

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdcqk.2020.0035

郭中方,潘成忠,刘春雷,等.再生水补给条件下河流水质及河岸渗滤水质演变试验[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(2):126-134. GUO Z F, PAN C Z, LIU C L, et al. Experimental study on the evolution of river water quality and riverbank percolation water quality under reclaimed water supply[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020,18(2):126-134. (in Chinese)

再生水补给条件下河流水质及河岸渗滤水质演变试验

郭中方¹,潘成忠^{1,2},刘春雷¹,汪啸宇¹

(1.北京师范大学水科学研究院,北京100875;2.城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室,北京100875)

摘要:由于人类活动影响加剧,永定河呈现水量锐减以及水环境持续恶化的趋势,生态环境遭到严重破坏。在此背景下,永定河生态重建工程亟待开展,生态补水方式急需确定。为探究多水源生态补水方式对河流水质及河岸渗滤水质演变的影响,开展模拟试验,探究流速、温度和土壤渗滤对再生水补水水质的影响。研究表明:流速增加有利于污染物降解;与高温相比,低温条件下的污染物降解能力明显优于高温,表明低温在一定程度上有利于再生水补水水质的改善;河岸渗滤水某些水质指标有一定程度的好转,但由于河底沉积物的聚集吸附作用使得通过土壤的水体轻微富营养化。最终结果表明,流速对于再生水补水水质指标影响最大。

关键词:水质指标;模拟河道;渗漏水;流速;温度

中图分类号:TV213.4;X522 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Experimental study on the evolution of river water quality and riverbank percolation water quality under reclaimed water supply

GUO Zhongfang¹, PAN Chengzhong^{1,2}, LIU Chunlei¹, WANG Xiaoyu¹

(1. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Spongy City Technology, Beijing 100875, China)

Abstract: In recent years, Yongding River exhibited a sharp decrease in water quantity, a trend of continuous deterioration of the water environment, and serious damage to ecological environment due to the intensified influence of human activities. Under this background, there is an urgent need of an ecological reconstruction project and the determination of ecological water replenishment mode in the Yongding River. In order to explore the influence of multi-water source ecological replenishment mode for the evolution of river water quality and riverbank percolation water quality, this study conducted a simulation experiment to explore the influence of flow rate, temperature and soil percolation on reclaimed water replenishment water quality. The results showed that the increase in flow velocity was beneficial to the degradation of pollutants. Compared with high temperature, the degradation capacity of pollutants at low temperature was significantly better than that at high temperature, indicating that low temperature was beneficial to the improvement of reclaimed water quality to some extent. Although water quality indexes of riverbank leachate improved to some extent, but the water passing through the soil was slightly eutrophication due to the aggregation and adsorption of river bottom sediments. The final results showed that the flow velocity had the greatest influence on the quality index of regenerated water.

收稿日期:2019-06-26 修回日期:2019-08-22 网络出版时间:2019-09-18

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190918.1317.002.html>

基金项目:国家水环境治理重大专项(2018ZX07101005-04);国家自然科学基金(41771305;41530858)

作者简介:郭中方(1995—),男,山西朔州人,主要从事河流生态保护方面研究。E-mail:919739012@qq.com

通信作者:潘成忠(1980—),男,江苏连云港人,副教授,主要从事流域水沙过程方面研究。E-mail:pancz@bnu.edu.cn

Key words: water quality; indicators; simulated river courses; seepage; velocity; temperature

现阶段再生水在城市河湖水体的补给中所占分量不容小觑,2006年北京的再生水用量为3.6亿 m^3 ,2015年达到9.5亿 m^3 ,到2020年预计达到12亿 m^3 ,有一多半的再生水将用于补充城市景观河湖水体^[1]。探究再生水与河道水混合后对于其自身水体调节能力有很大的意义,也成为当下再生水补水课题的研究重点^[2]。

王鹤立等^[3]从水体富营养化、自净等技术措施及其与二级处理相关性等方面进行了探讨;李昆^[4]分析了我国再生水相关法律法规建设与制定标准,并提出再生水工艺选择与可行经济性的相关建议。李锦秀等^[5]以三峡库区江段为例,探究水库建成后水流条件变化对 BOD_5 的降解速率影响。王雅钰等^[6]利用模拟河道分别使用曝气复氧、人工水力循环、渗滤净化技术对河道的几项水质指标进行了探究。国内外对河道水质指标与再生水补水水质指标定性研究较多,而一定再生水占比情景下的河道模拟试验较为少见^[7]。

本研究利用自主设计的模拟河道分别设置了三组控制条件的对比试验,探究土壤渗滤、流速以及水温对于水体指标的影响。而水体再生水比重参考汪啸宇等以永定河为研究对象,开展的探究不同再生水占比试验^[8],采用80%再生水与20%河道水的配比进行试验。该结论对永定河北京段的河流廊道修复与保护提供理论支持。

1 材料与方 法

1.1 试验装置及仪器

试验装置为自主设计的模拟河道,采用不锈钢材质打造,长6 m,底宽0.3 m,两侧河岸带宽0.6 m,边坡系数1.732 1。模拟河道进水口端设有管径3 cm、长5 cm的蜂窝状PVC稳流装置,起到稳定来水流向与流速,使水流顺直的作用。河道表面铺设隔热棉并放有卵石,保证模拟河道水温不致过高或过低的同时也提供了一定的糙度,使模拟河道与实际河道情况相近。模拟河道中部设有120 cm \times 20 cm \times 70 cm的河岸带模拟土柱,填装不同土壤以探究渗滤水的水质演变。试验装置平面图见图1。水质指标测定所用仪器及方法见表1。

