焦岗湖本土水生植物的水质净化试验

陈结平[1]，胡友彪[1]，张治国[1,2]，郑永红[1]，谢士峰[3]，陈小运[1]，刘 焕[1]，陈永春[4]
(1. 安徽理工大学 地球与环境学院，安徽 淮南 232001；2. 安徽省矿山地质灾害防治重点实验室，安徽 淮南 232001；
3. 安徽省焦岗湖旅游发展有限公司，安徽 淮南 232001；4. 煤矿生态环境保护国家工程实验室，安徽 淮南 232001)

摘 要：[目的] 针对淮南市焦岗湖近期污染物超标问题，开展本土 4 种水生植物进行水质净化试验，为焦岗湖利用水生植物修复水质提供可靠依据。[方法] 在对淮南市焦岗湖水质检测的基础上，选取焦岗湖本土种植的泽泻(*Alisma plantago-aquatica*)、千屈菜(*Lythrum salicaria*)、石菖蒲(*Acorus tatarinowii*)以及金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)等水生植物为研究对象，在人工模拟自然条件下，研究其对焦岗湖水体中总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH_3-N)、化学需氧量(COD)等污染物的去除效果。[结果] 千屈菜、泽泻和石菖蒲对 TN 去除率较好；石菖蒲和金鱼藻对氨氮去除效果良好，千屈菜对 TP 去除效果最佳，而对于 COD 而言，4 种水生植物均有较为理想的去除效果。[结论] 所选取的 4 种水生植物对各污染物均有一定的去除效果，将水生植物的种植面积、数量和时间进行优化配置，可用于焦岗湖水质改良。

关键词：焦岗湖；污染物；水生植物；净化水质
文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2019)02-0172-07 **中图分类号**：X52

文献参数：陈结平，胡友彪，张治国，等. 焦岗湖本土水生植物的水质净化试验[J]. 水土保持通报，2019，39(2)：172-178. DOI：10. 13961/j. cnki. stbctb. 2019. 02. 028；Chen Jieping，Hu Youbiao，Zhang Zhiguo，et al. Water purification of native aquatic plants in Jiaogang Lake[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(2)：172-178.

Water Purification of Native Aquatic Plants in Jiaogang Lake

CHEN Jieping[1]，HU Youbiao[1]，ZHANG Zhiguo[1,2]，
ZHENG Yonghong[1]，XIE Shifeng[3]，CHEN Xiaoyun[1]，LIU Huan[1]，CHEN Yongchun[4]
(1. *School of Earth and Environment，Anhui University of Science and Technology，Huainan，Anhui* 232001，*China*；2. *Key Laboratory of Mine Geological Hazard and Control，Huainan，Anhui* 232001，*China*；3. *Anhui Jiaogang Lake Tourism Development Co.，Ltd.，Huainan，Anhui* 232001，*China*；4. *National Engineering Laboratory for Protection of Coal Mine Eco-environment，Huainan，Anhui* 232001，*China*)

Abstract：[Objective] To solve the problem of excessive pollutants in Jiaogang Lake in Huainan City，four native aquatic plants were tested for water purification. The experiment was expected to provide a reliable basis for the use of aquatic plants to repair water quality in Jiaogang Lake. [Methods] Based on the water quality test data of Jiaogang Lake in Huainan City，*Alisma plantago-aquatica*，*Lythrum salicaria*，*Acorus tatarinowii* and *Ceratophyllum demersum* grown locally in Jiaogang Lake were selected as research objects，the removal effects of aquatic plants on TN，TP，NH_3-N and COD in water body of Jiaogang Lake were studied under simulated natural-alike conditions. [Results] The removal rate of TN was better in *Lythrum salicaria*，*Alisma plantago-aquatica* and *Acorus tatarinowii*. The removal rate of NH_3-N was better for *Acorus tatarinowii* and *Ceratophyllum demersum*. *Lythrum salicaria* had the best effect on removing TP，while for COD，the four aquatic plants had better removal effect. [Conclusion] The four selected aquatic plants have certain removal effects on pollutants. The optimum arrangement of planting area，quantity and time of aquatic plants can be used for water quality improvement of Jiaogang Lake.

Keywords：**Jiaogang Lake；pollutants；aquatic plants；water purification**

收稿日期：2018-11-01 **修回日期**：2018-12-10
资助项目：安徽省自然科学基金项目“煤矸石风化物—土壤系统中溶解性有机碳迁移富集特征研究”(1508085SMD218)；安徽省高校自然科学研究项目(KJ2018A0072)；2017 年淮南市科技重点研究与开发专项计划项目(2017A0416)
第一作者：陈结平(1994—)，男(汉族)，安徽省宿松县人，硕士研究生，研究方向为水污染控制及生态修复。E-mail：284501985@qq. com。

