

# 天津滞缓流型城市河网水质时空分布特征

董立新,白昊阳

(天津市水利科学研究院,天津 300061)

**摘要:**针对天津城市河网滞缓流特点突出、水质变化与天然河流不同的特征,以海河、津河、卫津河、外环河 4 条重点河道为研究对象,应用聚类分析、因子分析、多元线性回归分析等多元统计分析方法对 11 个重点河道断面 2008 年和 2009 年 39 周的水质监测指标进行了分析。结果表明:河道断面水质在时间和空间上具有一定的分布特征,时间上,各断面 5—8 月水质较其他时间更差,氨氮、总磷超标严重;空间上,呈现出从海河到津河、卫津河再到外环河水质逐步下降的特征;海河、津河、卫津河等河道氮磷类汇入是主要污染源,外环河则以有机物污染汇入为主要污染源。

**关键词:**城市河网;滞缓流;水质变化;多元统计分析;天津市

**中图分类号:**X522;X824

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7647(2017)04-0008-06

**Temporal and spatial distribution characteristics of water quality of stagnant river network in Tianjin City, China//DONG Lixin, BAI Haoyang**(*Tianjin Hydraulic Research Institute, Tianjin 300061, China*)

**Abstract:** The urban river network in Tianjin City has stagnant or slow-flow water, which leads to water quality variations different from natural rivers. Multivariate statistical analysis methods, including the cluster analysis method, factor analysis method, and multiple linear regression method, were used to evaluate the water quality data from 11 sites in four main rivers of Tianjin, the Haihe River, Jinhe River, Weijin River, and Waihuai River, for 39 weeks during the period from 2008 to 2009. The results show that the water quality variation exhibited specific temporal and spatial characteristics. Water quality data from May to August were worse than during other months, especially for the ammonia nitrogen and total phosphorous concentrations, which severely exceeded the water quality standards. Water quality deteriorated from the Haihe River to Jinhe River, Weijin River, and, finally, Waihuan River gradually. Nitrogen and phosphorous pollutants were the main pollution sources of the Haihe River, Jinhe River, and Weijin River, while organic pollutants were the main pollution sources of the Waihuan River.

**Key words:** urban river network; stagnant and slow-flow water; water quality variation; multivariate statistical analysis; Tianjin City

滞缓流型城市河网是指水体整体呈现出流速滞缓、流动性差等特征的城市河网区域。在我国北方地区,包括天津在内的多个城市河网滞缓流特点均比较突出。由于上游的水资源量较少,在满足生活、生产用水后才能进行城市河网补给,生态补水无法得到保障;此外,北方地区的天然来水多集中在汛期,为保障城市排涝安全,也无法给河网充分补水。由此,为实现城市河网的景观环境功能、存蓄河网水量,常通过建立闸坝等水工设施将城市河网与天然河道分割开来,进行人工调控。因此,城市河网无法像天然河流一样自然流动,呈现人工调控下的滞缓流特征<sup>[1]</sup>,造成了水体流动性差,抑制了河道复氧过程,溶解氧含量长期处于较低水平,水体自净能力下降,再加上污染汇入、蒸发渗漏的长期作用,河网

水体水质总体上较差,多数处于劣 V 类状态<sup>[2]</sup>。

河道水质变化规律研究已有多年的历史,目前主要集中在水质时空分布特征分析与水质综合评价上<sup>[3-5]</sup>,现阶段主要采用的方法是多元统计分析方法,其中,系统聚类分析法、因子分析法、多元线性回归分析法既可用于河流水质的时空变化分析,还可兼顾河流水质综合评价,应用较为广泛<sup>[6-8]</sup>。国外 Berkant 等<sup>[9]</sup>、André 等<sup>[10]</sup>、Bahman 等<sup>[11]</sup>采用多元统计分析方法分别对土耳其、加拿大、日本的河流开展了水质时空变化特征分析,得到了河道主要水质指标的变化规律及其影响因子;国内卜红梅等<sup>[7]</sup>、张棋等<sup>[12]</sup>、徐华山等<sup>[13]</sup>采用系统聚类分析、因子分析和主成分多元线性回归分析等多元统计分析方法分别对金水河流域、湘江流域、漳卫南运河流域水质时空变化特征进行了

