

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0011

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 research on water quality evolution mechanism of landscape water bodies with different ratios of reclaimed water[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(1): 76-83. (in Chinese)

# 不同再生水占比景观水体水质演变机制实验研究

汪啸宇<sup>1</sup>, 潘成忠<sup>1,2</sup>, 刘春雷<sup>1</sup>, 郭中方<sup>1</sup>

(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:**以永定河(北京段)为研究对象,开展不同再生水占比景观水体连续24 d的水质监测实验,监测指标包括化学需氧量、氨氮、溶解氧、pH、电导率及土壤微生物多样性等。结果分析表明:相同实验条件下永定河上游山峡段河岸带土壤微生物多样性明显好于下游沙质断流河岸带土壤,而二者混合形成的沙土有利于丰富土壤微生物多样性;高再生水占比水体对于环境更加敏感,更容易因为外部因素引起水质变化,在高温下水质恶化速率更快;根据实验所监测的多项水质指标与生态效应综合分析,静止景观水体再生水占比在超过75%以后水质持续恶化,推荐永定河实际景观河道再生水占比控制在75%以下。

**关键词:**再生水;水温;水质;土壤微生物;景观水体

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



## Experimental research on water quality evolution mechanism of landscape water bodies with different ratios of reclaimed water

WANG Xiaoyu<sup>1</sup>, PAN Chengzhong<sup>1,2</sup>, LIU Chunlei<sup>1</sup>, GUO Zhongfang<sup>1</sup>

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

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

**Abstract:** Taking Yongding River (Beijing section) as the research object, we monitored the changes of water quality in landscape water bodies with different ratios of reclaimed water for 24 consecutive days. The monitoring indicators included chemical oxygen demand, ammonia nitrogen, dissolved oxygen, pH, conductivity, and soil microbial diversity. The results showed that: The microbial diversity in the upstream riparian soil of the Yongding River is significantly better than that in the downstream riparian soil. The sand formed by the combination of the two is conducive to enriching soil microbial diversity. The water body with a high ratio of reclaimed water is more sensitive to environmental changes. Its water quality is more prone to changes when influenced by external factors, and deteriorates faster at high temperature. According to the comprehensive analysis of various water quality indicators monitored by the experiment, the water quality of impounded landscape water bodies will deteriorate continuously if the ratio of reclaimed water exceeds 75%. It is recommended that the ratio of reclaimed water in Yongding River be controlled below 75%.

**Key words:** reclaimed water; water temperature; water quality; soil microorganism; landscape water

收稿日期:2018-09-19 修回日期:2018-10-26 网络出版时间:2018-11-20

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20181116.1520.010.html>

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

作者简介:汪啸宇(1994—),男,河北人,主要从事河流生态保护研究。E-mail:201621470016@mail.bnu.edu.cn

通信作者:潘成忠(1980—),男,江苏人,副教授,主要从事流域水沙过程研究。E-mail:pancz@bnu.edu.cn

永定河是海河水系最大的一条河流,是贯穿京津冀生态功能区的天然走廊,是《京津冀协同发展规划纲要》明确提出要推进生态治理与修复的“六河五湖”中的重要河流之一,是京津冀区域重要水源涵养区、生态屏障和生态廊道<sup>[1]</sup>。然而随着北京及周边地区经济社会和人口的发展、水资源的不合理利用及保护程度的不足,永定河流量将逐年减少,致使下游河道长年断流<sup>[2]</sup>。2006年北京市的再生水用量为3.6亿m<sup>3</sup>,2015年达到9.5亿m<sup>3</sup>,预计到2020年,这一数字将达到12亿m<sup>3</sup>,其中超过50%的再生水将用于城市景观河湖水体的补充<sup>[3]</sup>。在大量再生水用于补给永定河的情况下,再生水补给河流对河流自身水质水生态的影响得到了广泛关注。

现阶段的研究多是针对再生水补水对水体影响某一方面的定性研究。夏高原等<sup>[4]</sup>采用一维水动力水质模型,结合模糊模式识别方法,研究再生水补水位置、水质和补水量对塘西河水质的影响;顾永钢<sup>[5]</sup>和张扬<sup>[6]</sup>则分别对不同盐度和填料条件下再生水补水水体水质变化的影响进行了实验研究;马永明等<sup>[7]</sup>通过对昆明翠湖不同功能区表层沉积物的分析得出了再生水补给下城市景观水体沉积物氮污染特征;王广焯等<sup>[8]</sup>对再生水补给湿地中水生植物根际细菌群落多样性特征进行了线管研究。然而,对于再生水在河流中占比的相关研究较为少见<sup>[9]</sup>。