淮南市焦岗湖位于淮河北岸,横跨淮南市毛集试验区与阜阳市颍上县,是淮河流域的一处浅水性湖泊,也是皖北地区最大的天然淡水湖之一,为国家级湿地公园,国家 AAAA 级旅游景区和国家水利风景区,集灌溉、养殖、旅游、调蓄洪水等多种功能于一体[1]。近年来,毛集试验区坚持生态立区、生态富区、生态强区战略,保护水域生态环境,积极为将焦岗湖打造成环境优美、景色宜人、集旅游休闲度假为一体的国家 5A 级旅游景区做准备。然而其为发展地方经济和促进农业生产,焦岗湖大力发展渔业养殖及生态旅游业,流域内农业生产过程中大量使用化肥、农药等,致使湖泊受到较大程度的干扰。据报道[2],2018 年焦岗湖水质在 4—6 月连续 3 个月不达标,出现不同程度的污染物超标现象。水生植物具有克藻效应[3-4],对水体中氮磷等污染物的吸收、富集以及转移有明显的效果[5-6],是一项生态化的水污染净化技术。本研究就淮南市焦岗湖近期污染物超标问题,开展了本土 4 种水生植物进行水质净化研究试验,为焦岗湖利用水生植物修复水质提供可靠的依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

本研究选取 4 种焦岗湖本土水生植物,分别为:泽泻(*Alisma plantago-aquatica*)、石菖蒲(*Acorus tatarinowii*)、千屈菜(*Lythrum salicaria*)以及金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)。选取标准为生长健壮,长势相对一致,个体生物量相近的植株,用自来水洗净根部,用供试水体预培养一周,长出新根后进行试验。供试水体采用人工配置的方式,在高纯水中加入磷酸二氢钾、氯化铵、硝酸钾和邻苯二甲酸氢钾进行配置。根据焦岗湖水体中 N,P 的实际测定值为供试水体低浓度处理组,另兼顾湖泊富营养化和污水水生植物净化,结合《城镇污水排放标准 GB18918-2002》的一级 B 标准和二级标准,设置中、高浓度处理组,配置成高、中、低三种不同浓度的富营养化水体[7],对配置的供试水体进行标定,水体实际初始浓度值详见表 1。

表 1　供试水体水质　　mg/L

水质指标	高浓度	中浓度	低浓度
TN	20.57	8.12	2.15
TP	2.67	0.54	0.13
NH_3-N	4.32	1.84	0.19
COD	257.0	115.0	68.3

1.2　试验设计

试验选用上底直径为 36 cm,下底直径为 27 cm,高为 32 cm 的 PVC 水桶内进行盆栽试验,试验时每桶含供试水 10 L。分别研究以上 4 种水生植物不同处理组对污水的净化,主要污染物总氮、总磷、氨氮和化学需氧量的去除效率比较。每种水生植物的不同处理组设置 3 个重复另加无水生植物的空白对照,共计 45 个试验水桶。试验持续 42 d,从 2018 年 7 月 4 日至 8 月 8 日,每周三上午 9:00—10:00 取样,期间用蒸馏水来补充蒸发和取样所消耗的水分以保持水位。

1.3　试验方法

按照《水和废水监测分析方法(第 4 版)》[8]中相关方法对各指标检测,其中,焦岗湖水体水质指标化学需氧量(COD)采用高锰酸盐法,试验水体的 COD 采用重铬酸盐法。

1.4　数据处理

使用 ArcGIS 10.2 和 SPSS 24 软件对相关数据进行统计分析,并采用 Origin 9.0 进行相关图形绘制。

2　焦岗湖水质概况

2.1　采样点选取

根据焦岗湖出入湖河流流经路线,在各个入湖口、出水口、湖面以及荷花淀设置 9 个取样点,具体点位情况详见表 2。其中 1#,2#,3#,4# 以及 9# 为焦岗湖入湖口,5#,7# 和 8# 为焦岗湖水面采点,6# 为焦岗湖出水口。于 2018 年 5,7,9 月 3 次采集距采样点水面下 0.5 m 处水样。样品 1 h 内运往安徽理工大学实验室进行分析检测,严格按照《水和废水监测分析方法》(第 4 版)中相应的方法测定总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH_3-N)和化学需氧量(COD)等相应指标。

表 2　采样点位地理信息表

编号	名称	经度	纬度
1#	枣林闸	116°37′05.84″	32°36′48.00″
2#	穆台孜	116°34′30.64″	32°36′39.08″
3#	唐台桥	116°34′00.18″	32°36′37.62″
4#	北中心沟	116°34′03.55″	32°36′07.55″
5#	湖中心 1	116°35′19.36″	32°35′44.64″
6#	曹集河口	116°39′27.19″	32°35′47.29″
7#	湖中心 2	116°37′38.65″	32°36′07.55″
8#	荷塘	116°39′09.51″	32°36′00.41″
9#	丁家沟河口	116°37′54.21″	32°37′15.73″