1.2 供试水样及土样

试验所用再生水取自北京卢南污水运营有限公司,河道水和山峡段河岸土取自北京市门头沟区龙



图1 试验装置平面图

Fig. 1 Experimental device plan

表1 水质指标测定仪器及方法

Tab. 1 Water quality index measuring instrument and method

试验指标	测定方法
pH	PHscan10S 笔式 pH 计
溶解氧	溶解氧测定仪 DO200A
温度	EFG18AD00290 温湿度记录仪
氨氮	采用国标(GB/T 5750.5—2006)纳氏试剂法
硝氮	二磺酸酚比色法
亚硝氮	重氮化偶合比色法
总磷	钼酸铵分光光度法
COD	快速消解法 GDYS-201M 多参数水质分析仪
电导率	2265FS 便携式电导率测定仪

泉雾村忠良博物馆旁,下游沙质断流河岸土取自北京市大兴区中国石化永定加油站(左堤路)。

再生水与河道水初始水质状况见表2。

表2 再生水与河道水初始水质

Tab. 2 Reclaimed water and channel water initial quality

水样名称	再生水	河道水
pH	8.6	8.9
溶解氧/($mg \cdot L^{-1}$)	4.12	4.98
氨氮/($mg \cdot L^{-1}$)	0.36	0.03
硝氮/($mg \cdot L^{-1}$)	13.2	4.4
亚硝氮/($mg \cdot L^{-1}$)	0.03	0.03
总磷/($mg \cdot L^{-1}$)	0.09	0.01
COD/($mg \cdot L^{-1}$)	15	34
电导率/($ms \cdot cm^{-1}$)	1.04	0.86

1.3 试验内容

试验共分两组,分别为渗滤净化试验和人工水力循环试验。试验持续30 d,每组试验定期检测水温、pH、溶解氧、氨氮、硝氮、亚硝氮、总磷、COD、电导率水质指标,每个样品重复测量三次取平均值,防止试验监测结果出现偶然性误差。

1.3.1 渗滤净化试验

试验前将永定河山峡段河岸土和永定河下游沙

质断流河岸土烘干并分别填装于模拟河道两侧河岸带模拟土柱中,作为模拟实际河岸带的渗滤装置,设计渗滤流量 $Q=0.6 \text{ m}^3/\text{d}$,水流方向上进下出。由外部水泵对模拟河道进行水力循环,在渗滤装置下方收集渗滤水并检测。试验开始前,渗滤装置已试运行一段时间,渗滤水水质水量稳定后即开始运转。

1.3.2 人工水力循环试验

试验分别于 2018 年夏季 8 月 13 日与冬季 11 月 3 日进行两场,除温度外控制其他条件不变。试验通过外部水泵实现水体内部循环,通过控制水泵出水流量及出水口挡板高度控制河流流速,流速按照生态流速 0.60 m/s 率定。在进水口端设置有 $130 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 的稳流槽,起到均匀布水的作用,也可有效防止水面杂物干扰、紊流现象和滞留水区的产生。模拟河水在夏季与冬季均按照再生水与河道水 4:1 的比例进行配比。

同时设置空白对照试验在容积 30 L 水箱中按

照再生水与河道水 4:1 的配比开展静置水体模拟试验,同样定期检测水温、pH、溶解氧、氨氮、硝氮、亚硝氮、总磷、COD、电导率水质指标,探究流速对水质演变的影响。

每组试验均采用一天 24 h 的连续运行方式持续 30 d,氨氮、COD 夏季每日均有监测,冬季 6 d 监测 1 次,其余指标冬夏均有每日监测,每只样品都重复测量 3 次,取平均值,防止试验监测结果出现偶然性并减小误差。

2 结果与分析

2.1 土壤渗滤对再生水补水水质的影响

为保证试验数据的代表性,在渗滤净化试验进行的 35 d 中去掉试验初始运行的 3 d 与试验结尾河道水体严重冰冻的 2 d,将剩余 30 d 渗滤水和水力循环水的 COD、氨氮、溶解氧、硝氮、亚硝氮、总磷初始值与最终值对比并计算变化率,结果见表 3。

表 3 土壤渗滤组初始与最终水质指标值

Tab.3 Initial and final water quality index values of soil percolation group

项目	初始值/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	最大值/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	最小值/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	平均值/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	最终值/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	变化率/%	
COD	渗漏水	27.00	45.00	11.00	25.70	16.00	-33.33
	水力循环水	25.00	25.00	11.00	17.50	15.00	-40.00
氨氮	渗漏水	0.41	0.50	0.08	0.24	0.08	-80.49
	水力循环水	0.02	0.25	0.02	0.11	0.02	0.00
溶解氧	渗漏水	9.44	14.50	2.10	8.38	5.80	-38.56
	水力循环水	6.60	18.70	5.80	11.85	2.10	-68.18
硝氮	渗漏水	17.70	24.70	17.70	23.05	24.00	35.59
	水力循环水	16.60	25.70	16.60	21.63	25.70	54.82
亚硝氮	渗漏水	0.02	0.04	0.02	0.03	0.04	100.00
	水力循环水	0.20	0.20	0.05	0.08	0.10	-50.00
总磷	渗漏水	0.02	0.02	0	0.01	0	-100.00
	水力循环水	0.03	0.03	0	0.02	0	-100.00

由表 3 发现,在渗漏水组中 COD、溶解氧、氨氮和总磷质量浓度均有不同程度下降,但氨氮的变化最为明显。而硝氮与亚硝氮均有增长。在水力循环水组除硝氮以外其余指标均有消减,其中 COD 与溶解氧的降幅最为明显。

分别绘制渗滤水及水力循环水的不同水质指标在试验周期内的演变趋势图,见图 2。

COD 反映了水中受还原性物质污染的程度,该指标也是有机物相对含量的综合指标之一^[11]。由图 2(a)可知,试验过程中水力循环水和渗滤水的 COD 质量浓度均表现出随时间下降的趋势,但在 11 月 21 日水力循环水中的 COD 突增,一度达到 45 mg/L 已经劣于地表水环境质量标准 V 类水标

