶形苞片; 喜暖畏寒, 喜

湿怕旱，喜阴忌晒，能忍受的最高温为 35℃，可忍受的低温为 14℃。

富贵竹 (*Dracaena sanderiana*)，龙舌兰科，万寿竹属，多年生常绿草本，茎秆直立、粗壮，叶长披针形，叶片浓绿，茎叶肥厚；喜阴湿高温，耐涝，耐肥力强，适宜生长温度为 20℃~28℃，可耐 2℃~3℃，冬季需防霜冻。

(1) 单种植物对富营养化水体的净化效果

① 春羽、红掌和富贵竹分别对富营养化水体 TN、TP 的去除效果

春羽、红掌、富贵竹在富营养化水体中生长良好，三种植物 TN 去除率均表现为上升趋势，在处理 35 d TN 去除率分别达到 61.71%，59.66%，63.05% (图 2-11)。图中，0 天的去除率是指将洗净的植物最初放入水体测定的值，前期 TN 去除率相对低，可能是前期植物还处于苗期，到 35d 时其进入了营养生长，所以测定的值达到最大值，在第 28 天去除率低于 21 和 35d，可能是 pH 降低，铵盐转化为 NH_3 释放到空气中的量少了。三种植物对 TP 有去除效果，但是贡献不大，春羽在 0 d 到 28 d 之间，TP 去除率逐渐上升，春羽和红掌在第 28 d TP 去除率达到最大值，分别是 47.34%，48.11%，富贵竹在第 21 d TP 去除率达到最大值为 42.04%，第 35 天水体中 TP 去除率下降的原因可能与模拟富营养化水体中营养物质被消耗有关 (图 2-12)。

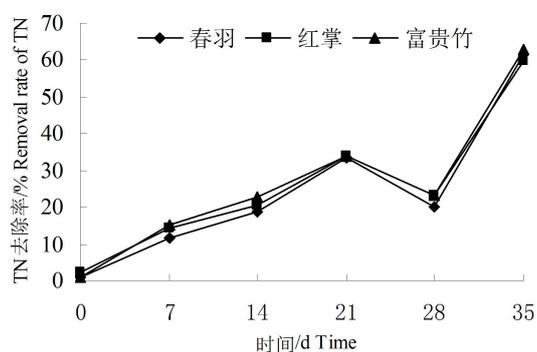


图 2-11 三种不同植物培养下富营养化水体 TN 去除率变化

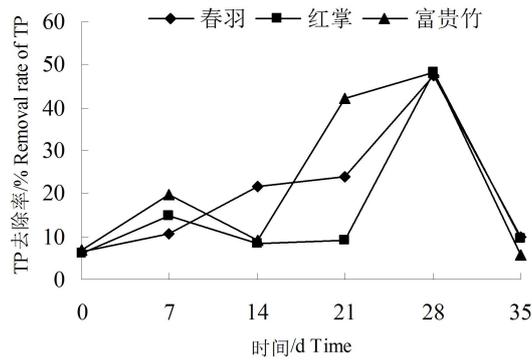


图 2-12 三种不同植物培养下富营养化水体 TP 去除率变化

②春羽、红掌和富贵竹分别对富营养化对水体 pH、DO、叶绿素 a 的影响

春羽、红掌、富贵竹在富营养化水体的生长过程中 pH 值变化范围小，多呈中性或者弱碱性，富贵竹较春羽和红掌略低（图 2-13）；红掌 DO 值比春羽和富贵竹高，呈现先下降后上升，在第 14 d 到第 28 d 明显高于其他处理天数，在第 35 d 急剧下降，可能是由于根系小的原因，在第 28 d 达到最大值 28.80 mg/L，春羽和富贵竹 DO 变化趋势几近相同（图 2-14）；三种植物对叶绿素 a 均有较好的去除效果，春羽和红掌的叶绿素 a 值相对于富贵竹略低，富贵竹的叶绿素 a 值在第 14 d 达到最大值 0.696 mg/L（图 2-15）。总体来说，春羽对于叶绿素 a 的去除效果比较好。