研究,分析了主要污染因子和可能的污染来源。

综合来看,目前,多元统计分析方法在天然河流上应用较多,还未见在城市滞缓流河道中的应用。关于北方城市滞缓流河道各方面的研究较少,且偏重于水资源管理、水生态恢复、污染治理等方面<sup>[14]</sup>,而针对其水质时空演变及污染源定性识别研究鲜见报道。本文以天津城市河网中重点河道为研究对象,采用系统聚类分析法分析河道水质时空分布特征,采用因子分析法对河流主要污染源进行定性识别,采用多元线性回归分析法确定主要公因子对各水质指标的贡献率,为北方滞缓流型城市河网水质改善和修复提供科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

天津城市河网目前共有行洪排沥河道 20 条,再生水河道 4 条,河道总长度 231.4 km,滞缓流特点突出。选取水环境影响较大、关注度较高的海河、卫津河、外环河 4 条重点河道作为代表,在这 4 条研究河道中选择了 11 个重点断面进行分析,包括海河的三岔口(S1)和四新桥(S2),卫津河的三元村(S3)、八里台(S4)、广东路桥(S5)和津河广场(S6),外环河的津涞公路桥(S9)、七号桥(S10)和津汉桥(S11)。河道及其重点断面位置如图 1 所示。

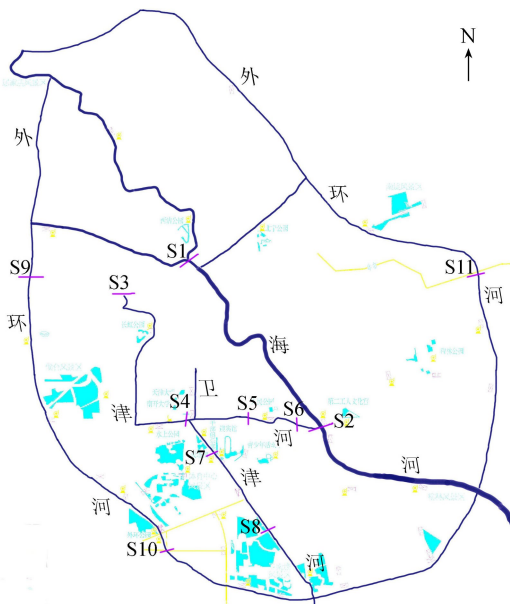


图 1 天津城市河网重点河道及监测断面

水质数据由现场采样监测获得,采样时间为 39 周(2008 年 5 月下旬至 2008 年 11 月中旬以及 2009 年 3 月初至 2009 年 5 月下旬),采样频次为每周 1 次,监测的水质指标包括氨氮、总氮、总磷、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)和溶解氧(DO)

共 6 项,采样监测标准依据《水和废水监测分析方法》<sup>[15]</sup>。表 1 为采样时间内所有 11 个重点河道断面 6 项水质指标的监测数据。

表 1 天津城市河网重点河道断面

主要水质指标监测数据

mg/L

水质指标	平均值	范围	标准偏差
氨氮	5.08	0.19 ~ 15.67	2.92
总氮	6.99	1.05 ~ 23.4	3.75
总磷	0.64	0.02 ~ 1.78	0.31
COD <sub>Mn</sub>	12.02	3.4 ~ 22.88	3.55
BOD <sub>5</sub>	8.23	1.67 ~ 18.88	3.31
DO	4.09	0 ~ 14.21	1.90

