

## 再生水补给河流北运河 COD<sub>Cr</sub>降解系数变化及影响因素\*

张培培<sup>1</sup>, 吴艺帆<sup>1</sup>, 庞树江<sup>1</sup>, 王晓燕<sup>1,2\*\*</sup>, 杜伊<sup>1</sup>

(1: 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

(2: 首都师范大学首都圈水环境研究中心, 北京 100048)

**摘要:** 化学需氧量(COD)是影响地表水体水质的主要污染指标. 明确地表水中 COD 的降解系数, 可为把握有机物污染过程变化以及有效控制污染提供科学依据. 北运河是城市再生水河流, COD 污染严重. 以北运河从上游至下游的 5 个典型断面(马坊桥、火沙路、东关大桥、榆林庄桥、杨洼闸)为例, 通过室内模拟实验, 估算了不同断面 COD<sub>Cr</sub>降解系数, 并对 COD<sub>Cr</sub>降解系数进行校正; 测定了颗粒物沉降速率、复氧系数, 评估了水体自净能力; 分析了不同环境条件(温度、溶解氧、流速)对 COD<sub>Cr</sub>的降解影响. 结论如下: 北运河水体自净能力较差, 颗粒物沉降速率范围为 1.09~3.22 m/d, 杨洼闸断面颗粒物沉降速率最低为 1.09 m/d, 其复氧系数偏低, 为 0.016 d<sup>-1</sup>. 北运河水体 COD<sub>Cr</sub>降解系数符合一级动力学方程; 经水力、温度经验公式校正后, COD<sub>Cr</sub>降解系数范围为 0.0184~0.0883 d<sup>-1</sup>, 低于我国其他平原地区河流. 北运河 COD<sub>Cr</sub>降解系数存在明显的空间差异性, 上游断面的降解系数高于下游断面, 不过下游北京界最后出水断面杨洼闸表现出闸坝特殊性, 降解系数最高(0.0416~0.0883 d<sup>-1</sup>). 水质参数中温度、溶解氧、氧化还原电位、营养盐以及总有机碳是 COD<sub>Cr</sub>降解系数的主要影响因子. COD<sub>Cr</sub>降解系数随着温度、溶解氧、外源动力增加而增大; COD<sub>Cr</sub>降解系数与营养盐、TOC 呈显著正相关, 与氧化还原电位呈显著负相关. 研究结果可为我国相关城市再生水水质改善和城市黑臭水体治理提供科学依据.

**关键词:** 再生水; COD<sub>Cr</sub>降解; 水体自净; 降解因素; 北运河

## COD<sub>Cr</sub> degradation coefficient of urban river recharged with reclaimed water and its impacting factors

ZHANG Peipei<sup>1</sup>, WU Yifan<sup>1</sup>, PANG Shujiang<sup>1</sup>, WANG Xiaoyan<sup>1,2\*\*</sup> & DU Yi<sup>1</sup>

(1: College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, P.R.China)

(2: Research Center of Aquatic Environment in the Capital Region, Capital Normal University, Beijing 100048, P.R.China)

**Abstract:** Chemical oxygen demand (COD) is one of the major indicators of surface water pollution in China. Degradation coefficient of pollutant may provide scientific basis for understanding the process of organic pollutant change and effective pollution control. As a typical urban river recharged with reclaimed water, Beiyun River is at very serious state of COD pollution. In this research, five typical sections from upstream to downstream (Mafang Bridge, Huosha Road, Dongguan Bridge, Yulinzhuang Bridge and Yangwa Sluice) on Beiyun River were selected for estimating COD<sub>Cr</sub> degradation coefficients and calibration by laboratory simulation experiments. Taking the section of Yangwa sluice as a typical example, the sedimentation rate and reoxygenation coefficient were measured on site to evaluate water self-purification ability. Then the impacts of different environmental factors (temperature, dissolved oxygen and flow rate) on COD<sub>Cr</sub> degradation were discussed based on laboratory simulation experiments. The conclusions were summarized as follows: The water purifying ability of Beiyun River was very low. The sedimentation rates ranged from 1.59 to 3.22 m/d, among which, the lowest rate was in Yangwa Sluice with a reoxygenation coefficient of 0.016 d<sup>-1</sup>. The variation of COD<sub>Cr</sub> degradation coefficients conformed to the first-order kinetic equation, ranging from 0.0184 d<sup>-1</sup> to 0.0883 d<sup>-1</sup> corrected by the hydraulic and temperature condition. The COD<sub>Cr</sub> degradation coefficients showed significant spatial variation. The degradation

\* 北京市自然科学基金委员会—北京市教育委员会联合资助重点项目(KZ201810028047)、科技创新服务能力建设—基本科研业务费(科研类)(025185305000/149)和国家自然科学基金项目(41271495)联合资助. 2018-05-16 收稿; 2018-07-03 收修改稿. 张培培(1992~), 女, 硕士研究生; E-mail: 1414526183@qq.com.

\*\* 通信作者; E-mail: wangxy@cnu.edu.cn.

coefficients of upstream sections was higher than that of downstream sections, except Yangwa Sluice (last section of Beijing at downstream) as the highest ( $0.0416\text{--}0.0883\text{ d}^{-1}$ ), showing the characteristics of the sluice. Water quality parameters such as temperature, dissolved oxygen, redox potential (ORP), nutrients, and total organic carbon (TOC) were the main influence factors. The  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  degradation coefficients increased with the temperature, dissolved oxygen and flow rate. In addition,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  degradation coefficient was positively related to nutrients and TOC, but negatively to ORP. The results of this study can provide a scientific reference for urban river improvement and pollution control.

**Keywords:** Urban reclaimed water; water self-purification; degradation of  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ ; degradation factors; Beiyun River

污染物降解系数研究对认识水体有机物污染程度极为重要. 欧美国家多以生物需氧量(BOD)表征有机物污染程度<sup>[1]</sup>. 而我国有机物污染程度表征指标多用化学需氧量(COD)<sup>[2]</sup>. 《重点流域水污染防治规划》(2016—2020年)指出,全国地表水劣V类断面占9.7%,COD即为主要污染指标之一. 七大重点流域中黄河、海河、淮河COD污染较为严重<sup>[3]</sup>. 淮河平水年COD入河量约为30.78万t<sup>[4]</sup>;海河COD年入河量约为68万t<sup>[5]</sup>. 《“十三五”节能减排综合工作方案》明确提出到2020年全国地表水COD总量将同比2015年下降10%的要求<sup>[6]</sup>. 因此,开展针对地表水体COD降解系数变化规律及影响因素研究,对控制水体污染尤为重要.

确定COD降解系数方法主要有3大类,即野外原位测定、实验室模拟和模型模拟法<sup>[7-8]</sup>. 最常用的方法为实验室模拟法,该方法具有简单便捷、成本较低等特点. 实验室模拟结果表明,COD降解过程服从一级动力学方程、米氏方程、Monod方程等<sup>[7]</sup>. 其中一级动力学模型能够较好地描述污染物降解过程<sup>[7,9-11]</sup>. 但该方法所测得的降解系数偏低低于河流的实际降解系数,因此有必要对实验室模拟的降解系数进行校正<sup>[8]</sup>. 例如,陶威等<sup>[12]</sup>通过实验室模拟研究长江宜宾段氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )的衰减系数,采用一维稳态模型,根据长江宜宾段的实测资料对降解系数进行校正,通过推导的降解系数公式验证得到的降解系数与修正后的值几乎一致;冯帅等<sup>[13]</sup>对太湖上游平原河网的 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 降解系数进行模拟计算,通过可靠性验证得到修正后的相对误差减小.

$\text{COD}_{\text{Cr}}$ 降解系数作为水体自净表征参数之一,受到多方面因素的影响. 相关研究认为,区域下垫面差异、污染物性质及初始浓度、微生物性质、水力特征、水温、pH、溶解氧等都是导致 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 降解系数存在差异的重要影响因素<sup>[14-15]</sup>. 其中,下垫面差异、水温、水动力特征以及溶解氧(DO)浓度被认为是影响 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 降解系数的主要因素.

北运河是再生水补给河流,为多闸坝系统, $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 污染严重,是北京市重点治理的城市污染河流. 再生水补给对河流水质具有一定影响及扰动,再生水携带污染物汇入河流致使河流水体污染加剧. 此外,再生水汇入影响河流水动力条件,引起流量、流速变化,改变河流水体自净能力<sup>[16]</sup>. 北运河对有机污染物排放通量、组分特征、污染源分析以及水质评价等内容研究较多<sup>[17-20]</sup>,但针对北运河水体自净能力评估及影响因素并不清楚. 本文以北运河作为研究对象,通过实验室模拟估算、校正 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 降解系数,根据不同空间位置特点分析 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 降解系数变化规律,探究不同环境因素对 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 降解系数的影响,并识别其主要影响因子. 针对河流特点评估水体自净能力及污染削减过程,以期对北运河再生水河流水质改善和城市黑臭水体综合治理提供参考.