2.2 焦岗湖水质空间变化

通过对焦岗湖水体采样检测分析，发现各个采样点处各污染物平均浓度空间分布差异性较大。由图 1 可知，3# 点处湖水 TN 平均质量浓度明显高于其他点位，达到 3.34 mg/L；除 8# 点外，其余点位处水体 TN 浓度均超国家《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》中规定的Ⅲ类标准(以湖、库计，下同)(1 mg/L)，属于不同程度的超标状态。TP 浓度含量最高的为 3# 和 9#，分别达到 0.40 和 0.23 mg/L，分别超标 7 倍和 3.6 倍；除 8# 点外，其余点位处水体 TP 含量均严重超标。

由图 1 可以发现，仅 1#，3# 和 9# 3 个点位处 NH_3-N 含量处于超标状态，分别为 1.14，2.48 和 1.13 mg/L。图 1 中 2# 点处 COD 平均质量浓度最大，为 13.62 mg/L。除 COD 外，6# 出水口中各污染物浓度均低于入湖口水体，表明湖中的沉积物吸附、微生物降解等一系列自然净化机制，截留了入湖水体中带来的污染物，达到了一定的水体净化，但曹集河口水体仍达不到规定的相关标准(Ⅲ类)，需要结合其他方法对其进行综合治理。

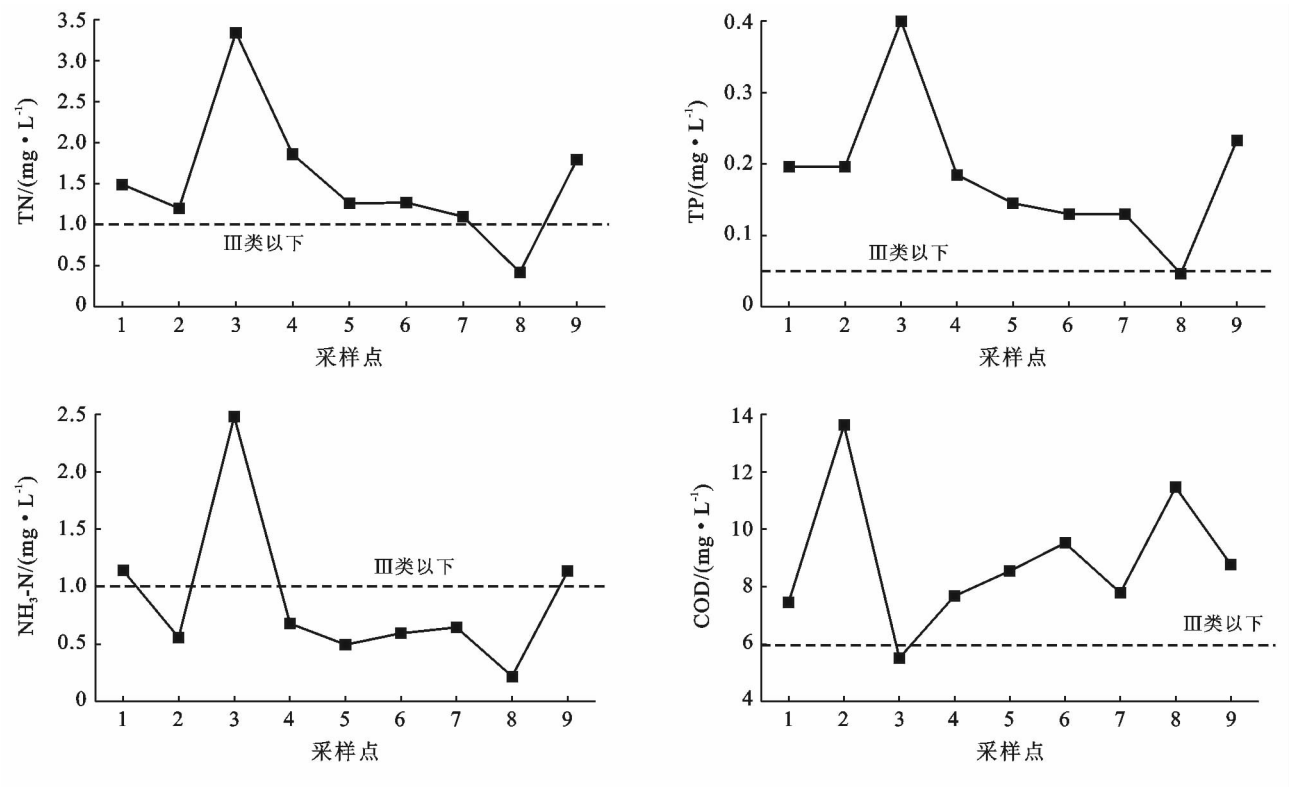


图 1 焦岗湖 TN，TP，NH_3-N 和 COD 空间分布

3 水生植物对污染物的净化效果

3.1 水生植物对 TN 的去除效果

通过 6 次采样对供试水体中 TN 含量的测定结果，可发现随着试验日期的增加，水生植物组水体中 TN 含量基本低于空白对照组(无水生植物)水体中 TN 含量，表明本次试验所选取 4 种水生植物对 TN 均有不同程度的净化作用。从图 2 可以看出，高浓度处理组在试验开始 7 d 时总氮浓度差异较为明显，净化效率依次为：千屈菜＞泽泻＞石菖蒲＞金鱼藻；在第 28 d 时，千屈菜、泽泻以及金鱼藻组总氮浓度值基本稳定，达到最低值，此时净化效率最大，分别为 96.60%，93.90%和 26.01%，而石菖蒲组总氮浓度还在持续下降中，在 42 d 时净化效率为 91.46%。