准,推测是由于气温下降导致该系统藻类与水生植物大量死亡,使得监测指标上升,在后续过程中又随时间推移渐渐下降,营养物质从水体逐步输送沉积在了河底,水质条件得到一定改善,考虑到试验条件劣于实际水体,认为该条件下化学需氧量波动在人为可控范围之内。而渗滤水水质虽与水力循环水有相同的波动,但幅度不明显,说明在一定程度上土壤渗漏作用对再生水补水水质质量有所改善。

溶解氧是水生系统中最为重要的水质指标之一,其关系到水体能否维持生态系统平衡^[9]。在自然条件下溶解氧浓度会出现较大的日变化,这是由水温的日变化以及藻类、水生植物光合作用和呼吸作用两种机制竞争引起^[10]。由图 2(b)可知,水力循

环水与渗漏水的溶解氧含量波动趋势基本一致,但后者高于前者,推测是由于接取渗漏水时缓缓滴入容器中从而增大了与空气接触面,使得渗漏水溶解氧偏高。在后期进一步探究试验中改进渗漏水采集

装置,避免其过多的接触空气,从而影响试验精度与结果。在试验后期 11 月 20 日气温骤降引起藻类与水生植物大面积生长受限和死亡,植物光合作用衰减使得溶解氧含量下降。

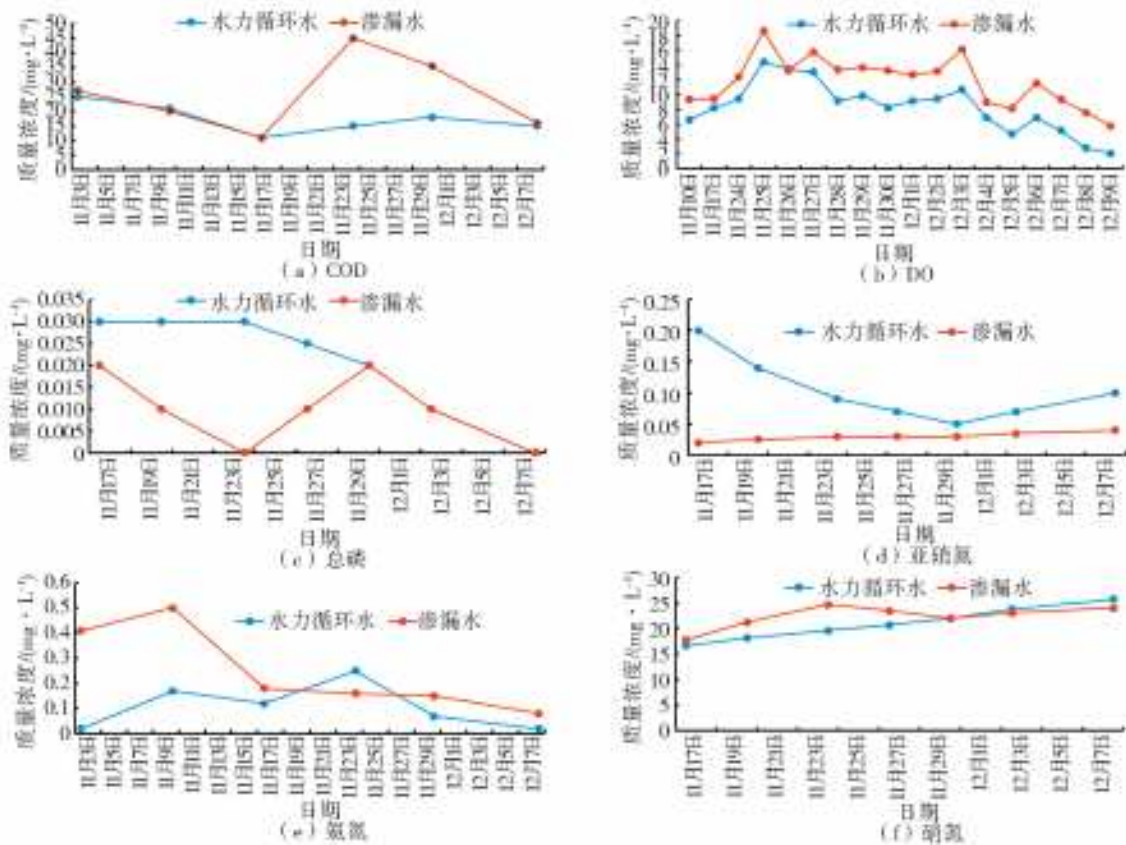


图 2 水力循环水与土壤渗滤水水质指标变化趋势

Fig. 2 Trend of water quality index of hydraulic circulating water and soil percolation water

磷是藻类、水生植物生长所需的重要营养物质之一,其溶解度小,而且能够强烈地吸附在悬浮固体上通过沉降而脱离水体^[12]。磷在本试验中主要是水体自带。由图 2(d)所示,水力循环水 TP 随时间呈现逐步下降的趋势且试验过程中测得磷酸盐质量浓度很低,可以忽略不计,因此推测水体中的磷以有机磷的方式存在。有机磷被藻类、水生植物新陈代谢所吸收和浮游动物对藻类的捕食而脱离系统存在于营养物质中^[13]。同时在试验后期 11 月末水体中溶解氧含量呈下降趋势,在好氧条件下有机磷中的溶解态磷会吸附在沉积颗粒上,这样悬浮沉积物和有机磷中吸附态磷的沉降提供了磷从水体到沉积床最重要的损耗机制,在厌氧条件下,吸附在沉积颗粒上的有机磷可以重新被溶解,进而为生物所用^[14]。这两种机制共同作用使得水体中 TP 质量浓度下降。而经过土壤渗滤过的水体指标中磷的质量浓度在极低的范围内波动,考虑到试验存在相对开放性,故推测土壤对磷有轻微过滤吸附作用。