## 1 研究区域与方法

### 1.1 研究区概况

北运河发源于北京市,流域面积5300.00 km<sup>2</sup>,占全市总面积的27.00%,人口1300.00万,约占全市的70.00%. 其上游为温榆河,北关闸以下称北运河,右岸纳通惠河、凉水河、凤港减河等支流,左岸与潮减河、潮白河相通,多数河流流经北京城区(图1). 北运河流域涉及4个中心城区,以及延庆、昌平、怀柔等11个郊区. 清河、坝河、通惠河、凉水河构成了北运河四大排水系统,接纳了北京90.00%排水任务<sup>[21]</sup>. 清河和坝河各有4个支流,其中在清河西北部和坝河东北部接纳2座污水处理厂退水;通惠河有高碑店污水处理厂,污水经处理后排入干流;凉水河支流较多且接纳5座污水处理厂退水. 北运河干流共有防洪节制闸17座,其中北京市5座<sup>[22]</sup>. 干流两岸地形平坦,地面坡度约为2.00%,流速缓慢. 年均降雨量为643.00 mm,降雨主要集中在5—9月,约占全年的84.00%,年际变幅大,年内分配不均. 2011年平均径流量约为9.00亿m<sup>3</sup>,出境量12.00

亿 m<sup>3</sup><sup>[23]</sup>. 由于大量污水长期排入温榆河、北运河,致使水体遭受严重污染,生态遭到严重破坏. 监测资料显示,除丰水期外北运河水质处于劣 V 类<sup>[18]</sup>. 主要污染物为有机物,主要污染指标为 COD、BOD 和 NH<sub>3</sub>-N. 枯水期污染较为严重,丰水期(6—9 月)COD、NH<sub>3</sub>-N 浓度比枯水期(3—5 月)低 21%~42%<sup>[17]</sup>. 严重的水质问题是制约北运河流域生态环境改善的重要问题<sup>[18,24-25]</sup>.

## 1.2 监测概况

本文共设置 5 个采样断面(马坊桥、火沙路、东关大桥、榆林庄桥和杨洼闸),其中马坊桥、火沙路断面位于北运河上游;马坊桥位于沙河水库附近,水量流速受水闸开闭影响明显;火沙路位于蔺沟支流下游,水质受上游支流污染物汇入影响较大;东关大桥位于通州城区,地处繁华带,生活污水、农业污水长期排入;榆林庄桥位于北运河下游支流,渔业畜禽养殖较为发达;杨洼闸作为北运河北京段最后一个断面,处于通州区与河北省交界处.

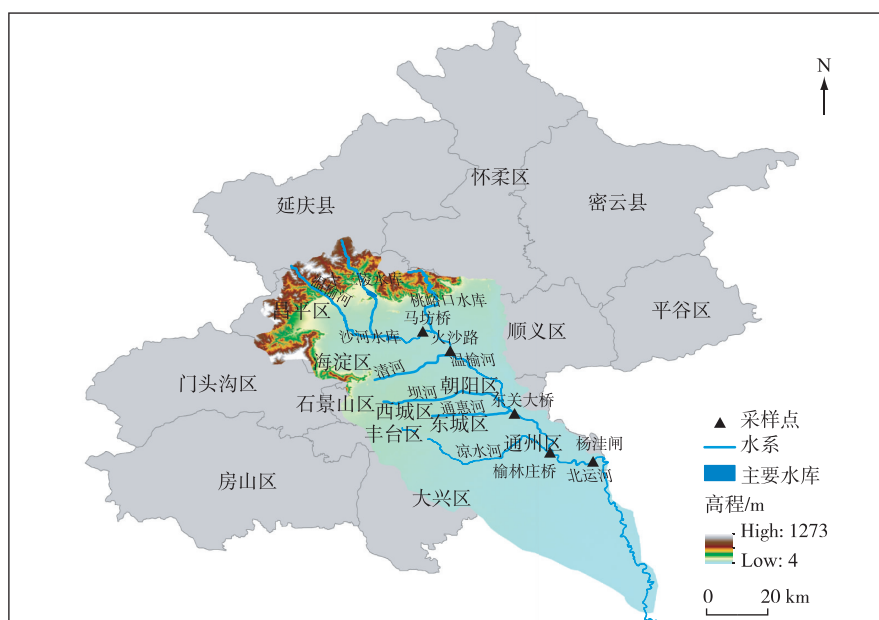


图 1 研究区位置及采样点分布

Fig.1 Distribution of research area and sampling sites

采样时间为 2010 年非汛期 10 月份,将采集的水样、底泥 4℃ 保存带回实验室用于水体自净评估与 COD<sub>Cr</sub>降解系数及影响因素的模拟. 现场测定的水质参数包括氧化还原电位(ORP)、流速、水温(T)、pH、DO 浓度. 其他水质参数 COD<sub>Cr</sub>浓度、总氮(TN)、总磷(TP)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、亚硝态氮(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)、NH<sub>3</sub>-N、总有机碳(TOC)、BOD 均依据国家《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)监测.

## 1.3 COD<sub>Cr</sub>降解模拟实验

水样取自马坊桥、火沙路、东关大桥、榆林庄桥、杨洼闸断面. COD<sub>Cr</sub>初始浓度分别为 51、38、77、62.8、58.8 mg/L. 将样品带回实验室模拟不同水温下 COD<sub>Cr</sub>降解系数变化. 将水样放置玻璃培养缸中,根据 2010 年实际测得的北运河 4—11 月水温,得到北运河春、夏、秋、冬季平均水温分别为 19.7、25.7、13.9、4.7℃. 因此,将装有 3 L 水样的玻璃培养缸放置在生化培养箱中,设置温度 20、25、14、4℃ 分别代表北运河春、夏、秋、冬四季的水温. 每组实验设置 3 个平行,连续敞口静置培养 12 d,每日监测 COD<sub>Cr</sub>数据.

以杨洼闸断面为例,设置不同条件,分别模拟水温、DO 浓度、动力条件对 COD<sub>Cr</sub>降解变化的规律. 将初始浓度相同的水样放置在 20℃ 生化培养箱中,每组实验设置 3 个平行,静置培养 12 d,每日测定 COD<sub>Cr</sub>浓度,连续测定 12 d.

溶解氧影响实验:将 3 L 初始浓度(58 mg/L)相同的水样置于 4 个玻璃培养缸中,分别编号为 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>. 在 1<sup>#</sup>培养缸中每日充纯氧 40 min 至饱和后将缸口扎紧;2<sup>#</sup>培养缸敞口,同时采用电动搅拌装置实现大气复氧;3<sup>#</sup>培养缸静止并敞口,与大气进行氧气静态交换;4<sup>#</sup>培养缸每日充入氩气 40 min 至饱和,将玻璃缸口扎紧. 4 个培养缸均静置培养.

动力条件实验:分别取 3 L 水样放于 4 个玻璃培养缸中,其中 1 个静置培养,其他 3 个分别配以 0~150 转/min 转速的电动搅拌装置,模拟自然条件下水流速度为 0.03、0.06、0.10 m/s 的动态实验. 4 个培养缸均敞口放置,实现大气复氧.

#### 1.4 水体自净能力评估

本文选取闸坝断面(杨洼闸)、受闸坝影响断面(马坊桥)以及典型支流汇入断面(火沙路)进行颗粒物沉降速率评估. 选取闸坝断面杨洼闸进一步测定水体复氧系数.

在众多水体自净参数中,颗粒物沉降速率和复氧系数是重要指标之一. 颗粒态物质的沉降速率对河流污染物的迁移、转化以及营养盐循环再生过程具有重要意义<sup>[26-27]</sup>. 水体中的溶解氧是评价水体有机物污染的重要指标之一,水体复氧过程直接导致有机污染物迁移、扩散、降解能力差异<sup>[28]</sup>.

1.4.1 颗粒物沉降速率测定 将颗粒物收集器(聚乙烯瓶)装满蒸馏水后,置于河桥断面的水底,并于第 2 天取出;将收集器中的水样带回实验室进行抽滤,抽滤前称量膜的质量,记为  $W_1$ ,抽滤后收集滤膜,并冷冻干燥后称取重量,记为  $W_2$ ,计算  $W_2$  与  $W_1$  的差值得到收集颗粒物的质量  $W$ . 在采样点带回水样,量取 1 L 水样并抽滤,滤膜上的(SS)物质重量即为悬浮质浓度  $C$ . 抽滤膜为直径 5 cm 的混合玻璃纤维膜,悬浮质 SS 的测定采用国标重量法(GB 11901—1989),玻璃纤维膜的烘干采用冷冻干燥机<sup>[29-30]</sup>. 颗粒物沉降速率  $k$  的计算公式为:

$$k = \frac{W}{C \cdot S \cdot t} \quad (1)$$

$$W = W_2 - W_1 \quad (2)$$

式中, $W$  为收集的颗粒物质量,mg; $W_1$  为抽滤前滤膜的质量,mg; $W_2$  为抽滤后滤膜的质量,mg; $C$  为悬浮质的平均浓度,mg/L; $S$  为收集器的采样面积,m<sup>2</sup>; $t$  为收集沉降物的时间,d.