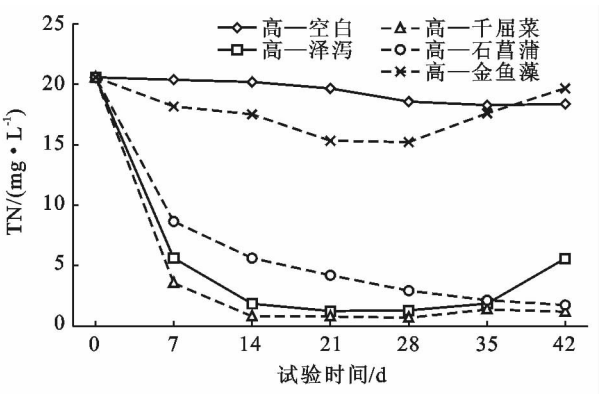


图 2 高浓度组试验水体 TN 浓度变化

由图 3 可知，中浓度处理组在 14 d 内，净化效率大小依次为：泽泻＞千屈菜＞石菖蒲＞金鱼藻，且净化效率差异明显；18 d 后泽泻净化效率超过千屈菜，

表现为千屈菜＞泽泻＞石菖蒲＞金鱼藻;泽泻、千屈菜和金鱼藻组均在 28 d 时为最低值,表明此时其净化效率最大,分别为 92.48%,94.12%和 59.86%,石菖蒲组在 35 d 时净化效率达到最大值为 83.67%。

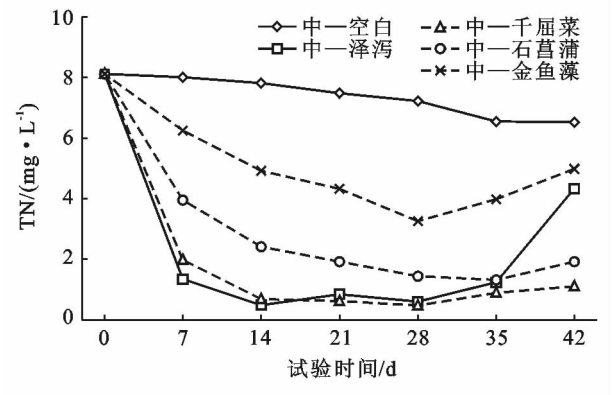


图 3　中浓度组试验水体 TN 浓度变化

由图 4 可知,低浓度处理组中,除金鱼藻外,其余 3 种水生植物处理组在 14 d 前曲线接近重合,说明这个时间段内处理效率相近;14～33 d 时间段,总氮净化效率大小依次为:千屈菜＞泽泻＞石菖蒲＞金鱼藻;金鱼藻在 21 d 时净化效率最高为 36.69%,石菖蒲和泽泻在 14 d 时净化效率分别为 82.52%和 80.35%,千屈菜在 35 d 时净化效率为 86.02%。直到 28 d 后,千屈菜、石菖蒲以及金鱼藻组总氮浓度均有增高现象,可能是植物根系停止生长并开始腐败而使总氮含量升高[9]。

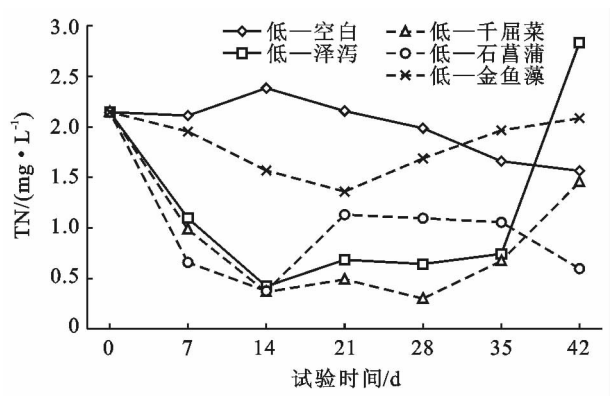


图 4　低浓度组试验水体 TN 浓度变化

3.2　水生植物对 TP 的去除效果

通过 6 次采样对供试水体中 TP 含量的测定结果可知,植物组和空白对照组差异较为明显,在试验期内,有植物组的水体中总磷浓度基本低于无水生植物组。

各植物组对于总磷含量的去除效果不同(如图 5 所示),高浓度处理组下,金鱼藻和泽泻对于总磷的去除效果差异明显,金鱼藻组在 14 d 时去除率 42.25%,泽泻在 35 d 时去除率最大,为 68.31%;石菖蒲和千屈菜对总磷浓度的去除效果差别不大,在 7 d前去除速率较快,石菖蒲在 28 d 达到总磷去除率 75.58%,千屈菜在 42 d 时去除率为 78.13%。