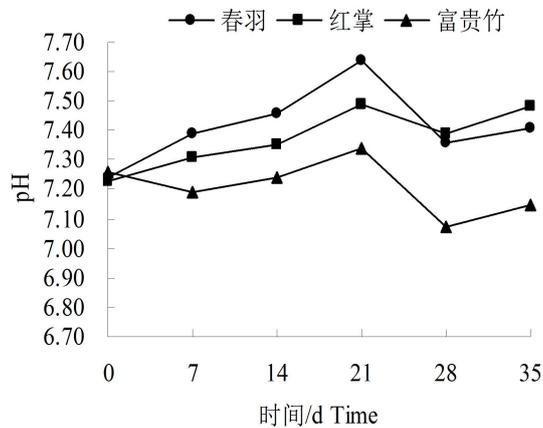


图 2-13 三种不同植物培养下富营养化水体 pH 值变化

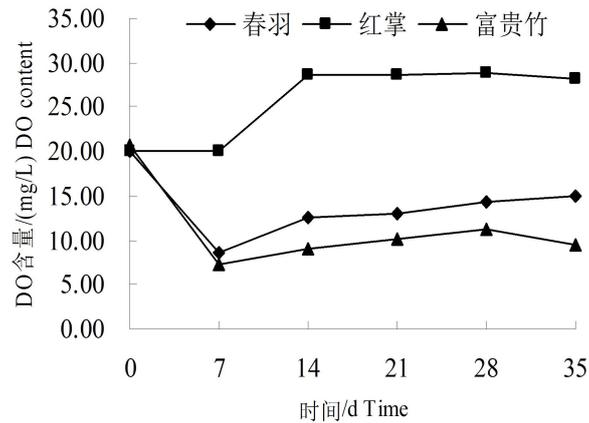


图 2-14 三种不同植物培养下富营养化水体 DO 值变化

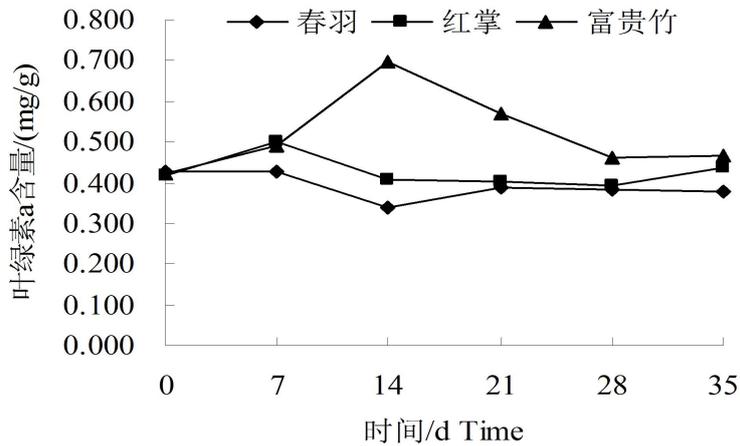


图 2-15 三种不同植物培养下富营养化水体叶绿素 a 含量变化

(2) 不同花卉植物组合对富营养化水体的净化效果

① 对富营养化水体氮磷素的去除效果

富贵竹+红掌，富贵竹+春羽，春羽+红掌三种植物组合在整个生长过程中对 TN 都有吸收作用，去除率趋势相近，总体是逐渐增加的过程，最大 TN 去除率分别为 63.33%、62.37% 和 61.18%（图 2-16）。三种植物组合对 TP 去除效果显著，在第 14 d 和第 21 d 三种植物组合 TP 去除率相对较高，富贵竹+红掌、富贵竹+春羽和春羽+红掌最高时分别达到 60.13%、41.31%和 51.93%，其中有红掌的组合比没有红掌的组合对富营养化水体 TP 去除效果好（图 2-17）。