氮对植物和动物组织的生产非常重要,有机物

的关键组成部分,主要用于动植物合成蛋白质^[15]。由图 2(d)、2(e)、2(f)可知,试验初期水力循环水氨氮质量浓度在小范围波动,硝氮呈现上升趋势,亚硝氮呈现下降趋势,这是因为试验开始时水生植物、藻类可以通过光合作用吸收氨与硝酸盐用于生长,但是由于吸收硝酸盐需要消耗较多的能量,因此,氨是其生长首选的氮形式^[16]。硝化作用是铵离子被氧化成为亚硝酸盐然后再被氧化成为硝酸盐的过程,亚硝酸盐不稳定,其通常是氮转化过程的一个中间产物^[17]。同时颗粒有机氮通过水解降解为溶解性有机氮(DON),进而 DON 通过矿化作用转变为氨。在试验后期由于藻类、水生植物的死亡释放溶解性有机营养物质和溶解性无机营养物质到水中,这样有机氮经过细菌的分解又成为氨氮^[18],使得氨氮含量在小范围内有所升高。同时溶解氧含量下降导致厌氧条件下第一阶段硝化反应过后第二阶段氧气不足而反应缓慢或停滞,使得亚硝氮的含量略有增加^[19]。经过土壤渗滤作用过后试验初期氨氮与硝氮含量高于水力循环指标,推测是土柱——沉积床

界面的氨氮、硝氮通量引起的^[20], 试验后期数据可表明土壤渗滤对硝氮亚硝氮质量浓度有轻微的改善作用, 氨氮的质量浓度高于水力循环水可能是由土壤中的矿化作用强于水体而产生^[21]。

2.2 流速对再生水补水水质指标的影响

为探究流速对再生水补水水体水质的影响, 将静置水与水力循环水的 COD、氨氮、DO、硝氮、亚硝氮、总磷初始值与最终值做比对并计算变化率, 结果见表 4。

表 4 静置水箱组初始与最终水质指标值

Tab. 4 Initial and final water quality index values of static water tanks

项目	初始值/(mg·L ⁻¹)	最大值/(mg·L ⁻¹)	最小值/(mg·L ⁻¹)	平均值/(mg·L ⁻¹)	最终值/(mg·L ⁻¹)	变化率/%	
COD	静置水	26.00	33.00	13.00	23.00	22.00	-15.38
	水力循环水	25.00	25.00	11.00	17.50	15.00	-40.00
氨氮	静置水	0.02	0.17	0.02	0.08	0.15	650.00
	水力循环水	0.02	0.25	0.02	0.11	0.02	0
溶解氧	静置水	10.50	11.70	1.30	7.76	1.30	-87.62
	水力循环水	9.44	18.70	5.80	11.85	5.80	-38.56
硝氮	静置水	11.90	15.00	11.90	13.56	14.40	21.01
	水力循环水	16.60	25.70	16.60	21.63	25.70	54.82
亚硝氮	静置水	0.17	0.17	0.03	0.07	0.04	-76.47
	水力循环水	0.20	0.20	0.05	0.10	0.10	-50.00
总磷	静置水	0.14	0.14	0.09	0.12	0.09	-35.71
	水力循环水	0.03	0.03	0.01	0.02	0	-100.00

由表 4 可知, 静置水的 COD、溶解氧、亚硝氮与总磷质量浓度有不同程度的下降, 其中溶解氧与亚硝氮下降最为明显, 氨氮和硝氮有一定的涨幅, 氨氮涨幅较突出。在水力循环水组除硝氮以外其余指标