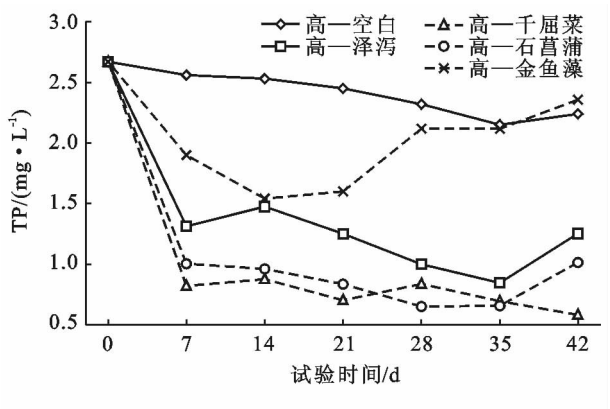


图 5　高浓度组试验水体 TP 浓度变化

由图 6 中总磷变化曲线可知,在中浓度处理下,21 d 前,去除效果依次为:千屈菜＞泽泻＞石菖蒲＞金鱼藻,21 d 后,石菖蒲去除率超过泽泻,总体来说,两种植物最大净化效率相近,只是净化速率不同,分别为 28 d 的 77.21%和 14 d 的 77.57%;千屈菜去除效果较好,14 d 达到总磷去除率 95.22%,金鱼藻去除效果一般,最大去除率为 35 d 时的 45.59%。

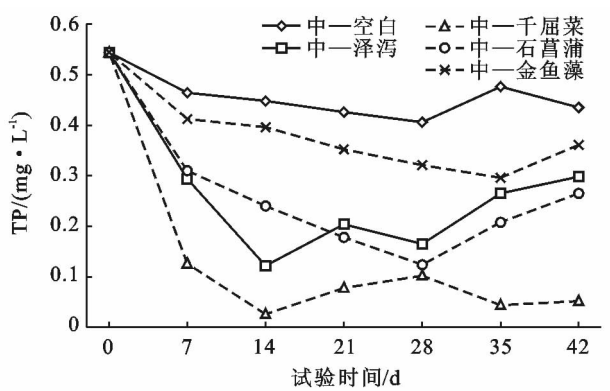


图 6　中浓度组试验水体 TP 浓度变化

由图 7 可知,在低浓度处理下,4 种水生植物中只有千屈菜的总磷浓度去除率较好,在 21 d 时总磷含量去除率达到 63.08%,其余水生植物去除相差较小,未达到显著差异。

3.3　水生植物对 NH_3-N 的去除效果

通过 6 次采样对供试水体中 NH_3-N 含量的测定结果可知,在试验期内,4 种水生植物对 NH_3-N 含量均有一个降低的过程,但其降低的速率以及降低的含量有明显的区别,由图 8 可知,高浓度处理下,4 种水

生植物在前 7 d 的降低量较大，去除速率也较快，泽泻组更是在此时达到最大去除率 88.34%；7 d 后千屈菜、石菖蒲和金鱼藻等组 NH_3-N 含量均有继续下降的效果，但是效率较低，在 28 d 时均到达最大去除率，分别为 87.04%，95.23%和 94.35%；35 d 前氨氮去除率大小为：石菖蒲＞金鱼藻＞泽泻＞千屈菜，35 d后金鱼藻去除率高于石菖蒲。