### 1.2 研究方法

a. 系统聚类分析法。根据变量或样品的亲疏程度,逐次聚合,将性质最接近的对象结合在一起,直至聚成一类。通常,根据采样点和采样时间进行聚类以分析水质的时空变化特征,根据评价指标进行聚类以分析指标相似性<sup>[16-17]</sup>。聚类分析采用的是组间连接法,利用两组数据间各变量值平均平方距离作为衡量两组数据差异的基准。

b. 因子分析法。从多个实测变量中提取出较少的、互不相关的抽象综合指标(因子),每个变量可用因子的线性组合表示;同时,根据各因子对变量的影响大小,也可将变量分为等同于因子数目的类数。此方法用于提取污染因子和识别污染源<sup>[18-19]</sup>。因子分析前首先要对数据进行 KMO 检验和 Barlett 球形检验,结果合格后才可进行因子分析。

c. 多元线性回归分析法。将变量值与因子得分进行多元线性回归,根据回归参数得到针对各因子的估计值,从而确定因子对各个变量的贡献。该方法用于计算污染因子对各评价指标的贡献率<sup>[20]</sup>。多元统计分析用 SPSS 完成。

## 2 结果与分析

依据河道监测数据,利用系统聚类分析、因子分析和多元线性回归分析等方法,研究分析河流水质指标,探讨滞缓流型城市河网水质分布特征。根据 GB3838—2002《地表水环境质量标准》,监测断面的水质类别以劣 V 类和 V 类为主,劣 V 类断面占监测断面的比例达到了 63%,V 类断面占比为 25%,表明天津城市河网水质污染问题依然十分严峻,其中,总氮、氨氮、总磷超标较为突出,这与水体滞缓流特性、呈现出一定的湖泊水质特征有直接关系。

### 2.1 河道水质时空分布特征

#### 2.1.1 河道水质时间分布特征

从时间聚类结果(图 2)看,虽然各月水质以劣 V 类为主,但根据聚类中心距不同,可以分为 4 个不

同的时段:3、9、10、11月为第Ⅰ阶段,5、6、7月为第Ⅱ阶段,4月为第Ⅲ阶段,8月为第Ⅳ阶段。结合各阶段主要污染物质量浓度指标(图3),第Ⅰ阶段为非汛期,水质较好,氨氮、COD<sub>Mn</sub>、BOD<sub>5</sub>质量浓度值显著低于其他时段;第Ⅲ阶段为汛前,BOD<sub>5</sub>、氨氮质量浓度均有一定上升,水质有所下降;第Ⅱ阶段和第Ⅳ阶段为汛期,污染物质量浓度均明显高于前2个阶段,非汛期到汛期水质变差的趋势较显著,其中第Ⅳ阶段污染物质量浓度更高,氨氮、总氮超标最严重。

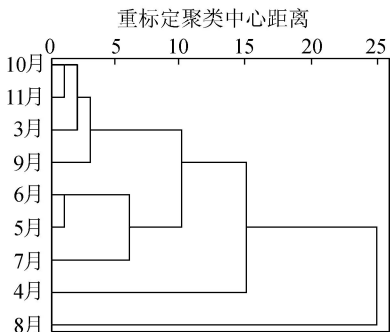


图2 时间聚类结果

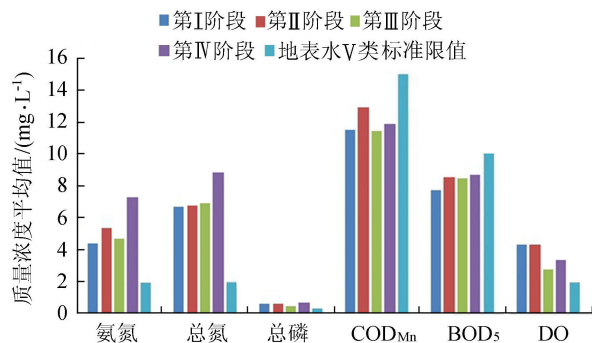
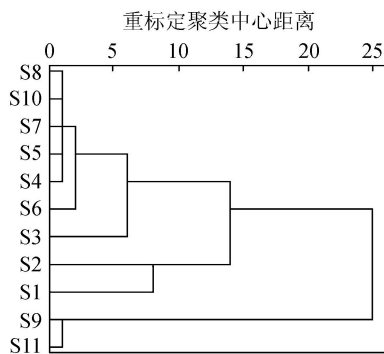


