

## 常绿水生植物冬季对富营养化水体净化效果研究

居萍<sup>1</sup>, 徐顺飞<sup>1</sup>, 李良俊<sup>2</sup>, 卢燕<sup>1</sup>, 宋天赐<sup>1</sup> (1.扬州市职业大学, 江苏扬州 225002; 2.扬州大学, 江苏扬州 225009)

**摘要** 选用香菇草和石菖蒲 2 种常绿水生植物单独种植和混合种植, 研究它们在冬季对富营养化水体的净化效果。结果表明, 香菇草单独种植对水体净化效果较好, 其鲜重增加了 6.10 倍, 水体浊度下降 70.5%, 对水体中 TN、TP 去除率分别为 87.8%、78.8%, 底泥中 TN 含量减少了 69.5%, 底泥中 TP 含量增加了 0.53%; 香菇草和石菖蒲混合种植效果其次, 其鲜重增加了 4.43 倍, 水体浊度下降 55.8%, 对水体中 TN、TP 去除率分别为 82.7%、79.2%, 底泥中 TN 含量减少了 47.0%, 底泥中 TP 含量下降了 0.67%; 而石菖蒲单独种植其鲜重只增加了 1.02 倍, 水体浊度下降 49.9%, 对水体中 TN、TP 去除率分别为 70.0%、67.0%, 底泥中 TN 含量减少了 37.4%, 底泥中 TP 含量下降了 1.40%。综合考虑净化效果和景观美学性, 香菇草和石菖蒲混合种植是冬季适宜的水生植物选择。

**关键词** 常绿水生植物; 冬季; 富营养化水体; 净化

中图分类号 X52 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)18-0068-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.18.017



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Study on the Purification Effect of Evergreen Aquatic Plants on Eutrophic Water in Winter

JU Ping<sup>1</sup>, XU Shun-fei<sup>1</sup>, LI Liang-jun<sup>2</sup> et al (1. Yangzhou Vocational College, Yangzhou, Jiangsu 225002; 2. Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009)

**Abstract** Two evergreen aquatic plants of *Hydrocotyle vulgaris* and *Acorus tatarinowii* were planted alone and mixed to study the effect of their purification on eutrophic water in winter. The results showed that *Hydrocotyle vulgaris* planting alone for purification effect was better, the fresh weight increased 6.10 times, the turbidity decreased 70.5%, the removal rate of TN and TP in water was 87.8%, 78.8%, respectively, TN content in the sediment decreased by 69.5%, TP content in the sediment increased by 0.53%. *Hydrocotyle vulgaris* and *Acorus tatarinowii* mixing effect secondly, its fresh weight increased 4.43 times, the turbidity decreased 55.8%, the removal rate of TN and TP in water was 82.7%, 79.2%, respectively, TN content in the sediment decreased by 47.0%, TP content in the sediment decreased by 0.67%. *Acorus tatarinowii* planting alone for purification effect following: the fresh weight only increased 1.02 times, the turbidity decreased 49.9%, the removal rate of TN and TP in water was 70.0%, 67.0%, respectively, TN content in the sediment decreased by 37.4%, TP content in the sediment decreased by 1.40%. Considering the effect of purification and landscape aesthetics, the mixed planting of *Hydrocotyle vulgaris* and *Acorus tatarinowii* was a suitable choice for aquatic plants in winter.

**Key words** Evergreen aquatic plant; Winter; Eutrophic water; Purification

氮磷超标引起的水体富营养化是目前普遍面临的问题<sup>[1]</sup>, 水生植物对于水体中氮、磷的富集有明显的效果<sup>[2]</sup>。近年来, 利用水生植物和陆生植物浮床等植物修复技术治理富营养化水体已取得一定效果<sup>[3]</sup>。但已有的研究多为冬季枯死或休眠植物, 而且多为单一种植, 常绿植物单一种植以及常绿植物组合种植对冬季富营养化水体净化的研究较少, 至今鲜见研究某一植物单独种植和其他植物混合种植净化效果的比较<sup>[4-7]</sup>。该研究选用冬季常绿型水生植物分别单独种植和混合种植, 比较分析其对富营养化水体的净化效果, 以期为解决植物修复水体的周年循环问题和满足湿地植物景观冬季观赏提供一定参考。