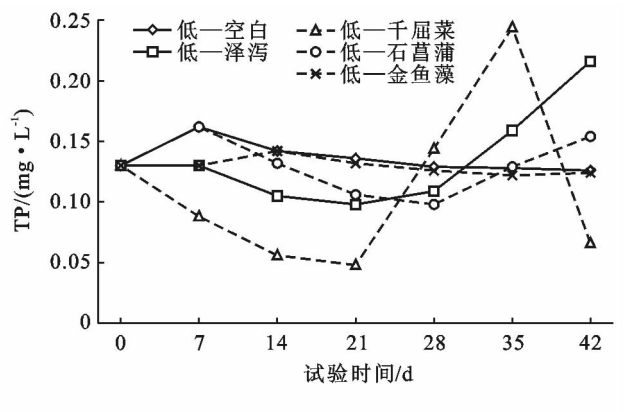


图 7 低浓度组试验水体 TP 浓度变化

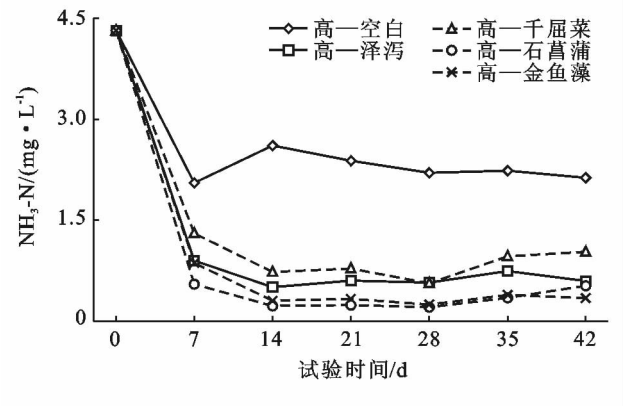


图 8 高浓度组试验水体 NH_3-N 浓度变化

由图 9 可知在中浓度处理下，4 种水生植物在 14 d前的 NH_3-N 浓度净化率差异较大，泽泻、千屈菜和石菖蒲组远远大于金鱼藻组，表现为：石菖蒲＞泽泻＞千屈菜＞金鱼藻；在 14～21 d 试验时间内，金鱼藻组对 NH_3-N 浓度净化速率明显上升，供试水体内 NH_3-N 含量也大幅降低，此时去除率大小为：石菖蒲＞金鱼藻＞泽泻＞千屈菜；在达到最大去除率的时间上，泽泻在 14 d 时为 75.51%，石菖蒲、金鱼藻和千屈菜组与高浓度处理组相似，均在 28 d 达到最大，分别为 88.17%，83.66%和 74.42%。

低浓度处理组下(如图 10 所示)，千屈菜组 NH_3-N 浓度在 14 d 前的小幅下降后，迅速上升甚至超过初始值，可能是由于千屈菜部分枝叶掉落至供水水体内未及时清理腐烂后释放 NH_3-N 所致[9]，然而其 TN 含量依旧在下降，表明千屈菜对 TN 去除率较好，对 NH_3-N 去除一般，从高处理组和中处理组也可以看出，千屈菜对于 NH_3-N 的去除效果较其他水生植物一般；泽泻组 NH_3-N 浓度曲线与空白组接近重合，表明其在低浓度处理时对 NH_3-N 含量的去除效果不显著；石菖蒲组去除率大于金鱼藻组，分别为14 d时的 80.83%和 21 d 的 72.02%。

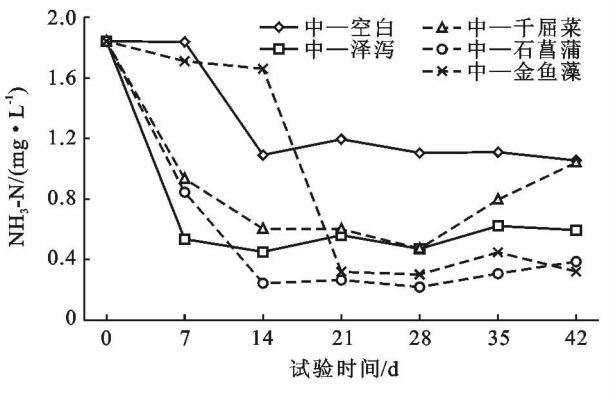


图 9 中浓度组试验水体 NH_3-N 浓度变化

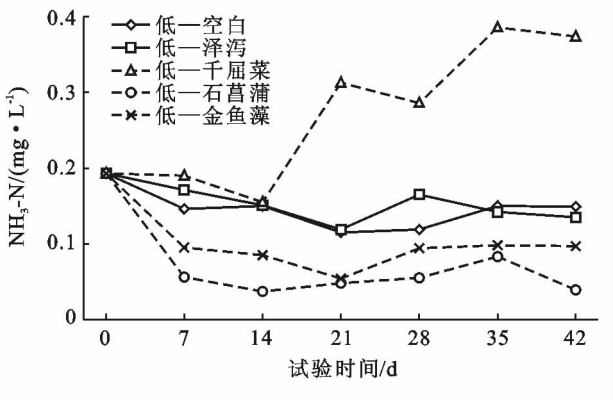


图 10 低浓度组试验水体 NH_3-N 浓度变化

3.4 水生植物对 COD 的去除效果

通过 5 次采样对供试水体中 COD 含量的测定结果可知，3 种 COD 浓度处理下，4 种水生植物对其皆有一定的去除能力，与其他 3 种污染物相比，本次对照组(无水生植物)COD 浓度下降幅度较大。

由图 11 可知在高浓度处理下，在前 7 d 内，泽泻组去除效率显著，去除率 91.04%，7 d 后供试水体内 COD 浓度较为平稳，并没出现明显的降低或者升高现象；在 14 d 时，石菖蒲和金鱼藻组 COD 都有一个快速下降的过程，表明在这段时间内这 2 种水生植物有一个较好的去除效果，去除率分别为 93.78%和 92.38%；千屈菜组在 28 d 时 COD 去除率达到 84.45%，其去除效率不及其他 3 种水生植物；总的来说，在 COD 高浓度处理下，去除率大小依次为：泽泻＞石菖蒲＞金鱼藻＞千屈菜。

由图 12—13 中 COD 浓度含量曲线可知，中浓度和低浓度处理下，4 种水生植物组的浓度曲线变化较

为相似,金鱼藻和千屈菜在 7 d 左右都要高于空白对照组,在 7～14 d 时间段内,这 2 种水生植物组中 COD 含量下降明显,14 d 后 COD 含量维持在一个较稳定的范围;两种不同浓度处理下,石菖蒲和泽泻组中 COD 在 21 d 一直在不同程度的下降,之后有一个小幅的上升趋势;在中浓度处理下,泽泻、石菖蒲、金鱼藻和千屈菜的最大净化率分别为 86.81%,85.07%,84.38%和 81.94%,在低浓度处理下,泽泻、石菖蒲、金鱼藻和千屈菜的最大净化率分别为 87.12%,83.02%,79.51%和 61.36%。4 种水生植物对于高浓度供试水体的 COD 去除效率比较低浓度更为显著。

