

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.02.010

浑河沈抚段水体污染季节性变化研究

刘 强,禹雪迪

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要:为明确浑河沈抚段水污染特征,提升水环境治理有效性,2015 年 3 月—2016 年 2 月对浑河沈抚段进行水环境调查。根据丰、平、枯 3 个水期的 pH 值、电导率、COD、NH₃-N、BOD 及 COD_{Mn} 等水质指标,运用改进的综合水质标识指数法识别出主要污染因子,并分析浑河沈抚段水质污染时空变化特征。结果表明,研究区域的 pH 值在一个水文年变化范围为 6.42~8.06,较适宜水生生物生长;水体在枯水期的电导率最高,丰水期最低。浑河沈抚段水体受沿岸工业废水和生活污水的点源污染影响,流域枯水期和平水期各监测断面的综合水质均未达标;从上游到下游 4 项水质指标的综合水质指数增大,污染逐渐加重,主要污染指标为 COD 和 NH₃-N。

关键词:综合水质标识指数法;水质评价;污染源;季节性变化;浑河沈抚段

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2017)02-0052-07

Study of seasonal variation of water pollution of Shenfu section of Hunhe River

LIU Qiang, YU Xuedi

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: In order to determine water pollution characteristics of the Shenfu section of the Hunhe River and improve the effectiveness of water environmental treatment, a water environmental investigation was conducted from March 2015 to February 2016. The survey data included pH, conductivity, COD, NH₃-N, BOD, and COD_{Mn} in the wet, normal, and dry seasons, and the improved comprehensive water quality identification index method was used to identify the main pollution factors and analyze the characteristics of temporal and spatial variations of water pollution in the Shenfu section of the Hunhe River. The results show that the pH value ranged from 6.42 to 7.92 within a hydrological year, which is suitable for the growth of aquatic organisms. The conductivity was highest in the dry season and lowest in the wet season. Affected by point source pollution from industrial wastewater and domestic sewage, the comprehensive water quality of the monitoring sections in the study area in the dry and normal seasons did not reach the standards. The overall water quality index of four water quality indices from upstream to downstream was increased, and pollution was gradually aggravated. The main pollution indices were COD and NH₃-N.

Key words: comprehensive water quality identification index method; water quality assessment; pollution source; seasonal variation; Shenfu section of Hunhe River

随着沈抚新城的快速发展,浑河沈抚段已经由自然原生态河流向城市内河转变,面临着激增的城市点源与原有农业面源对支流和干流的叠加污染、上游污水厂出水水质较差、河流污径比较大、生态需水量难以保证等问题,河流自净能力逐渐降低,生态

功能不断退化,河流两岸自然生态带急剧萎缩。
现阶段,国内学者们已对浑河水质进行了一定的研究,王辉等^[1]对浑河中 11 项污染物的健康风险的时空变化特征进行分析,得出 NH₃-N 超标严重的结论。张鸿龄等^[2]利用 NH₃-N、TP、重金属 3 个指

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07202-011)
作者简介:刘强(1966—),男,教授,主要从事水污染控制理论与技术研究。E-mail:771780475@qq.com

标分析浑河水体的污染变化特征,结果表明浑河流域的TP、重金属污染较轻,浑河下游NH₃-N污染较重,水质属于V类甚至劣V类。陈艳丽等^[3]选用COD、NH₃-N、BOD等7项监测项目对浑河干流水质进行评价,得出COD及NH₃-N超标为河流部分水质断面超标的主要原因。

东北地区的气温、径流、降雨量季节性变化较明显,影响水体污染的因素众多,监测污染指标的年内平均值无法明确反映水体污染的季节性变化特征^[4]。笔者选取2015年3月—2016年2月,对浑河沈抚段枯、丰、平3个水期的污染指标进行分析,利用改进的综合水质标识指数法识别主要污染因子,以期获得更具意义的浑河沈抚段水体污染时空变化特征,为巩固辽河流域重污染“摘帽”成果、进一步提升浑河沈抚段干流水质、实现浑河沈抚段景观用水水质功能要求提供技术支撑。

1 研究区域概况与方法

1.1 研究区概况

浑河源于辽宁省抚顺市清原县滚马岭,流经抚顺、沈阳等市县,本次研究区域为浑河沈抚段区域,指沈阳市东部和抚顺市西部的沈抚连接带,流经该区域的浑河干流水域约11 km²,区域内干流全长32.7 km,干流平均水面宽度约411 m。区域内年径流量分布不均匀,冬季河面结冰,主要靠地下水补给径流,4月份之后气温逐渐升高,积雪融化,同时上