均有消减, 其中 COD 与 DO 的降幅最为明显。

分别绘制静置水及水力循环水的不同水质指标在试验周期内的演变趋势图见图 3, 用以分析流速对水质的影响。

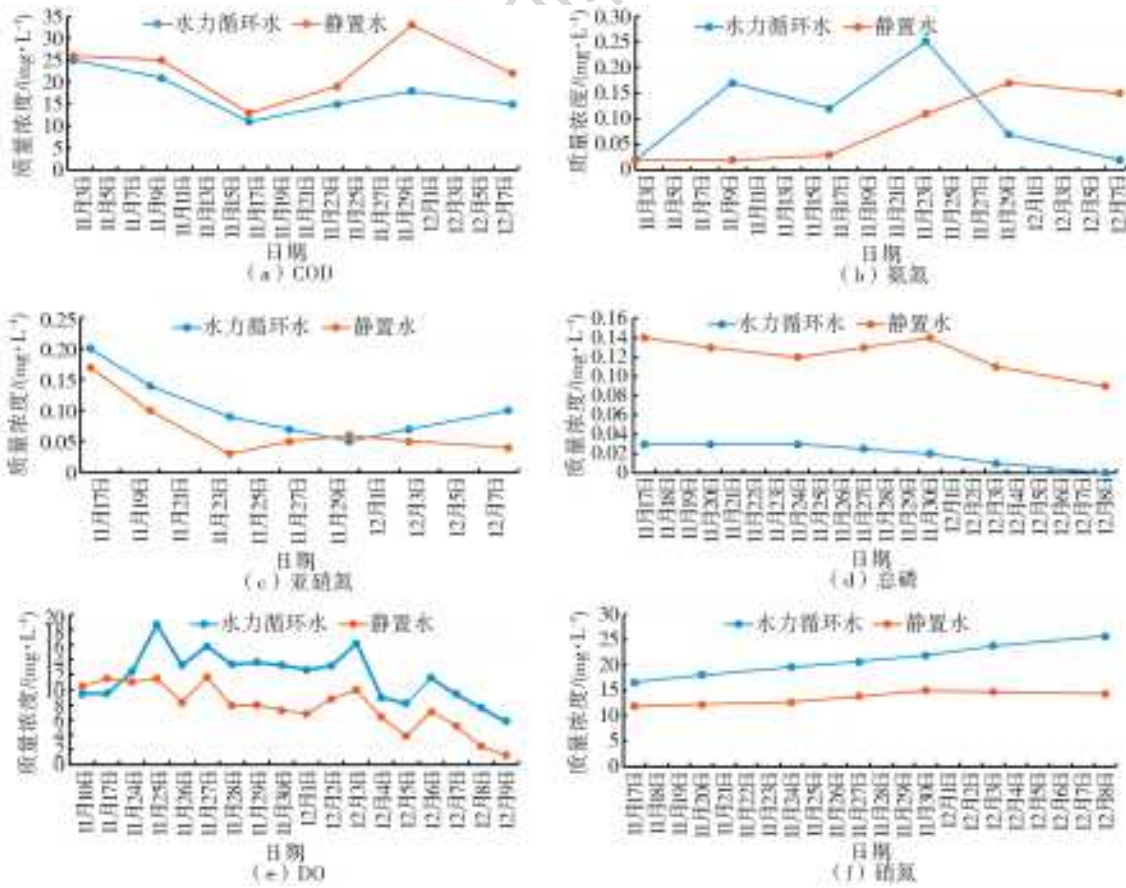


图 3 水力循环水与静置水水质指标变化趋势

Fig. 3 The trend of water quality index of hydraulic circulating water and standing water

化学需氧量可表示为受还原性污染物污染的程度,在静置水箱中水体生理生化反应较流动的水体缓慢而微弱,水质相对水力循环水较差。在 11 月 21 日由于降温导致的水生植物死亡,其有机质转化为污染物使水质恶化,在 12 月 1 日 COD 质量浓度一度达到 33 mg/L,已经劣于地表水环境质量标准 IV 类水标准^[22],说明静置的水箱自我调节能力较水力循环水的水差。

静置的水箱在试验初期氧气充足的情况下亚硝酸盐不稳定氧化为硝酸盐消耗溶解氧,其质量浓度呈现下降趋势。氨氮由于有机氮的矿化作用与藻类生长,质量浓度有所上升,水质有恶化倾向^[24]。而相比于水力循环的水质指标,流速较大对污染物有一定的降解作用,而流速较小则水质会富营养污染化。

两个系统中磷酸盐质量浓度监测值很低可忽略不计,而有机磷形态通常与生物体联系在一起^[23],

水箱中不存在水与土壤间的物质交换,磷的沉降与生物消耗较少,所以呈现出较高的稳定值,水力循环水中磷的含量随时间推移而降低,故认为流速较大时磷的降解作用较强。

静置的水箱由于较低的流动性其接触空气的面积与水量受限,大气复氧作用微弱,使其溶解氧含量虽与水力循环的水波动大体趋势一致,但总体相对流动的水体偏低,并且在 11 月底首先结冰从而与空气接触面被冰层覆盖,使得溶解氧含量进一步降低。

2.3 温度对再生水补水水体水质指标的影响

为探究温度对再生水补水水体水质的影响,在夏季 8 月中旬,控制同等试验条件下进行了为期 15 d 的稳定连续监测,与冬季 11 月有典型代表的时间天数大致相同的监测数据初始值与最终值进行比对,并计算其变化率见表 5。

表 5 冬夏对照组初始与最终水质指标值

Tab. 5 Initial and final water quality index values of winter and summer control group

项目		初始值	最大值	最小值	平均值	最终值	变化率/%
溶解氧/(mg·L ⁻¹)	夏季 8 月监测	6.31	7.55	6.31	7.04	6.67	5.71
	冬季 11 月监测	12.44	18.70	5.80	11.85	5.80	-53.38
化学需氧量/(mg·L ⁻¹)	夏季 8 月监测	24	24	16	19.61	21	-12.50
	冬季 11 月监测	25	25	11	16.82	15	-40.00
温度/°C	夏季 8 月监测	31.50	31.50	27.20	29.07	27.20	-13.65
	冬季 11 月监测	24.20	24.20	4.30	13.54	4.30	-82.23
pH	夏季 8 月监测	9	9.10	9	9.10	9.10	1.11
	冬季 11 月监测	8.80	8.90	8.60	8.77	8.80	0
氨氮/(mg·L ⁻¹)	夏季 8 月监测	0.15	0.16	0.11	0.14	0.17	13.33
	冬季 11 月监测	0.20	0.25	0.02	0.12	0.20	0
电导率/(ms·cm ⁻¹)	夏季 8 月监测	1.14	1.48	1.13	1.35	1.48	29.82
	冬季 11 月监测	1.14	1.49	1.04	1.25	1.30	14.03

由表 5 可知夏季 8 月除化学需氧量有小范围降低以外,其余水质指标均有小幅的提升。而冬季 11 月监测的指标(部分见表 4)除硝氮以外其余指标均有消减,其中 COD 与 DO 的降幅最为明显。

分别绘制夏季与冬季水力循环水的不同水质指标在试验周期内的演变趋势见图 4,用以分析温度对水质的影响。

观察图 4(a),夏季 8 月温度平均比冬季 11 月高 15 °C 左右,并且温度也比较稳定,因此可以认为该试验具有代表性。水中溶解氧的可溶性与水温直接相关^[25],高水温导致低溶解氧质量浓度,虽然冬季溶解氧监测值相比夏季有较大的波动,但结合当季气温波动,认为也基本符合实际情况。而电导率代表了水体中溶解性矿物质的含量^[26],由于水体没有与外界进行无机盐类的交换,故推测