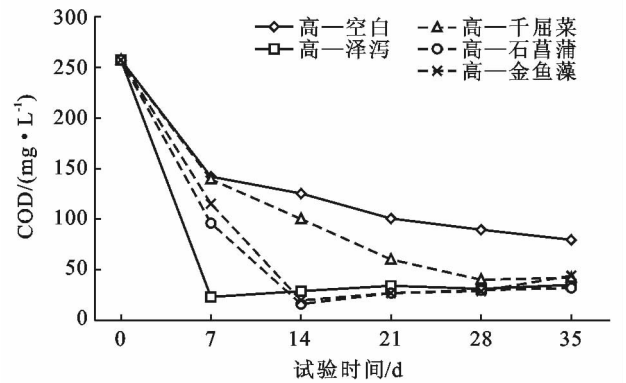


图 11　高浓度组试验水体 COD 浓度变化

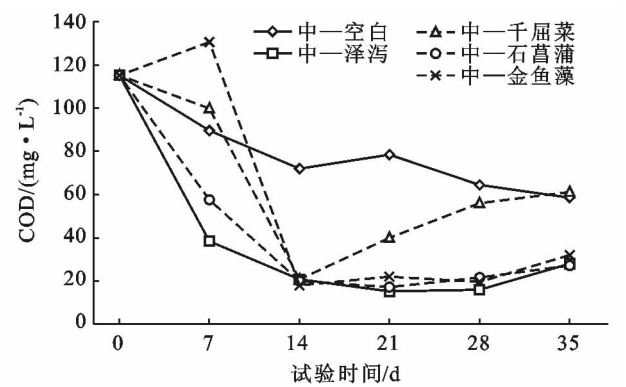


图 12　中浓度组试验水体 COD 浓度变化

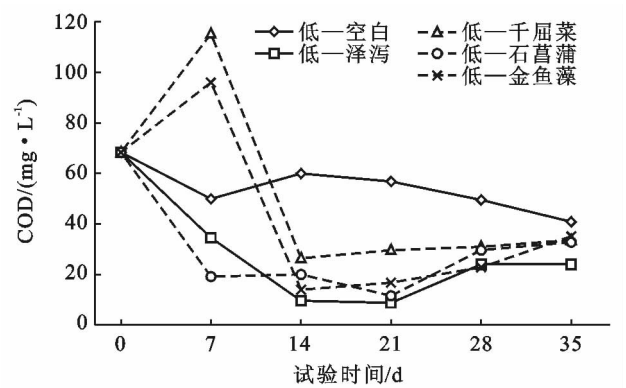


图 13　低浓度组试验水体 COD 浓度变化

4　讨 论

从本研究的水生植物对污水的净化水质试验结果来看,4 种水生植物对 TN,TP,NH_3-N 和 COD 均有去除效果,其净化水质的效果均优于静水条件下无水生植物对照组,与前人[10-12]的研究基本一致。另外研究表明,不同水生植物对水体中各水质指标的去除率有明显差别。

(1) 对 TN 去除效果方面,综合各浓度梯度 4 种水生植物与空白对照去除率,对供试水体中 TN 含量去除效果较好的有千屈菜、石菖蒲和泽泻。千屈菜对 TN 的去除率较高,这与元文革等[13]研究的结果相同,石菖蒲对 TN 的去除率较高,这与何池全等[14]研究的结果一致。而张之浩[15]研究结果显示金鱼藻的去 TN 较好,与本次研究有一定的差异,可能是由于试验设置的供试水体浓度不一致有关;

(2) 对 TP 去除效果方面,综合各浓度梯度 4 种水生植物与空白对照去除率,对于高、中浓度水体,石菖蒲和千屈菜去除效果较好,低浓度的水体则仅有千屈菜的去除效果良好,温奋翔等[16]研究结果也表明千屈菜去除 TP 能力效果显著($p<0.001$),与本研究结果一致,可为遭受不同等级污染的湖泊治理提供一定的科学依据;

(3) 对 NH_3-N 去除效果方面,综合各浓度梯度 4 种水生植物与空白对照去除率,对供试水体中 NH_3-N 含量去除效果较好的为石菖蒲和金鱼藻。石菖蒲对 NH_3-N 去除效果较好与何娜[17]等研究结果一致;

(4) 对 COD 去除效果方面,综合各浓度梯度 4 种水生植物与空白对照去除率,4 种水生植物对供试水体中 COD 含量去除效果均较好,只是在低浓度时,千屈菜的去除效果相对其他 3 种水生植物较差,但总体来说对 COD 含量去除良好;

