

三峡库区重庆段某排污口下游污染物降解研究¹

祖波^{1,2,3}, 周领^{1,2,3}, 李国权^{1,3}, 刘波^{1,3}

(1 . 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074 ; 2 . 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074 ; 3 . 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074)

【摘要】采用室内实验测定和野外实测相结合的方法,选取高锰酸盐指数(COD_{mn})、总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₃-N)为污染物监测指标,进行了各污染物降解系数计算及降解规律的分析研究。结果表明:1)在野外实测中,岸边与河流中心的各污染物降解系数有着大致相同的变化趋势,但岸边的降解系数值明显小于河流中心各断面的降解系数值,对比发现,岸边和河流中心的温度、溶解氧、pH值的差距不明显,初步可以判断流速对污染物的降解影响较显著,且流速越大,降解系数也越大;2)室内实验测定中,流速在0.4-2.0m/s,降解系数值伴随流速的增大而逐渐增加,与野外实测法所得规律相同,也反映出流速对污染物的降解有较显著影响。基于此,应用了结构方程模型定量研究污染物降解系数与影响因子间的响应关系,结果表明:流速对污染物降解的影响较大,为污染物降解较重要的影响因子之一。最后,以结构方程模型研究结果为依据,以影响较大的因子流速为自变量,降解系数为因变量,以野外现场实测的实验数据作为基础数据,拟合得出由流速确定河流污染物降解系数的经验公式,在研究条件范围内可运用这些经验公式迅速求出污染物降解系数。

【关键词】三峡库区;排污口下游;污染物;降解

【中图分类号】X13;TVZI3.4

【文献标志码】A

【文章编号】1004-8227(2017)01-0134-08

【DOI】10.11870/cjlyzyyhj201701016

污染物降解系数是反映污染物质在水体作用下浓度下降速率快慢程度的参数,是污染物质在水体中发生一系列降解作用综合概化后的表征。天然水体中污染物质的降解一般可分为物理降解、化学降解和生物降解3种类型[11]。其中,微生物对污染物的生物降解是水体污染物降解最主要的作用。同时,污染物降解系数是水环境数学模型、研究水质污染变化、计算水环境容量以及纳污能力的重要参数。其取值的合理与否直接关系到模型计算结果的优劣,进而影响到污染物浓度预测的准确性及不同控污

¹收稿日期:2016-05-11

修回日期:2016-07-06

基金项目:重庆市研究生创新基金项目(The graduate student innovation fund project of chongqing);重庆市研究生教育教学改革研究重点项目(yjg20162025)1(Chongqing Graduate Education Teaching Reform Research Key Project)(yjg20162025)]

作者简介:祖波(1980-),男,教授,博士,主要从事废水处理理论与技术方面的工作。E-mail:zubo@cqjtu.edu.cn

方案优化比选的合理性。Bosko[2]通过研究得到实验室和河水实际的降解系数间的关系： $k_{(实际)} = k_{(实验)} + \frac{au}{h}$ ；邱巍[3]对长江口竹园排污区 COD_{mn} 降解动力学进行了模拟研究，认为其符合一级降解模型；杜娟等[4]对长江宜宾段 TP 降解进行了实验室模拟研究，应用一级降解模型，并根据长江宜宾段的坡度和不同时期的水温对磷的综合降解系数进行修正；陶威等[5]采用实验室模拟的方法测定了长江宜宾段氨氮的降解系数。天然水体中污染物质降解过程受诸多条件的影响，目前对天然水体有机污染物自然降解机理尚缺乏较为深入的了解，相关研究主要集中在河流[6-10]，且多数是通过实验室内静态模拟或水质模型率定法求取污染物降解系数，其结果只适用于特定河段特定研究条件，具有一定的局限性，不能完全反应天然水体污染物降解特性，为相关管理工作和方针政策的制定带来诸多困难。

三峡水利工程属于特大型水利工程，三峡成库后，库区内的水流水文特征和污染负荷与成库前相比有着巨大变化，这些变化对库区污染物的迁移转化、降解将产生重大影响[11, 12]。因此，对三峡库区重庆段流域内污染物质降解规律的研究显得尤为必要，有着较为重要的学术意义和实用价值。

1 实验方案及内容

本次研究选取三峡库区重庆段某污水处理厂排污口下游的天然水体作为对象，研究污水排入水体后高锰酸盐指数、总氮、总磷、氨氮 4 个指标的降解规律。研究采用野外现场实测和室内模拟实验相结合的方法。其中野外现场实测选取流速、水温、溶解氧、pH 共 4 个影响因子；室内模拟实验选取流速为控制因子，设置 0.4、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0m/s 共 8 组工况，对不同流速下，各污染物的降解系数与流速间的相关关系进行研究分析。

研究选取三峡库区重庆段，距某污水处理厂排污口下游一定距离 2000m 段天然水体作为研究对象。据此，将采样河段分为 4 个断面，包括一个控制断面和 3 个消减断面，采样断面等间距布设，相邻两断面间距为 700m，在每个采样断面的河流中心和排污口-侧岸边分别设置采样点，编号为 1#-8#，采样点位安排见图 1，采样点位用 GPS 精确定位。采样时间于重庆秋冬季，此时段为三峡库区重庆段河流由平水期转为枯水期的过渡阶段，采样共计 10 次。水样采集方法按照《水和废水监测分析方法（第四版）》进行，采集的水样主要为表层水（水面下 0.5-1m）。水样于采样后 3h 内迅速带回实验室，短时间内氧化还原反应和生化作用等对水质指标影响较小，故运送中未采取特殊措施保存水样，水样带回实验室后立即进行指标监测。研究中采用便携式流速仪测定流速，温度计测定温度，溶氧仪（TOLEDO 125 DO Meter）测定溶解氧，pH 计测定 pH；纳氏试剂分光光度法测定氨氮；采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定总氮；采用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法测定总磷；采用高锰酸钾法测定 COD_{mn}。