## 1 材料与方法

**1.1 试验材料** 选用香菇草(*Hydrocotyle vulgaris*)和石菖蒲(*Acorus tatarinowii*) 2 种常绿水生植物。试验材料洗净根系后在自来水中驯化 7 d, 栽培用水和底泥取自扬州市职业大学校园池塘中。

## 1.2 试验方法

**1.2.1 试验设计。** 试验于 2020 年 10 月 26 日—11 月 30 日在扬州市职业大学园林园艺生态实训基地自然条件下进行,

但对试验场地进行了避雨处理。

试验设 4 组(3 个处理, 1 个对照), 处理 1(T<sub>1</sub>)为香菇草单独种植, 处理 2(T<sub>2</sub>)为石菖蒲单独种植, 处理 3(T<sub>3</sub>)为香菇草+石菖蒲组合种植, 以不栽植植物的底泥和水样为对照组。将驯化好的植物用蒸馏水洗净并用吸水纸吸干水分后称重, 其中 T<sub>1</sub> 称重香菇草 60 g, T<sub>2</sub> 称重石菖蒲 60 g, T<sub>3</sub> 称重石菖蒲和香菇草各 30 g。种植容器为 50 cm×30 cm 的塑料桶, 每桶装入底泥 6 kg, 植物种入后放入取自池塘的水, 每桶放水 5 L, 每组设 3 个重复。

**1.2.2 采样。** 10 月 26 日种植, 14 d 植物恢复生长后开始取样, 每 7 d 取样一次, 取样时间为当天 08:00, 取得的水样立即带入实验室分析水样中的 TN、TP, 每 7 d 一次用蒸馏水补充蒸发和植物蒸腾所散失的水分。底泥在试验开始和试验结束各取样一次, 风干后分析测定 TN 和 TP, 在试验结束后, 将植物全部取出洗净, 用吸水纸吸干水分后称重。

**1.2.3 指标测定。** 水样浊度用 SGZ-200BS 便携式浊度计测定, 水样 TN 用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定, 水样 TP 用钼酸铵分光光度法测定, 底泥中的 TN 用凯氏定氮法测定, TP 用钼锑抗比色法测定。去除率计算公式为去除率 =  $[(C_0 - C_i) / C_0] \times 100\%$ , 式中, C<sub>0</sub> 为试验开始时水体中污染物的浓度; C<sub>i</sub> 为第 i 天时水体污染物浓度。

**1.3 数据处理** 所有数据经 Excel 和 SPSS 16.0 软件进行处理并用 Duncan 进行多重比较。

**基金项目** 江苏省扬州市职业大学校级科研项目(2018ZR33); 江苏省高等学校大学生创新创业训练计划 2020 年立项项目(202011462022Y)。

**作者简介** 居萍(1973—), 女, 江苏连云港人, 教授, 硕士, 从事园林植物方面的教学和科研工作。

**收稿日期** 2021-11-04

## 2 结果与分析

**2.1 不同处理对富营养化水体浊度的影响** 浊度是水质测定的一项重要物理指标,浊度越高,水越浑浊,水质越差。不同植物种植方式水体的浊度变化见图 1。从图 1 可以看出,10 月 26 日—11 月 30 日 3 个处理组和对照组水体的浊度都出现下降趋势,但对对照组水体浊度的下降趋势慢于 3 个处理组。至试验结束时,对照组水体的浊度仍有 71.9 NTU,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  的浊度分别为 32.0、54.3、48.0 NTU, 3 个处理对水体浊度净化作用分别为  $T_1 > T_3 > T_2$ , 分别比初始浊度 (108.5 NTU) 降低 70.5%、55.8%、50.0%。