(5) 在试验后期,水体中各污染物指标均有所反弹,可能是由于水生植物部分根系开始腐烂导致的二次污染[9]。

可根据试验的结果与水生植物的生活型、生长特性以及水生植物间生长竞争关系进一步合理的搭配水生植物的组合配置,结合焦岗湖各个入湖口的污染状况,在焦岗湖各个入湖口以人工浮床[18]、人工湿地[19]和净化塘等方式种植上搭配好的植物组合,期望能够达到更好地对焦岗湖水质综合净化效果,也能为同类型其他湖泊提供借鉴和参考。

本研究是在静水条件下通过对供试水体中污染物含量的检测了解各水生植物对各污染物的去除效果,可能和自然条件下水生植物净化水质效果有所差

异。因为自然条件下水体底泥吸附以及微生物降解等作用也会对水体中污染物去除起一定效果，而且由于水生植物在水桶内生长范围受限制，导致生物量增加不明显，也会引起试验效果的差异性[20]。虽然本研究的结果具有一定的局限性，但仍对水生植物的筛选具有一定的参考作用。

5 结 论

(1) 4 种水生植物对各种污染物的去除效果随着时间的增长而不断变化；

(2) 4 种水生植物均对污染物有不同程度的去除效果，千屈菜和泽泻对 TN 的去除效果最好；千屈菜对 TP 的去除效果最佳；石菖蒲和金鱼藻对 NH_3-N 去除效果良好；而对于 COD，4 种水生植物均有较为不错的去除效果；

(3) 相同水生植物在不同污染物浓度梯度下，表现的水体净化效果不大一致，如石菖蒲对高、中浓度 TP 去除效果较好，对低浓度 TP 去除效果一般。

[参 考 文 献]

[1] 王变，陈飘雪，韦绪好，等. 淮河流域焦岗湖水质参数时空变化及影响因素[J]. 湖泊科学，2016，28(3)：520-527.

[2] 新华网安徽. 焦岗湖水质严重恶化安徽环保厅实施涉水项目区域环评限批[EB/OL]. (2018-07-17)[2018-10-21]. http://life.hefei.cc/2018/0717/028111889.Shtml.

[3] Zhang Tingting, Wang Lilong, He Zongxiang, et al. Growth inhibition and biochemical changes of cyanobacteria induced by emergent macrophyte *Thalia dealbata* roots [J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2011, 39(2)：88-94.

[4] 田如男，孙欣欣，魏勇. 不同类型水生植物群落对铜绿微囊藻的化感作用[J]. 生态环境学报，2010，19(9)：2149-2154.

[5] Ciurli A, Zuccarini P, Alpi A. Growth and nutrient absorption of two submerged aquatic macrophytes in mesocosms, for reinsertion in a eutrophicated shallow lake [J]. Wetlands Ecology & Management, 2009, 17(2)：107-115

.[6] Lu Qin, He Zhenli, Graetz D A, et al. Phytoremediation to remove nutrients and improve eutrophic stormwaters using water lettuce(*Pistia stratiotes* L.)[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2010, 17(1)：84-96.

[7] 施思. 水生植物净化不同浓度梯度污水能力试验研究[D]. 浙江 杭州：浙江农林大学，2017.

[8] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法. 4 版[M]. 北京：中国环境科学出版社，2002.

[9] 唐金艳，曹培培，徐驰，等. 水生植物腐烂分解对水质的影响[J]. 应用生态学报，2013，24(1)：83-89.

[10] 黄鹏，张丹丹，秦松岩. 挺水植物浮床对再生水补水景观水体的修复[J]. 环境科学与技术，2015，38(S2)：140-144.

[11] 吴诗杰，陈慧娟，许小桃，等. 美人蕉、鸢尾、黄菖蒲和千屈菜对富营养化水体净化效果研究[J]. 安徽大学学报：自然科学版，2016，40(1)：98-108.

[12] 刘晓波，高奇英，朱文君，等. 苦草与金鱼藻对水体污染物的去除效果[J]. 给水排水，2018，54(S2)：82-88.

[13] 元文革，余新晓. 滦河上游 4 种水生植物的水质净化研究[J]. 环境科学与技术，2018，41(1)：109-114.

[14] 何池全，叶居新. 石菖蒲净化富营养化水体的研究[J]. 南昌大学学报：理科版，1999(1)：73-76.

[15] 张之浩，李威，吴晓芙. 6 种沉水植物对富营养化水体化感抑藻效果研究[J]. 湘潭大学自然科学学报，2017，39(2)：55-60.

[16] 温奋翔，王兵，肖波，等. 北方景观水体中生态浮床的植物筛选与水质净化效果[J]. 环境工程学报，2015，9(12)：5881-5886.

[17] 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.

[18] 李威，司马小峰，陈晓国，等. 人工浮床对汾江河水质净化的研究[J]. 环境工程学报，2012，6(11)：4041-4046.

[19] 黄雅娴. 人工湿地处理景观水体富营养化的研究进展[C]//《环境工程》编委会，工业建筑杂志社有限公司. 《环境工程》2018 年全国学术年会论文集：下册，2018.

[20] 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.