

城市中水再生利用研究

马洁, 曹永哲, 康树珍, 于志宝 (天津市格瑞花苗木经营有限公司, 天津 300000)

摘要 [目的] 探索天津市中水再生利用的有效途径。[方法] 对高尔夫球场的湖泊、环沟场的中水进行了自然净化试验, 并在室内水族箱中进行了人工控制试验。[结果] 随着中水在蓄水池、环沟到东湖的逐级净化, 氨氮由 1.67 mg/L 下降至 1.38 mg/L, 硝酸态氮由 9.43 mg/L 下降至 4.19 mg/L, 亚硝酸态氮由 0.18 mg/L 下降至 0.07 mg/L, 无机氮由 11.28 mg/L 下降至 5.68 mg/L, 总磷由 2.36 mg/L 下降至 1.93 mg/L, 磷酸盐磷由 0.51 mg/L 下降至 0.33 mg/L; 浮游植物由 5.80×10^6 个/L 上升到 7.98×10^6 个/L, 浮游动物由 0.64 个/L 上升到 0.82 个/L, 细菌由 6.73×10^6 个/L 上升到 3.79×10^7 个/L。对无机氮的去除效果为: 东湖 > 环沟 2 > 环沟 1 > 西湖, 对总磷的去除效果为: 东湖 > 西湖 > 环沟 1、环沟 2, 对磷酸盐的去除效果为: 西湖 > 东湖 > 环沟 2 > 环沟 1, 对 COD 的去除效果为: 环沟 2 > 环沟 1 > 东湖 > 西湖。[结论] 净化后中水的水质指标达到了“景观环境用水(河道类)的再生水水质标准”。

关键词 再生利用; 氨氮; 硝酸态氮; 浮游植物; 净化

中图分类号 X703 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2009)06-02686-04

Experimental Study on the Recycling of Reclaimed Water in Cities

MA Jie et al (Tianjin Geruihua Management of Nursery Stock Co., Ltd, Tianjin 300000)

Abstract [Objective] The aim was to explore the effective approach of recycling reclaimed water in Tianjin City. [Method] The natural clarification experiment was performed on the reclaimed water of the lakes and ring ditch fields in golf course and the artificial control experiment was performed in indoor aquarium. [Result] As the reclaimed water was clarified gradually through reservoir, ring ditch and east lake, the ammonia nitrogen was reduced from 1.67 mg/L to 1.38 mg/L, the nitrate nitrogen was reduced from 9.43 mg/L to 4.19 mg/L, the nitrite nitrogen was reduced from 0.18 mg/L to 0.07 mg/L, the inorganic nitrogen was reduced from 11.28 mg/L to 5.68 mg/L, the total phosphorous was reduced from 2.36 mg/L to 1.93 mg/L and the phosphate phosphorous was reduced from 0.51 mg/L to 0.33 mg/L; the amount of phytoplankton was increased from 5.80×10^6 /L to 7.98×10^6 /L, the amount of zooplankton was increased from 0.64 /L to 0.82 /L and the amount of bacteria was increased from 6.73×10^6 /L to 3.79×10^7 /L. The removal effects on inorganic nitrogen were as follows: east lake > ring ditch 2 > ring ditch 1 > west lake, that on total phosphorous were as follows: east lake > west lake > ring ditch 1 and 2, that on phosphate were as follows: west lake > east lake > ring ditch 2 > ring ditch 1 and that on COD were as follows: ring ditch 2 > ring ditch 1 > east lake > west lake. [Conclusion] The indices of water quality of clarified reclaimed water reached the water quality standard of recycled water of water for scenic environment use (watercourse).

Key words Recycling; Ammonia nitrogen; Nitrate nitrogen; Phytoplankton; Clarification

国际上“中水”指的是城市污水经处理设施深度净化处理后的水(包括污水处理厂经二级处理再进行深化处理后的水和大型建筑物、生活社区的洗浴水、洗菜水等经集中处理后的水)的统称。在我国, 建设部 1995 年发布的《城市中水设施暂行办法》第二条规定: 中水是指部分生活优质杂排水经处理净化后, 达到《生活杂用水水质标准》, 可以在一定范围内重复利用的非饮用水^[1]。中水回用的处理技术按其机理可分为物理化学法、生物化学法和物化生化组合法等^[2]。目前, 在污水处理中多采用生物化学法。为了探索天津市中水再生利用的有效途径, 笔者以采用生物学技术原理为主, 利用该市河西区园林局高尔夫球场的现有湖泊、环沟(水道)条件对该场的中水进行了自然净化试验观察, 并在室内水族箱人工控制试验条件下, 采用不同生物材料对中水进行了再生处理试验研究。