游大伙房水库放水补给,流量显著增大。浑河沈抚段接纳了沈阳和抚顺沿浑河岸边排放的大量污染物,其环境状况直接影响着区域居民的健康安全。

1.2 样品采集和分析

采样点沿浑河沈抚段上游抚顺和平桥开始布控,共设置22个监测断面,包括10个干流断面、8个支流断面、3个排污口断面,见图1。从2015年3月到2016年2月对各监测断面每月进行1次样品采集,根据《水和废水监测分析方法》,采用事先净化好的塑料瓶采集水面下0.5 m水样,并现场采用YSI6600 V2型多参数水质参数仪测定水温、浊度、pH值及电导率等指标。每个采集的样品经过滤后立即加H₂SO₄(1 mg/L)酸化,在分析样品前将其保存在4℃的冰箱中,用于测定COD、NH₃-N、BOD、COD_{Mn}。

1.3 水质评价方法

综合评价水环境质量的方法有很多,目前较常见的有污染指数法、模糊综合指数法、人工神经网络法等,但其共有的不足之处是不能显示各个水质指标中超标指标的个数,更不能表明河流是否满足水体功能区水质要求。因此,选用综合水质标识指数法进行水质评价,其显著优势为既可以定性定量评价水体,又不会因个别水质指标较差就否定水体综合水质,从而对河流综合水质做出合理评价,计算公式为

$$I_{wQ} = X_1 \cdot X_2 X_3 X_4 \tag{1}$$

式中: I_{wQ} 为综合水质标识指数; X_1 为综合水质级别; X_2 为综合水质在该级别水质变化区间中所处的



图1 采样点位置示意图

位置; X_3 为参与综合水质评价的单项水质指标中,劣于水环境功能目标的指标个数; X_4 为综合水质类别与水环境功能区类别的比较结果,视综合水质的污染程度, X_4 为一位或两位有效数字^[5-6]。

综合水质标识指数法的重点是计算综合水质指数 X_1 、 X_2 , 为使其更确切反映现状, 初步选定以下 3 种改进方案^[7]。

方案一:

$$X_1, X_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \tag{2}$$

方案二:

$$X_1, X_2 = \frac{1}{2} (\bar{P} + P_{\max}) \tag{3}$$

其中
$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$$

方案三:

$$X_1, X_2 = \frac{1}{m+1} \left(\sum_{j=1}^m P_j' + \frac{1}{s} \sum_{k=1}^s P_k' \right) \tag{4}$$

式中: N 为参加综合水质评价的污染指标个数; P_i 为单因子水质标识指数, 其计算方法及意义详见文献^[5]; $\bar{P}$ 为单因子水质标识指数平均值; n 为因子个数; $P_{\max}$ 为各指标单因子水质标识指数最大值; m 为未达标指标的个数; P_j' 为未达标指标的单因子水质指数; s 为达标指标的个数; P_k' 为达标指标的单因子水质指数。

2 水质指标变化及分析

2.1 pH 值在一个水文年内的变化

水体 pH 值是水体水化学特征的综合反映。如图 2 所示, 研究区域在一个水文年内 pH 值为 6.42 ~ 8.06, 属中性水平。枯水期, 水体 pH 值变化范围为 7.02 ~ 7.56, 属中性水平; 丰水期, pH > 7, 属中性偏碱水平, 最高值出现在和平桥点位; 平水期, pH 变化范围为 6.42 ~ 6.97, 属中性偏酸水平。总体来说, 河流水体 pH 值较适宜水生生物的生长。