图3 时间聚类各阶段主要污染物质量浓度平均值

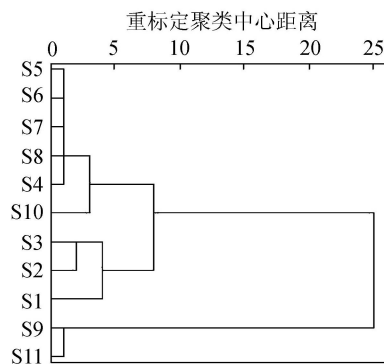
### 2.1.2 河道水质空间分布特征

**a. 汛期。**按空间聚类结果(图4(a)),断面可以分为3类:第Ⅰ类断面是S1和S2,第Ⅱ类断面是S3~S8和S10,第Ⅲ类断面是S9和S11。如图5(a)所示,第Ⅰ类断面的COD<sub>Mn</sub>、BOD<sub>5</sub>、氨氮基本满足地表水V类标准限值,只有氮磷指标超标;第Ⅱ类断面属重要景观河道断面,汛期水质污染较重,只有BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Mn</sub>、氨氮基本满足地表水V类标准限值;第Ⅲ类断面受外环沿线污染汇入影响,汛期水质最差,所有指标均超过地表水V类标准限值,有机污染物和氮磷均超标数倍。

**b. 非汛期。**按空间聚类结果(图4(b)),断面可以分为3类:第Ⅰ类断面是S1~S3,第Ⅱ类断面是S4~S8和S10,第Ⅲ类断面是S9和S11。如图5(b)所示,3类断面水质差别显著,污染程度逐步加重,第Ⅰ类断面除了总氮外其他指标均满足地表水V类标准限值,第Ⅱ类断面氮磷污染超过地表水V类标准限值,第Ⅲ类断面各污染物均超过地表水V

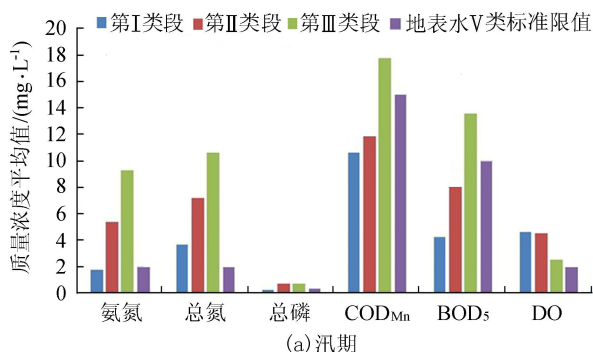


(a) 汛期

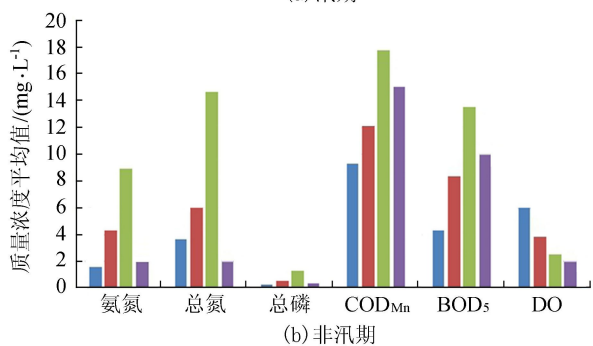


(b) 非汛期

图4 空间聚类结果



(a) 汛期



(b) 非汛期

图5 空间聚类各类断面主要污染物质量浓度平均值

类标准限值,且超标严重。

综合空间聚类分析结果,天津城市河网水质具有明显的空间分布特征,作为城市补水水源的海河干流断面水量多,水质最好;二级景观河道流动性比海河差,水量少,受沥水、污水汇入影响,水质较差;市区外围的外环河流动性更低,沿线可能的污染源分布较多,水质最差。