1 材料与方法

1.1 中水自然净化再生试验

1.1.1 试验条件。 试验在天津市河西区园林局高尔夫球训练场进行。该场有东湖、环沟、中水蓄水池(西湖)的人工景观建筑。中水蓄水池约圆形, 面积约 100 m², 深 3.5 m, 位于该场西南侧。东湖则位于该场东部, 面积约 2 000 m², 深 2.0 m, 环湖有水生植物莲藕、芦苇、菹草、菖蒲等。中水蓄水池与东湖之间有环沟水道相连, 环沟长约 180.0 m, 深 3.0 m, 宽约 5.0 m。中水蓄水池与水道环沟之间有一堵隔水墙, 中水水

位过高时隔水墙常被淹没。隔水墙的下方位于中水蓄水池的一侧有一中水出水口, 蓄入的中水可由中水蓄水池沿环沟水道流入东湖。东湖水体为整个高尔夫球场草坪浇灌用水。

1.1.2 采样点设置。 高尔夫球训练场中水流经途径及采样点设置示意图见图 1。试验共设 4 个采样点, 分别为中水蓄水池、环沟 1、环沟 2、东湖。

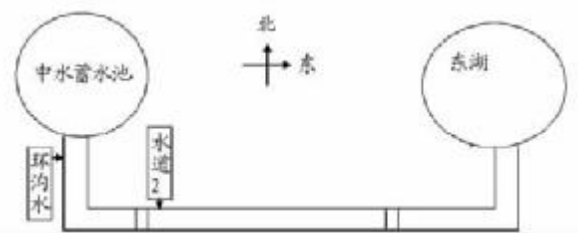


图 1 高尔夫球场中水流经及采样点示意

Fig. 1 Diagram of the different sampling sites of medium water in golf course

1.2 人工湖净化试验

1.2.1 试验材料。 水芹菜 (*Oenanthe javanica*)、凤眼莲 (*Eichhornia crassipes*)。水芹菜为连根植株, 为除去老枝后的嫩芽, 平均株高 160 cm; 凤眼莲为无病健壮植株, 平均株高 18 cm。浮游植物: 螺旋藻 (*Spirulina*)、颤藻 (*Oscillatoria*)。白鲢鱼 (*Hypophthalmichthys molitrix*) 种, 取自西青区南河镇陈台村, 体长 6.5 cm。充气泵, 由广东海利集团有限公司生产, 功率 135 W。试验水族箱由天津市水产养殖病害防治中心生态毒理室提供, 每个箱容积 100 L。试验用中水, 取自洞庭路街心公园中水站。

作者简介 马洁 (1980 -), 女, 天津人, 助理工程师, 从事园林方面的研究。

收稿日期 2009-01-09

1.2.2 试验方法。试验在天津市水产养殖病害防治中心生态毒理室水族箱中进行。试验分 6 组, 每组分别加入不同的生物材料, 1 组: 水芹菜。选用 1.5 cm 厚的泡沫为水芹菜的载体, 按株距 5 cm 打孔, 把水芹菜插入孔中, 将扦插好的水芹菜的泡沫板放入 1 号水族箱中。每箱水芹菜用量 0.4 kg; 2 组: 凤眼莲。将每株凤眼莲直接放入 2 号箱, 每箱凤眼莲用量 0.4 kg; 3 组: 藻类。将浮游植物藻液直接加入 3 号箱中, 使藻类密度为 5.6×10^6 个/L; 4 组: 鱼类净化 (凤眼莲、藻类及白鲢鱼)。将 5 尾白鲢鱼种 (平均体长 5 cm)、凤眼莲、藻类 (投放量均同上) 同时放入 4 号箱; 5 组: 曝气。将 4 个气石放入 5 号箱中连续充气, 充气量设定为 10.4 L/min。6 组为对照组。只加水 60 L, 静置, 不放任何处理材料。