本研究对不同再生水占比实验组进行了较长时间的实验监测,设置水温变化,水生植物及藻类等变量。分析气候因素,水生植物及藻类在不同再生水占比静止水体中对水质的影响,比较不同再生水占比实验水质变化和永定河不同区段河岸土在实验结束后微生物多样性指标,其结论对永定河(北京段)生态廊道修复提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

实验所用再生水采自北京卢南污水运营有限公司,河道水、山峡段河岸土、水生植物及藻类采自北京永定河三家店水库以上4 km处,下游沙质断流河岸土采自北京大兴永定河断流河段永定河自行车运动公园附近。河岸土采自河岸近沿,与河道土质地相同且无河流底泥,由于河流冲刷及其他原因<sup>[10]</sup>,上游河岸土粒径明显大于下游沙质断流河岸土,取两地河岸土进行对比实验。

河道水与再生水初始水质指标如表1所示。土壤粒径采用土壤体积平均粒径与土壤表面积平均粒

径这两种常用的粒径表达方式,基本可以表达土壤粒径情况,结果见表2。

表1 再生水与河道水初始水质

Tab.1 Initial water quality of reclaimed water and river water

水样	化学需氧量/ (mg·L <sup>-1</sup> )	氨氮/ (mg·L <sup>-1</sup> )	溶解氧/ (mg·L <sup>-1</sup> )	电导率/ (ms·cm <sup>-1</sup> )	pH
再生水	19	0.15	4.12	1.05	8.4
河道水	26	0.06	4.98	0.73	9.1

表2 河岸土土壤粒径

Tab.2 Particle size of river bank soil

土样	土壤体积平均粒径/ μm	土壤表面积平均粒径/ μm
	上山峡段河岸土	104.173
下游沙质断流河岸土	62.340	11.302

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 实验流程

实验采用5个容积150 L的塑料桶,桶内再生水占比分别为100%、75%、50%、25%、0%,其余部分以河道水填充。桶壁挂3个30 cm×40 cm的布袋,布袋内分别装有永定河山峡段河岸土、永定河下游沙质断流河岸土及二者各占一半的混合土,用以模拟河道侧位土壤。每个桶内放入5条金鱼作为水生生物。同时挖5个可以容纳实验用桶的土坑,将实验用桶放入土坑并把周边用土填实,模拟真实河道场景。实验总共进行24 d,在实验进行的第15 d加入水生植物紫萍以及藻类丝藻,实验过程中每日下午3点30分对水质进行监测,测量数据包括化学需氧量、氨氮、电导率、pH、溶解氧、水温,在实验结束后对侧方悬挂河道土进行微生物多样性分析。相关实验参数测定方法见表3。

表3 相关参数测量方法

Tab.3 Measurement methods for related parameters

水质参数	测定方法
化学需氧量	采用快速消解法,使用GDYS-201M多参数水质分析仪测量
氨氮	采用国标(GB/T5750.5-2006)纳氏试剂法
pH	PHscan10S笔式pH计
溶解氧	Seven2Go Pro S9便携式溶氧仪
电导率	2265FS便携式电导率测定仪
微生物多样性	微生物多样性16s rDNA高通量测序

### 1.2.2 相关计算方法

为整体体现水质情况变化,采用《北京市各区地表水环境质量排名技术规定(试行)》所规定的河流水质指数计算方法进行总体实验水质估算<sup>[11]</sup>。

河流水质指数计算采用《地表水环境质量标准》Ⅲ类标准限值为标准值,先计算出所有河流监测断面各单项指标浓度的算术平均值,计算出单项指标的水质指数,再综合计算出河流的水质指数。低于检出限的项目,按照 1/2 检出限值进行计算<sup>[12]</sup>。

用各单项指标的浓度值除以该指标对应的地表水Ⅲ类标准限值,计算单项指标的水质指数,采用公式(1)。

$$C_{wqi}(i) = (C(i)) / (C_s(i)) \quad (1)$$

式中: $C(i)$ 为第  $i$  个水质指标的浓度值; $C_s(i)$ 为第  $i$  个水质指标地表水Ⅲ类标准限值; $C_{wqi}(i)$ 为第  $i$  个水质指标的水质指数。

根据各单项指标的水质指数,取其加和值即为河流的水质指数,计算见式(2)。

$$C_{wqi,河流} = \sum_{i=1}^n C_{wqi}(i) \quad (2)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 实验桶内水质变化