1.4.2 水体复氧系数测定 水体中 DO 浓度测定采用多功能水质仪(Hydrolab MS5),监测点位于杨洼闸,监测时间为 17:00 至次日凌晨 7:00,测定时间间隔为 20 min. 复氧系数计算公式为<sup>[31-32]</sup>:

$$K = -\frac{\ln(1-a)}{t} \quad (3)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n c_i - nb} \quad (4)$$

$$b = \frac{-\left(\sum_{i=3}^n c_i^2 \sum_{i=1}^n d_i - \sum_{i=1}^n c_i d_i - \sum_{i=1}^n c_i\right)}{n \sum_{i=1}^n c_i d_i - \sum_{i=1}^n c_i \sum_{i=1}^n d_i} \quad (5)$$

$$d_i = O_{i+1} - O_i \quad (6)$$

$$c_i = O_{si} - O_i \quad (7)$$

式中, $t$  为时间,d; $O_{si}$  为第  $i$  时刻河水中的饱和 DO 浓度,mg/L; $O_i$  为第  $i$  时刻河水断面上 DO 浓度,mg/L; $n$  为时间间隔数; $K$  为复氧系数,d<sup>-1</sup>.

#### 1.5 COD<sub>Cr</sub>降解系数计算

研究认为,含 COD<sub>Cr</sub> 的污水经河水混合后污染物浓度降低,即 COD<sub>Cr</sub> 浓度在水体中随着迁移距离呈负指数变化. 基于此,本研究假设北运河中 COD<sub>Cr</sub> 的降解过程符合一级反应动力学规律<sup>[8]</sup>.

$$K = \frac{1}{t} \ln \left( \frac{C_0}{C} \right) \quad (8)$$

式中,  $K$  为降解系数,  $d^{-1}$ ;  $C_0$  为污染物初始浓度;  $C_t$  为  $t$  时间相对应的污染物浓度;  $t$  为污染物降解时间。

尽管一般研究认为, COD<sub>Cr</sub> 降解过程符合一级动力学模型, 但在实际中, 由于其他因素及实验操作可能存在不确定性, 使得必须对一元线性回归模型进行假设检验来判断上述模型的可靠性。当给定显著水平  $\alpha$  时, 计算  $T$  值<sup>[33]</sup>。

由线性回归  $y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon, \varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$  可知, 当  $\beta_1 = 0$  时认为  $y$  与  $x$  之间不存在线性关系, 因此归纳假设: 进行检验  $H_0: \beta_1 = 0, H_1: \beta_1 \neq 0$ , 当  $H_0: \beta_1 = 0$  成立, 检验统计量:

$$T = \frac{\beta_1}{\sqrt{\frac{SSE}{n-2}}} \quad (9)$$

$$L_{xx} = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \quad (10)$$

式中,  $x$  为 COD<sub>Cr</sub> 监测值;  $\beta_1$  为回归方程  $x$  系数;  $SSE$  为残差平方和;  $n$  为监测 COD<sub>Cr</sub> 的次数。若  $T \geq t_{\frac{\alpha}{2}}(n-2)$ , 则线性回归显著, 即用所得的实验数据建立的一元线性回归模型是成立的; 若  $T < t_{\frac{\alpha}{2}}(n-2)$ , 则线性回归不显著。

### 1.6 降解系数修正

由于 COD<sub>Cr</sub> 实测降解系数受河流流速、温度的影响, 因此需要对实验测定条件下的北运河降解系数进行水力及温度校正。降解系数的水力与水温修正公式为<sup>[12]</sup>:

$$K_{\text{实际}} = K_{\text{实验}} \times 1.017^{T-T_0} + \partial \frac{U}{H} \quad (11)$$

式中,  $T$  为河流实际温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_0$  为实验室河流温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $U$  为平均流速,  $\text{m/s}$ ;  $H$  为平均水深,  $\text{m}$ ;  $\partial$  为河道活度系数, 综合反映河流对有机物生化降解作用, 与河道坡度有关, 由于北运河水力坡度较小,  $\partial$  取 0.03。

### 1.7 数据处理及统计方法

利用 SPSS 软件对所得不同条件下的 COD<sub>Cr</sub> 降解系数进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA)。单因素方差分析是一个分类型自变量对一个数值型自变量的影响。采用统计推测方法对单因素多个独立样本均值进行比较, 是两样本  $t$  检验的扩展, 可检验均值间是否存在差异或哪些因素的均值存在差异<sup>[34]</sup>。

利用偏最小二乘回归模型 (partial least squares regression, PLSR) 分析各个断面水质参数与 COD<sub>Cr</sub> 降解系数之间的相关性。偏最小二乘回归是一种多因变量对多自变量的回归建模方法。可以较好地解决多元线性回归中多重相关性、样本点数据少等问题, 且结论更加可靠, 整体性更强。近年来广泛应用于化学、化工、经济、环境、食品、教育心理等领域<sup>[35]</sup>。将 2010 年实测的 5 个断面代表四季的理化指标与室内模拟出的四季 COD<sub>Cr</sub> 降解系数输入到 PLSR 模型中, 探究各个理化指标对 COD<sub>Cr</sub> 降解系数影响的重要性; 其他数据制图均在 Origin9.0 上完成; 采样点图采用 Arc GIS10.2 绘制。

## 2 结果与讨论

### 2.1 自净能力评估

结果表明, 位于北运河上游断面火沙路颗粒物沉降速率最大, 为 3.22  $\text{m/d}$ ; 马坊桥次之, 为 1.59  $\text{m/d}$ , 位于北运河下游的北京出境控制闸坝——杨洼闸最小, 为 1.09  $\text{m/d}$  (表 1)。但 3 个断面的颗粒物沉降速率均低于大清河口的 4.79  $\text{m/d}$ <sup>[36]</sup>。可能是受支流方式渠地表径流汇入影响, 导致火沙路水流量以及流速增大, 促进颗粒物相互碰撞, 颗粒物沉降速率较高。研究表明, 闸坝开启致使水体流速突涨不利于良好沉降环境的建立, 减缓颗粒物沉降速率, 这是杨洼闸断面水环境不稳定、沉降条件差的主要原因<sup>[37-38]</sup>。马坊桥主要受上游的沙水库开闭闸影响, 流速不稳定且非汛期流速较小, 导致颗粒物沉降速率偏低<sup>[29]</sup>。总之, 北运河多闸坝蓄拦作用导致北运河水量减少, 水动力不足以及闸坝闸门控制导致的颗粒物沉降环境条件差是北运河断面



颗粒物沉降速率整体偏低的主要原因.

表 1 北运河各断面的颗粒物沉降速率

Tab.1 Particle subsidence rate of typical sections on Beiyun River

采样点	时间/h	悬浮物质浓度/(mg/L)	颗粒物沉降/mg	采样器面积/m <sup>2</sup>	颗粒物沉降速率/(m/d)
马坊桥	0.99	8	88	0.00694	1.59
火沙路	0.89	17	340	0.00694	3.22
杨洼闸	0.76	13	74.5	0.00694	1.09

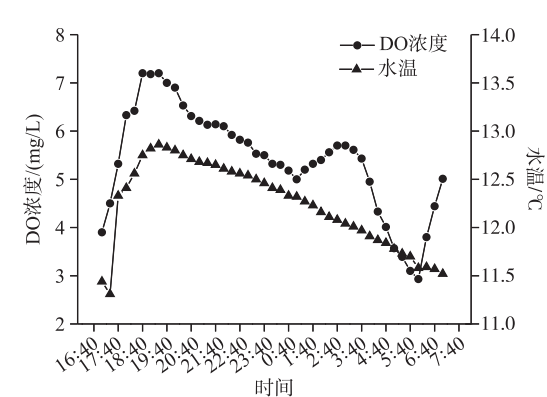


图 2 北运河溶解氧浓度连续变化  
Fig.2 Continuous change of dissolved oxygen concentration in Beiyun River

监测发现,北运河 DO 浓度从 17:00 持续上升,至 18:40 达最高(7.2 mg/L);之后缓慢降低,在夜间 1:00 左右出现浮动,DO 浓度由 5.2 mg/L 升高到 5.7 mg/L,之后继续降低;直到凌晨 6:00 降至最低,为 2.93 mg/L,之后持续上升,且增加幅度明显. 同期,杨洼闸断面 pH 和水温变化并不明显,其中,pH 变化范围为 7.08 ~ 7.42,水温变化范围为 11.31 ~ 12.86℃(图 2). 19:00 之后 DO 浓度呈下降趋势的主要原因是河流中水生生物的呼吸作用的耗氧速率大于水体复氧速率<sup>[14]</sup>. 在 1:00 时出现波动可能是因为流速改变引起大气氧气交换发生变化,水体复氧速率高于水生生物呼吸作用. 之后由于水体有机物分解耗氧、底泥耗氧、水生生物呼吸耗氧,致使水体 DO 浓度持续降低. 直至次日凌晨 6:00,日出后随着水生植物的光合作用,复氧系数大于水体生物的

耗氧系数,DO 浓度逐渐上升<sup>[39-40]</sup>. 利用复氧系数计算公式,测得杨洼闸的复氧系数为 0.016 d<sup>-1</sup>. 与文献[36]推荐的复氧系数值 0.40 d<sup>-1</sup>相比,北运河复氧系数偏低,水体自净能力较弱.