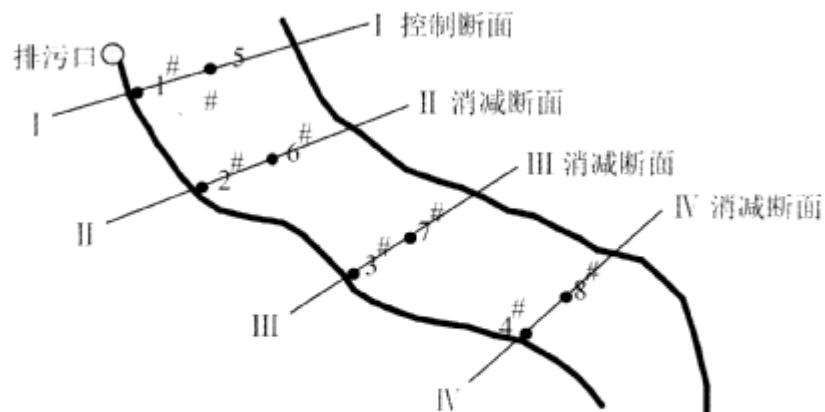


图 1 采样点位示意图

Fig.1 Sampling Points Diagram

2 结果与讨论

2.1 降解系数的影响因子变化趋势结果分析

整个实验周期内野外现场共采样 10 次，降解系数的影响因子流速、温度、溶解氧、pH 值的变化趋势分别见图 2-5。

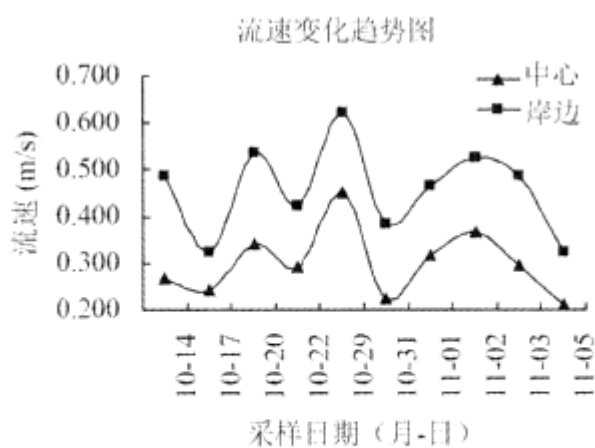


图 2 实验周期内流速变化趋势图

Fig.2 Variation Trend Diagram of Velocity in Experimental Cycle

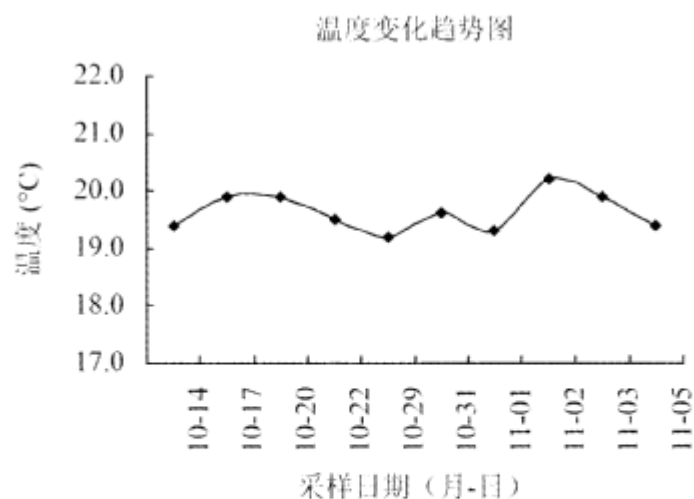


图 3 实验周期内温度变化趋势图

Fig.3 Variation Trend Diagram of Temperature in Experimental Cycle

整个实验周期内室外实验部分研究水体的温度接近典型温度 20℃；溶解氧均值在 9mg/L 左右，水体处于高好氧状态；pH 均值在 7 左右，水体处于中性状态；流速变化幅度较大，且岸边采样点流速明显小于中心采样点的流速，大流速更有利于污染物的输移扩散。所有这些条件均有利于排污口下游水体污染物的降解，为后续研究奠定了基础。

2.2 各污染物降解规律的实验研究

2.2.1 野外现场实测结果

表 1 和表 2 分别为排污口下游岸边与河流中心监测断面各污染物降解系数的计算结果。

通过表 1 和表 2 的对比分析可知，岸边与河流中心各污染物降解系数有着相同的变化趋势，但各断面岸边的降解系数值明显小于河流中心的降解系数值，可以看出环境因子对各污染物降解过程有着很大的影响。对比野外现场实验实测数据，我们发现在采样期间的温度范围在 19.2–20.2℃ 之间、溶解氧变化范围在 7.74–12.7mg/L 之间、pH 值变化范围在 6.476–7.789 之间；在以上野外现场试验条件下，温度、溶解氧和 pH 的变化对污染物降解的影响规律变化不明显；而河段流速对污染物降解的影响较大，且流速和降解系数之间的关系为正相关。考虑到实际应用价值，本研究在室内模拟实验中，仅考虑流速对降解系数的影响。