将实验进行的 24 d 内测得的化学需氧量、氨氮、溶解氧、pH 及电导率指标与时间变化的关系作图,并将各个水质指标初始值与最终值列表进行对比,结果见表 4。发现 pH、电导率两项指标在不同再生水占比实验组中有一定差异,但在实验周期内变化不大;氨氮、化学需氧量与溶解氧三项指标以及将数据汇总换算得到的河流水质指数在高再生水占比实验组(100%、75%)中于实验周期内有明显差异,在低再生水占比实验组(50%、25%、0%)内则可以基本稳定。

表 4 各再生水占比实验组初始与结束水质数据

Tab. 4 Initial and final water quality data of test groups with different ratios of reclaimed water

项目	100%再生水	75%再生水	50%再生水	25%再生水	0%再生水	
化学需氧量	初始值/(mg·L <sup>-1</sup> )	19	25	26	25	26
	最终值/(mg·L <sup>-1</sup> )	72	63	26	20	17
	变化率/%	+278.95	+152.00	0.00	-20.00	-34.62
氨氮	初始值/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.12	0.07	0.08	0.06	0.04
	最终值/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.31	0.25	0.16	0.08	0.06
	变化率/%	+158.33	+257.14	+100.00	+33.33	+50.00
溶解氧	初始值/(mg·L <sup>-1</sup> )	3.12	4.01	4.25	4.86	4.98
	最终值/(mg·L <sup>-1</sup> )	7.82	8.12	4.89	4.76	3.56
	变化率/%	+148.08	+102.49	+15.06	-2.06	-28.51
电导率	初始值/(ms·cm <sup>-1</sup> )	1.07	0.95	0.91	0.84	0.73
	最终值/(ms·cm <sup>-1</sup> )	1.11	1.02	1.01	0.96	0.89
	变化率/%	+3.74	+7.37	+10.99	+9.52	+21.92
pH	初始值	8.4	8.5	8.7	9.1	9.2
	最终值	8.9	8.9	8.9	8.8	8.8
	变化率/%	+5.95	+4.71	+2.25	-3.30	-4.35
河流水质指数	初始值	3.37	3.31	3.40	3.43	3.39
	最终值	5.50	4.96	3.43	3.03	3.21
	变化率/%	+63.20	+49.85	+0.88	-8.75	-5.31

将各水质指标在实验周期内的变化过程作图,见图 1。并对各指标变化进行分析。

化学需氧量为水样在一定条件下,以氧化 1 L 水样中还原性物质所消耗的氧化剂的量为指标,折算成每升水样全部被氧化后,需要的氧的毫克数,以 mg/L 表示。它直观反映了水中受还原性物质污染的程度,是一种直观表达有机物相对含量的综合指标<sup>[13]</sup>。

高再生水占比(75%、100%)实验中,化学需氧量含量在实验结束时已经达到 72 mg/L 和 63 mg/L,已经劣于地表水环境质量标准 V 类水标准,说明该

再生水占比静止水体条件下水质已经严重恶化<sup>[14]</sup>。较低再生水占比(50%、25%、0%)实验虽然在加入水生植物前也一度恶化至 50 mg/L 左右的劣 V 类水质,但在实验进行的第 15 天加入水生植物后水质恶化得以减缓,并呈现出一定程度的好转。实验结束时已经分别稳定在 26、20 和 18 mg/L,都在地表水环境质量标准要求的 IV 类水标准以上。考虑到实验条件劣于实际水体,认为该再生水占比下化学需氧量含量满足北京市对景观河道水的要求。