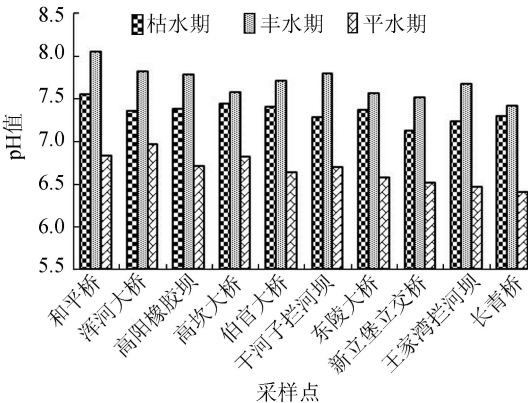


图2 浑河沈抚段枯、丰、平水期 pH 值变化

从水期变化来看, 研究区域水体枯水期和丰水期 pH 值略高于平水期, 且大部分监测断面丰水期 pH 值最高。主要由 3 个原因造成: ①对于空气直接接触的表层, 丰水期温度较高, CO_2 在水中的溶解度降低, pH 值则上升; ②丰水期浮游生物的光合作用强烈消耗水中的 CO_2 导致 pH 值升高^[8]; ③丰水期上游大伙房水库放水, 大量水流对河底产生冲击作用, 加速水体的解离速度, 加速 pH 值上升。从河道走向来看, 丰水期和平水期抚顺西段内水体 pH 值高于沈阳东段, 而枯水期规律不明显, 主要因为枯水期水量小、污染重、水质差, 水体主要以排污口及支流排放的流量为主, 导致各监测区段 pH 值差异不显著。

2.2 电导率在一个水文年内的变化

电导率(σ) 主要取决于水中的总离子浓度, 是水化学分析的重要指标之一。如图 3 所示, 从水期变化来看, 研究区域水体枯水期的电导率最高, 其次为平水期, 丰水期最低。Anderson 等^[9] 在研究阿拉斯加 Kennicott 河流流量和电导率时发现, 一般水量增大时电导率则降低, 水量下降时电导率则升高。本研究中, 枯水期的河流电导率明显高于平水期和丰水期, 与前述规律一致^[10]。从河道走向来看, 枯水期和丰水期抚顺西段内电导率略高于沈阳东段, 特别是在枯水期高坎大桥监测点达到峰值 6.15 mS/m, 这主要是因为高坎大桥上游存在下伯官排污口, 排放的污水中含有可溶性盐类, 从而使下游电导率升高^[11-12]。

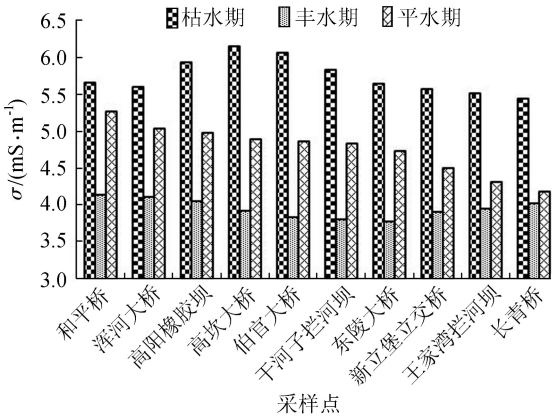


图3 浑河沈抚段枯、丰、平水期电导率变化

3 水质指标评价

浑河水环境功能区目标执行 GB3838—2002《地表水环境质量标准》IV 类标准, 采用 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、BOD 和 COD_{Mn} 共 4 个项目作为主要评价指标^[13], 对其水环境状况进行综合评价, 枯、丰、平 3 个水期各指标的单因子水质标识指数和水体综合水质指数 X_1 、 X_2 的 3 种方案的评价结果见表 1。