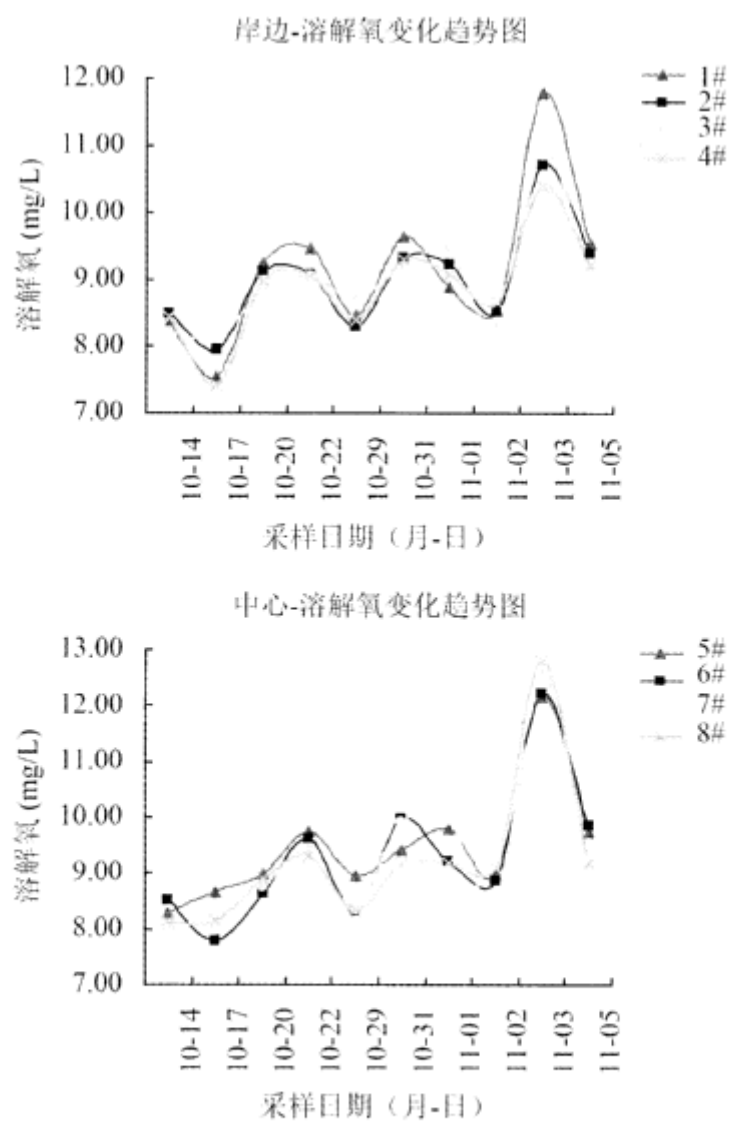


图4 实验周期内溶解氧变化趋势图

Fig.4 Variation Trend Diagram of DO in Experimental Cycle

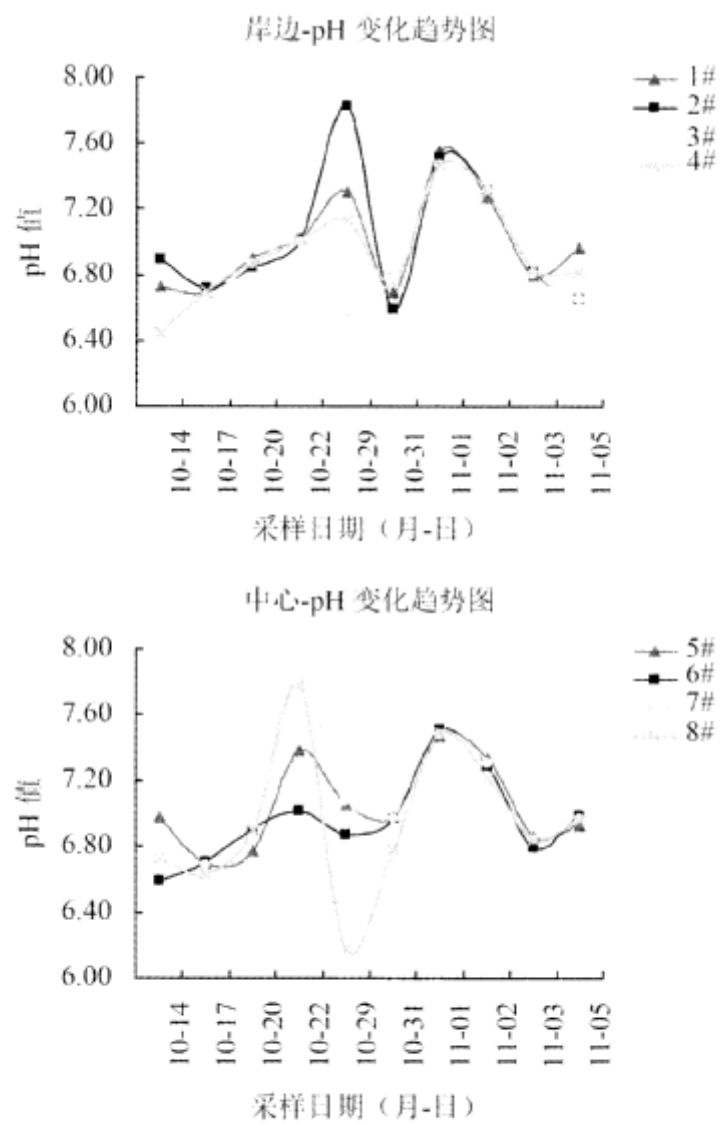


图 5 实验周期内pH变化趋势图

Fig.5 Variation Trend Diagram of pH in Experimental Cycle

表 1 排污口下游岸边监测断面各污染物降解系数计算结果

Tab.1 Results of Pollutants Degradation Coefficient on Shoreside Monitoring Section