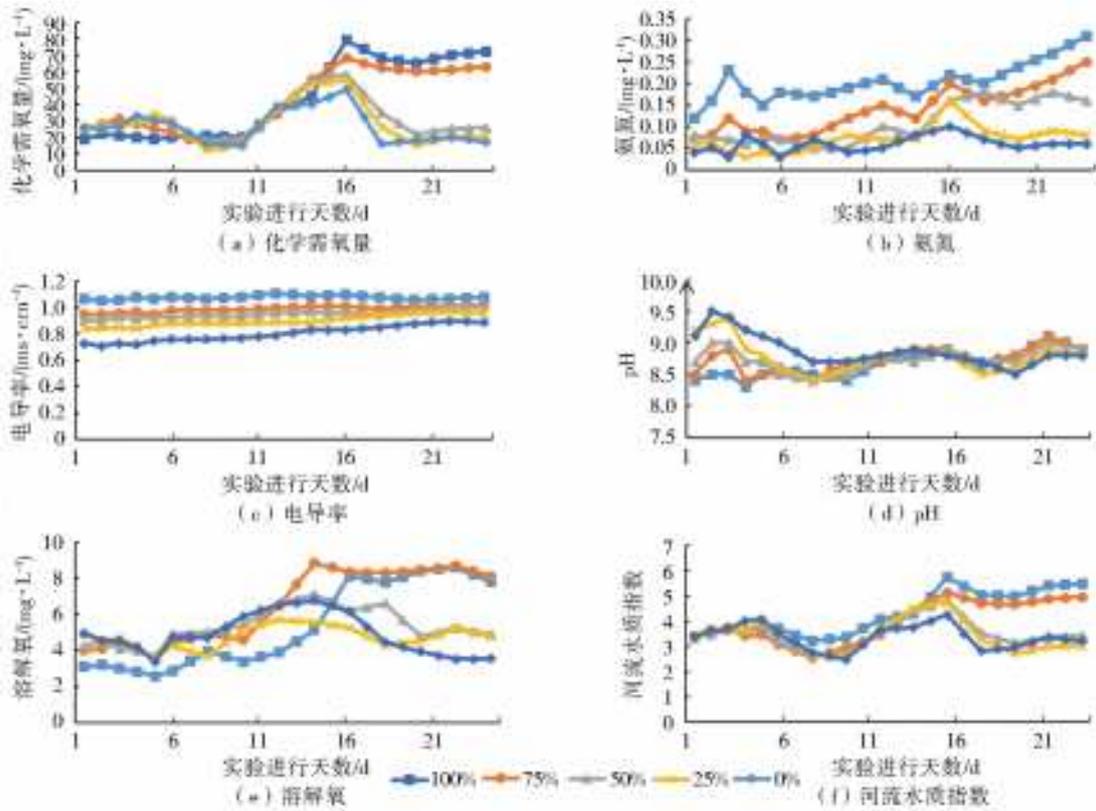


图1 各水质指标实验周期内变化过程

Fig. 1 Changes of water quality indicators during the experimental period

氨氮指标总体变化不大,且质量浓度较低,最低的0%再生水占比实验氨氮指标在实验后期稳定在0.06 mg/L,已经达到地表水环境质量标准Ⅰ类水的要求。即使氨氮质量浓度最高的100%再生水占比实验氨氮质量浓度到达0.31 mg/L,这一数据也优于Ⅱ类水标准。推测主要原因是封闭条件无外源摄入,且侧方悬挂土壤为河道土,不会同河流底泥一样随环境变化向水中释放氨氮<sup>[15]</sup>,所以在水质较好情况下自身氨氮指标变化不大。

但氨氮变化趋势明显。除随气温变化有轻微幅度变化外,高再生水占比(75%、100%)氨氮质量浓度在实验后期分别达到0.31 mg/L和0.25 mg/L,并且仍有比较明显的上涨趋势,水质处于持续恶化阶段。而从50%、25%和0%再生水占比实验氨氮质量浓度则基本保持稳定,分别在0.16、0.08和0.06 mg/L左右。

电导率是用数字来表示水溶液传导电流的能力,用于监测水中溶解性矿物质浓度的变化,是估算水体被无机盐污染的指标之一<sup>[16]</sup>。地表水环境质量标准中对电导率没有明确的要求,但电导率指标对于水质污染的指示作用不容忽视。虽然高再生水浓度的实验组电导率高于低再生水占比实验组,但总体各个实验组电导率指标都在1 ms/cm左右,处于正常范围内,因此认为各再生水占比条件下电导

率指标均达标<sup>[17]</sup>。

水体pH是一项重要的水质指标,pH值过高或过低会影响水体中有机质的离子化作用,从而间接影响藻类的生长和水体富营养化现象的发生<sup>[18]</sup>。所以地表水环境质量标准对于水体pH规定在6~9的范围内,实验所涉及的再生水占比均处于该范围内且基本一致,因此认为各再生水占比条件下pH均满足地表水环境质量标准Ⅲ类水质标准。

再生水占比为0%、25%、50%的3个桶在加入浮游植物后溶解氧有小幅上升,但因为长时间封闭且水体静止,溶解氧质量浓度逐步下降,在4~5 mg/L逐步稳定。一般认为4 mg/L以上可以满足水生生物生存需要<sup>[19]</sup>,此稳定状态略差于地表水环境质量的Ⅲ类水标准,优于Ⅳ类水标准。考虑到实验条件通风较少比实际条件更加恶劣,因此认为实际条件下该再生水占比溶解氧满足地表水环境质量标准Ⅲ类水质标准。