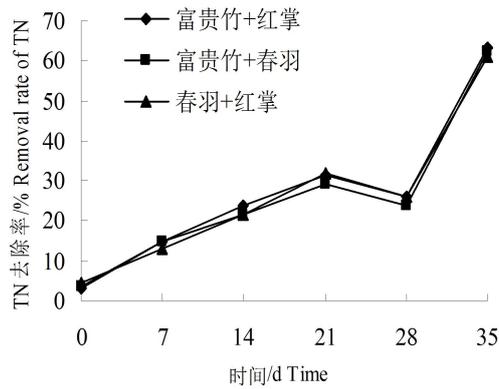


图 2-16 三种植物组合培养下富营养化水体 TN 去除率变化

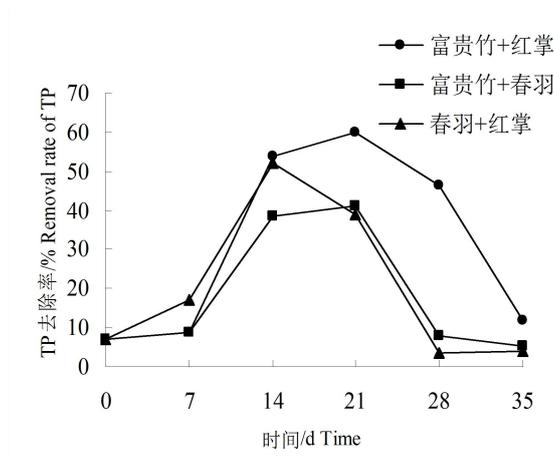


图 2-17 三种植物组合培养下富营养化水体 TP 去除率变化

② 对富营养化水体 pH、DO、叶绿素 a 的影响

富贵竹+红掌、富贵竹+春羽和春羽+红掌在富营养化水体生长过程中 pH 值多为中性，其中 pH 值表现为富贵竹+春羽<富贵竹+红掌<春羽+红掌，这与单种植物培养时 pH 变化相符合（图 2-18）；有红掌的组合 DO 变化趋势相近，其中富贵竹+春羽在第 35 d 达到最大值 10.13 mg/L，春羽+红掌和富贵竹+红掌分别于第 14 d 达到最大值，分别为 14.00 mg/L 和 13.47 mg/L（图 2-19）；三种植物组合的叶绿素 a 变化趋势相近，在第 14 d 有富贵竹的组合叶绿素 a 爆发，其中富贵竹+红掌为 0.644 mg/L，富贵竹+春羽为 0.554 mg/L，这与单种富贵竹在第 14 d 较高相一致（图 2-20）。