试验期间对各试验组水质指标及生物指标进行监测, 每周测定 1 次, 共监测 3 次, 以观察各组试验材料对中水的净化处理效果。试验时间 2007 年 9 月 16 日至 10 月 10 日。

1.3 测定指标和方法

1.3.1 测定指标。①理化指标。物理性质: 水温、透明度

(cm)。化学性质: pH 值、溶解氧 (D. O, mg/L)、氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$, mg/L)、亚硝酸盐氮 ($\text{NO}_2^- - \text{N}$, mg/L)、硝酸盐氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$, mg/L)、无机氮 (mg/L)、磷酸盐 ($\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$, mg/L)、总磷 (mg/L)、有机物耗氧量 (COD, mg/L)。②生物指标。浮游植物: 浮游植物数量 (万个/L)、浮游植物量 (g/L)、浮游植物组成 (%)。细菌总数 (个/L)。

1.3.2 测定方法。水体理化、生物指标测定采用常规方法进行, 有机物耗氧量 (COD) 测定采用碱性高锰酸钾法进行。

2 结果与分析

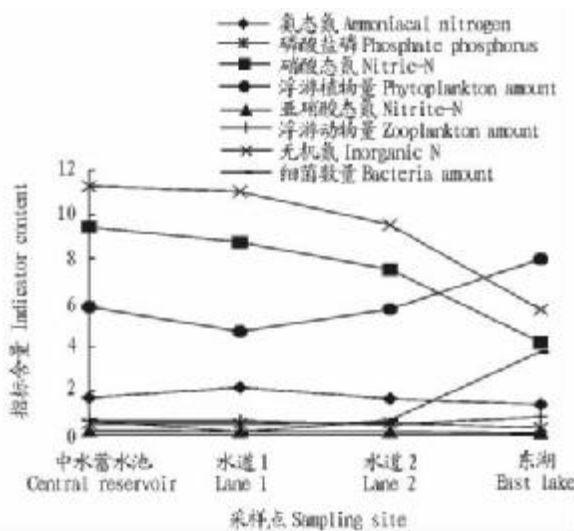
2.1 中水自然净化再生试验

2.1.1 采样点中水指标监测统计结果与分析。天津市河西区园林局高尔夫球训练场中水在蓄水池 (西湖)、环沟水道、东湖现场取样测定工作从 7 月 10 日开始, 至 8 月 7 日结束。试验进行 28 d, 采样 5 次。监测结果表明 (表 1、图 2): 随着中水在蓄水池、环沟水道到东湖的逐级净化, 氨氮由 1.67 mg/L 下降至 1.38 mg/L; 硝酸态氮由 9.43 mg/L 下降至 4.19 mg/L; 亚硝酸态氮由 0.18 mg/L 下降至 0.07 mg/L; 无机氮由

表 1 人工湖各采样点测定结果统计

Table 1 Result analysis on the medium water of different sampling sites in artificial lake

采样点 Sampling sites	透明度//cm Transparency	温度// $^{\circ}\text{C}$ Temperature	pH	D. O mg/L	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ mg/L	$\text{NO}_2^- - \text{N}$ mg/L	$\text{NO}_3^- - \text{N}$ mg/L	无机氮 mg/L Inorganic N	总磷 mg/L Total P	$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ mg/L	COD mg/L	浮游植物量 $\times 10^6$ 个/L Phytoplankton amount	浮游动物量 //个/L Zooplankton amount	细菌数量 $\times 10^7$ 个/L Bacteria amount
中水蓄水池	31	28.4	8.3	9.6	1.67	9.43	0.18	11.28	2.36	0.51	10.30	5.80	0.64	0.67
水道 1	21	28.0	7.9	7.6	2.15	8.73	0.16	11.04	1.10	0.52	9.45	4.69	0.65	0.12
水道 2	34	26.0	7.2	2.2	1.64	7.51	0.15	9.54	1.39	0.55	10.80	5.70	0.46	0.67
东湖	28	28.4	8.4	6.7	1.38	4.19	0.07	5.68	1.93	0.33	11.30	7.98	0.82	3.79



注: 各项指标单位同表 1。

Note: The unit for each indicator is as same as in table 1.