采样日期	采样断面	流速	温度	溶解氧	pH值	k_c	$\bar{k}_c$	k_N	$\bar{k}_N$	k_P	$\bar{k}_P$	k_{NH_3-N}	$\bar{k}_{NH_3-N}$
10-14	I-II	0.268	19.4	8.40	6.815	0.324		0.054		0.013 8		0.039 4	
	II-III	0.268	19.4	8.35	6.766	0.314	0.315 5	0.053	0.053 0	0.013 6	0.013 6	0.038 1	0.038 3
	III-IV	0.268	19.4	8.32	6.542	0.308		0.052		0.013 3		0.037 4	
10-17	I-II	0.241	19.9	7.74	6.705	0.291		0.049		0.012 6		0.035 3	
	II-III	0.241	19.9	8.04	6.695	0.302	0.294 5	0.051	0.049 7	0.013 1	0.012 7	0.036 7	0.035 7
	III-IV	0.241	19.9	7.77	6.685	0.291		0.049		0.012 6		0.035 3	
10-20	I-II	0.342	19.9	9.18	6.870	0.403		0.068		0.017 4		0.048 9	
	II-III	0.342	19.9	8.98	6.854	0.391	0.397 2	0.066	0.067 0	0.016 9	0.017 2	0.047 5	0.048 2
	III-IV	0.342	19.9	8.91	6.869	0.397		0.067		0.017 2		0.048 2	
10-22	I-II	0.293	19.5	9.27	7.016	0.344		0.058		0.014 9		0.041 7	
	II-III	0.293	19.5	9.07	7.005	0.332	0.336 0	0.056	0.056 7	0.014 4	0.014 5	0.040 3	0.040 8
	III-IV	0.293	19.5	9.06	7.004	0.332		0.056		0.014 4		0.040 3	
10-29	I-II	0.451	19.2	8.39	7.564	0.510		0.086		0.021 9		0.062 8	
	II-III	0.451	19.2	8.50	7.191	0.516	0.513 8	0.087	0.086 7	0.022 1	0.022 0	0.063 5	0.063 3
	III-IV	0.451	19.2	8.54	6.841	0.516		0.087		0.022 1		0.063 5	
10-31	I-II	0.225	19.6	9.48	6.640	0.255		0.043		0.010 9		0.031 4	
	II-III	0.225	19.6	9.26	6.697	0.249	0.251 0	0.042	0.042 3	0.010 7	0.010 8	0.030 7	0.030 9
	III-IV	0.225	19.6	9.24	6.777	0.249		0.042		0.010 7		0.030 7	
11-01	I-II	0.318	19.3	9.05	7.535	0.368		0.062		0.015 8		0.045 3	
	II-III	0.318	19.3	9.33	7.490	0.379	0.373 5	0.064	0.063 0	0.016 3	0.016 0	0.046 7	0.046 0
	III-IV	0.318	19.3	9.26	7.468	0.374		0.063		0.016 0		0.046 0	
11-02	I-II	0.367	20.2	8.53	7.290	0.444		0.074		0.018 9		0.052 5	
	II-III	0.367	20.2	8.38	7.308	0.432	0.438 0	0.072	0.073 0	0.018 4	0.018 6	0.051 1	0.051 8
	III-IV	0.367	20.2	8.45	7.303	0.438		0.073		0.018 6		0.051 8	
11-03	I-II	0.296	19.9	11.24	6.806	0.354		0.059		0.015 1		0.041 8	
	II-III	0.296	19.9	10.78	6.810	0.336	0.340 0	0.056	0.056 7	0.014 3	0.014 5	0.039 7	0.040 2
	III-IV	0.296	19.9	10.62	6.818	0.330		0.055		0.014 0		0.039 0	
11-05	I-II	0.211	19.4	9.46	6.806	0.246		0.041		0.010 5		0.029 1	
	II-III	0.211	19.4	9.26	6.652	0.240	0.240 0	0.040	0.040 0	0.010 2	0.010 2	0.028 4	0.028 4
	III-IV	0.211	19.4	9.17	6.732	0.234		0.039		0.009 9		0.027 7	

表 2 排污口下游河流中心监测断面各污染物降解系数计算结果

Tab.2 Results of Pollutants Degradation Coefficient on River Center Monitoring Section