## 2.2 河道主要污染源定性识别

采用因子分析法分别对全部断面以及聚类后的每一类断面的主要水质影响因子进行分析。

### 2.2.1 全部断面主要水质影响因子

对全部监测河流断面进行统计分析,KMO 检验值为 0.621,变量间的偏相关性较强,Barlett 球形检验表明各变量间具有相关性,因此可以使用因子分析法进行水质影响因子分析。

根据因子分析结果,提取了对水质影响较大的 2 个公因子  $F_1$  和  $F_2$ ,因子载荷、特征值及方差贡献率结果见表 2。 $F_1$  的方差贡献率 49.9%,其中氨氮、总氮、总磷、 $BOD_5$  的因子载荷大,均与  $F_1$  呈正相关关系,因此, $F_1$  主要反映了水体氮磷的污染程度。 $F_2$  的方差贡献率为 23.3%,其中  $COD_{Mn}$ 、DO 的因子载荷较大,且与  $F_2$  呈正相关关系,反映了水体中有机污染的水平。总体来说,天津城市河网水质状态是以氮磷污染为主导因素,其次是其他种类的有机污染。

表 2 全部断面因子载荷、特征值及方差贡献率

指标	$F_1$	$F_2$
氨氮	0.941	-0.098
总氮	0.844	-0.247
总磷	0.741	0.187
$COD_{Mn}$	0.471	0.738
$BOD_5$	0.765	0.283
DO	-0.206	0.817
特征值	2.995	1.398
方差贡献率/%	49.9	23.3

因子得分(表 3)反映各监测断面的污染状况,其值越高,说明水质越差,外环河的津汉桥断面(S11)和津涞公路桥断面(S9)得分最高,污染最为严重,海河干流的 2 个断面得分最低,水质最好。这一点与空间聚类的分析结果一致。

表 3 监测断面因子得分

河流断面	$F_1$ 得分	$F_2$ 得分	综合得分	排序
S1	-2.101	0.531	-5.550	11
S2	-1.396	0.175	-3.936	10
S3	-1.010	0.251	-2.674	9
S4	-0.079	-0.008	-0.248	4
S5	-0.120	0.008	-0.348	5
S6	-0.315	0.162	-0.715	7
S7	-0.549	-0.126	-1.820	8
S8	0.001	-0.254	-0.352	6
S9	1.787	-0.160	5.127	2
S10	0.530	-0.119	1.422	3
S11	2.242	-0.210	6.421	1

### 2.2.2 3 类断面的主要水质影响因子

对空间聚类得到的 3 类断面进行统计分析,KMO 检验值均大于 0.6,表明变量间的偏相关性较强,Barlett 球形检验表明各变量间具有相关性,因此可使

用因子分析法进行水质影响因子分析。根据特征值大于 1 的原则,3 类断面均提取了  $F_1$ 、 $F_2$  2 个公因子,公因子累计方差贡献率均在 80% 左右(表 4)。

表 4 3 类断面因子载荷、特征值及方差贡献率

指标	$F_1$			$F_2$		
	第 I 类断面	第 II 类断面	第 III 类断面	第 I 类断面	第 II 类断面	第 III 类断面
氨氮	0.847	0.846	0.277	-0.190	0.135	0.685
总氮	0.956	0.964	-0.142	0.146	-0.070	0.859
总磷	0.950	0.905	-0.025	0.085	-0.075	0.754
$COD_{Mn}$	0.170	0.541	0.960	0.942	0.616	-0.106
$BOD_5$	0.117	0.795	0.954	0.957	0.176	-0.150
DO	-0.213	-0.129	-0.946	0.422	0.889	-0.106
特征值	2.623	3.406	2.824	2.046	1.230	1.822
方差贡献率/%	43.7	56.8	47.1	34.1	20.5	30.4

a. 第 I 类断面。2 个公因子中, $F_1$  的方差贡献率为 43.7%,氨氮、总氮、总磷的因子载荷较大,与  $F_1$  呈正相关关系; $F_2$  的方差贡献率为 34.1%, $COD_{Mn}$ 、 $BOD_5$  的因子载荷较大,均超过了 0.94,与  $F_2$  呈正相关关系。综合来看,氮磷污染、有机物排入仍然是海河水质变化的主要因素,这与上游来水、沿岸二级河道的水体汇入有关。