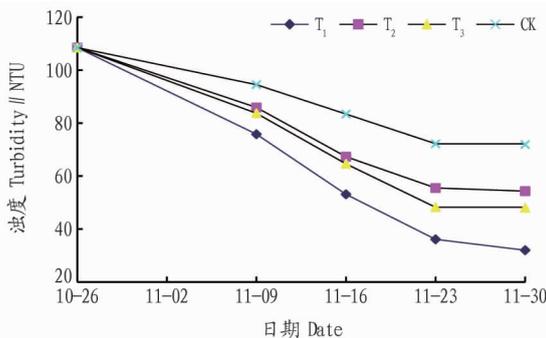


图 1 不同处理水体浊度的变化

Fig.1 Change of turbidity in different treatment water

**2.2 不同处理水体中 TN 的变化** 从图 2 可以看出,随着处理时间的延长,各处理的 TN 浓度均有不同程度下降,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  水体中 TN 浓度始终低于对照,且 3 个处理在 11 月 9 日测定的水体中 TN 浓度明显低于 10 月 26 日的浓度,由最初的 8.990 1 mg/L 分别下降为 2.752 3、3.526 5、3.125 3 mg/L,此后水体中 TN 浓度下降缓慢,至试验结束时,3 个处理水体中的浓度分别为 1.097 4、2.697 1、1.554 3 mg/L;对照组中,由于各种微生物及其他因素作用,水体中 TN 浓度也由 8.990 1 mg/L 下降至 6.863 7 mg/L。

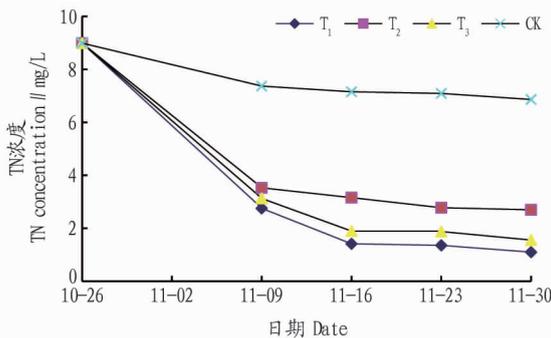


图 2 不同处理水体中 TN 浓度的变化

Fig.2 Change of TN concentration in different treatment water

从表 1 可以看出,3 个处理在不同阶段对水体中 TN 均有去除效果,尤其在植物恢复生长后的第一次测定,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  水体中 TN 去除率分别为 69.4%、60.7%和 65.2%。分析比较 3 个处理最终对水体中 TN 去除率发现,经过 35 d 的处理后,  $T_1$  的去除率最高,达 87.8%,其次是  $T_3$  和  $T_2$ , 去除率分别为 82.7%和 70.0%;对照组水体中的 TN 浓度虽有缓慢下降,但变化不大;对于水体中 TN 的去除率,除了  $T_1$  和  $T_3$  之间差

异不显著,其余处理之间差异均达极显著水平。

表 1 不同处理对水体中 TN 的去除率

Table 1 Removal rates of TN in water by different treatments %

处理 Treatment	11-09	11-16	11-23	11-30
$T_1$	69.4 cB	84.3 cC	84.9 dC	87.8 cC
$T_2$	60.7 bB	64.9 bB	69.2 bB	70.0 bB
$T_3$	65.2 bcB	78.9 cC	79.2 cC	82.7 cC
CK	18.1 aA	20.4 aA	21.1 aA	23.7 aA

注:同列不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ),不同大写字母表示差异极显著 ( $P < 0.01$ )

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ( $P < 0.05$ ), and different capital letters indicate extremely significant differences ( $P < 0.01$ )

**2.3 不同处理水体中 TP 的变化** 从图 3 可看出,3 个处理中水体的 TP 浓度变化趋势与 TN 浓度变化趋势相似,随着时间的延长,TP 浓度均有不同程度下降,  $T_3$  和  $T_1$  下降趋势较明显,由最初的 1.005 0 mg/L 分别下降为 0.208 8、0.218 8 mg/L,其次为  $T_2$ , 试验结束时水体中的 TP 浓度下降至 0.339 8 mg/L,3 个处理水体中的浓度均低于对照处理水体的浓度 (0.765 1 mg/L)。