随着夏季高温水分大量的蒸发,无机盐的含量相对会随时间推移而增大,而冬季 11 月由于蒸散发量较小,电导率处于 1.2 ms/cm 值附近,处于正常范围之内。

化学需氧量在试验中期与后期冬季 11 月监测值均低于夏季 8 月监测值,认为温度过高会降低水体对污染物的自我降解能力,而试验中后期冬季 11 月监测值上升是由于低温的出现使水生植物和藻类大面积的死亡,水质有一定程度的恶化,但还属于在水体自我调控范围之内^[29]。

pH 值主要通过调控生物降解速率来实现对水质的影响,而水体中污染物等的降解反应离不开酶的催化作用,适宜的 pH 值是保证相关酶活性的根本^[27]。地表水环境质量标准中对于水体正常的 pH 规定在 6~9 的范围内^[28],冬季 11 月水体监测的

pH 属于正常范围的波动,而夏季 8 月监测的 pH 值则表明温度过高会影响水体的 pH 值使其过高,进而增大了生态风险爆发的可能性。

氨氮的指标夏季 8 月变化不大,且在 0.14 mg/L 的值附近维持了稳定,而冬季 11 月监测值有较大波

动,出现了两个峰值,这是由于温度以外的因素致使水体氨氮含量上升,在试验后期阶段氨氮含量得以稳步下降,并有降致为 0 的趋势,故可认为温度在一定程度上对氨氮在水体中降解的速率有影响,温度低时速率大,后期可以延长试验天数进行进一步的探究。

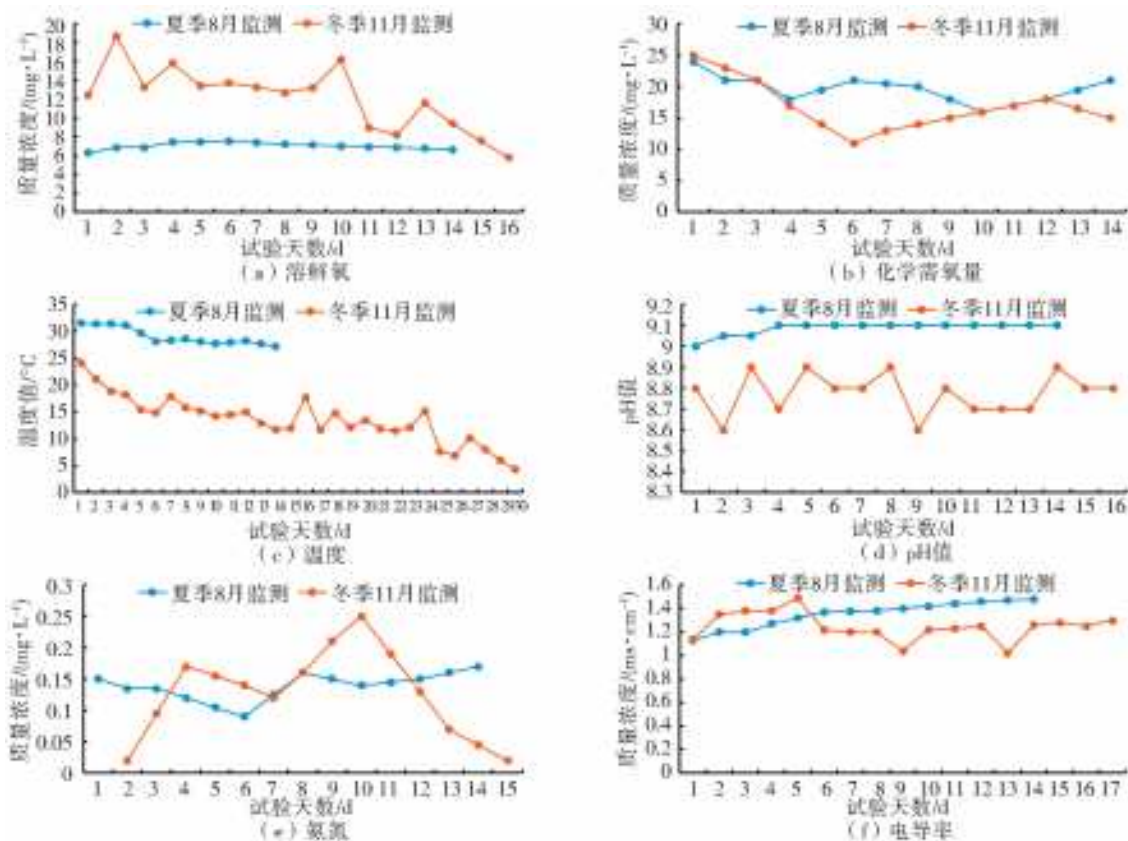


图 4 冬夏对照组水质指标变化趋势

Fig. 4 Trend of water quality index in winter and summer control group

3 结论

再生水对于现代城市河流的影响越来越大,探究不同处理方式对再生水与河道水的作用具有重大前景^[30],本试验研究对于今后探究再生水和河道水的水质变化以及实际应用具有一定的探究意义,现阶段的处理方式得出以下结论。

(1)土壤的渗滤作用对于再生水补水水质的改善作用有限,因为土壤内本来就含有一定的污染物与营养元素,但是土壤的渗滤作用是不容忽视的,是地表水向地下水转变的一个不可或缺的重要过程,河道过多的衬砌与人工化的防渗处理使得渗滤作用减少,因此不建议人为的屯蓄水源而减少土壤的渗滤作用。

(2)相对于低流速状态,高流速状态下的氨氮、COD、溶解氧与总磷均有较大的幅度的改善,低流速状态下再生水补水水体对于环境更为敏感,容易发生水质恶化,建议有关部门在流速不大的河段上

加大巡查力度,一旦发现水质问题及时处理。

(3)再生水补水水体低温条件下的化学需氧量和氨氮的降解速率较高温条件有明显的加快,溶解氧含量也较大,故推测不易发生水体富营养化。高温与低流速是诱导再生水补水水体发生生态风险的两大诱因,在修复湿地改善河道水环境时建议着重考虑。

参考文献(References):

[1] 梁培瑜,王烜,马芳冰. 水动力条件对水体富营养化的影响[J]. 湖泊科学,2013,25(4):455-462. (LIANG P Y, WANG X, MA F B. Influence of hydrodynamic conditions on water eutrophication [J]. Science of lakes, 2013, 25(4): 455-462. (in Chinese)) DOI: 10.18307/2013.0401.