采样日期	采样断面	流速	温度	溶解氧	pH值	k_c	$\bar{k}_c$	k_N	$\bar{k}_N$	k_P	$\bar{k}_P$	k_{NH_3-N}	$\bar{k}_{NH_3-N}$
10-14	I-II	0.489	19.4	8.40	6.784	0.540		0.091		0.023 5		0.065 5	
	II-III	0.489	19.4	8.25	6.476	0.528	0.526	0.089	0.088 7	0.023 3	0.023 2	0.064 0	0.065 5
	III-IV	0.489	19.4	8.06	6.543	0.510		0.086		0.022 9		0.061 9	
10-17	I-II	0.322	19.9	8.22	6.705	0.379		0.064		0.015 2		0.046 0	
	II-III	0.322	19.9	7.98	6.700	0.362	0.372	0.061	0.062 7	0.014 9	0.015 1	0.043 9	0.046 0
	III-IV	0.322	19.9	8.16	6.660	0.374		0.063		0.015 1		0.045 3	
10-20	I-II	0.538	19.9	8.82	6.839	0.563		0.095		0.027 2		0.068 3	
	II-III	0.538	19.9	8.70	6.917	0.551	0.559	0.093	0.094 3	0.027 0	0.027 1	0.066 9	0.068 3
	III-IV	0.538	19.9	8.82	6.913	0.563		0.095		0.027 2		0.068 3	
10-22	I-II	0.423	19.5	9.68	7.200	0.492		0.083		0.019 8		0.060 6	
	II-III	0.423	19.5	9.52	7.405	0.486	0.484	0.082	0.081 7	0.019 7	0.019 6	0.059 9	0.060 6
	III-IV	0.423	19.5	9.36	7.789	0.474		0.080		0.019 4		0.058 4	
10-29	I-II	0.621	19.2	8.63	6.959	0.581		0.098		0.028 9		0.071 5	
	II-III	0.621	19.2	8.33	6.971	0.563	0.567	0.095	0.095 7	0.028 6	0.028 7	0.069 3	0.071 5
	III-IV	0.621	19.2	8.34	6.627	0.557		0.094		0.028 6		0.068 6	
10-31	I-II	0.383	19.6	9.69	6.971	0.468		0.079		0.018 3		0.057 7	
	II-III	0.383	19.6	9.94	6.965	0.480	0.470	0.081	0.079 3	0.018 6	0.018 3	0.059 1	0.057 7
	III-IV	0.383	19.6	9.53	6.874	0.462		0.078		0.018 1		0.056 9	
11-01	I-II	0.465	19.3	9.51	7.484	0.522		0.088		0.022 0		0.064 2	
	II-III	0.465	19.3	9.58	7.492	0.534	0.530	0.089	0.088 7	0.022 1	0.022 1	0.063 1	0.064 2
	III-IV	0.465	19.3	9.56	7.483	0.534		0.089		0.022 1		0.063 1	
11-02	I-II	0.526	20.2	8.92	7.310	0.558		0.093		0.026 8		0.066 0	
	II-III	0.526	20.2	8.72	7.295	0.540	0.548	0.090	0.091 3	0.026 6	0.026 7	0.063 8	0.066 0
	III-IV	0.526	20.2	8.85	7.261	0.546		0.091		0.026 7		0.064 5	
11-03	I-II	0.489	19.9	12.18	6.825	0.552		0.092		0.023 9		0.065 2	
	II-III	0.489	19.9	12.40	6.815	0.558	0.558	0.093	0.093 0	0.024 0	0.024 0	0.066 0	0.065 2
	III-IV	0.489	19.9	12.70	6.837	0.564		0.094		0.024 2		0.066 7	
11-05	I-II	0.323	19.4	9.81	6.960	0.390		0.065		0.015 3		0.046 1	
	II-III	0.323	19.4	9.53	6.979	0.378	0.378	0.063	0.063 0	0.015 1	0.015 1	0.044 7	0.046 1
	III-IV	0.323	19.4	9.19	6.963	0.366		0.061		0.014 9		0.043 3	

2.2.2 室内模拟实验结果

根据野外现场实测结果,在室内模拟实验中选取流速为控制因子,设置 0.4、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0m/s 共 8 组工况。室内实验温度控制在 20° C 左右, pH 在 7 左右。

对实验结果进行处理分析,以流速为横坐标, COD_{mn}、TN、TP、NH₃-N 各自的降解系数为纵坐标,作降解系数与流速之间的关系曲线,如图 6-9 所示。由图可知,室内模拟实验中 COD_{mn} 降解系数范围为 0.39-0.77d⁻¹;TN 降解系数范围为 0.07-0.20 d⁻¹;TP 降解系数范围为 0.018-0.046 d⁻¹;氨氮降解系数范围为 0.05-0.14 d⁻¹。随着流速的增大,各污染物的降解系数值逐渐增加,与野外实测法所得到的规律相同,也反映出流速对各污染物的降解有较为显著的影响。王蓉等在研究典型城市河道氮、磷自净能力影响因素中认为,水体流速从静止水体增加到 16m/h 后,氨氮降解系数和总磷降解系数都增大[13]。李锦秀等研究了水流条件巨大变化对有机污染物降解速率的影响,研究表明,三峡水库建成以后,在正常蓄水位 175m 的情况下,淹没区流速与天然河道相比减小 5 倍左右,单位时间内枯水期水库建成以后 BOD₅ 降解速三较建库前减小 1 倍多(从 0.029 d⁻¹减小到 0.12 d⁻¹)[14]。蒲讯赤等通过 3 种不同紊动强度的实验,发现紊动对有机物的降解有明显的影,紊动强度越大,有机物的降解率和降解速度越大[15]。