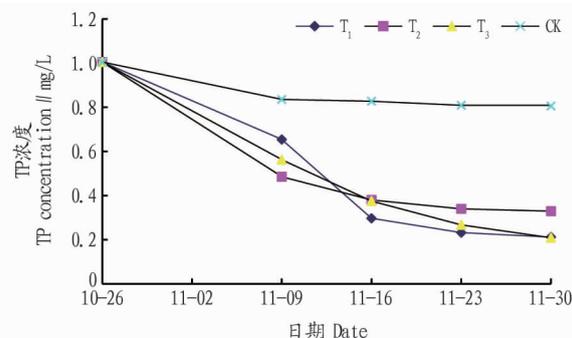


图 3 不同处理水体中 TP 浓度的变化

Fig.3 Change of TP concentration in different treatment water

从表 2 可以看出,3 个处理在不同阶段对水体中 TP 均有一定的去除作用,与对 TN 的去除率不同的是,植物恢复生长后的第一次测定,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  去除率不高,分别仅为 34.8%、51.4%和 43.7%,而后多次取样测定并计算,去除率不断上升,至试验结束时,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  对水体中 TP 的去除率分别为 78.8%、67.0%和 79.2%,与对照都达到极显著差异,  $T_1$  和  $T_3$  间差异不显著,但  $T_1$  和  $T_2$ 、 $T_3$  和  $T_2$  之间均差异显著。

表 2 不同处理对水体中 TP 的去除率

Table 2 Removal rates of TN in water by different treatments %

处理 Treatment	11-09	11-16	11-23	11-30
$T_1$	34.8 bB	70.2 bB	76.6 bB	78.8 cB
$T_2$	51.4 cB	61.9 bB	65.9 bB	67.0 bB
$T_3$	43.7 bcB	62.4 bB	72.8 bB	79.2 cB
CK	8.7 aA	14.1 aA	16.3 aA	17.0 aA

注:同列不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ),不同大写字母表示差异极显著 ( $P < 0.01$ )

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ( $P < 0.05$ ), and different capital letters indicate extremely significant differences ( $P < 0.01$ )

**2.4 不同处理底泥中 TN、TP 的变化** 在富营养化水体中,

一般来说,底泥与上覆水中的氮磷营养盐处于一个动态平衡状态,因此研究水生植物对富营养化水体的净化作用时,底泥中的 TN 和 TP 也是重要的分析指标<sup>[8]</sup>。

从图 4 可以看出,至试验结束时, $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  底泥中的 TN 含量分别由初始时的 2.059 g/kg 分别降为 0.629、1.289、1.092 g/kg,降低幅度为 69.5%、37.4%和 47.0%;对照组底泥中的 TN 含量降至 1.563 g/kg,降低 24.1%。说明水生植物在冬季生长期利于降低底泥中的 TN 含量。从各处理对底泥中 TP 含量的影响(图 5)可以看出, $T_1$  底泥中 TP 含量由最初的 40.396 g/kg 上升为 40.612 g/kg,增幅为 0.53%; $T_2$  和  $T_3$  底泥中的 TP 含量虽然下降,由最初的 40.396 g/kg 分别下降为 39.831 和 40.126 g/kg,但下降幅度很小,分别为 1.40%和 0.67%。