[2] 夏高原,葛军,柯正辰,等. 城市内河综合水质对再生水补水的响应[J]. 环境工程学报,2017,11(1):136-142. (XIA G Y, GE J, KE Z C, et al. Response of urban inland water quality to rehydration of reclaimed water

- [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11 (1): 136-142. (in Chinese) DOI: 10. 12030/j. cjee. 201508133.
- [3] 王鹤立,陈雷,程丽,等. 再生水回用于景观水体的水质标准探讨[J]. *中国给水排水*, 2001 (12): 31-35. (WANG H L, CHEN L, CHENG L, et al. Approach on the quality standard for reuse of reclaimed water in scenic waters[J]. *China Water & Wastewater*, 2001, 17(12): 31-35. (in Chinese) DOI: 10. 3321/j. issn: 10004602. 2001. 12. 009.
- [4] 李昆,魏源送,王健行,等. 再生水回用的标准比较与技术经济分析[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(7): 1635-1653. (LI K, WEI Y S, WANG J X, et al. Water reclamation: Standards comparison and cost analysis[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34 (7): 1635-1653. (in Chinese) DOI: 10. 13671/j. hjkxxb. 2014. 0562.
- [5] 李锦秀,廖文根. 水流条件巨大变化对有机污染物降解速率影响研究[J]. *环境科学研究*, 2002, 15(3): 45-48. (LI J X, LIAO W G. Study on the effect of great changes in water flow conditions on degradation rate of organic pollutants[J]. *Journal of Environmental Science*, 2002, 15(3): 45-48. (in Chinese) DOI: 10. 13198/j. res. 2002. 03. 47. lijx. 013.
- [6] 王雅钰,刘成刚,黄天寅,等. 不同处理技术对河流污染物降解系数影响的比较[J]. *环境工程学报*, 2014 (3): 917-923. (WANG Y Y, LIU C G, HUANG T Y, et al. Comparison of effects of different treatment technologies on degradation coefficients of river pollutants [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2014 (3): 917-923. (in Chinese))
- [7] RONG C, DONG A, JI J, et al. Insight into the risk of replenishing urban landscape ponds with reclaimed wastewater[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 324 (Pt B). DOI: 10. 1016/j. jhazmat. 2016. 11. 028.
- [8] 汪啸宇,潘成忠,刘春雷,等. 不同再生水占比景观水体水质演变机制实验研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(1): 76-83. (WANG X Y, PAN C Z, LIU C L, et al. Experimental study on water quality evolution mechanism of landscape water with different proportion of reclaimed water [J]. *South-To-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(1): 76-83. (in Chinese) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2019. 0011.
- [9] HALL R O, TANK J L. Ecosystem metabolism controls nitrogen uptake in streams in Grand Teton National Park, Wyoming [J]. *Limnology & Oceanography*, 2003, 48(3): 1120-1128. DOI: 10. 4319/lo. 2003. 48. 3. 1120.
- [10] 曹敏. 大沽河污染物衰减系数分析研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(3): 128-132. (CAO M. Study on degradation coefficient of pollutant in Dagu River [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2016. 27(3): 128-132. (in Chinese) DOI: 10. 11705 / j. issn. 1672-643X. 2016. 03. 25.
- [11] 孔繁翔,马荣华,高俊峰,等. 太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践[J]. *湖泊科学*, 2009, 21(3): 314-328. (KONG F X, MA R H, GAO J F, et al. The theory and practice of prevention, forecast and warning on cyanobacteria bloom in Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21 (3): 314-328. (in Chinese) DOI: 10. 18307/2009. 0302.
- [12] 牛军宜. 基于相关分析的湖泊水库水华诱因诊断方法[A]. 中国科学技术协会、湖北省人民政府. 健康湖泊与美丽中国——第三届中国湖泊论坛暨第七届湖北科技论坛论文集[C]. 中国科学技术协会、湖北省人民政府:湖北省科学技术协会, 2013: 8. (NIU J Y. Methods for diagnosis of causes of lake and reservoir bloom based on correlation analysis[A]. China association for science and technology, hubei provincial people's government. Healthy lakes and beautiful China-the third Chinese lake BBS and the seventh hubei science and technology BBS proceedings[C]. China Association for Science and Technology, Hubei Provincial People's Government: Hubei Association for Science and Technology, 2013: 8. (in Chinese))
- [13] 汪亮,张海欧,解建仓,等. 黄河龙门至三门峡河段污染物降解系数动态特征研究[J]. *西安理工大学学报*, 2012, 28(3): 293-297. (WANG L, ZHANG H O, XIE J C, et al. Dynamic characteristics of pollutant degradation coefficient in the Yellow River from longmen to sanmenxia [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2012, 28 (3): 293-297. (in Chinese) DOI: 10. 19322/j. cnki. issn. 1006-4710. 2012. 03. 008.
- [14] 郭儒,李宇斌,富国. 河流中污染物衰减系数影响因素分析[J]. *气象与环境学报*, 2008, 24(1): 56-59. (GUO R, LI Y B, FU G. Analysis of influencing factors of pollutant attenuation coefficient in rivers[J]. *Journal of Meteorology And Environment*, 2008, 24 (1): 56-59. (in Chinese) DOI: CNKI: SUN: LNQX. 0. 2008-01-014.
- [15] WRIGHT R M, MCDONNELL A J. In-stream deoxygenation rate prediction [J]. *Journal of the Environmental Engineering Division*, 1979, 105(2): 323-335.
- [16] ALEXANDER R B, SMITH R A, SCHWARZ G E. Effect of stream channel size on the delivery of nitrogen to the Gulf of Mexico[J]. *Nature*, 2000, 403(6771): 756-758. DOI: 10. 1038/35001562.
- [17] 张鹏. 不同宽度竹林河岸缓冲带对氮磷的截留转化效