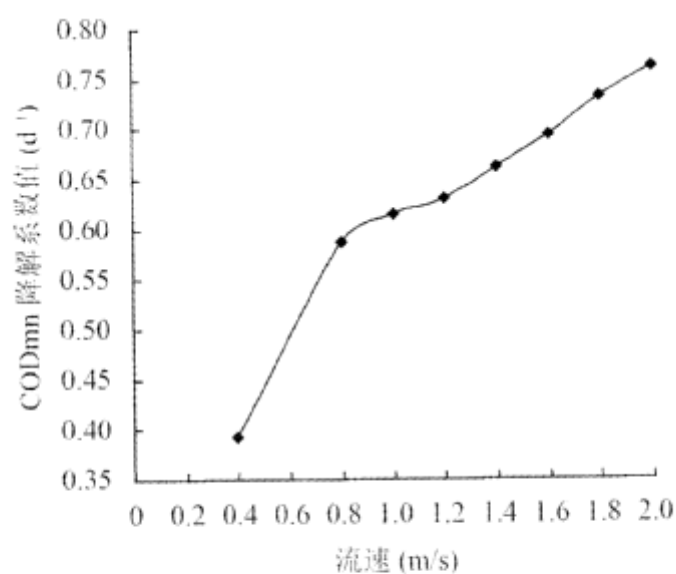


图 6 室内实验COD_{Mn}降解系数与流速关系曲线图

Fig.6 Relationship Curves of COD_{Mn} Degradation Coefficient and Flow Velocity

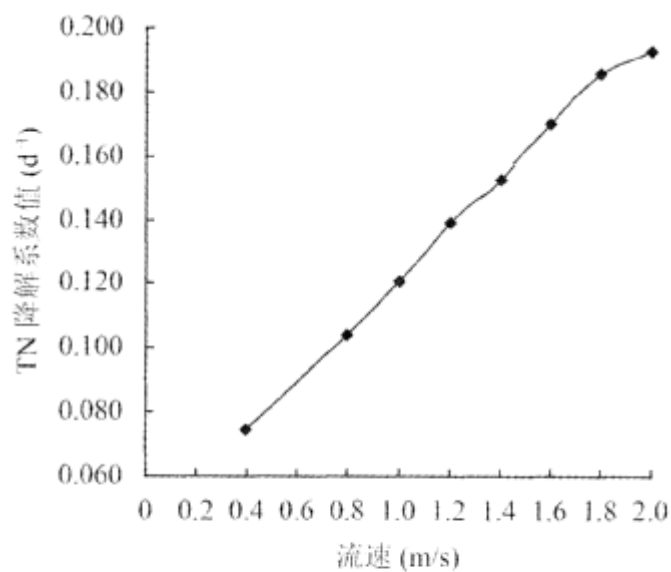


图 7 室内实验TN降解系数 K_N 与流速关系曲线图

Fig.7 Relationship Curves of TN Degradation Coefficient and Flow Velocity

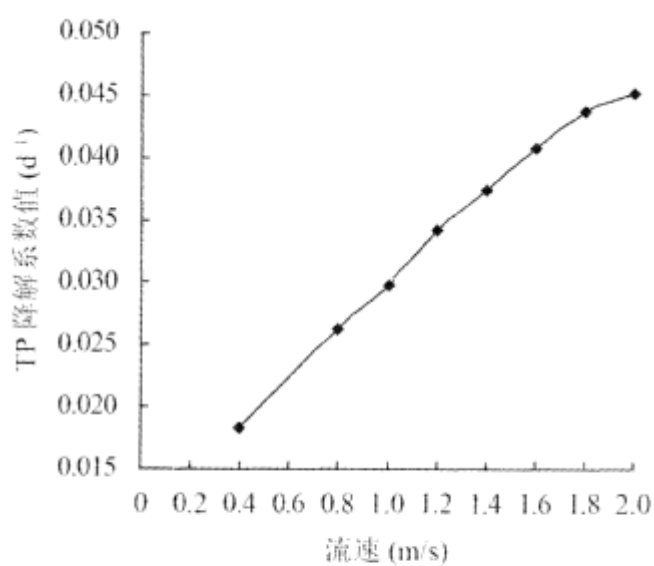


图 8 室内实验TP降解系数 K_p 与流速关系曲线图

Fig.8 Relationship Curves of TP Degradation Coefficient and Flow Velocity

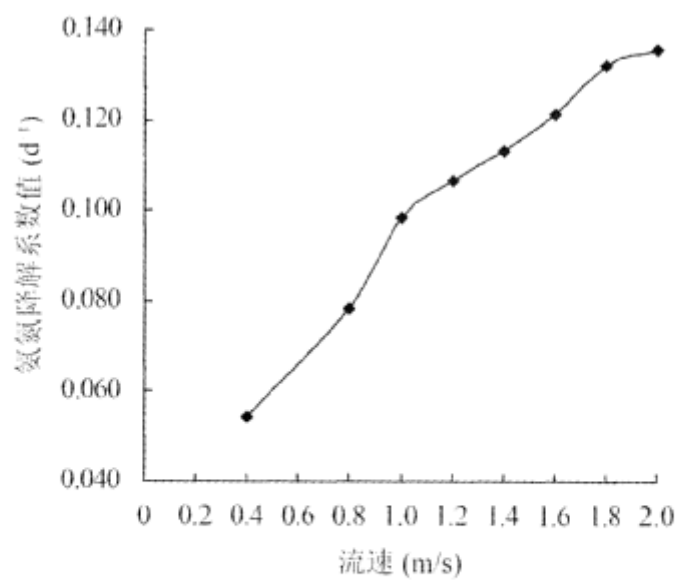


图 9 室内实验氨氮降解系数 $k_{\text{NH}_3\text{-N}}$ 与流速关系曲线图

Fig.9 Relationship Curves of Ammonia Degradation Coefficient and Flow Velocity

2.3 降解系数与影响因子的响应关系分析

天然水体中污染物质的降解是一个很复杂的过程,受诸多因素的影响。前人的相关研究概括起来主要包括污水特性、pH 值、污染物初始浓度、水力特性、微生物性质、悬浮固体、温度、溶解氧等几个方面[15, 16]。目前,污染物降解系数与影响因子响应关系的研究多为定性研究,一般只是描述降解系数随影响因子变化的趋势,不能确定各因子对降解系数的影响比重,本文应用结构方程模型[17]定量的分析了降解系数与各影响因子的响应关系。结构方程模型的分析过程概括起来主要有以下几个步骤[18, 19]: 1) 模型概念化; 2) 模型设定; 3) 模型识别; 4) 模型参数估计; 5) 模型适配度评估; 6) 模型修正。