b. 第 II 类断面。2 个公因子中, $F_1$  的方差贡献率为 56.8%,氨氮、总氮、总磷因子载荷为主, $BOD_5$  因子载荷值也较高,与  $F_1$  呈正相关关系; $F_2$  的方差贡献率为 20.5%,DO 为主要因子载荷,与  $F_2$  呈正相关关系; $COD_{Mn}$  则同时受 2 个公因子影响,均呈中度正相关关系。综合来看,氮磷污染、可降解有机物污染是水质污染的主要因素,且与海河相比,氮磷污染影响更为突出,这与河道长年补水较少、汛期沿岸雨污水集中汇入有直接关系。

c. 第 III 类断面。2 个公因子中, $F_1$  的方差贡献率为 47.1%, $COD_{Mn}$ 、 $BOD_5$ 、DO 的因子载荷较大, $COD_{Mn}$ 、 $BOD_5$  的因子载荷与  $F_1$  呈正相关关系,DO 的因子载荷与  $F_1$  呈负相关关系; $F_2$  的方差贡献率为 30.4%,因子载荷较大的是总氮、总磷、氨氮,均与  $F_2$  呈正相关关系。综合来看,对外环河而言,生活、工业污染带来的有机污染影响是河道断面水质变化的关键因子,氮磷的影响相对较弱。

## 2.3 主要因子对水质指标的贡献率

根据因子分析结果,采用多元线性回归分析法,计算得到 3 类断面不同的公因子对各水质指标的贡献率如表 5 所示。

回归过程中,相关系数  $R$  在 0.886 ~ 0.988 之间,说明回归分析有统计学意义;各水质指标估计值与实测值的比值在 0.991 ~ 1.009 之间,也证明了回归结果的准确性。结果显示,第 I 类断面, $F_1$  主要

表5 公因子对水质指标的贡献率 %

指标	$F_1$			$F_2$		
	第Ⅰ类断面	第Ⅱ类断面	第Ⅲ类断面	第Ⅰ类断面	第Ⅱ类断面	第Ⅲ类断面
氨氮	62.54	71.85	20.28	13.98	6.10	32.25
总氮	47.22	85.92	17.67	15.51	8.37	68.71
总磷	80.79	78.73	3.63	10.59	14.66	71.50
COD <sub>Mn</sub>	9.38	33.52	48.01	76.08	44.65	3.42
BOD <sub>5</sub>	6.68	65.46	43.58	80.22	17.00	4.40
DO	15.81	8.75	32.19	45.95	70.64	2.32

影响氨氮、总氮、总磷,  $F_2$  主要影响 COD<sub>Mn</sub>、BOD<sub>5</sub>、DO; 第Ⅱ类断面,  $F_1$  主要影响氨氮、总氮、总磷和 BOD<sub>5</sub>,  $F_2$  主要影响 COD<sub>Mn</sub>、DO; 第Ⅲ类断面,  $F_1$  主要影响 COD<sub>Mn</sub>、BOD<sub>5</sub>、DO,  $F_2$  主要影响氨氮、总氮、总磷。

## 2.4 污染源分析

综合上述分析, 氮磷污染和有机污染汇入及其他不确定因子共同影响着天津城市河网水质, 其中, 氮磷污染物是河网水质的主要污染因子, 有机污染物的影响也较为突出。海河、津河、卫津河等主要河道的水域污染因子分布均呈类似的特征, 这与城市河网天然补水较少、水体滞缓流、汛期雨污水汇入有密切关系, 而在城市外围河流区域, 有机污染则超过了氮磷污染, 成为首要污染因素, 这与城市周边污水收集设施不完善、各类污染源排入较多有直接关系。