表 1 浑河沈抚段枯、丰、平水期水质综合评价结果

控制单元	监测断面	水期	单因子水质标识指数				X_1, X_2			I_{wQ}	水质类别	定性评价
			COD	NH ₃ -N	BOD	COD _{Mn}	方案一	方案二	方案三			
抚顺段	和平桥	枯	6.03	3.80	4.20	4.00	4.5	5.3	5.0	5.021	V	轻度污染
		丰	5.31	3.50	1.80	3.10	3.4	4.3	4.0	4.010	IV	良好
		平	6.03	4.30	3.90	3.80	4.5	5.3	5.0	5.010	V	轻度污染
	浑河大桥	枯	6.03	5.02	4.40	4.10	4.9	5.5	5.1	5.121	V	轻度污染
		丰	5.41	3.70	1.90	3.10	3.5	4.4	4.1	4.110	IV	良好
		平	6.02	4.80	4.00	3.90	4.7	5.4	5.1	5.110	V	轻度污染
	高阳橡胶坝	枯	6.03	5.81	4.60	4.30	5.2	5.6	5.4	5.421	V	轻度污染
		丰	5.81	4.80	3.10	3.20	4.2	5.0	4.7	4.710	IV	良好
		平	5.91	5.81	4.70	4.00	5.1	5.5	5.3	5.321	V	轻度污染
	河段平均	枯	6.03	5.41	4.40	4.20	5.0	5.5	5.2	5.221	V	轻度污染
		丰	5.31	4.00	1.90	3.10	3.6	4.7	4.1	4.110	IV	良好
		平	6.02	4.90	4.20	3.90	4.8	5.4	5.2	5.210	V	轻度污染
沈阳段	高坎大桥	枯	6.22	6.42	5.11	4.70	5.6	6.0	5.6	5.631	V	轻度污染
		丰	6.12	4.80	3.90	3.40	4.6	5.4	5.1	5.110	V	轻度污染
		平	6.22	6.00	4.80	4.20	5.3	5.8	5.6	5.621	V	轻度污染
	伯官大桥	枯	6.22	6.12	5.11	4.70	5.5	5.9	5.5	5.531	V	轻度污染
		丰	6.22	5.71	4.90	4.40	5.3	5.8	5.5	5.521	V	轻度污染
		平	6.22	5.71	4.90	4.40	5.3	5.8	5.5	5.521	V	轻度污染
	干河子拦河坝	枯	6.22	6.22	5.11	4.60	5.5	5.9	5.5	5.531	V	轻度污染
		丰	5.81	4.30	4.10	3.50	4.4	5.1	4.9	4.910	IV	良好
		平	6.12	5.51	4.80	4.30	5.2	5.7	5.4	5.421	V	轻度污染
	东陵大桥	枯	6.03	6.32	5.11	4.50	5.5	5.9	5.5	5.531	V	轻度污染
		丰	5.61	4.20	4.00	3.40	4.3	5.0	4.7	4.710	IV	良好
		平	6.03	5.02	4.60	4.20	5.0	5.5	5.2	5.221	V	轻度污染
	新立堡立交桥	枯	6.23	5.92	5.02	4.30	5.4	5.8	5.4	5.431	V	轻度污染
		丰	5.51	3.70	3.90	3.40	4.1	4.8	4.6	4.610	IV	良好
		平	5.91	4.70	4.50	4.10	4.8	5.4	5.2	5.210	V	轻度污染
	王家湾拦河坝	枯	6.13	6.03	5.00	4.30	5.3	5.7	5.3	5.331	V	轻度污染
		丰	5.02	3.60	3.80	3.30	3.9	4.5	4.3	4.310	IV	良好
		平	6.02	4.40	4.60	4.10	4.8	5.4	5.2	5.210	V	轻度污染
	长青桥	枯	6.23	6.22	5.02	4.50	5.5	5.9	5.5	5.531	V	轻度污染
		丰	5.21	3.40	3.80	3.30	3.9	4.5	4.3	4.310	IV	良好
		平	6.12	4.70	4.50	4.20	4.9	5.5	5.3	5.310	V	轻度污染
	河段平均	枯	6.22	6.22	5.11	4.50	5.5	5.9	5.5	5.531	V	轻度污染
		丰	5.61	4.00	4.00	3.40	4.2	4.9	4.7	4.710	IV	良好
		平	6.12	5.11	4.70	4.20	5.0	5.6	5.2	5.221	V	轻度污染

由表 1 可知,方案一的各监测断面的综合水质指数最小,主要是因其未充分考虑超标因子对水环境质量的影响,将所有因子赋予相同的权重;方案二赋予超标因子过多的权重,导致各监测断面的综合水质指数偏大;方案三合理考虑了超标因子对水环境的贡献力,从而更加贴切地反映河流水体的综合水质情况,因此本研究采用方案三对浑河沈抚段进行综合水质标识评价。

3.1 单因子水质标识指数评价

浑河沈抚段枯、丰、平 3 个水期单因子水质标识指数评价结果见表 1。可以看出,在枯水期,10 个监测断面的 COD 和 NH₃-N 水质污染指标基本上达劣 V 类水标准,绝大多数断面 BOD 也处于 V 类水标准,仅 COD_{Mn}符合水环境功能区目标;丰水期各监测断面的 NH₃-N、BOD 及 COD_{Mn} 3 个水质污染指标均

为Ⅳ类水标准,水环境状况良好,但 COD 仍均超标于水环境功能区目标,个别监测点劣于 V 类水标准;平水期 10 个监测断面的 COD 几乎均劣于 V 类水标准,BOD 及 COD_{Mn}水质污染指标均为Ⅳ类水标准,NH₃-N 变化差异性较大。