2.2 COD<sub>Cr</sub>降解系数计算及校正

北运河一年中 COD<sub>Cr</sub>降解系数变化范围为 0.0156~0.0847 d<sup>-1</sup>,最大值出现在杨洼闸 25℃条件下,最小值出现在东关大桥 4℃条件下(表 2). 北运河各断面与各温度之间的 COD<sub>Cr</sub>降解系数均表现出显著差异性( $P<0.05$ ,表 3). 通过对室内试验水力、水温修正,得到北运河 COD<sub>Cr</sub>降解系数范围为 0.0184~0.0883 d<sup>-1</sup>. 修正后的降解系数有所增加,这一结果与室内模拟 COD<sub>Cr</sub>降解系数偏低与现场直接测量结果的结论相一致<sup>[41]</sup>.

表 2 修正前后 COD<sub>Cr</sub>降解系数(d<sup>-1</sup>)结果

Tab.2 COD<sub>Cr</sub> degradation coefficients (d<sup>-1</sup>) before and after correction

断面(位置)		4℃	14℃	20℃	25℃
马坊桥(上游)	修正前	0.0223	0.0319	0.0412	0.0613
	修正后	0.0249	0.0343	0.0429	0.0649
火沙路(上游)	修正前	0.0287	0.0378	0.0469	0.0642
	修正后	0.0313	0.0407	0.493	0.0675
东关大桥(中下游)	修正前	0.0156	0.0179	0.0238	0.0286
	修正后	0.0184	0.0207	0.0270	0.0321
榆林庄桥(下游)	修正前	0.0171	0.0246	0.0305	0.0378
	修正后	0.0199	0.0271	0.0323	0.0410
杨洼闸(下游)	修正前	0.0393	0.0501	0.0694	0.0847
	修正后	0.0416	0.0535	0.0703	0.0883

此外,由表 3  $T$  值可知,取  $\alpha = 0.01$  的水平,均得到  $T \geq t_{\frac{\alpha}{2}}(n - 2) = 3.169$ . 因此通过线性回归检验证明, COD<sub>Cr</sub>降解系数符合一级动力模型,所得 COD<sub>Cr</sub>降解系数值具有可靠性.

总之,与其他河流 COD<sub>Cr</sub>降解系数值相比<sup>[41]</sup>,北运河 COD<sub>Cr</sub>降解系数总体偏低(表 2). 主要原因有以下 3 个方面:首先,北运河长期缺少天然径流,补水主要是再生水,再生水携带污染物汇入北运河,加剧水体污染程度;其次,北运河受到周围城市生活、农业污水影响,水质自净能力下降,生态功能破坏严重. 研究表明,北运河不可生物降解成分浓度高,整个河流水环境的可生化性较差. 上游水体溶解性不可降解有机物浓度低于下游水体,中游地区主要为慢速可降解有机物与溶解性不可降解有机物<sup>[19]</sup>;另外,北运河水文条件较差,自净能力差. 由于存在多闸坝系统,闸坝蓄拦,破坏水系连通性. 水位升高,河流流速缓慢,污染物转移、稀释、降解作用差,使得闸坝上下游水体交换能力较弱且易形成瞬间冲击负荷,破坏微生物菌群的良性驯化过程<sup>[42]</sup>.

表 3 COD<sub>Cr</sub>降解系数验证结果  
Tab.3 Verification results of COD<sub>Cr</sub> degradation coefficients

断面	位置	水温	相关系数( $r$ )	残差平方和( $SSE$ )	$T$ 值
马坊桥	上游	4℃	0.9331	0.006	14.87
		14℃	0.8985	0.015	13.29
		20℃	0.8501	0.025	13.20
		25℃	0.9554	0.061	11.94
火沙路	上游	4℃	0.9163	0.007	16.69
		14℃	0.9499	0.014	16.15
		20℃	0.9373	0.054	10.43
		25℃	0.9647	0.002	22.77
东关大桥	中下游	4℃	0.8395	0.003	14.58
		14℃	0.9493	0.003	16.73
		20℃	0.9310	0.007	14.17
		25℃	0.9638	0.007	17.44
榆林庄桥	下游	4℃	0.8998	0.004	13.68
		14℃	0.9591	0.001	16.40
		20℃	0.9751	0.005	19.90
		25℃	0.9595	0.018	14.54
杨洼闸	下游	4℃	0.9217	0.014	19.65
		14℃	0.9804	0.035	13.69
		20℃	0.9460	0.071	13.42
		25℃	0.9927	0.001	15.45

2.3 不同环境条件对 COD<sub>Cr</sub>降解系数的影响

利用偏最小二乘回归模型(PLSR)探究了北运河各断面 COD<sub>Cr</sub>降解系数的主要影响因子(图 3). 结果表明,水温、ORP、营养盐、TOC 对北运河 COD 降解系数影响较大. 水温对 COD<sub>Cr</sub>降解系数具有正效应,即水温越高越有利于 COD<sub>Cr</sub>降解. 研究结果显示温度对 COD 降解过程存在一定阈值效应,在 4~25℃内随着水温升高,COD<sub>Cr</sub>降解系数趋于增大,相关研究也证实了这一观点. 北运河可降解有机物主要通过光化学分解、化学分解、生物分解的方式降解,COD<sub>Cr</sub>降解主要依赖于生物降解<sup>[43]</sup>,而温度对微生物群落结构、活性影响较大,适宜的温度能够促进微生物对 COD<sub>Cr</sub>的降解速率<sup>[44]</sup>;其中 ORP 对上述 5 个断面的 COD<sub>Cr</sub>降解系数具有明显的负相关性,这与相关研究结果基本接近. 北运河 COD<sub>Cr</sub>降解受 ORP 影响较大的可能原因是电导率可以促进水体有机物吸附性,降低有机物亲水性,导致有机物被吸附到惰性物质表面上,不易于与微生物接触反应<sup>[45]</sup>. 此外,相关研究表明,电导率越低就越有利于提高放电过程活性粒子产量,促进有机物降解<sup>[46]</sup>. 营养盐对 COD<sub>Cr</sub>降解具有一定促进作用,这主要是因为营养盐可以通过促进水体中微生物的活性,进而促进

COD<sub>Cr</sub>降解速率增加. 研究认为,营养盐是水环境中生物降解速率重要影响因素之一<sup>[47]</sup>;另外,TOC 能够为微生物提供碳源,促进微生物的新陈代谢功能,导致微生物对 COD 的降解速率增加<sup>[48]</sup>. 本研究结果表明, TOC 浓度与水体中 COD<sub>Cr</sub>降解速率呈现明显的正相关关系,这与已有研究结果<sup>[49]</sup>基本类似.