结合本研究的实际情况,由于室外实验是在一个天然开放的水体环境中进行,污染物初始浓度并不固定,故本次研究对污染物初始浓度与降解系数响应关系部分未做考虑。选取流速、温度、溶解氧、pH 共 4 个影响因子,对污染物降解系数与影响因子的响应关系进行分析。应用结构方程模型理论,绘制降解系数与影响因子的结构方程模型图,见图 10。模型识别是模型进行参数估计之前最重要的步骤,只有可识别模型才能进行参数估计。根据数据点的数目和参数数目的关系,模型分为恰好识别模型、过度识别模型和不可识别模型 3 种形态。由 t 法则判断,该结构方程模型为过度识别模型,可进行参数估计。整理野外现场实测数据,应用图 10 的结构方程模型对 COD_{mn}、TN、TP、NH₃-N 各污染物降解系数与相关影响因子的响应关系进行分析,结果如下: 运用结构方程对 COD_{mn}、TN、TP、NH₃-N 各污染物降解系数与相关影响因子的响应关系分析可知,在本研究范围内,流速、温度、溶解氧、pH 值 4 个影响因子与 COD_{mn}、TN、TP、NH₃-N 各污染物的降解系数均呈正相关。其中,流速的影响较大,为较重要的影响因子之一;温度、溶解氧、pH 值对 COD_{mn}、TN、TP、NH₃-N 各污染物的降解系数影响与流速相比较小。

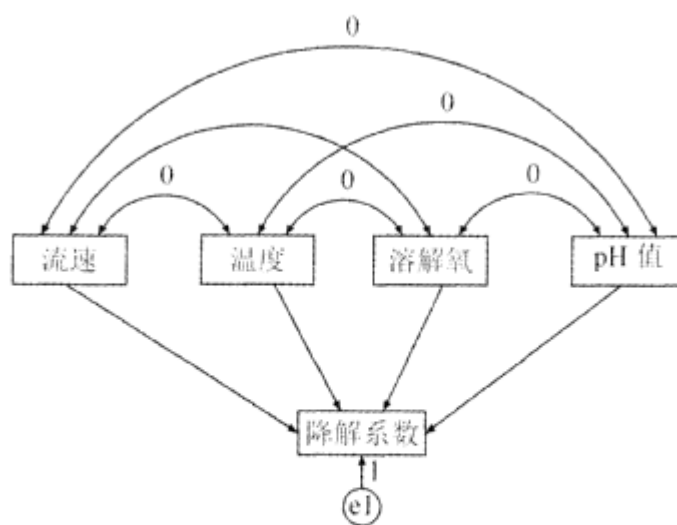


图 10 结构方程模型示意图

Fig.10 Structural Equation Model Diagram

2.4 降解系数求取的经验公式拟合

现有的污染物降解系数估计方法[9, 20],如现场实测法、室内实验法、模型估计法等所得到的降解系数值均是在特定研究水体特定条件下适用,并不能估计水文条件、纳污状况等发生变化的水体污染物降解系数值。由 2.2 节与 2.3 节对温度、流速·溶解氧·pH 值 4 个环境因子与 COD_{mn}、TN、TP、氨氮各污染物降解系数响应关系分析可知,流速是降解系数较重要的影响因子之一。参照 wright 等[9]的研究思路,依据野外现场实测的实验数据作为基础数据,应用数理统计工具提出一个由流速确

定河流污染物降解系数的经验公式，据此可在资料相对缺乏或精度要求不高的情况下迅速计算出相应污染物的降解系数值。依据野外现场实测的实验数据为基础数据，以流速为自变量，COD_{mn}、TN、TP、NH₃-N 各污染物降解系数为因变量，进行了 COD_{mn}、TN、TP、NH₃-N 各污染物降解系数求取的经验公式拟合。由 COD_{mn}、TN、TP、NH₃-N 降解系数随流速的变化趋势，分别选取线性函数、幂函数、指数函数、3 种模型进行拟合，经对比分析，幂函数的拟合度明显高于其他 2 种模型，为最优拟合模型。由幂函数模型系数估计结果可得，COD_{mn}、TN、TP、NH₃-N 各自的降解系数求取的经验公式形式如下：

$$k_c = 0.989v^{0.868} \quad (1)$$

$$k_N = 0.166v^{0.868} \quad (2)$$

$$k_P = 0.047v^{0.970} \quad (3)$$

$$k_{\text{NH}_3\text{-N}} = 0.123v^{0.885} \quad (4)$$

经 F 检验法对模型进行方差分析，结果表明高度显著，幂函数模型合理可用。式中： k_c 、 k_N 、 k_P 、 $k_{\text{NH}_3\text{-N}}$ 分别为 COD_{mn}、TN、TP、NH₃-N 降解系数， d^{-1} ； v 为河流平均流速， m/s 。式（1）-（4）建立的基础数据范围为：河流 COD_{mn}、TN、TP、NH₃-N 降解系数分别为 $0.23\text{--}0.59\text{d}^{-1}$ 、 $0.039\text{--}0.098\text{d}^{-1}$ 、 $0.0090\text{--}0.0290\text{d}^{-1}$ 、 $0.027\text{--}0.072\text{d}^{-1}$ ；河流流速为 $0.200\text{--}0.700\text{m/s}$ ；水温在 20°C 左右；溶解氧为 $7\text{--}13\text{mg/L}$ ；pH 为 $6\text{--}8$ 。

3 结论与建议

3.1 结论

本文选取三峡库区重庆段某污水处理厂排污口下游 2000m 的水体作为研究对象，以 COD_{mn}、TN、TP、氨氮作为污染物监测指标，采用野外现场实测和室内实验模拟相结合的手段，研究三峡库区排污口下游污染物的降解机理及规律。主要成果和结论如下：

（1）野外现场实测取流速、温度、溶解氧、pH 值 4 个因子作为污染物降解主要的影响因子，主要监测这 4 个指标的变化趋势。其中，流速的变化幅度较大，排污口-侧岸边流速的变化范围为 $0.200\text{--}0.450\text{m/s}$ ，河流中心的流速的范围为 $0.300\text{--}0.700\text{m/s}$ ，岸边的流速明显小于河流中心的流速；水体温度在 20°C 上下浮动，与典型水温 20°C 比较接近；8 个采样点的溶解氧值在 $7\text{--}13\text{mg/L}$ 之间变动，水体处于高好氧状态；pH 在 $6\text{--}8$ 之间浮动，水体处于中性状态。总的水体条件有利于排污口下游水体污染物降解的发生。