对研究区域各个监测断面 4 个污染指标的单因子水质标识指数 P_i 取平均值(图 4)可看出,严重超标的污染指标是 COD 和 NH₃-N,3 个水期中 COD 均未达到水环境功能区目标,超过水环境功能区 2 个等级的出现 20 次;NH₃-N 指标达到水环境功能区目标的仅有 14 次,有 7 次超过水环境功能区 2 个等级;BOD 对河流水体的污染较轻,达到水环境功能区目标的占 82.5%。

3.2 综合水质标识指数评价

采用方案三计算的综合水质标识指数 I_{wQ} 结果

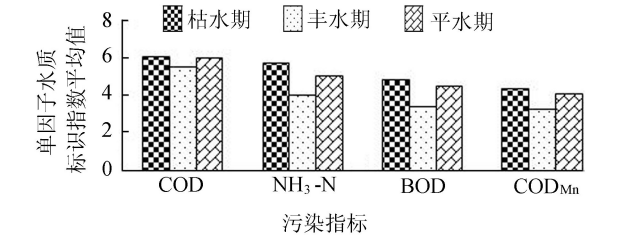


图4 各监测断面4项指标单因子水质标识指数平均值

见表1。从水期变化来看,研究区域枯水期的 I_{WQ} 最大,水质最差, X_1 、 X_2 变幅为5.0~5.6,其中最大值出现在高坎大桥断面,最小值出现在和平桥断面,10个监测断面均处于V类水标准;平水期次之, X_1 、 X_2 变幅为5.0~5.6,与枯水期差异较小,表明该区域污染源主要为点源污染;丰水期污染较轻, X_1 、 X_2 变幅为4.0~5.5,仅高坎大桥和伯官大桥断面未达到水环境功能区目标。根据表1中水质定性评价结果,枯水期和平水期整个研究流域均处于轻度污染状态,丰水期情况较好。浑河受上游大伙房水库影响较大,每年5月份左右水库持续放水一个月供农业灌溉,之后断续放水2~3个月,其他时间多为关闸蓄水^[14],这是导致丰水期水质良好的主要原因。

研究流域各个监测断面的 I_{WQ} 在不同水期之间的变化率见图5。可看出从枯水期到丰水期的过程中,水质情况改善幅度平均值为15.41%;而当转为平水期时,水质情况恶化幅度平均值为16.08%,说明影响浑河水质的因素较复杂;从平水期到枯水期,水质情况恶化幅度最大为4.24%,水质基本不变。从图5中可明显看出,在高坎大桥断面附近水质变化相对不明显,说明此处水质情况主要受污染源影响。

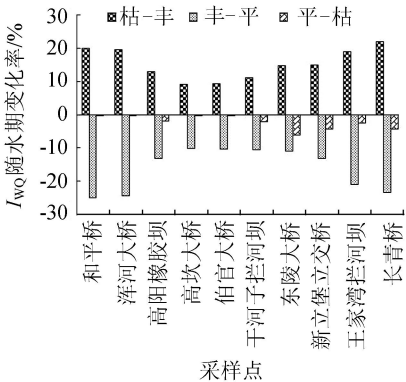


图5 各监测断面 I_{WQ} 随水期变化率

从河道走向看,研究区域水体污染程度沿程变化较明显。其中和平桥断面位于研究区段上游,接纳污水量相对较少,3个水期 I_{WQ} 为4.010~5.021。下游污染情况逐渐加重,流经沈阳后在高坎大桥断面达到峰值,3个水期 I_{WQ} 为5.110~5.631,随后污染情况呈缓慢好转趋势。

研究区域各监测断面之间 I_{WQ} 的空间变化率见表2。可看出丰水期高阳橡胶坝断面至高坎大桥断面 I_{WQ} 恶化幅度为14.49%;丰水期浑河大桥断面至高阳橡胶坝断面 I_{WQ} 恶化幅度为8.59%;丰水期新立堡立交桥断面至王家湾拦河坝断面的 I_{WQ} 改善幅度为6.51%。