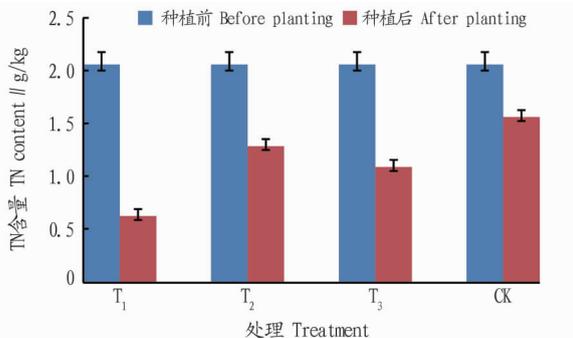


图 4 不同处理底泥中 TN 含量的变化

Fig.4 Change of TN content in sediment with different treatment

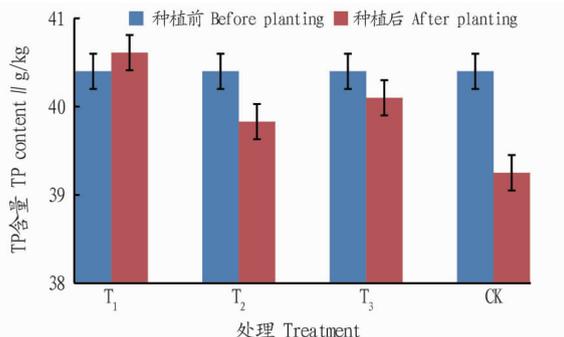


图 5 不同处理底泥中 TP 含量的变化

Fig.5 Change of TP content in sediment with different treatment

**2.5 不同处理植物鲜重的变化** 经过 35 d 的试验,用于净化水体的植物在感官形态上有了较大的变化,所栽培植物全部成活,且长势旺盛,总生物量明显增加。从图 6 可看出,在试验结束后, $T_1$  植物鲜重增加最大,由最初的 60 g 增加至 426 g,净增加 366 g,增加了 6.10 倍;其次是  $T_3$ ,由 60 g 增加到 326 g,净增加 266 g,增加了 4.43 倍; $T_2$  由 60 g 增加到 121 g,净增加 61 g,增加了 1.02 倍。

### 3 讨论

该试验研究常绿水生植物冬季对富营养化水体的净化作用,并比较水生植物单独种植和混合种植的净化效果。从植物造景的艺术性角度来看,香菇草较为铺散的横向性生长和石菖蒲直立生长特性形成了方向和质感上的对比,而香菇草叶片浅绿色和石菖蒲深绿色又形成了颜色上的对比,符合植物造景形式美法则。

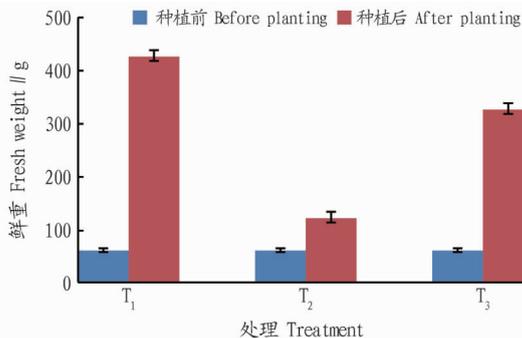


图 6 不同处理植物鲜重的变化

Fig.6 Change of fresh weight of plants with different treatment

生长旺盛、鲜重增加较快是决定水生植物水质净化能力的一个十分重要的因素,水生植物旺盛生长,光合作用强,使水中溶解氧浓度保持充足,能加快悬浮物的分解,从而使水体富营养化下降。在 35 d 中香菇草的鲜重净增 366 g,增加了 6.10 倍,这与金树权等<sup>[9]</sup>将水质氮、磷去除率与水生植物净增生物量的相关性分析研究结果一致,金树权等研究的香菇草对水体 TN、TP 的去除率分别为 91.8%和 79.1%,高于该研究的去除率,这与冬季温度低,植物代谢慢有关。徐秀玲等<sup>[10]</sup>在不同水生植物对富营养化水体氮磷去除效果比较研究中也发现水生植物生长旺盛、生物量大对氮、磷的去除效果好。

底泥是富营养化水体主要的内源污染源,内源污染指的是在阻止了外部污染后,水体与水体沉积物之间的物质交换过程中,沉积物在扰动情况下再次向水体释放营养物质改变水质产生富营养化的现象。该研究中,香菇草单独种植使栽植底泥的 TN 下降,TP 上升,是因为香菇草旺盛生长,根系非常发达,可直接从与底泥吸收氮素营养,从而降低了 TN;TP 上升是因为水体中悬浮物慢慢沉积并被植物根系固定,从而导致底泥中 TP 含量增加。由于石菖蒲鲜重增加量比香菇草小,因此对底泥中 TN 的吸收效果不如香菇草明显,香菇草和石菖蒲混合种植对底泥中 TN 的效果介于 2 种单独植物之间。