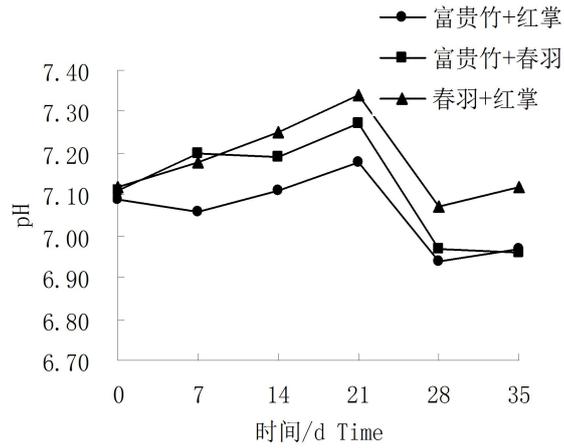


图 2-18 三种植物组合培养下富营养化水体 pH

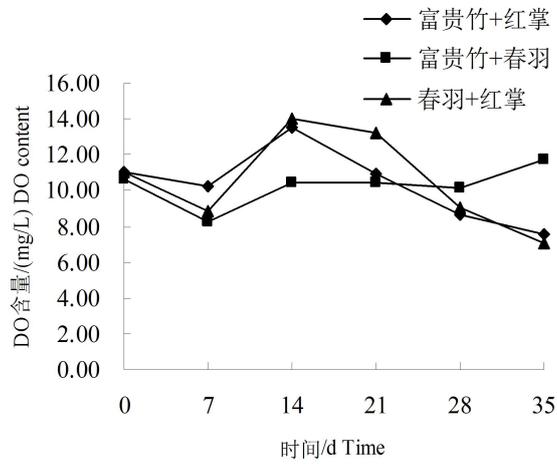


图 2-19 三种植物组合培养下富营养化水体 DO 值变化

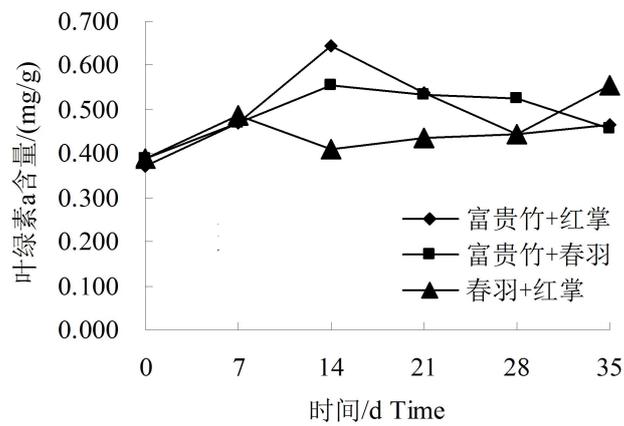


图 2-20 三种植物组合培养下富营养化水体叶绿素 a 含量变化

一般认为，富营养化水体中氮的去除主要依靠植物的直接吸收和微生物的氨化、硝化、

反硝化等作用完成，而总磷去除主要依赖水体、植物和微生物三者之间的联合作用，通过一系列复杂的物理、化学以及生物途径实现磷素去除的目的。本研究结果表明，春羽、红掌、富贵竹在富营养化水体中生长良好，3种植物对富营养化水体中总氮和总磷均具有良好的去除效果，证明3种花卉植物具有净化富营养化水体的重要作用，而且随着处理时间的延长，三种植物总氮去除率逐渐增加，在处理35d时总氮去除率分别达到61.71%、59.66%和63.05%；春羽、红掌和富贵竹总磷去除率分别为47.34%、48.11%和42.04%。分析认为，一方面春羽、红掌和富贵竹均具有发达的根系和通气组织，根系吸收水体中的氮、磷等营养物质，致使水体氮、磷含量下降；另一方面，3种植物除了生长过程中吸收氮、磷营养物质之外，可能还与植物共生细菌及水体微生物代谢有关，但还需进一步试验证实。此外，3种植物均能提高水中DO值，其中红掌和春羽对水体DO值升高贡献较大的原因可能是其具有气生根，而且通气组织发达，可将大量氧气输送至其根部，使水体含氧量增加。

已有研究表明，多种植物组合比单种植物能更好地对水体进行净化，因为每种水生植物各有其特点，对净化对象产生净化优势，水生植物的生态组合能使它们互相取长补短，保持较为稳定的净化效果。本研究表明，富贵竹+红掌、富贵竹+春羽、春羽+红掌三种植物组合对富营养化水体的总氮去除率相近，而富贵竹+红掌组合的总磷去除率较高。分析认为这可能是由于不同花卉植物对氮、磷吸收性能不同，而且不同的植物组合更容易形成较复杂的微生态环境，使不同植物、微生物和水体形成较稳定的微生态系统，抑制了水体氮、磷含量的过度积累，从而达到水体的净化。因此，多种植物组合比单种植物能更好地净化水质，具有更合理的物种多样性，更容易保持生态系统的长期稳定性，也有利于植物之间取长补短，保持较为稳定的净化效果。

本研究旨在观察水生花卉植物对模拟富营养化水体的适应和净化能力，以便筛选出既有景观作用又有净化作用的水生植物。总体上看，3种植物对富营养化水体均具有良好的适应性，可应用于湖泊等富营养化水体的水质净化，在获得环境效益的同时，又得到了经济效益。此外，由于不同花卉植物对富营养化水体净化效果的差异，可以根据水体的富营养化程度选择不同的植物搭配而增加富营养化水体净化效果。但由于本实验在6月到10月进行，正是植物生长旺盛季节，所以所测得的水体中各指标的去除率相对较高，而水生花卉植物长期对富营养化水体的水质净化效果还有待进一步研究。