（2）选取一级降解模型对 COD_{mn} 的降解进行研究。野外现场实测法中，岸边监测断面 COD_{mn} 降解系数小于河流中心监测断面 COD_{mn} 降解系数 k_c 。岸边与河流中心的 COD_{mn} 降解系数 k_c 有着相同的变化趋势，但岸边的降解系数值明显小于河流中心各断面的降解系数值，分析出认为，在试验河段流速对污染物的降解影响较大；室内模拟实验选取流速为控制因子，共设置 8 个流速梯度，COD_{mn} 降解系数值伴随流速的增大而逐渐增加，与野外实测法所得到的规律相同，也反映出流速对各污染物的降解的影响较为显著。

（3）依据 TN、TP、氨氮的降解机理，选用一级降解模型进行研究，数据处理分析方法与 COD_{mn} 指标相同，结果表明污染物 TN、TP、氨氮的降解系数与 COD_{mn} 降解系数也有相似的变化规律。

(4) 应用结构方程模型定量研究污染物降解系数与影响因子的响应关系, 结合本研究实际情况, 选取流速、温度、溶解氧、pH 值 4 个影响因子进行统计分析。结果表明: 在本研究范围内, 流速对污染物降解的影响较大, 为污染物降解较重要的影响因子之一。

(5) 以结构方程模型的研究结果为依据, 以影响最大的因子流速为自变量, 降解系数为因变量, 以野外现场实测的实验数据作为基础数据, 拟合得出了由流速确定河流污染物降解系数的经验公式, 在本研究条件范围内可运用这些经验公式迅速求出污染物降解系数。

3.2 建议

本文通过野外现场实测和室内实验模拟相结合的研究手段, 对三峡库区重庆段某排污口下游水体污染物降解规律进行研究, 取得了一些有价值的成果。但由于时间和精力的限制以及天然水体污染物降解问题本身的复杂性, 文章存在相关缺陷和不足, 相关方面有待于进一步研究与探索, 这些问题主要包括: (1) 研究中室内模拟实验只选取流速为控制因子, 研究内容稍显单薄, 进一步研究可增加实验工况和实验组数的设定, 加入对温度、初始浓度、溶解氧、pH 值等因子的分析; (2) 文章的相关研究主要是在枯水期进行的, 研究结果有一定的局限性, 进一步研究可对平水期、丰水期等不同水文条件下的污染物降解规律进行研究。

参考文献:

- [1] 侯宇光, 杨龄真, 黄川友. 水环境保护 [M] . 成都: 成都科技大学出版社, 1990 .
- [2] BOSKO K . Advanccs in water pollution research [J] . International Association on Water Pollution Research , 1966, 45(3):153-161.
- [3] 邱巍. 长江口竹园排污区 coD 降解系数的测试与分析[J] . 上海水利, 1996(4):33-36, 12.
- [4] 杜娟, 潘婷, 谭剑聪, 等. 长江宜宾段总磷的迁移转化特征分析[C]//四川省第十一次环境监测学术交流会议论文集. 成都: 四川省环境科学学会, 2010:186-189 .
- [5] 陶威, 刘颖, 任怡然. 长江宜宾段氨氮降解系数的实验室研究[J] . 污染防治技术, 2009, 22(6):8-9, 20.
- [6] VAGNETTIR , MIANAP , FABRISM , et al . Self - purification ability of a resurgence stream [J] . Chemosphere , 2003, 52(10):1781-1795.
- [7] 倪浩清, 李福田. 水环境中生物化学时均反应率的研究阴. 水利学报, 2010, 41(1):3746.
- [8] LEU HG , OUYANG CF , PAI T Y . Effects of flow velocity and depth on the rates of reaeration and BOD removal in a shallow open channel [J] . Water Science and Technology , 1997, 35(8):57-67.
- [9] WRIGHT RM , MCDONNELL A J . In-stream deoxygenation rate prediction [J) . Journal of the Environmental Engineering Division , 1979, 105(2):323-335.
- [10] NOVOTNYV , KRENKEL P A . A waste assimilative capacity model for a Shallow , turbulent stream [J] . Water Research , 1975, 9(2):233-241.

-
- [11] 刘同宦, 蔺秋生, 姚仕明. 三峡工程蓄水前后进出库水沙特性及径流量时间序列变化周期分析 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2011, 43(1): 58-63.
- [12] 许全喜, 童辉. 近 50 年来长江水沙变化规律研究 [J]. 水文, 2012, 32(5): 38-7, 76.
- [13] 王蓉, 黄天寅, 吴玮. 典型城市河道氮、磷自净能力影响因素 [J]. 湖泊科学, 2016, 28(1): 105-113.
- [14] 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.
- [15] 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 [J]. 中国环境科学, 1999, 19(6): 485-489.
- [16] 王有乐, 张建奎, 孙苑茵, 等. 黄河兰州市区段泥沙特性及水质预江. 研究 [J]. 甘肃科技, 2006, 22(7): 69-71.
- [17] 吴明隆. 结构方程模型—AMOS 的操作与应用 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2009.
- [18] ANDERSON JC, GERBING D W. Structural equation modeling: practice: a review and recommended two-step approach [J]. Psychological Bulletin, 1988, 103(3): 411-23.
- [19] HAIR J F JR, ANDERSON RE, TATHAM RL, et al. Multivariate data analysis [M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998.
- [20] 韩言柱, 翟素军, 孙洪涛. 由河流流速、COD 浓度估计河流 COD 衰减系数的经验模型 [J]. 中国环境监测, 1998, 14(5): 40-2.