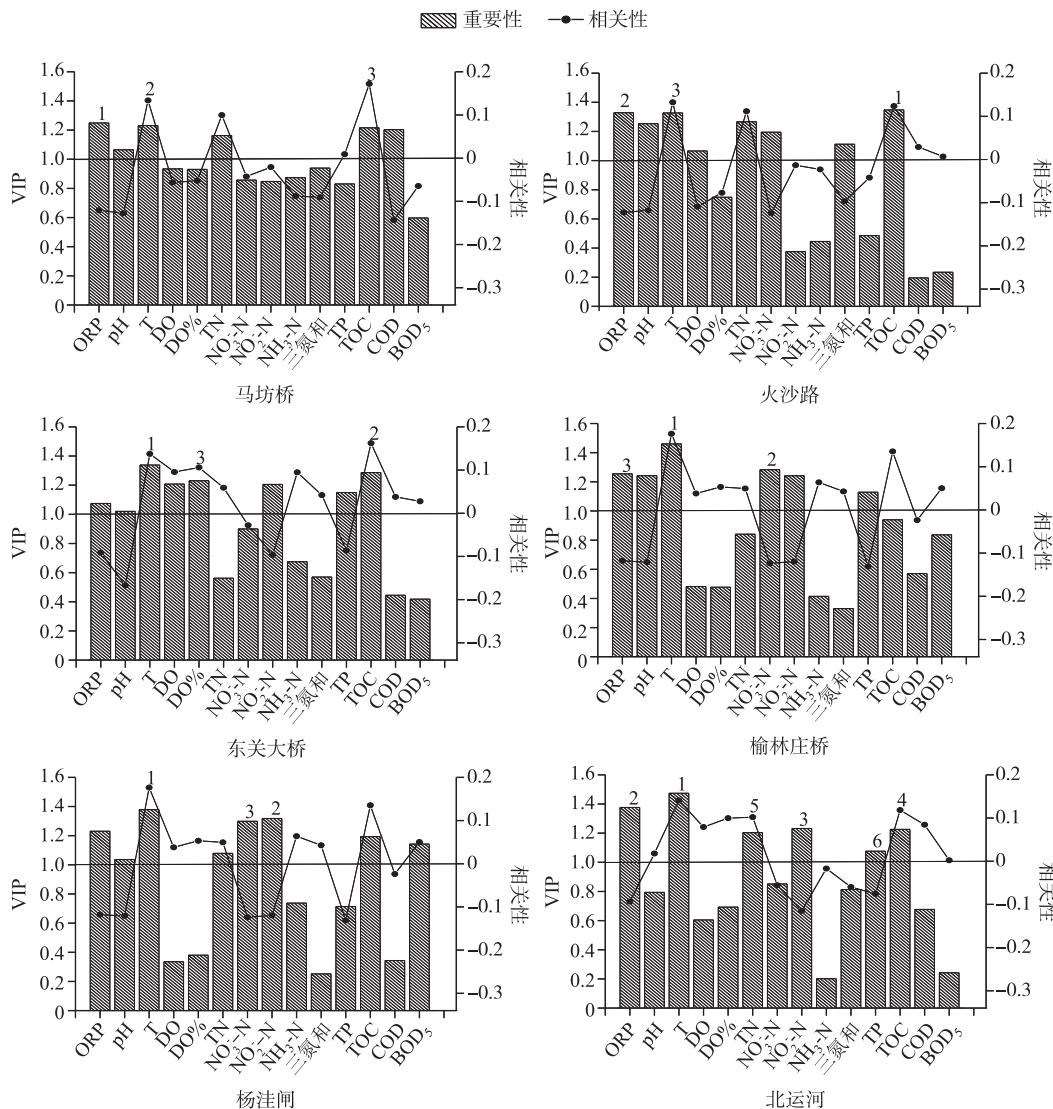


图3 北运河 COD<sub>Cr</sub>降解系数可变重要性

Fig.3 Variable importance of COD<sub>Cr</sub> degradation coefficient in Beiyun River

从影响因子的空间相似性来看,北运河不同闸坝位置的 COD<sub>Cr</sub>降解系数因素存在一定的差异性. 其中,上游的马坊桥和火沙路断面的 COD<sub>Cr</sub>降解系数影响因子基本一致,主要包括 ORP、水温、TOC、TN 以及 pH. 位于北运河中游的东关大桥的影响因素与上下游点位明显不同,其中 DO 成为该点位 COD<sub>Cr</sub>降解的重要因素之一,下游的榆林庄和杨洼闸断面的 COD<sub>Cr</sub>降解系数影响因素基本一致,包括 ORP、pH、水温、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 等<sup>[50]</sup>.

通过水质参数对北运河 COD<sub>Cr</sub>降解系数影响的分析,发现不同断面间水质指标对 COD<sub>Cr</sub>降解系数存在差异. 针对北运河而言,水温是理化指标中最重要的影响因子;而降解系数最低的东关大桥,DO 浓度为重要



影响因子之一. 这与其他断面结果不同.

水温、溶解氧对 COD<sub>Cr</sub>降解系数的影响规律有待进一步探究,此外,外源动力条件也是 COD<sub>Cr</sub>降解系数的重要影响因子. 因此,本文选取水温、DO 浓度、流速对 COD<sub>Cr</sub>降解系数的影响进行室内模拟,探讨不同环境因素对 COD<sub>Cr</sub>降解系数的影响.

**2.3.1 不同断面 COD<sub>Cr</sub>降解系数及差异** 由表 2 可知,北运河水体的 COD<sub>Cr</sub>降解系数存在明显的空间差异性 ( $P=0.028$ ),上游断面降解系数普遍高于下游断面,但下游断面杨洼闸表现出了闸坝断面特殊性. 以 20℃ 下不同点位 COD<sub>Cr</sub>降解系数变化规律为例(图 4),5 个断面中杨洼闸 COD<sub>Cr</sub>降解系数最高(0.0694 d<sup>-1</sup>),其次是上游断面火沙路(0.0469 d<sup>-1</sup>),中下游东关大桥断面降解系数最低(0.0235 d<sup>-1</sup>). 这与陈永娟等对北运河水系主要污染物来源与污染分区特征结果具有较高一致性<sup>[20]</sup>.

马坊桥与火沙路均在温榆河上游,马坊桥受到上游非汛期闸坝关闭影响,水动力条件较差,水中颗粒物沉降速率相对较低. 随着水体流速增加,其下游火沙路水体自净能力高于马坊桥,污染物浓度降低且降解性能趋于好转. 因此,火沙路 COD<sub>Cr</sub>降解性能偏高于马坊桥. 东关大桥位于通州城区繁华地带,人口活动密集,有大量生活污水、农业污水汇入. 东关大桥紧邻通惠河支流口,该支流设有高碑店污水处理厂,且污水处理设施超负载运转普遍. 除了污水处理厂处理后的污水排入干流,其他未处理污水也会直排入北运河<sup>[17]</sup>. 因此,导致东关大桥水质复杂,不可降解性物质多,DO 浓度低,降解性能差. 榆林庄桥断面主要污染源为上游畜禽加工废水和鱼塘换水,经常未经处理或不达标处理排到凉水河,致使断面 COD<sub>Cr</sub>降解效果差<sup>[51]</sup>. 杨洼闸断面降解系数相对最高,约为东关大桥 COD<sub>Cr</sub>降解系数的 3 倍. 究其原因可能是通州段上游水量充足,两岸有经绿化的休闲广场,且建有北运河森林公园及湿地. 水体中污染物经过通州段上游的匀质、扩散、降解作用,以及通过调节闸门增大流量使得污染物得到较好稀释,生态功能部分恢复,污染物相对稳定. 因此与上游断面相比,其降解速率最大.