- 率[D]. 北京:中国林业科学研究院,2010. (ZHANG P. Interception and conversion efficiency of nitrogen and phosphorus in different width bamboo bank buffer zones [D]. Beijing: Chinese academy of forestry sciences,2010. (in Chinese))
- [18] 蔡建楠,潘伟斌,曹英姿,等. 广州城市河流形态对河流自净能力的影响[J]. 水资源保护,2010 (5):16-19. (CAI J N, PAN W B, CAO Y Z, et al. Influence of urban river morphology on river self-purification capacity in guangzhou[J]. Water Resource Conservation, 2010 (5):16-19. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;SZYB. 0. 2010-05-004.
- [19] 申满斌,陈永灿,刘昭伟. 岸边排放污染物浓度场三维浑水水质模型研究[J]. 水力发电学报,2005,24(3):93-98. (SHEN M B, CHEN Y C, LIU Z W. Study on three-dimensional muddy water quality model of coastal discharge pollutant concentration field [J]. Chinese Journal of Hydropower, 2005, 24(3):93-98. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;SFXB. 0. 2005-03-019.
- [20] RIMET F. Recent views on river pollution and diatoms [J]. Hydrobiologia, 2012, 683 (1): 1-24. DOI: 10. 1007/s10750-011-0949-0
- [21] TORSVIK V, L Φ . Microbial diversity and function in soil: from genes to ecosystems. [J]. Current Opinion in Microbiology, 2002, 5(3): 240-245. DOI:10. 1016/S1369-5274(02)00324-7.
- [22] 陈桐,张毅敏,高月香,等. 鱼类、底栖动物和水生植物的不同组合对水质净化效果的原位围隔实验[J]. 环境工程学报,2016,10(10):5511-5520. (CHEN T, ZHANG Y M, GAO Y x, et al. Different combination of fishes, benthic animals and aquatic plants control of eutrophication water bodies by mesocosm experiment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10 (10): 5511-5520. (in Chinese)) DOI: 10. 12030/j. ejee. 201 505076.
- [23] 何本茂,韦蔓新. 北海湾水体自净能力的探讨[J]. 海洋环境科学. 2004, 23(1):16-18. (HE B M, WEI M X. Study on self-purification capacity of north gulf water [J]. Marine Environmental Science, 2004, 23 (1):16-18. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;HYHJ. 0. 2004-01-005.
- [24] 蒲讯赤,李克锋. 紊动对水体中有机物降解影响的实验[J]. 中国环境科学,1999,19(6):485-489. (PU X C, LI K F. Effects of turbulence on degradation of organic pollutants in water [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 1999, 19(6):485-489. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;ZGHJ. 0. 1999-06-001.
- [25] ZHOU Q, GIBSON CE, ZHU Y. Evaluation of phosphorus bioavailability in sediments of three contrasting lakes in China and the UK [J]. Chemosphere, 2001, 42: 221-225. DOI: 10. 1016/S0045-6535(00)00129-6.
- [26] SEITZINGER S, HARRISON J A, BOHLKE J K, et al. Denitrification across landscapes and waterscapes: A synthesis [J]. Ecological Applications, 2006, 16(6): 2064-2090. DOI: 10. 1890/1051-0761 (2006) 016 (2064; DALAWA) 2. 0. CO; 2. DOI: 10. 1890/1051-0761(2006)016[2064; DALAWA]2. 0. CO; 2.
- [27] JENSEN H S, ANDERSEN F O. Importance of temperature, nitrate, and pH for phosphate release from aerobic sediments of four shallow [J]. Eutrophic Lakes. Limnology and Oceanography, 1992, 37(3): 577-589. DOI: 10. 4319/lo. 1992. 37. 3. 0577.
- [28] 姜伟,周川,纪道斌,等. 三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较[J]. 环境科学, 2017, 38(6):2326-2335. ((JIANG W, ZHOU C, JI D B, et al. Comparison of relationship between conduction and algal bloom in Pengxi River and Modao River in three gorges reservoir [J]. Environmental Science, 2017, 38 (6): 2326-2335. (in Chinese)) DOI: 10. 13227/j. hjkx. 201610183.
- [29] 汪家权,孙亚敏,钱家忠,等. 巢湖底泥磷的释放模拟实验研究 [J]. 科学学报, 2002, 22 (6): 735-742. (WANG J Q, SUN Y M, QIAN J Z, et al. Experimental study on phosphorus release from Chaohu sediment [J]. Journal of Environmental Science, 2002, 22 (6): 735-742. (in Chinese)) DOI: 10. 13671/j. hjkxxb. 2002. 06. 010.
- [30] 顾永钢,金鹏康,李兆欣,等. 不同填料对再生水补水型水体物种形成研究[J]. 环境污染与防治, 2017, 39 (10):1122-1126. (GU Y G, JIN P K, LI Z X, et al. Effect of different fillers on the species formation in the waterbodies supplemented by reclaimed water [J]. Environmental Pollution and Control, 2017(10): 1122-1126. (in Chinese)) DOI: 10. 15985/j. cnki. 1001-3865. 2017. 10. 016.