表2 各监测断面之间 I_{WQ} 的空间变化率 %

监测区段	空间变化率		
	枯水期	丰水期	平水期
和平桥/浑河大桥	-1.99	-2.49	-1.99
浑河大桥/高阳橡胶坝	-5.85	-8.59	-4.13
高阳橡胶坝/高坎大桥	-3.87	-14.49	-5.64
高坎大桥/伯官大桥	1.77	1.96	1.77
伯官大桥/干河子拦河坝	0	1.99	1.81
干河子拦河坝/东陵大桥	0	4.07	3.69
东陵大桥/新立堡立交桥	1.81	2.12	0.21
新立堡立交桥/王家湾拦河坝	1.84	6.51	0
王家湾拦河坝/长青桥	3.75	0	1.92

从浑河沈抚段水体 I_{WQ} 变化规律来看,造成浑河水质变化的污染源较为复杂^[15]。研究区域内主要为点源污染,从抚顺西到沈阳东沿途有3处排污口、8条支流汇入浑河沈抚段区域^[16]。各排污口及支流水质情况见表3。

表3 浑河沈抚段排污口及支流水质调查和评价结果

监测断面	$\rho(\text{COD})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{BOD})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	I_{WQ}	水质类别
高阳排污口	68	7.49	10.6	9.3	6.642	劣V类但不黑臭
下伯官排污口	77	13.25	11.3	14.5	7.643	劣V类且黑臭
长青桥排污口	66	9.25	9.2	12.9	6.942	劣V类但不黑臭
莲岛河	51	3.86	12.4	18.3	6.442	劣V类但不黑臭
友爱河	48	0.89	8.8	7.3	5.031	V类
仁镜河	133	23.58	31	20.6	10.446	劣V类且黑臭
李石河	52	0.78	9.8	10.9	5.331	V类
旧站河	91	26.03	27	17.5	8.844	劣V类且黑臭
白沙河	30	1.31	6.4	8.9	4.310	Ⅳ类
满堂河	81	2.53	16	10.0	6.232	劣V类但不黑臭
张官河	29	1.92	8.2	11.8	5.431	V类

由表3可知,研究区段3个排污口均劣于V类水标准,水质污染严重,排放的污水汇入干流,直接导致下游水质变差。8条支流中仁镜河及旧站河堪比排污口,COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 严重超标,由于周围居民基本生活设施匮乏,生活污水和垃圾未经处理直接排放丢弃,河道逐渐成为天然垃圾场,导致水体呈黑色,基本不透明,是使下游高坎大桥断面水质恶化的直接原因^[17-18];莲岛河及满堂河污染也较重,莲岛

河沿岸存在多家化工工厂,其排放的污水导致莲岛河水体浑浊、有泡沫,劣于V类水标准;只有东陵大桥断面附近的白沙河符合水环境功能区目标。此外,浑河沿岸还布有多个生活污水直排口,偷排漏排现象也时有发生,这些都会加剧浑河水质的污染程度^[19]。

4 结 论

为解决浑河水生态环境问题,摘掉流域重度污染帽子,本文利用综合水质标识指数法对浑河沈抚段 2015 年 3 月—2016 年 2 月的水质污染指标数据进行分析发现:

a. 研究区域在一个水文年内 pH 值为 6.42 ~ 8.06,属中性水平,较适宜水生生物的生长;水体枯水期的电导率最高,其次为平水期,丰水期最低,电导率沿河道走向变化不显著。

b. 影响浑河沈抚段的主要污染指标为 COD 和 NH₃-N,BOD 及 COD_{Mn}基本上可达水功能区水质要求——Ⅳ类水标准。浑河沈抚段水体仅丰水期的 80% 监测断面达到水环境功能区要求,枯水期及平水期各监测断面的综合水质均未达标;沿浑河沈抚段河道走向水污染程度表现出一定的规律性,抚顺段的综合水质标识指数总体低于沈阳段。

c. 造成浑河沈抚段水体污染的原因较复杂,从总体来看,浑河污染源主要来自两岸工业和生活排污口、市政管网污水溢流口和浑河市区段主要支流排入的污水。因此,为防止水质进一步恶化,应加强对浑河的控制管理,以控源截污为重点,加强重点污染企业整治提升,减少污染物排放量;加快污水管网建设,提高污水纳管率,从而实现科学治水。

参考文献:

[1] 王辉,孙丽娜,刘哲,等. 浑河水环境健康风险特征研究 [J]. 生态毒理学报,2015, 10 (2): 394-402. (WANG Hui,SUN Lina,LIU Zhe, et al. Study on the character of health risk in the water environment of Hun River [J]. Asian Journal of Ecotoxicology,2015, 10 (2): 394-402. (in Chinese))