图 2 人工湖净化试验期间各点监测指标变化趋势

Fig. 2 Change tendency of water purification test in different sampling sites

11.28 mg/L 下降至 5.68 mg/L; 总磷由 2.36 mg/L 下降至 1.93 mg/L; 磷酸盐磷由 0.51 mg/L 下降至 0.33 mg/L。浮游植物由 5.80×10^6 个/L 上升至 7.98×10^6 个/L; 浮游动物由 0.64 个/L 上升至 0.82 个/L; 细菌数由 6.73×10^6 个/L 上升至 3.79×10^7 个/L。

综上所述, 在中水自然净化再生试验中, 随着中水在蓄

水池、环沟水道到东湖的逐级净化, 水体污染指标呈下降趋势, 生物指标呈上升趋势。

2.1.2 各采样点水质指标监测结果与分析。人工湖各监测点无机氮、磷酸盐磷、总磷、COD 的变化情况如图 3~6 所示。由图 3~6 可见:

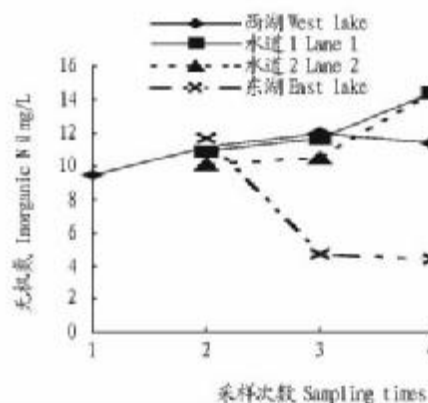


图 3 人工湖净化中水试验期间无机氮变化情况

Fig. 3 Change tendency of inorganic nitrogen in water purification test in artificial lake

(1) 中水蓄水池: 无机氮由 9.45 mg/L 下降到 9.44 mg/L, 去除率为 0.1%; 磷酸盐磷由 0.62 mg/L 下降到 0.32 mg/L, 去除率为 48.4%; 总磷由 6.5 mg/L 下降到 1.8 mg/L, 去除率为 72.3%; COD 由 12.1 mg/L 下降到 10.0 mg/L, 去除率为 17.4%。

(2) 环沟 1: 无机氮由 10.89 mg/L 下降到 7.13 mg/L, 去

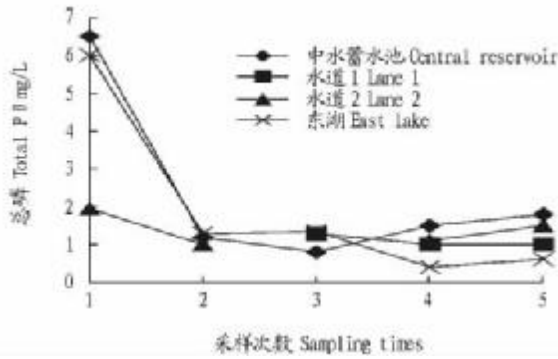


图4 人工湖净化中水试验总磷变化情况

Fig.4 Change tendency of total phosphorus in water purification test in artificial lake

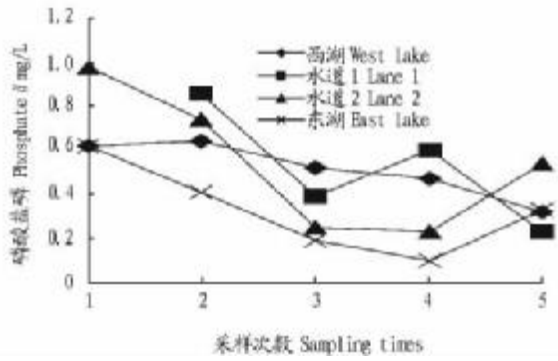


图5 人工湖净化中水磷酸盐变化情况

Fig.5 Change tendency of phosphate in water purification test in artificial lake

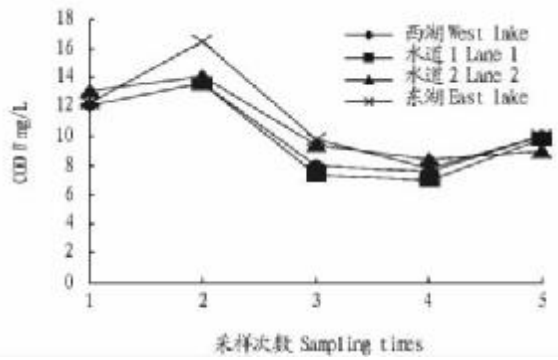


图6 人工湖净化中水试验 COD 变化情况

Fig.6 Change tendency of COD in water purification test in artificial lake

除率为 34.5%；磷酸盐磷由 0.39 mg/L 下降到 0.23 mg/L，去除率为 41.0%；总磷由 1.3 mg/L 下降到 1.0 mg/L，去除率为 23.1%；COD 由 13.6 mg/L 下降到 9.8 mg/L，去除率为 27.9%。