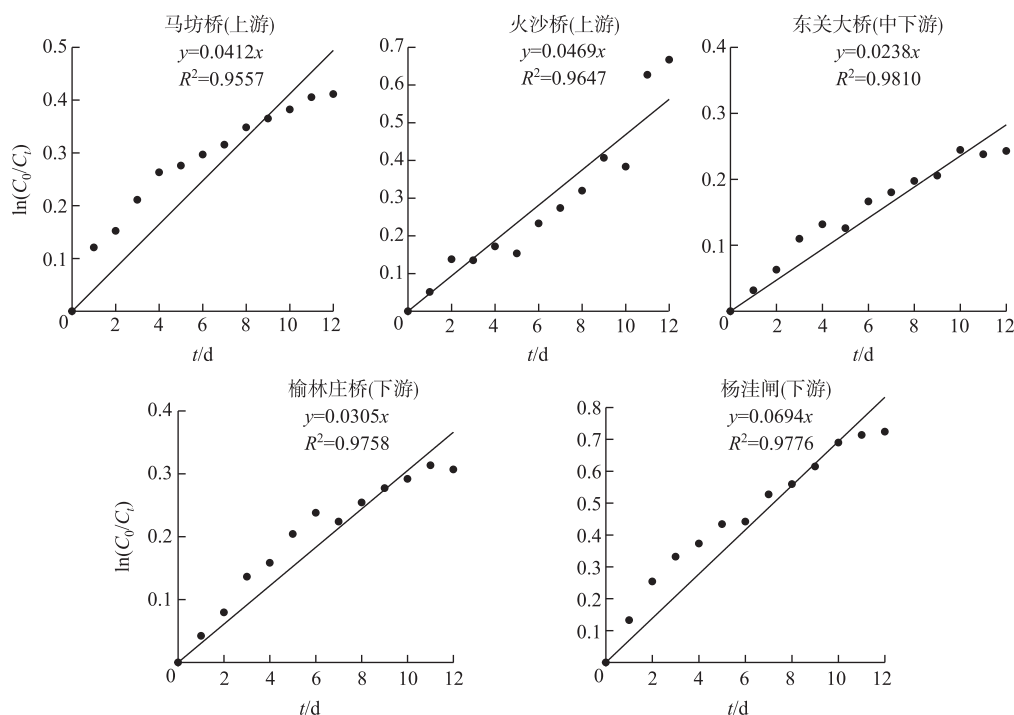


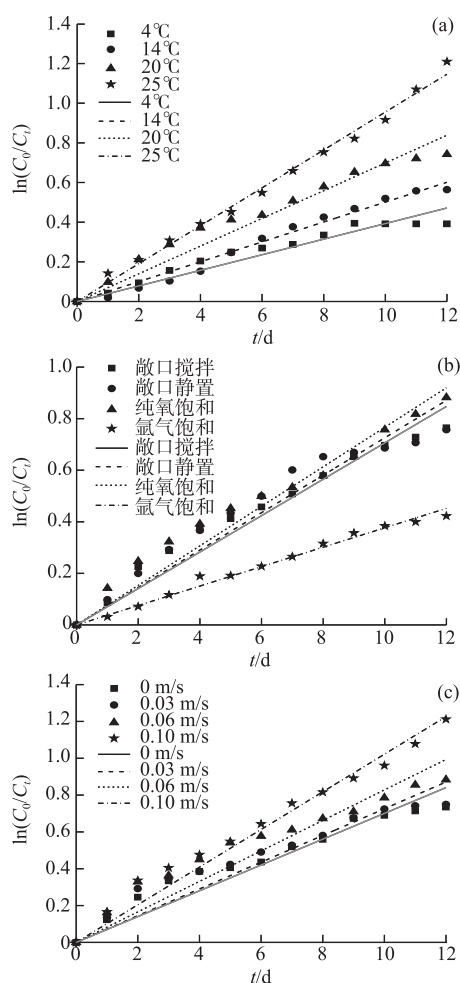
图 4 北运河典型断面 COD<sub>Cr</sub>的  $\ln(C_0/C_t)-t$  关系

Fig.4  $\ln(C_0/C_t)-t$  diagram of COD<sub>Cr</sub> at typical sections of Beiyun River

**2.3.2 不同水温对 COD<sub>Cr</sub>降解系数及差异性的影响** 由表 4 可知,水温对 COD<sub>Cr</sub>降解系数具有明显影响( $P=$

表 4 不同温度下  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  降解速率及相关系数Tab.4  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  degradation rate and correlation coefficients at different temperatures

水温/ ℃	方程式	相关系数 ( $r$ )	降解系数/ $\text{d}^{-1}$
4	$\ln(C_0/C_t) = 0.0393t$	0.9217	0.0393
14	$\ln(C_0/C_t) = 0.0491t$	0.9733	0.0491
20	$\ln(C_0/C_t) = 0.0699t$	0.9460	0.0699
25	$\ln(C_0/C_t) = 0.0955t$	0.9627	0.0955

图 5 不同水温 (a)、溶解氧 (b) 和流速 (c) 下  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  的  $\ln(C_0/C_t)-t$  关系Fig.5  $\ln(C_0/C_t)-t$  diagram of  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  at different water temperatures (a), dissolved oxygen levels (b) and flow rates (c)

0.045), 随着温度升高  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  降解系数呈升高趋势. 4℃ 下  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  降解系数变化范围为 0.0184~0.0416  $\text{d}^{-1}$ ; 14℃ 下  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  降解系数变化范围为 0.0207~0.0535  $\text{d}^{-1}$ ; 20℃ 下  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  降解系数变化范围为 0.027~0.0703  $\text{d}^{-1}$ ; 25℃ 下  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  降解系数变化范围为 0.0321~0.0883  $\text{d}^{-1}$ . 以杨洼闸断面为例, 将  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  数据代入公式 (8) 进行一元线性回归得到图 5a, 并求得不同温度的  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  降解速率及相关系数.

根据线性回归结果可知, 25℃ 的  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  降解速率最大, 4℃ 的降解速率最小, 且 25℃ 的  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  降解速率约为 4℃ 的两倍, 主要原因在于温度较高时生物活性高, 对  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  的降解效能也就越强. 相反, 在温度较低的冬季, 生物生长受到抑制, 河流流速较慢, 污染物的降解能力减弱. 研究表明, 温度为 20~25℃ 左右有机物生物降解性能最佳. 此外, 相关研究发现在微生物活性范围内, 温度升高 10℃,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  降解系数会提高一倍<sup>[52]</sup>. 从北运河不同温度下的降解系数来看, 当温度由 10℃ 升高到 20℃ 时,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  降解系数提高不到一倍; 温度由 4℃ 升高到 20℃ 时,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  降解系数提高了一倍, 其原因可能是北运河有机污染成分复杂, 含有较多难降解有机物且水文状况不佳导致河流水体水质可生化性差<sup>[19]</sup>. 研究表明, 未来 (至 2050 年) 温度变化对水质有机物污染的影响变得更为严重<sup>[53]</sup>.

2.3.3 不同 DO 浓度对  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  降解系数的影响 将实验数据代入公式 (8), 得到一元线性回归如图 5b, 并求得同一初始浓度下, 不同 DO 浓度的  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  降解速率及相关系数 (表 5).

结果表明, 同一水样在不同溶解氧水平下,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  降解速率存在显著差异性 ( $P=0.042$ ). 随着 DO 浓度下降,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  降解系数逐渐减小. 敞口电动搅拌与敞口静置差异不明显, 可能原因在于设定搅拌流速 (0.03 m/s) 较小, 大气氧气与水体交换量少. 充纯氧饱和与敞口状态  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  降解系数差异变化不明显, 但相对充氩气至饱和状态变化明显, 降解系数约为 2 倍. 当天然河流中 DO 浓度 > 2 mg/L 时, DO 通过影响微生物新陈代谢过程影响污染物降解系数. DO 浓度升高, 耗氧有机污染物生物降解更顺利<sup>[54]</sup>, 且充足的 DO 还能够抑制底泥对上覆水体的二次污染<sup>[55]</sup>. 当水体 DO 浓度 < 2 mg/L 时, DO 成为  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  降解的限制性因素. 低 DO 浓度导致污染物厌氧分解, 产生甲烷、硫化氢等有害气体, 破坏水生态系统, 损害天然水体的自净能力<sup>[56]</sup>. 充纯氧至饱和、敞口磁力搅拌两个水样均能保证水体微生物正常代谢, 因此它们的降解速率差别不大. 但充氩气饱和和水样中 DO 浓度较低, 水中的异氧微生物对 DO 的需求不能满足, 因此有机物

降解速率降低.

2.3.4 外源动力条件对 COD<sub>Cr</sub>降解系数的影响

由实验结果可知,搅拌状态下 COD<sub>Cr</sub>的降解速率高于静置状态,当流速为 0.1 m/s 时 COD<sub>Cr</sub>降解系数约为静置状态的 1.50 倍. 当流速较小时 (0.03 m/s),降解系数变化不明显. 一般认为,水体扰动条件比静态更有利于污染物的降解. 随着水动力增加,水中 DO 更易进入水体,促进微生物对有机物的耗氧降解. 已有研究中,华祖林等<sup>[57]</sup>考虑流速对污染物降解性能影响,设置 0.06 和 0.10 m/s 的转速,分别得到的降解系数为静态降解系数的 2~3 倍. 北运河流速对 COD<sub>Cr</sub>降解系数变化差异相对较小,其可能的原因是再生水河流中可溶性难降解有机物较多. 且闸坝系统下的杨洼闸沉降环境相对较差,增大水流速度,只有少量颗粒态有机物快速沉降. 此外,北运河水体微生物菌群变化、活性较低,流速增大水体污染物质衰减可能未必持续增大,反而由于流速增大,减少了水体中微生物和污染物滞留时间,不利于污染物与微生物之间的充分接触<sup>[9]</sup>. 将实验数据代入公式(8)进行一元线性回归得到图 5c,并求得降解速率及相关系数(表 6).

表 5 不同 DO 浓度下 COD<sub>Cr</sub>降解速率及相关系数

Tab.5 COD<sub>Cr</sub> degradation rate and correlation coefficient under different dissolved oxygen conditions

溶解氧状态	方程式	相关系数 (r)	降解系数/ d <sup>-1</sup>
充纯氧至饱和	$\ln(C_0/C_t) = 0.0767t$	0.9517	0.0767
敞口电动搅拌	$\ln(C_0/C_t) = 0.0734t$	0.9305	0.0734
敞口静态交换	$\ln(C_0/C_t) = 0.0706t$	0.9496	0.0706
充氩气至饱和	$\ln(C_0/C_t) = 0.0377t$	0.9870	0.0377

表 6 不同流速下 COD<sub>Cr</sub>降解速率及相关系数

Tab.6 COD<sub>Cr</sub> degradation rate and correlation coefficient at different flow rates

流速/ (m/s)	方程式	相关系数 (r)	降解系数/ d <sup>-1</sup>
0.00	$\ln(C_0/C_t) = 0.0701t$	0.9059	0.0701
0.03	$\ln(C_0/C_t) = 0.0726t$	0.8842	0.0726
0.06	$\ln(C_0/C_t) = 0.0828t$	0.8792	0.0828
0.10	$\ln(C_0/C_t) = 0.1022t$	0.9698	0.1022

3 结论

1)北运河污染负荷严重,多闸坝、水力坡度小以及水流流速缓慢等因素,不利于污染物稀释、扩散、转化,水体自净能力差. 颗粒物沉降速率范围为 1.09~3.22 m/s,其中,杨洼闸断面复氧系数偏低,为 0.016 d<sup>-1</sup>.