再生水占比为75%、100%的两个桶内在加入浮游植物后溶解氧上升明显,在7~9 mg/L。原因推测是在高温静止条件下高再生水占比水体开始富营养化进程,处于富营养化响应阶段,藻类及其他浮游植物光合作用旺盛,大量释放氧气,使水体溶解氧含量上升<sup>[20]</sup>。

由不同再生水占比河流水质指数变化图可知,

较高再生水占比(100%、75%)两组实验组水质已经开始持续恶化,水质指数在 5~6 并持续上升,而较低再生水占比(0%、25%、50%)水质指数则在加入水生植物后在 3 左右趋于稳定。综上,在水质因素方面,推荐静止水体再生水占比应不超过 75%。

相对于河道水,再生水中氨氮及电导率的初始含量明显更高,说明再生水虽然水质达标,但相较于河道水仍有更多的营养物质以及无机盐,有更高的富营养化风险。在长期水体静止及中期加入水生植物的条件下,高再生水占比水体化学需氧量、氨氮以及溶解氧指标大幅增加,推测是在高温静止条件下高再生水占比水体开始富营养化进程所导致。

## 2.2 水温对水质影响

水温是水域生态系统中的一个非常重要的水质参数,水的所有物理、化学特性几乎都与水温密切相关<sup>[23]</sup>。水中溶解氧的分布和变化是受温度、生物、化学等联合影响的结果,但主要是受水温控制,水温影响水中溶解氧浓度,进而影响水中生物和微生物活动、pH 值和有机物降解速率等<sup>[24]</sup>。

一般认为,在较高水温的情况下水体化学需氧量,氨氮浓度会上升,静止水体实验现象与之相吻合<sup>[25]</sup>。在实验进行的第 4 d 至第 8 d,实验区域普遍阴天,空气湿度较高并有阵雨,实验水温在 22~24 °C,在这段时间,各项污染指标均趋于平稳或稍有回落。与之形成对比的是实验的第 9 d 至第

15 d,在天气大晴,水温 26~27.5 °C 的条件下,各项水质数据恶化明显。第 15 d 之后,由于加入水生植物且水温几乎无变化,水质受多方面影响,水温不作为主要影响因素,所以不做讨论<sup>[26]</sup>。

为探究不同再生水占比条件下水温对水质的影响,将实验第 1 d 至第 15 d 的排列顺序打乱,水温按从低到高进行排列作为  $x$  轴,对应的水质指数、化学需氧量以及氨氮为  $y$  轴作图,结果见图 2。并做相关性分析,探究水温变化对水质的影响,结果见表 5。

根据相关性分析发现,对于化学需氧量、氨氮和溶解氧三项指标,水温与各水质数据均呈正相关,高再生水占比实验组(100%、75%、50%)数据与水温相关系数普遍高于低再生水占比实验组(25%、0%)。一般来说,取绝对值后,0~0.09 为没有相关性,0.1~0.3 为弱相关,0.3~0.5 为中等相关,0.5~1.0 为强相关。将各项水质指标转换为水质指数后,结果表明高再生水占比实验组(100%、75%)水温与水质指数有强相关性,相关系数均大于 0.5;50%与 25%再生水占比实验组的相关系数则在 0.3~0.5,为中相关性;而 0%再生水占比相关系数只有 0.150 4,呈弱相关。可见高再生水占比水体对于环境更加敏感,更容易因为外部气候变化引起水质变化。