3 基于植被净化的沙湖湿地水体生态净化关键技术集成

3.1 基于植被净化的沙湖湿地水体生态净化关键技术集成

将基于植被净化的人工浮岛、水耕植物过滤和水生植物滤床技术进行集成，初步形成了基于植被净化的沙湖湿地水体生态净化关键技术（图3-1）。

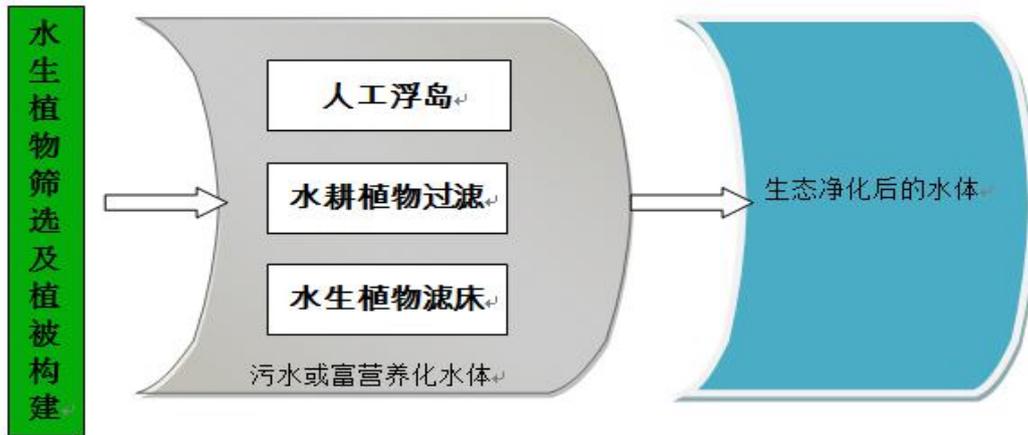


图 3-1 沙湖湿地水体生态净化关键技术集成图

3.2 基于植被净化的沙湖湿地水体生态净化关键技术效益评价

3.2.1 基于植被净化的沙湖湿地水体生态净化关键技术生态效益评价

(1) 净化水质，降解污染。

由于旅游、养殖、底泥及部分水源的问题，沙湖水体含有较高的有机污染物，污染物质经湖中水生植物及其它生物的吸收、转化或处理，变成无毒物质或各种营养物质，进入生态系统的物质循环，起到净化湖水水质作用。

(2) 保持水土，涵养水源。

通过利用基于植被净化的沙湖湿地水体生态净化关键技术，使沙湖植被面积扩大，充分发挥植被具有水土保持和涵养水源的功能，为沙湖生态系统的健康稳定提供保障。

(3) 维护生物多样性。

湖泊湿地具有各生态系统最丰富的生物多样性，基于植被净化的沙湖湿地水体生态净化关键技术，对保护和改善了野生动植物赖以生存的栖息地，对扩大野生动植物种群数量，增加植物群落结构的多样性，使生态系统更加完整，生物多样性更加丰富具有非常重要的意义。

(4) 调节气候，防风减灾。

通过该技术的应用，可增加沙湖植被的覆盖度，植被经过蒸腾作用，增加了空气湿度，有利于农作物种植、生长，同时可减轻干旱、风沙等自然灾害的侵袭和危害，对改善局域环境，净化空气都有良好的作用。

3.2.2 基于植被净化的沙湖湿地水体生态净化关键技术生态效益评价

(1) 促进区域经济发展

通过利用基于植被净化的沙湖湿地水体生态净化关键技术的利用，加强了对沙湖生态系统的保护，防止了现有珍稀动植物资源的减少，净化了水质，改善了生态环境，保障了社区经济的可持续发展，由此帮助产生的经济效益是十分巨大的，尤其是沙湖适度发展生态旅游

和多种经营,为沙湖和周边区域提供了大量的就业机会,进一步调整和优化了经济发展结构,有利于群众生活水平的提高,有利于区域经济的良性发展。

(2) 生态旅游效益

沙湖生态旅游已成为全国旅游的王牌景区,2014年游客人数已突破115万人次。生态旅游带动了餐饮、住宿、交通、通讯、购物等相关产业,直接和间接经济效益非常显著。通过利用基于植被净化的沙湖湿地水体生态净化关键技术,尤其是人工生态浮岛技术,不仅对沙湖水环境改善具有重要的生态效益,而且由于其本身是一种非常好的景观,因此对促进形成新的沙湖美景,扩大沙湖水色风景的影响力具有重要的意义,将会产生更大的生态旅游经济效益。

4 结论

(1) 通过对沙湖湿地生态环境的调查和水质检测,表明2014年沙湖水质为IV类,轻度富营养化。

(2) 宁夏乡土水生植物21科54种,外来水生植物有28科58种,筛选出了适合沙湖水体净化的植物,完成水生植被构建模式的研究,获得了不同植物组合对富营养化水体净化的研究并获得了植物组合,为宁夏水生植物的研究和开发利用提供了参考资料。