(3) 环沟 2: 无机氮由 10.11 mg/L 下降到 3.16 mg/L，去除率为 68.7%；磷酸盐磷由 0.98 mg/L 下降到 0.54 mg/L，去除率为 44.9%；总磷由 1.95 mg/L 下降到 1.50 mg/L，去除率为 23.1%；COD 由 13.1 mg/L 下降到 9.0 mg/L，去除率为 31.3%。

(4) 东湖: 无机氮由 11.65 mg/L 下降到 1.97 mg/L，去除率为 83.1%；磷酸盐磷由 1.3 mg/L 下降到 1.0 mg/L，去除率为 46.8%；总磷由 6.0 mg/L 下降到 0.6 mg/L，去除率为

90.0%；COD 由 12.3 mg/L 下降到 10.0 mg/L，去除率为 18.4%。

试验期间各监测点无机氮、总磷、磷酸盐磷与 COD 呈下降趋势；对无机氮的去除效果：东湖 > 环沟 2 > 环沟 1 > 西湖；对总磷的去除效果：东湖 > 西湖 > 环沟 1、环沟 2；对磷酸盐的去除效果：西湖 > 东湖 > 环沟 2 > 环沟 1；对 COD 的去除效果：水道 2 > 水道 1 > 东湖 > 西湖。

以上表明，中水自然净化期间，各监测点的中水水质污染指标均呈下降趋势。

2.1.3 各采样点生物指标监测结果与分析。由表 1、图 2 可看出，随着水体氮、磷、有机物等含量的下降，浮游植物、浮游动物、细菌数量有下降的趋势。氮、磷、有机物为上述生物的直接或间接营养物质，因此，随着水体对上述物质净化程度的提高，水体生物量逐步下降。

2.1.4 结论。中华人民共和国城市污水再生利用景观环境用水水质国家标准 (GB/T18921 - 2002) 中“景观环境用水 (河道类) 的再生水水质标准”：pH 值 6 ~ 9，溶解氧 ≥ 1.5 mg/L，总磷 ≤ 1.0 mg/L，氨氮 ≤ 5 mg/L。

中水自然净化前水质指标：pH 值 8.5，溶解氧 5.3 mg/L，总磷 6.50 mg/L，氨氮 0.70 mg/L，不符合“景观环境用水 (河道类) 的再生水水质标准”。经过 28 d 的逐级净化，水质指标：pH 值 7.9，溶解氧 9.1 mg/L，总磷 0.60 mg/L，氨氮 0.81 mg/L，达到“景观环境用水 (河道类) 的再生水水质标准”

2.2 人工控制条件下中水净化试验 各试验组对中水的无机氮 (氨态氮、硝酸态氮、亚硝酸态氮)、总磷、磷酸盐磷、COD 均有不同程度的净化效果 (图 7 ~ 10)。由图 7 ~ 10 可见：

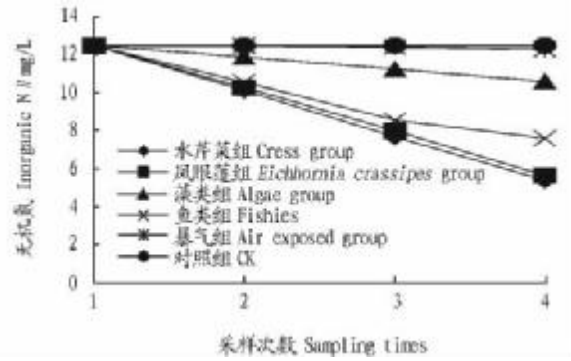


图7 人工控制条件下中水净化试验无机氮变化情况

Fig.7 Change tendency of inorganic nitrogen in Water Purification Test in the artificial controlled method