[2] 张鸿龄,孙丽娜,罗庆,等. 浑河流域水体污染的季节性变化及来源 [J]. 生态学杂志,2011,30 (1): 119-125. (ZHANG Hongling, SUN Lina, LUO Qing, et al. Seasonal variations and sources of pollutants in surface water of Hunhe River [J]. Journal of Ecology, 2011,30 (1): 119-125. (in Chinese))

[3] 陈艳丽,范远东,孙鹏. 应用模糊综合评判法评价浑河干流水质 [J]. 水生态学杂志,2012, 33 (2): 39-42. (CHEN Yanli, FAN Yuandong, SUN Peng. Fuzzy comprehensive evaluation on water quality of mainstream

of Hun River [J]. Journal of Hydroecology, 2012,33 (2): 39-42. (in Chinese))

[4] 赵倩,马建,问青春,等. 浑河上游大苏河乡农业非点源污染负荷及现状评价 [J]. 生态与农村环境学报,2010, 26 (2): 126-131. (ZHAO Qian, MA Jian, WEN Qingchun, et al. Load and status quo of agricultural non-point source pollution in Dasuhe Township on the upper streams of Hun River [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26 (2): 126-131. (in Chinese))

[5] 尹海龙,徐祖信. 河流综合水质评价方法比较研究 [J]. 长江流域资源与环境,2008, 17 (5): 729-733. (YIN Hailong, XU Zuxin. Comparative study on typical river comprehensive water quality assessment methods [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17 (5): 729-733. (in Chinese))

[6] 徐祖信. 我国河流综合水质标识指数评价方法研究 [J]. 同济大学学报 (自然科学版),2005, 33 (4): 482-488. (XU Zuxin. Comprehensive water quality identification index for environmental quality assessment of surface water [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33 (4): 482-488. (in Chinese))

[7] 郭劲松,龙腾锐,霍国友,等. 四种水质综合评价方法的比较 [J]. 重庆建筑大学学报,2000,22 (4): 6-12. (GUO Jingsong, LONG Tengrui, HUO Guoyou, et al. A comparision of four methods of water quality assessment [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2000, 22 (4): 6-12. (in Chinese))

[8] ABSALON D, MATYSIK M. Changes in water quality and runoff in the Upper Oder River Basin. Geomorphology, 2001,92:106-118.

[9] ANDERSON S P, LONGACRE S A, KRAAL E R. Patteins of water chemistry and discharge in the glacier fed Kennicott River, Alaska evidence for subglacial water storage cycles [J]. Chemical Geology, 2003, 202: 297-312.

[10] SHRESTHA S, KAZAMA F. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: a case study of the Fuji river basin, Japan [J]. Environmental Modeling & Software,2007,22:464-476.

[11] VINCENZO N, TIZIANO Z, VINCENZO B. Optimization of sampling frequency for river water quality assessment according to Italian implementation of the EU Water Framework Directive [J]. Environmental Science & Policy, 2007,10: 243-249.

[12] 范宁江,刘玉虹,安树青,等. 电导率作为流域水文变化指标初探 [J]. 应用生态学报,2006, 17 (11): 2127-2131. (FAN Ningjing, LIU Yuhong, AN Shuqing, et al. Electrical conductivity as an indicator of hydrological characteristics in catchment scale [J]. Journal of Applied Ecology, 2006,17 (11): 2127-2131. (in Chinese))