在该试验的 3 个处理中,通过分析各项试验指标,以香菇草对富营养化水体净化效果为最好,其次为香菇草和石菖蒲混合种植,但考虑水体造景的美学性以及植物选择多样性,建议选择香菇草和石菖蒲混合种植作为冬季水体富营养化水体净化植物的选择。

### 4 结论

(1)从净化富营养化水体效果看,以香菇草单独种植效果为最好,至试验结束时,使水体浊度下降 70.5%,对水体中 TN、TP 的去除率分别为 87.8 %和 78.8%;其次是香菇草+石菖蒲混合种植,使水体浊度下降 55.8%,对水体中 TN、TP 去除率分别为 82.7%和 79.2%;而石菖蒲单独种植,使水体浊度下降 50.0%,对水体中 TN、TP 去除率分别为 70.0%和 67.0%。

(2)水生植物生长旺盛、生物量增加快对水体中氮、磷的去除效果好,在 35 d 中香菇草的鲜重净增 366 g,增加了 6.10 倍。

(3)底泥也是富营养化水体污染源之一,植物根系可直  
(下转第 74 页)

20 cm 土层的呼吸强度高于 20~40 cm 土层,春季施肥的有机肥也主要集中在 0~20 cm 土层中,以上因素均影响着 0~

表 3 收获期土壤养分与酶活性的相关性

Table 3 Correlation between soil nutrients and enzyme activity during harvest period

因子 Factor	蔗糖酶 Sucrase	过氧化氢酶 Catalase	脲酶 Urease	有机质 OM	碱解氮 Alkaline nitrogen	速效磷 Available phosphorus
过氧化氢酶 Catalase	-0.014					
脲酶 Urease	0.785**	0.025				
有机质 OM	0.043	-0.031	0.214			
碱解氮 Alkaline nitrogen	0.482**	-0.282	0.106	0.015		
速效磷 Available phosphorus	0.347*	-0.200	0.148	-0.019	0.778**	
速效钾 Available potassium	-0.376*	-0.090	-0.682**	-0.104	0.553**	0.443**

注: \*\* 表示极显著相关( $P<0.01$ ), \* 表示显著相关( $P<0.05$ )

Note: \*\* indicates extremely significant correlation ( $P<0.01$ ), \* indicates significant correlation ( $P<0.05$ )

20 cm 土层中土壤酶的活性<sup>[17]</sup>。在辣椒整个收获期 0~20 cm 土层覆降解膜处理的土壤蔗糖酶和脲酶活性高于覆普通膜处理,可能是土壤微生物参与了降解膜的降解,随着降解的进行土壤中微生物的多样性发生变化,影响了土壤酶的活性,与何文清等<sup>[18]</sup>的研究结果相同,土壤中速效养分的变化也直接或间接地影响土壤酶活性的变化。

#### 参考文献

- [1] 王晓方,申茂向.塑料农膜:中国农业发展的希望和曙光[M].北京:中华人民共和国科学技术部农村科技司,1998.
- [2] 张文群,金维续,孙昭荣,等.降解膜残片与土壤耕层水分运动[J].土壤肥料,1994(3):12-15.
- [3] 王星,吕家珑,孙本华.覆盖可降解地膜对玉米生长和土壤环境的影响[J].农业环境科学学报,2003,22(4):397-401.
- [4] 赵爱琴,李子忠,龚元石.生物降解地膜对玉米生长的影响及其田间降解状况[J].中国农业大学学报,2005,10(2):74-78.
- [5] 姜益娟,郑德明,朱朝阳.残膜对棉花生长发育及产量的影响[J].农业环境保护,2001,20(3):177-179.
- [6] 王祥会.降解地膜覆盖对马铃薯产量及品质的影响[J].中国果菜,2014,34(12):64-66.
- [7] 孙倩,吴宏亮,陈阜,等.不同作物轮作对谷田土壤酶活性和土壤细菌群

落的影响[J].生态环境学报,2020,29(12):2385-2393.