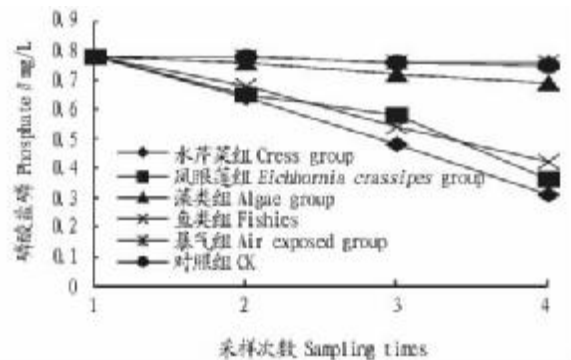


图8 人工控制条件下中水净化试验磷酸盐变化情况

Fig.8 Change tendency of phosphate in Water Purification Test in the artificial controlled method

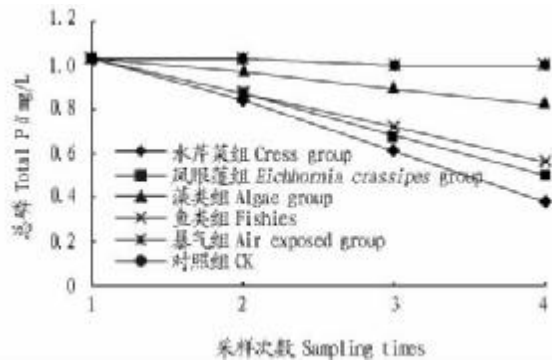


图9 人工控制条件下中水净化试验总磷变化情况

Fig.9 Change tendency of total phosphorus in water purification test in the artificial controlled method

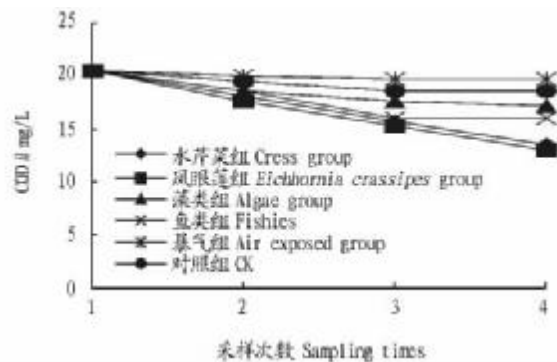


图10 人工控制条件下中水净化试验 COD 变化情况

Fig.10 Change tendency of COD in water purification test in the artificial controlled method

(1) 试验期间水芹菜净化组: 无机氮由 12.50 mg/L 下降到 5.38 mg/L, 去除率为 57.0%; 磷酸盐磷由 0.78 mg/L 下降到 0.31 mg/L, 去除率为 60.3%; 总磷由 1.03 mg/L 下降到 0.38 mg/L, 去除率为 63.1%; COD 由 20.5 mg/L 下降到 13.5 mg/L, 去除率为 34.1%。

(2) 凤眼莲净化组: 无机氮由 12.50 mg/L 下降到 5.62 mg/L, 去除率为 55.0%; 磷酸盐磷由 0.78 mg/L 下降到 0.36 mg/L, 去除率为 53.8%; 总磷由 1.03 mg/L 下降到 0.50 mg/L, 去除率为 51.5%; COD 由 20.5 mg/L 下降到 13.0 mg/L, 去除率为 36.6%。

(3) 藻类净化组: 无机氮由 12.50 mg/L 下降到 10.61 mg/L, 去除率为 15.1%; 磷酸盐磷由 0.78 mg/L 下降到 0.69 mg/L, 去除率为 11.59%; 总磷由 1.03 mg/L 下降到 0.82 mg/L, 去除率为 20.4%; COD 由 20.5 mg/L 下降到 17.2 mg/L, 去除率为 16.1%。

(4) 鱼类组: 无机氮由 12.50 mg/L 下降到 7.57 mg/L, 去除率为 39.4%; 磷酸盐磷由 0.78 mg/L 下降到 0.42 mg/L, 去除率为 46.2%; 总磷由 1.03 mg/L 下降到 0.56 mg/L, 去除率为 45.6%; COD 由 20.5 mg/L 下降到 16.0 mg/L, 去除率为 22.0%。