在实验中,高温条件下各再生水占比实验组均有不同程度的水质恶化。虽然作图打乱了实验日期顺序,但趋势线斜率仍可以在一定程度上体现水

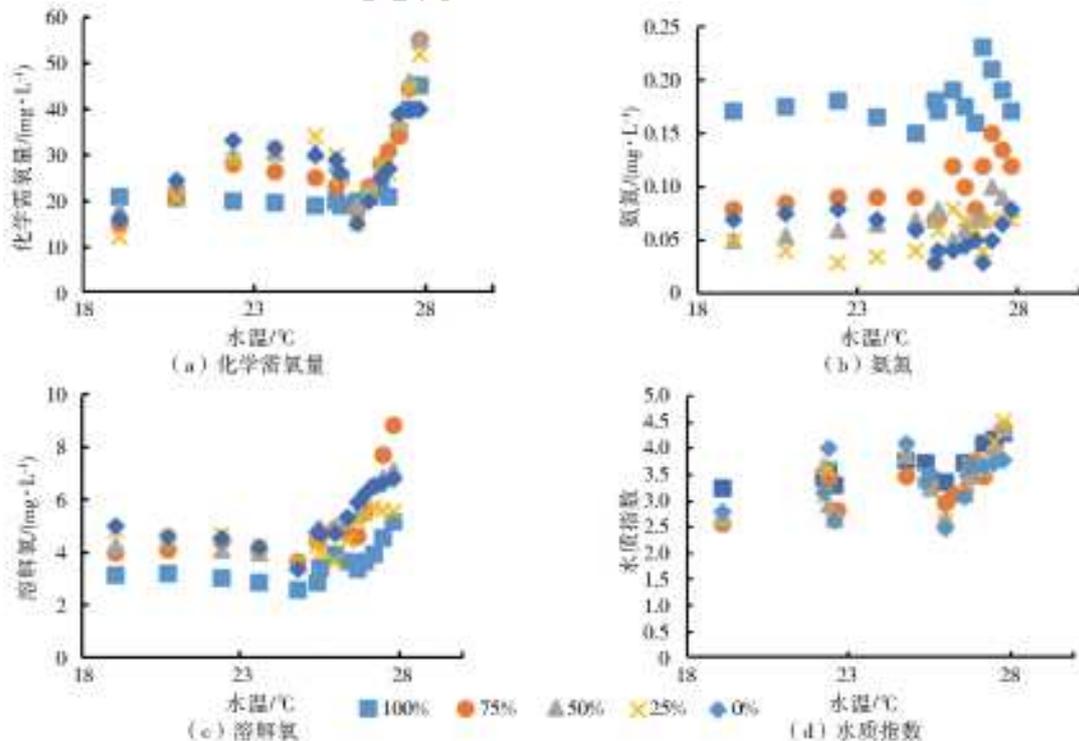


图 2 不同再生水占比水温与水质指标关系

Fig. 2 Relationship between water temperature and water quality indicators at different ratios of reclaimed water

表 5 不同再生水占比水温与水质指标相关系数与趋势线斜率

Tab. 5 Correlation coefficient and trend line slope of water temperature-water quality indicators at different ratios of reclaimed water

项目		再生水占比				
		100%	75%	50%	25%	0%
水温与水质指数	相关系数	0.500 7	0.544 2	0.374 1	0.360 8	0.150 4
	趋势线斜率	0.091 4	0.142 8	0.125 7	0.135 0	0.076 6
水温与化学需氧量	相关系数	0.262 3	0.384 7	0.289 3	0.254 7	0.197 5
	趋势线斜率	1.683 6	2.464 4	2.063 0	2.431 5	1.356 9
水温与氨氮	相关系数	0.306 6	0.309 4	0.440 4	0.293 1	0.211 6
	趋势线斜率	0.002 5	0.005 3	0.003 7	0.003 5	0.003 1
水温与溶解氧	相关系数	0.365 1	0.403 0	0.529 1	0.102 2	0.249 4
	趋势线斜率	0.159 6	0.363 8	0.303 4	0.286 1	0.229 6

温变化过程中水质的变化速率。100%再生水占比实验组水温与各水质指标趋势线斜率均较低,推测是因为该实验组在实验过程中总体水质一直较差,水质指数一直处于高位。而其它四组实验组综合来看,各水质指标均在高再生水占比情况下趋势线斜率较大,而低再生水占比实验组则较小。说明高再生水占比水体在被水温影响时变化幅度也较大。

相较于低再生水占比水体和自然水体,高再生水占比水体不但对于环境更加敏感,更容易因为外部气候变化引起水质变化,而且在高温下水质恶化速率也更快。因此,对于高再生水占比静止水体而言,高温天气应尤其注意进行水质监测及预警。

### 2.3 各实验组不同来源土壤微生物多样性区别

在实验中,为了探明不同再生水占比条件下上游山峡段河岸土与下游断流沙质河岸土在实验周期内生长的土壤微生物多样性区别,在实验开始前对采回的土壤进行了晾干处理,每个实验组都悬挂了这两种土及混合土三种土样,实验结束后对实验桶内侧方悬挂土壤进行微生物多样性 16s rDNA 高通量测序。

在对微生物多样性进行分析时,采用 Alpha 多样性分析中的 ACE 指数作为度量指标。微生物 Alpha 多样性是指一个特定区域或生态系统内的微生物多样性,反映丰富度和均匀度的综合,有多种度量指标。其中 ACE 指数可以反映微生物群落丰富度,是生态学中估计物种总数的常用指数之一。对不同土壤样本微生物多样性指标进行分析,并作对比见图 3。