[13] 陈利项,傅伯杰,张淑荣,等. 于桥水库流域地表水中水

- 溶性氮季节变化特征[J]. 中国环境科学, 2003, 23 (2): 210-214. (CHEN Lixiang, FU Bojie, ZHANG Shurong, et al. Seasonal change of solvable nitrogen in surface water of Yuqiao Reservoir Basin [J]. China Environment Science, 2003, 23 (2): 210-214. (in Chinese))
- [14] 付意成, 魏传江, 臧文斌, 等. 浑太河污染物入河控制量研究[J]. 水电能源科学, 2010, 28 (12): 21-25. (FU Yicheng, WEI chuangjiang, ZANG Wenbin, et al. Research on contaminant control quantity of entering into Huntai River[J]. Water Resources and Power, 2010, 28 (12): 21-25. (in Chinese))
- [15] 孟伟. 中国流域水环境污染综合防治战略[J]. 中国环境科学, 2007, 27(5): 712-716. (MENG Wei. The strategy of comprehensive pollution and cure of water environment in Chinese watershed [J]. China Environment Science, 2007, 27 (5): 712-716. (in Chinese))
- [16] 苏丹, 王彤, 刘兰岚, 等. 辽河流域工业废水污染物排放的时空变化规律研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19 (12): 2953-2959. (SU Dan, WANG tong, LIU Lanlan, et al. Research on the spatio-temporal variation of pollutant discharged from industrial wastewater in the Liaohe River Basin [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(12): 2953-2959. (in Chinese))
- [17] 苏丹, 王志红, 王彤, 等. 辽河流域工业废水主要污染物排放强度的单元差异分析[J]. 生态环境学报, 2010, 19 (2): 275-280. (SU Dan, WANG Zhihong, WANG tong, et al. Analysis on the regional differences of industrial wastewater main pollutants emission intensity in Liao River Basin [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(2): 275-280. (in Chinese))
- [18] 阳平坚, 吴为中, 孟伟, 等. 基于生态管理的流域水环境功能区划: 以浑河流域为例[J]. 环境科学学报, 2007, 27 (6): 944-952. (YANG Pingjian, WU Weizhong, MENG Wei, et al. Ecosystem management oriented water environmental function zoning at watershed scale: Hun River Basin as a case study [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(6): 944-952. (in Chinese))
- [19] 武玉峰. 辽宁省典型河流健康问题分析及保护对策[J]. 水利规划与设计, 2015, (9): 42-44. (WU Yufeng. Typical river health problem analysis and protection countermeasures in Liaoning Province [J]. Water Resources Planning and Design, 2015, (9): 42-44. (in Chinese))
- (收稿日期: 2016-06-07 编辑: 王 芳)
-
- (上接第 42 页)
- [8] 潘欢迎. 岩溶流域水文模型及应用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.
- [9] CAMPBELL C W, SULLIVAN S M. Simulating time-varying cave flow and water levels using the storm water management model[J]. Engineering Geology, 2002, 65 (2/3): 133-139.
- [10] PETERSON E W, WICKS C M. Assessing the importance of conduit geometry and physical parameters in karst systems using the storm water management model (SWMM)[J]. Journal of Hydrology, 2006, 329 (1/2): 294-305.
- [11] 章程, 蒋勇军, 袁道先, 等. 利用 SWMM 模型模拟岩溶峰丛洼地系统降雨径流过程: 以桂林丫吉试验场为例[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34 (3): 10-14. (ZHANG Cheng, JIANG Yongjun, YUAN Daoxian, et al. Rainfall-runoff simulation of a typical karst fengcong depression system using SWMM model: a case study of the Yaji experimental site in Guilin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34 (3): 10-14. (in Chinese))
- [12] 王腊春, 史运良. 西南喀斯特山区三水转化与水资源过程及合理利用[J]. 地理科学, 2006, 26 (2): 173-178. (WANG Lachun, SHI Yunliang. Formation process and rational use of water resources and transform of rainfall, surface water and underground water in karst mountainous area in southwest China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26 (2): 173-178. (in Chinese))
- [13] 赵人俊. 流域水文模拟: 新安江模型与陕北模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [14] 宋万祯, 雷晓辉, 黄晓敏, 等. 考虑拥挤度的多目标粒子群优化算法在马斯京根参数估计中的应用[J]. 水电能源科学, 2013, 31 (1): 38-41. (SONG Wanzhen, LEI Xiaohui, HUANG Xiaomin, et al. Application of multi-objective particle swarm optimization in muskingum parameter estimation considering crowding distance [J]. Water Resources and Power, 2013, 31 (1): 38-41. (in Chinese))
- [15] 王宇晖. 基于分布式水文模型的流域水循环及面源伴生过程模拟研究与应用[D]. 上海: 东华大学, 2012.
- [16] 赵人俊, 王佩兰. 新安江模型参数的分析[J]. 水文, 1988 (6): 2-9. (ZHAO Renjun, WANG Peilan. Analysis of Xinanjiang model parameter [J]. Journal of China Hydrology, 1988(6): 2-9. (in Chinese))
- (收稿日期: 2016-08-04 编辑: 徐 娟)