2)北运河 COD<sub>Cr</sub>降解变化规律符合一级动力学方程,降解系数偏低,界于 0.0184~0.0883 d<sup>-1</sup>之间. COD<sub>Cr</sub>降解系数存在明显的空间差异性,下游东关大桥、榆林庄桥断面 COD<sub>Cr</sub>降解性能低于上游马坊桥、火沙路断面. 主要原因在于下游断面受农业污染、城镇化干扰较为严重. 下游北京最后出水断面的杨洼闸降解性能最大(0.0416~0.0883 d<sup>-1</sup>),表现出闸坝断面的特殊性.

3)水质参数中水温、DO、ORP、TOC 以及营养盐是影响 COD<sub>Cr</sub>降解系数重要环境因子. 其中,COD<sub>Cr</sub>降解系数随着温度升高而增大;DO 浓度较高时能够促进 COD<sub>Cr</sub>降解. 外源动力条件能够促进 COD<sub>Cr</sub>降解系数的升高,但流速大小并不是 COD<sub>Cr</sub>降解的限制性因素.

4)北运河为再生水补给河流,生活污水、农业污染等致使北运河河流自然净化能力弱. 多闸坝系统蓄拦作用破坏水体连通性,开闭闸的人为干扰改变河流环境状况,降低对有机物的降解性能. 因此,为提高北运河水体自净能力,首先应减少城镇生活、农业污染源的排放;其次,提高污水处理厂排放标准且加强处理效率;配以河滨带修复,提高入河水质. 此外,需采取近自然治理技术的生态修复,增强河流连续性修复,促进水动力,改善水环境.

4 参考文献

[ 1 ] Dan D. Study on budget of ammonia degradation coefficient of Beiyun River[ Dissertation]. Beijing: Normal Capital University, 2013. [ 单铎. 北运河氨氮降解系数测算研究[ 学位论文]. 北京: 首都师范大学, 2013.]

[ 2 ] Pu XC, Li KF, Li J *et al.* The effect of turbulence in water body on organic compound bildegradation. *China Environmental Science*, 1999, **19**(6): 485-489. [ 蒲迅赤, 李克锋, 李嘉等. 紊动对水体中有机物降解影响的实验. 中国环境科学, 1999, **19**(6): 485-489.]

- [ 3 ] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China ed. Water pollution prevention and control plan for key watersheds. Energy Conservation and Environmental Protection, 2017. [ 中华人民共和国环境保护部. 重点流域水污染防治规划(2016—2020年). 节能与环保, 2017. ]
- [ 4 ] Ma J. Research on the non-point source pollution characteristics analysis and control and management of Huaihe Basin [Dissertation]. Beijing: Tsinghua University, 2013. [ 马静. 淮河流域面源污染特征分析与控制策略研究[学位论文]. 北京: 清华大学, 2013. ]
- [ 5 ] Zhu M. Study on agriculture NPS loads of Haihe Basin and assessment on its environmental impact [Dissertation]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011. [ 朱梅. 海河流域农业非点源污染负荷估算与评价研究[学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2011. ]
- [ 6 ] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China ed. Energy conservation and comprehensive emission reduction. China Environment New, 2017. [ 中华人民共和国环境保护部. 十三五节能减排综合工作方案. 中国环境报, 2017. ]
- [ 7 ] Dai AQ. Calculation method and application of land-based TN and COD pollutants allocated capacity index system in Bohai Sea [Dissertation]. Qingdao: Ocean University of China, 2015. [ 戴爱泉. 渤海陆源 TN 和 COD 污染物分配容量指标体系计算方法及应用[学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2015. ]
- [ 8 ] Feng S, Li XY, Deng JC. Biodegradation coefficients of typical pollutants in the plain rivers network. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1724-1733. [ 冯帅, 李叙勇, 邓建才. 平原河网典型污染物生物降解系数的研究. 环境科学, 2016, **37**(5): 1724-1733. ]
- [ 9 ] Yu Y, Wu J, Wang XY *et al.* Degradation of inorganic nitrogen in Beiyun River of Beijing, China. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, **13**: 1069-1075. DOI: 10.1016/j.proenv.2012.01.100.
- [ 10 ] Wang X, Zhang Y, Zhang M. Fate of COD and ammonia-nitrogen in a highly stressed watercourse in Northern China: the Zhangweinan Canal basin. *Water International*, 2011, **7**(36): 937-947.
- [ 11 ] Lincheva S, Todorova Y, Topalova Y. Long-term assessment of the self-purification potential of a technologically managed ecosystem: the Middle Iskar cascade. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 2014, **28**(3): 455-462.
- [ 12 ] Tao W, Liu Y, Ren YR. Study on ammonia nitrogen degradation coefficient in Yibin section of Yangtze River. *Pollution Control Technology*, 2009, **22**(6): 8-9. [ 陶威, 刘颖, 任怡然. 长江宜宾段氨氮降解系数的实验室研究. 污染防治技术, 2009, **22**(6): 8-9. ]
- [ 13 ] Feng S, Li XY, Deng JC. Determination of comprehensive pollutants attenuation coefficients of the plain river networks in the upper reaches of Lake Taihu Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, (3): 878-887. [ 冯帅, 李叙勇, 邓建才. 太湖流域上游平原河网污染物综合衰减系数的测定. 环境科学学报, 2017, (3): 878-887. ]
- [ 14 ] Wei G, Yang Z, Cui B *et al.* Impact of dam construction on water quality and water self-purification capacity of the Lancang River, China. *Water Resources Management*, 2009, **23**(9): 1763-1780. DOI:10.1007/s11269-008-9351-8.
- [ 15 ] Chen Y, Liu Y, Zhou Q *et al.* Enhanced phosphorus biological removal from waste water effect of microorganism acclimatization with different ratios of short-chain fatty acids mixture. *Biochemical Engineering Journal*, 2005, **27**(1): 24-32. DOI: 10.1016/j.bej.2005.06.003.
- [ 16 ] Zhang R, Liu C, Gu Y *et al.* Evaluation method of water ecological restoration technologies in urban river and lake supplied by reclaimed water established by analytical hierarchy: Establishing and application. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, **11**(6): 3545-3554.
- [ 17 ] Jing HW, Zhang ZG, Guo J. Water pollution characteristics and pollution sources of Bei Canal river system in Beijing. *China Environmental Science*, 2013, **33**(2): 319-327. [ 荆红卫, 张志刚, 郭婧. 北京北运河水系水质污染特征及污染源分析. 中国环境科学, 2013, **33**(2): 319-327. ]
- [ 18 ] Guo J, Jing HW, Li JX *et al.* Surface water quality of Beiyun Rivers basin and the analysis of acting factors for the recent ten years. *Environmental Science*, 2012, **33**(5): 1511-1518. [ 郭婧, 荆红卫, 李金香等. 北运河系地表水近 10 年来水质变化及影响因素分析. 环境科学, 2012, **33**(5): 1511-1518. ]
- [ 19 ] Du Y, Hu WX, Wang XY *et al.* Concentrations of chemical oxygen demand fractions and their biodegradability in waters of Beiyun River, Beijing. *Wetland Science*, 2017, **15**(3): 470-477. [ 杜伊, 胡玮璇, 王晓燕等. 北京市北运河水体中化学需氧量组分含量及其可生化性研究. 湿地科学, 2017, **15**(3): 470-477. ]
- [ 20 ] Chen YJ, Pang SJ, Geng RZ *et al.* Fluxes of the main contaminant in Beiyun River. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015,