土壤微生物多样性指生命体在遗传、种类和生态系统层次上的变化。它代表着微生物群落的稳定性,也反映土壤生态机制和土壤胁迫对群落的影响<sup>[21]</sup>。土壤微生物可以通过改善土壤结构、促进养

分循环增加植物抗性和植物对养分的吸收的方式来促进植物生长;同时可以促进腐质酸的形成,改良土壤;还可以创造物理屏障,减少病原菌侵害。河岸带的土壤微生物多样性对于河流生态健康向上发展十分重要<sup>[22]</sup>。

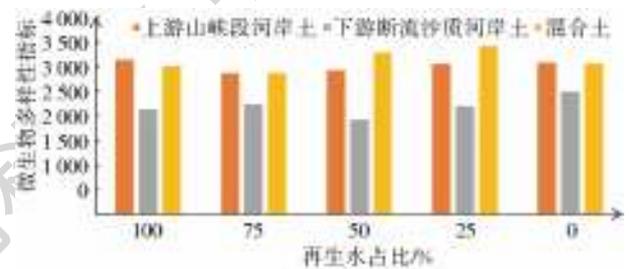


图 3 不同土壤样本微生物多样性指标对比

Fig. 3 Comparison of microbial diversity in different soil samples

据不同土壤样本微生物多样性对比图可以看出,永定河三家店水库上游山峡段河岸土在实验进行的 24 d 内产生的微生物群落明显比下游沙质断流河岸土丰富,其微生物多样性指标均在 3 000 左右,而下游沙质断流河岸土则普遍在 2 000 左右,混合土样本的指标则与上游山峡段河岸土相似。在考虑成本及两种土壤粒径区别的前提下,推荐在进行下游河段生态修复时应适当采用一部分大粒径外来土壤,与沙质河道土结合使用,以达到丰富河床微生物多样性,增强河流自净能力的目的。不同再生水占比的实验组微生物多样性则基本无明显区分,认为再生水占比在短期内对河床微生物多样性无明显影响。

### 3 结论与建议

(1)永定河下游沙质断流河岸土微生物多样性与上游山峡段河岸土有较大差距,而二者混合形成的沙土也有利于丰富土壤微生物多样性,推荐在进行下游河段生态初期修复时适当采用一部分外来大

粒径土壤,与沙质河道土混合使用,以达到丰富河床微生物多样性,增强河流自净能力的目的。

(2)在高温水条件下,各再生水占比均会发生不同程度的水质恶化,而且高再生水占比水体对于环境更加敏感,更容易因为外部气候变化引起水质变化,在高温下水质恶化速率也更快。推荐相关管理部门在夏季持续高温期间加大对景观水体监管力度,一经发现水质问题及时采取措施。

(3)根据实验所监测的多项水质指标与生态效应综合分析,静止景观水体再生水占比在超过 75%以后水质持续恶化,推荐永定河实际景观河道再生水占比控制在 75%以下。

#### 参考文献(References):

[1] 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.

[2] 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,2001,17(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:1000-4602.2001.12.009.

[3] 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. Effect of hydrodynamic conditions on water eutrophication; A review[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(4): 455-462. (in Chinese)) DOI:10.18307/2013.0401.

[4] 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(1):136-142. (XIA G Y,GE J,KE Z C,et al. Comprehensive water quality of urban river in response to reclaimed water recharge[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017(1): 136-142. (in Chinese)) DOI: 10.12030/j.cjee.201508133.

[5] 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(10):1122-1126. (GU Y G,JIN P K,LI Z X,et al. Effect of different fillers on the species formation in the water bodies 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.

[6] 张扬,熊家晴,王晓昌,等.盐度对再生水补水水体水质

变化影响的研究[J].环境科技,2016(6):17-21. (ZHANG Y,XIONG J Q,WANG X C,et al. Effect of salinity on water quality variations of the pond replenished by reclaimed water[J]. Environmental Science and Technology,2016(6):17-21. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1674-4829.2016.06.004.

[7] 马永明,郭红兵,陈荣.再生水补给下城市景观水体沉积物氮污染特征与评价[J].环境监测管理与技术,2017(1):30-34. (MA Y M,GUO H B,CHEN R. Characteristic and evaluation of nitrogen pollution in sediment of urban landscape water supplied by reclaimed water[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring. 2017(1):30-34. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1006-2009.2017.01.007.