(5) 暴气净化组: 无机氮由 12.50 mg/L 下降到 12.28 mg/L, 去除率为 1.8%; 磷酸盐磷由 0.78 mg/L 下降到 0.76 mg/L, 去除率为 2.5%; 总磷由 1.03 mg/L 下降到 1.00 mg/L, 去除率为 2.9%; COD 由 20.5 mg/L 下降到 19.70 mg/L, 去除率为 3.9%。

(6) 对照组: 无机氮由 12.50 mg/L 下降到 12.48 mg/L, 去除率为 0.2%; 磷酸盐磷由 0.78 mg/L 下降到 0.75 mg/L, 去除率为 3.8%; 总磷由 1.03 mg/L 下降到 1.00 mg/L, 去除率为 2.9%; COD 由 20.5 mg/L 下降到 18.6 mg/L, 去除率为 9.3%。

图 7~10 显示, 试验期间各试验组无机氮、磷酸盐、总磷及 COD 呈下降趋势; 各试验组对无机氮净化效果: 水芹菜组 > 凤眼莲组 > 鱼类组 > 藻类组 > 暴气组 > 对照组; 对磷酸盐净化效果: 水芹菜组 > 凤眼莲组 > 鱼类组 > 藻类组 > 对照组 > 暴气组; 对总磷净化效果: 水芹菜组 > 凤眼莲组 > 鱼类组 > 藻类组 > 暴气组、对照组; 对 COD 净化效果: 凤眼莲组 > 水芹菜组 > 鱼类组 > 藻类组 > 对照组 > 暴气组。

据中华人民共和国城市污水再生利用景观环境用水水质国家标准 (GB/T18921-2002), 人工控制条件下中水净化试验净化前水质指标: pH 值 7.5, 溶解氧 7.6 mg/L, 总磷 1.03 mg/L, 氨氮 6.18 mg/L, 不符合“景观环境用水(河道类)的再生水水质标准”。

经过 21 d 的净化, 水芹菜组水质指标: pH 值 7.3, 溶解氧 8.0 mg/L, 总磷 0.38 mg/L, 氨氮 1.66 mg/L; 凤眼莲组水质指标: pH 值 7.2, 溶解氧 7.6 mg/L, 总磷 0.50 mg/L, 氨氮 1.67 mg/L; 鱼类组水质指标: pH 值 7.0, 溶解氧 7.2 mg/L, 总磷 0.56 mg/L, 氨氮 2.47 mg/L; 藻类组水质指标: pH 值 7.6, 溶解氧 8.2 mg/L, 总磷 0.82 mg/L, 氨氮 4.83 mg/L; 上述各组水质指标均达到“景观环境用水(河道类)的再生水水质标准”。

3 讨论

(1) 夏秋季中水监测结果表明, 天津地区中水污染指标有随季节变化的趋势, 其中秋季较夏季略高。

(2) 净化前未达标的中水经自然净化和人工室内净化均可达到景观标准 (GB/T18921-2002) 中“景观环境用水(河道类)的再生水水质标准”。

(3) 从总体净化结果来看, 自然净化和人工室内净化效果相近, 表明了水体净化的生物作用和一般规律。

(4) 人工控制条件下中水净化试验结果表明, 水生维管束植物、浮游植物、水生动物、暴气对中水的无机氮、磷酸盐磷、总磷、COD 均有不同程度的净化作用。水生维管束植物、浮游植物可直接利用水中氮、磷, 水生动物起间接净化作用。从净化效果来看, 水生维管束植物净水效果较好。水生维管束植物有易打捞的优点, 通过打捞可将水体中氮、磷等污染物从水体带出, 因此在受污染水体中种植水生维管束植物是净化中水的良好手段。向水体中投放适量草鱼, 使其摄食水生维管束植物, 可达到间接净化水质的目的。白鲢通过滤食浮游植物、有机碎屑可间接去除水中碳、氮、磷, 从而达到净水目的。在人工控制条件下的中水净化试验表明, 白鲢对中水具有一定的净化作用, 如果将白鲢放入露天中水池中, 对水体净水作用将更好。各组试验中, 暴气组净水效果较差。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 城市污水再生利用景观环境用水水质 GB/T18921-2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [2] 韩潇源, 毕继胜, 宋志文. 水生植物在水污染控制中的应用与发展 [J]. 青岛理工大学学报, 2005, 26 (6): 88-90.