(3) 通过水生植被构建技术、人工生态浮岛技术及水耕植物技术等研究,初步形成了基于植被净化的沙湖湿地水体生态净化关键技术。

(4) 沙湖湿地是宁夏内陆干旱地区的典型荒漠和湿地结合类型,也是温带草原向荒漠过度的典型湿地生态系统,是荒漠化区域内典型湿地生态系统的天然“本底”和生物种质资源库、濒危、珍贵、稀有水禽类的“中转站”,代表着温带草原向荒漠过度的典型湿地生态系统的自然特征,此外沙湖也是宁夏著名的风景名胜旅游区。保护沙湖生态环境,遏制沙湖水质的逐步恶化趋势是沙湖湿地生态保护的必然要求,是实现沙湖可持续发展的必然选择,也是推动宁夏生态文明建设的重要途径。本研究成果符合沙湖生态保护与可持续发展战略规划和沙湖生态建设的实际情况,所形成的关键技术为相关部门改善沙湖水质的决策提供了重要的技术选项,为我区湖泊湿地水体生态修复提出了一种思路,其推广应用的前景十分广阔。

参考文献

- [1] 吴诗杰,杨佳,王淑萍,景建强,卢朋,陈惠娟,梁文裕.春羽、红掌和富贵竹对富营养化水体净化效果分析.西北农业学报,2015,24(3):150-156
- [2] 吴诗杰,陈慧娟,许小桃,马小丽,杨佳,王淑萍,梁文裕.美人蕉、鸢尾、千屈菜和黄菖蒲对富营养化水体净化效果研究.安徽大学学报(自然科学版),2016,24(1):22-28
- [3] 陈永华,吴晓芙.人工湿地植物配置与管理.北京:中国林业出版社,2012.
- [4] 傅立国.中国植物红皮书---稀有濒危植物(第一册).北京:科学出版社,1992.
- [5] 高正中,戴法和.宁夏植被.银川:宁夏人民出版社,1998.
- [6] 何志辉.水生生态学.北京:高等教育出版社,1999,191-221.
- [7] 环境保护部办公厅.湖泊生态环境保护实施方案编指南(试行).2014.
- [8] 金湘灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范.北京:中国环境科学出版社,1990.
- [9] 路安民.种子植物科属地理.北京:科学出版社,1999.
- [10] 罗燕珠,璩向宁.宁夏沙湖历年水质变化趋势分析.水土保持通报,2011,(5):31-34.
- [11] 刘慧兰主编.宁夏野生经济植物.银川:宁夏人民出版社,1991.
- [12] 马德滋,刘慧兰,胡福秀.宁夏植物志(第二版).银川:宁夏人民出版社,2007(上、下卷).
- [13] 马克星,吴海卿,朱东海.生物浮床技术研究进展评述.环境整治,2011,(2):60-64.
- [14] 潘峰,付强,梁川.模糊综合评价在水环境质量综合评价中的应用研究.环境工程,2002,20(2):58-60.
- [15] 秦伯强.湖泊生态恢复的基本原理与实现.生态学报.2007,27(11):4848-4858.
- [16] 孙胜民,何彤慧,楼晓钦,等.银川湖泊湿地水生态恢复及综合管理.北京:海洋出版社.2012
- [17] 王家楫.中国轮虫志.北京:科学出版社,1961.
- [18] 吴征镒.《世界种子植物科的分布区类型系统》的修定.云南植物研究.2003,25(5):535-538.
- [19] 吴征镒.中国种子植物区系地理.北京:科学出版社,2011.
- [20] 吴征镒.中国种子植物属的分布区类型.云南植物研究,1991,增刊IV:1-139.
- [21] 章宗涉,黄祥飞.淡水浮游生物研究方法.北京:科学出版社,1991.
- [22] 中国环境监测总站.湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定.国家环境保护总局,2001.
- [23] 中华人民共和国环境保护部.地表水环境质量标准.GB3838-2002.2002-06-01.2002
- [24] 中华人民共和国环境保护部.地表水和污水监测技术规范.HJ/T91-2002.2003-01-01.2002.