[8] 王广焯,王鹏程,张琼琼,等.再生水补给湿地香蒲根际细菌群落多样性分析[J].天津师范大学学报(自然科学版),2017(4):46-53. (WANG G X,WANG P C,ZHANG Q Q,et al. Analysis of rhizosphere bacterial diversity of *Typha orientalis* in reclaimed water river wetland[J]. Journal of Tianjin Normal University(Natural Science Edition. ). 2017(4):46-53. (in Chinese))

[9] 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.

[10] 齐乌云,马嵩乃,周大良,等.北京地区土壤水力侵蚀评估[J].水土保持研究,2003(3):137-139. (QI W Y,MA G N,ZHOU D L,et al. Evaluation on soil hydrosedimentation in Beijing area[J]. Research of Soil and Water Conservation. 2003(3):137-139. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1005-3409.2003.03.038.

[11] AO D,CHEN R,WANG X C,et al. On the risks from sediment and overlying water by replenishing urban landscape ponds with reclaimed wastewater[J]. Environmental Pollution, 2018(236): 488-497. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.01.105.

[12] 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.

[13] 杨岸明,甘一萍,常江,等.北京市北小河再生水厂MBR工艺介绍[J].膜科学与技术,2011,31(4):95-99. (YANG A M,GAN Y P,CHANG J,et al. Process introduction of MBR of Beijing Beixiaohe reclaimed water plant[J]. Membrane Science & Technology, 2011,31(4):95-99. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-8924.2011.04.019.

[14] 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.
- [15] ASANO T, COTRUVO J A. Groundwater recharge with reclaimed wastewater; health and regulatory considerations[J]. Water Research, 2004, 38(8): 1941-1951. DOI: 10. 1016/j. watres. 2004. 01. 023.
- [16] WEBER S, KHAN S, HOLLENDER J. Human risk assessment of organic contaminants in reclaimed wastewater used for irrigation[J]. Desalination, 2006, 187(1): 53-64. DOI: 10. 1016/j. desal. 2005. 04. 067.
- [17] 张皓, 潘晨, 张红高, 等. 水质指数法在过境河流水质综合分析中的应用[J]. 环境科学与技术, 2015(s1): 373-377. (ZHANG H, PAN C, ZHANG H G, et al. Application of the water quality index assessment method in the comprehensive analysis of transboundary river water quality[J]. Environmental Science & Technology, 2015(s1): 373-377. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-6504. 2015. 6P. 077.
- [18] BASTIDA F, TORRES I F, ROMERO-TRIGUEROS C, et al. Combined effects of reduced irrigation and water quality on the soil microbial community of a citrus orchard under semi-arid conditions[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2017(104): 226-237. DOI: 10. 1016/j. soilbio. 2016. 10. 024.
- [19] MA X Y, WANG X C, WANG D, et al. Function of a landscape lake in the reduction of biotoxicity related to trace organic chemicals from reclaimed water[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016(318): 663-670. DOI: 10. 1016/j. jhazmat. 2016. 07. 050.
- [20] 刘睿, 周孝德, 吴巍, 等. 河流水体与滨岸土壤微生物群落特征差异分析[J]. 西安理工大学学报, 2017(4): 384-389. (LIU R, ZHOU X D, WU W, et al. Comparison of microbial community characteristics in river water, sediment and riparian soil[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2017(4): 384-389. (in Chinese)) DOI: 10. 19322/j. cnki. issn. 1006-4710. 2017. 04. 002.
- [21] 立才, 单悦, 黄俊雄, 等. 河道再生水入渗的水岩相互作用机理研究[J]. 水资源保护, 2018(1): 31-35. (LI C, SHAN Y, HUANG J X, et al. Interaction mechanism experiment of water and rocks in infiltration of reclaimed water[J]. Water Resources Protection, 2018(1): 31-35. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 10046933. 2018. 01. 06.
- [22] CUEVAS RIBE R, MIMS S D. Investigation in reuse of decommissioned wastewater facility and reclaimed water for culturing paddlefish fingerlings[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2014, 45(3): 322-332. DOI: 10. 1111/jwas. 12115.
- [23] 孙祥, 朱广伟, 笪文怡, 等. 天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响[J]. 环境科学, 2018(6). (SUN X, ZHU G W, DA W Y, et al. Thermal stratification and its impacts on water quality in Shahe Reservoir, Liyang, China[J]. Environmental Science 2018(6). (in Chinese)) DOI: 10. 13227/j. hjkx. 201710223.
- [24] 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.
- [25] ZHANG W, WANG C, LI Y, et al. Seeking sustainability: multiobjective evolutionary optimization for urban wastewater reuse in China[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(2): 1094-102. DOI: 10. 1021/es404082f.
- [26] 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. cjee. 201505076.