- 35(7): 2167-2176. [陈永娟, 庞树江, 耿润哲等. 北运河水系主要污染物通量特征研究. 环境科学学报, 2015, 35(7): 2167-2176.]
- [21] Chen YJ, Hu WX, Pang SJ *et al.* Spatial distribution characteristics and source analysis of dissolved organic matter in Beiyun River. *Environmental Science*, 2016, 37(8): 3017-3025. [陈永娟, 胡玮璇, 庞树江等. 北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析. 环境科学, 2016, 37(8): 3017-3025.]
- [22] Beijing North Canal Administration Office ed. The North Canal floods and droughts. Beijing: Water Power Press, 2003. [北京市北运河管理处. 北运河水旱灾害. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.]
- [23] Ji LN, Yu HZ, Liu Y *et al.* Analysis on the water resources of north canal from 2010 to 2011. *Beijing Water*, 2016, (3): 9-11. [吉利娜, 于海柱, 刘勇等. 北运河 2010-2011 年水资源量调查成果分析. 北京水务, 2016, (3): 9-11.]
- [24] Cai M. Project cost control on the east reverside road of the Tongzhou North Canal[Dissertation]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015. [蔡猛. 通州区北运河东滨河路项目成本控制研究[学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2015.]
- [25] Beijing Municipal Environmental Protection Bureau. Beijing environmental statement 2016. Beijing Municipal Environmental Protection Bureau, 2017. [北京环境保护局. 2016 年北京市环境保护公告. 北京环境保护局, 2017.]
- [26] Simon M, Grossart HP, Schweitzer B *et al.* Microbial ecology of organic aggregates in aquatic ecosystems. *Aquat Microb Ecol*, 2002, (28): 175-211.
- [27] Turner JT. Zooplankton fecal pellets, marine snow and sinking phytoplankton blooms. *Aquat Microb Ecol*, 2002, (27): 57-102.
- [28] Wang L. Research on reoxygenation behavior characteristics of wave[Dissertation]. Qingdao: Ocean University of China, 2012. [王乐. 波浪作用下水体复氧行为特性研究[学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.]
- [29] Freitas PS, Abrantes F. Suspended particulate matter in the Mediterranean water at the Gulf of Cadiz and off the southwest coast of the Iberian Peninsula. *Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography*, 2002, 49(19): 4245-4261.
- [30] Cao J, Liu JH, Chu ZS *et al.* The effect of suspended particulates in Poyang Lake on the growth and flocculation of three kinds of algae. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(5): 1318-1324. [曹晶, 刘建辉, 储昭升等. 鄱阳湖水体颗粒物对 3 种典型藻类的生长及絮凝作用. 环境科学学报, 2015, 35(5): 1318-1324.]
- [31] Ebel W, Raymond H. Effect of atmospheric gas supersaturation on salmon and steelhead trout of the 'Snake and Columbia Rivers. *Symposium on Reaeration Research*, 1976, 7(38): 1-14.
- [32] Luo WS, Li LH, He T. Advances and prospects in the research of water reaeration theory and reaeration coefficient. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, (11): 64-70. [雒文生, 李莉红, 贺涛. 水体大气复氧理论和复氧系数研究进展与展望. 水利学报, 2003, (11): 64-70.]
- [33] Lei P ed. Probability and mathematical statistics. Shanghai: Lixin Accountant Press, 2012. [雷平. 概率论与数理统计. 上海: 立信会计出版社, 2012.]
- [34] Li ZH, Luo P eds. PASW/SPSS Statistics Chinese statistical analysis tutorial. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. [李志辉, 罗平. PASW/SPSS Statistics 中文版统计分析教程. 北京: 电子工业出版社, 2003.]
- [35] Cheng Z. Research on several key technologies of Partial Least Squares Regression in chemistry and chemical process modeling[Dissertation]. Hangzhou: Zhe Jiang University, 2005. [成忠. PLSR 用于化学化工建模的几个关键问题的研究[学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2005.]
- [36] Tan K, Chen QW, Mao JQ *et al.* The self-purification capacity of the outlet of Daqinghe River; experiment. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4736-4742. [谭夔, 陈求稳, 毛劲乔等. 大清河河口水体自净能力实验. 生态学报, 2007, 27(11): 4736-4742.]
- [37] Zhang W, Zhang H, Dan BQ. Characteristics of heavy metal pollution in the sediments from Shahe Reservoir, the upper reach of the North Canal River. *Environmental Science*, 2012, 33(12): 4284-4290. DOI: 10.13227/j.hjxx.2012.12.036. [张伟, 张洪, 单保庆. 北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究. 环境科学, 2012, 33(12): 4284-4290.]
- [38] Chen H, Zuo QT, Dou M *et al.* Comprehensive experimental research on impacts of dam operation on water environment of polluted river. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(3): 763-771. [陈豪, 左其亭, 窦明等. 闸坝调度对污染河流水环境影响综合实验研究. 环境科学学报, 2014, 34(3): 763-771.]
- [39] Matthew G, Mesa LK, Weiland A. Progression and severity of gas bubble trauma in Juvenile Salmonids. *Transactions of the*



- American Fisheries Society*, 2000, **129**(1): 174-185.
- [40] Deng SS. Dissolved oxygen in lowland Jiaying river [Dissertation]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. [邓思思. 嘉兴平原河网溶解氧平衡研究 [学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2013.]
- [41] Guo R, Li YB, Fu G. Controlling factors of degradation coefficient on organic pollutant in river. *Journal of Meteorology and Environment*, 2008, **24**(1): 56-59. [郭儒, 李宇斌, 富国. 河流中污染物衰减系数影响因素分析. 气象与环境学报, 2008, **24**(1): 56-59.]
- [42] Zhou QY, Wang SF eds. Environmental engineering microbiology. Beijing: Higher Education Press, 2008. [周群英, 王士芬. 环境工程微生物学. 北京: 高等教育出版社, 2008.]
- [43] Peng YL, Ma CY eds. Treatment and control of high concentration of difficult-degradable organic wastewater. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. [彭英利, 马承愚. 高浓度难降解有机废水的治理与控制. 北京: 化学工业出版社, 2006.]
- [44] Yu Y, Wang XY, Zhang PF. Spatial distribution of planktonic bacterial community and its relationship to water quality in Beiyun River. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2012, **7**(3): 337-344. [于洋, 王晓燕, 张鹏飞. 北运河水体浮游细菌群落的空间分布特征及其与水质的关系. 生态毒理学报, 2012, **7**(3): 337-344.]
- [45] Pitter P. Determination of biological biodegradability of organic substances. *Water Research*, 1976, **10**(2): 231-235.
- [46] Cheng H, Ye QZ, Tan SX *et al.* Influential factors on degradation rate of organic contamination in water treatment by discharge plasma. *High Voltage Engineering*, 2007, **33**(2): 150-153. [程虎, 叶齐政, 覃世勋等. 放电等离子体水处理中有机物的降解速率. 高电压技术, 2007, **33**(2): 150-153.]
- [47] Qian Y, Tang HX, Wen XH eds. The characteristics of water particles and refractory organics and the principle of control technology. Beijing: China Environmental Science Press, 2000. [钱易, 汤鸿霄, 文湘华等. 水体颗粒物和难降解有机物的特性与控制技术原理. 北京: 中国环境科学出版社, 2000.]
- [48] Lin Y, Li D, Zeng S *et al.* Changes of microbial composition during wastewater reclamation and distribution systems revealed by high-throughput sequencing analyses. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2016, **10**(3): 539-547.
- [49] Rusmi MHS. Removal of chemical oxygen demand(COD), total organicchemical(TOC) and total suspended solids(TSS) using anaerobic and aerobic degradation of pharmaceutical wastewater. Universiti Teknologi Petronas, 2007.
- [50] Dong J. Study of landfill leachate redox zones and degradation mechanisms of pollutants in the subsurface environment [Dissertation]. Changchun: Jilin University, 2006. [董军. 垃圾渗滤液在地下环境中的氧化还原分带及污染物的降解机理研究 [学位论文]. 长春: 吉林大学, 2006.]
- [51] Zhou HL. Ecological sluice mode for reconstruction of Yulinzhuang Sluice of Beiyun River. *Beijing Water*, 2006, (4): 17-19. [周洪利. 北运河榆林庄闸重建的生态水闸模式. 北京水务, 2006, (4): 17-19.]
- [52] Guo DP, Xu MD. The degradation rule of COD In South Yellow Sea. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2008, **39**(4): 358-361. [郭栋鹏, 徐明德. 黄海南部海水中 COD 降解规律的研究. 太原理工大学学报, 2008, **39**(4): 358-361.]
- [53] Zhang ZM, Wang XY, Ma WJ *et al.* The effects of global warming on purification processes of Tongzhou section of Beiyun river. *China Environment Science*, 2017, **37**(2): 730-739. [张质明, 王晓燕, 马文林等. 未来气候变暖对北运河通州段自净过程的影响. 中国环境科学, 2017, **37**(2): 730-739.]
- [54] Mbuligwe SE, Kaseva ME. Pollution and self-cleansing of an urban river in a developing country: A case study in Dar es Salaam. *Tanzania Environmental Management*, 2005, **36**(2): 328-342. DOI: 10.1007/s00267-003-0068-4.
- [55] Obst U. Strategies of maintaining the natural purification potential of rivers and lakes. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2003, **10**(4): 251-255.
- [56] Hariyadi S. A study on dissolved oxygen and its relation to organic matter load in the Cisadane River estuary. Ipb, 2011.
- [57] Hua ZL, Li YW, Gu L. A mixed-order model of COD<sub>Mn</sub> degradation in different lake regions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, **35**(5): 521-526. [华祖林, 李亚伟, 顾莉. 湖泊不同湖区 COD<sub>(Mn)</sub>降解的混合级数模型. 水利学报, 2013, **35**(5): 521-526.]