- [8] 曾玲玲,张兴梅,洪音,等.长期施肥与耕作方式对土壤酶活性的影响[J].中国土壤与肥料,2008(2):27-30,60.
- [9] 申丽霞,王璞,张丽丽.可降解地膜的降解性能及对土壤温度、水分和玉米生长的影响[J].农业工程学报,2012,28(4):111-116.
- [10] 陶凯,杨小锋,曹明,等.生物降解地膜对热区土壤温度和甜瓜生长发育及品质·产量的影响[J].安徽农业科学,2020,48(2):219-220,224.
- [11] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2001.
- [12] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.
- [13] 汪景宽,彭涛,张旭东,等.地膜覆盖对土壤主要酶活性的影响[J].沈阳农业大学学报,1997,28(3):210-213.
- [14] 吴国.环降解地膜降解产物对作物生长代谢及土壤关键酶活性的影响[D].成都:四川师范大学,2013.
- [15] 王海娟,王国平,冯杨,等.不同类型生物降解地膜降解性能及对棉花产量的影响[J].农业科技通讯,2020(7):104-106.
- [16] 田露,刘景辉,赵宝平,等.保水剂和微生物菌肥配施对旱作燕麦土壤微生物生物量碳、氮含量及酶活性的影响[J].水土保持学报,2020,34(5):361-368.
- [17] 董宇飞,吕相璋,张自坤,等.不同栽培模式对辣椒根际连作土壤微生物区系和酶活性的影响[J].浙江农业学报,2019,31(9):1485-1492.
- [18] 何文清,赵彩霞,刘爽,等.全生物降解膜田间降解特征及其对棉花产量影响[J].中国农业大学学报,2011,16(3):21-27.

(上接第 70 页)

接从底泥吸收营养,但随着时间的延长,植物根系固定营养从而会导致底泥中 TP 含量增加,因此需要及时剪除一部分水生植物,一是防止植物将营养固定于底泥中,二是防止植物生长过密影响造景效果。

(4) 考虑水生植物造景的美学性以及植物选择多样性,优选香菇草和石菖蒲混合种植作为冬季水体富营养化造景材料。

#### 参考文献

- [1] 高冲,杨肖娥,向律成,等.pH 和温度对薹苳植物床去除富营养化水中氮磷的影响[J].农业环境科学学报,2008,27(4):1495-1500.
- [2] 汪秀芳,许开平,叶碎高,等.四种冬季水生植物组合对富营养化水体的净化效果[J].生态学杂志,2013,32(2):401-406.

- [3] 黄亮,吴乃成,唐涛,等.水生植物对富营养化水系统中氮、磷的富集与转移[J].中国环境科学,2010,30(S1):1-6.
- [4] 王超,张文明,王沛芳,等.黄花水龙对富营养化水体中氮磷去除效果的研究[J].环境科学,2007,28(5):975-981.
- [5] 周小平,徐晓峰,王建国,等.3 种植物浮床对冬季富营养化水体氮磷的去除效果研究[J].中国生态农业学报,2007,15(4):102-104.
- [6] 刘盼,宋超,朱华,等.3 种水生植物对富营养化水体的净化作用研究[J].水生态学杂志,2011,32(2):69-74.
- [7] 陈敏,崔大方,黄平,等.3 种乡土水生植物对富营养化水体净化能力比较[J].安徽农业科学,2019,47(7):63-65,69.
- [8] 朱华兵,严少华,封克,等.水葫芦和香蒲对富营养化水体及其底泥养分的吸收[J].江苏农业学报,2012,28(2):326-331.
- [9] 金树权,周金波,朱晓丽,等.10 种水生植物的氮磷吸收和水质净化能力比较研究[J].农业环境科学学报,2010,29(8):1571-1575.
- [10] 徐秀玲,陆欣欣,雷先德,等.不同水生植物对富营养化水体中氮磷去除效果的比较[J].上海交通大学学报(农业科学版),2012,30(1):8-14.