结合天津市实际情况, 氮磷污染的主要污染源来自于汛期的雨污水。天津市城区 70% 以上的降水量集中在汛期, 雨水通过各种途径进入城区内的景观河道, 同时大量污水也通过溢流井及其合流制泵站、管网进入了景观河道, 导致河道水质在汛期氮磷污染严重。有机污染的主要污染源来自于工业点源, 且多数未经处理在城市外围直接排入, 虽然总量小于汛期污染汇入, 但其有机污染物浓度较高, 导致河道水质在非汛期有机污染严重。

## 3 水质改善措施

根据水质时空分布特征及主要污染源的分析, 结合天津市的具体特点, 可采取以下水质改善措施:

**a.** 加快推进城市河网水系连通与循环。从水质对比可以看出, 海河水质显著优于津河、卫津河和外环河。而海河作为城市河网水系的核心, 与所有河道都可以实现连通。目前, 在局部区域还存在阻断的情况, 水系没有实现完全的连通, 因此, 加快推进城市河网水系连通与循环, 对于景观河道的水质改善会起到积极的作用。特别是在非汛期, 通过海河给津河、卫津河等重点景观河道补水, 较好水质水体的进入对其他景观河道的水质和生态将会带来显

著的提升和改善。

**b.** 推动雨污合流片区的改造。天津城区中仍存在部分雨污合流片区, 雨污水的混合流入使得这些区域的景观河道水质会迅速恶化, 特别在汛期, 水体黑臭, 富营养化频发, 景观效果极差。为此, 应积极推动雨污合流片区的改造, 减少污水的直接汇入, 将污水引入污水处理厂统一处理, 从而从根本上解决津河、卫津河等部分景观河道汛期氮磷负荷过高的问题。

**c.** 采取生物生态等多种手段改善城市景观河道水质。由于长期水质较差, 单靠外来补水和雨污合流制改造不能在短期内改善津河、卫津河等河道水质, 可采取底泥清淤、生物投菌、生态浮岛等技术来提升河道水体自净能力, 加速水质的改善。其中, 底泥清淤属物理手段, 操作简单, 可以直接减少污染层底泥厚度, 降低底泥中污染物释放速度。生物投菌方法属化学手段, 将生物制剂投入富营养化突出的河段, 可迅速沉降水体中的磷, 对水质短时间的改善有显著效果。生态浮岛技术属生态治理技术, 利用植物对水体中污染物的吸收降解作用达到减污净水效果。这些技术都经过了大量的实践检验, 效果突出。

**d.** 利用湿地技术改善外环河水质。不同于城市内部, 外环河沿线有丰富的土地资源, 建议开展人工湿地建设, 通过在外环河沿线构建多个大型人工湿地, 对外环河水体进行异位处理, 来改善水质。目前, 外环河津涞公路桥附近已建成一个大型人工湿地, 从初期运行情况看, 对局部河段水质特别是氮磷有显著改善效果。

**e.** 加强对外环河排污口监管。外环河水质较差, 主要污染源是有机污染汇入, 这与外环河沿线工业点源有密切关系。结合天津市开展的排污口治理, 应加强对保留的排污口门的监督和管理, 控制排污量, 调控排污对河道水质的影响。

## 4 结论

**a.** 根据河道水质时间分布特征, 年内可划分为 4 个阶段: 3、9、10、11 月为第Ⅰ阶段, 4 月为第Ⅱ阶段, 5、6、7 月为第Ⅲ阶段, 8 月为第Ⅳ阶段, 前 2 个阶段水质总体较好, 后 2 个阶段水质较差, 氨氮、总磷质量浓度超标严重。

**b.** 根据河道水质空间分布特征, 将 11 个监测断面分为 3 类: 汛期海河 2 个断面为第Ⅰ类断面, 津河、卫津河 6 个断面及外环河七号桥断面为第Ⅱ类断面, 外环河其他 2 个断面为第Ⅲ类断面; 非汛期与汛期相似, 只是津河三元村断面由汛期第Ⅱ类断面

变为了第 I 类断面。从第 I 类断面到第 III 类断面,水质逐步下降。

c. 天津滞缓流城市河网水系水质以氮磷污染为主,其他有机污染次之,呈现出典型的湖泊水质特征。其中,第 I 类断面以氮磷污染为主,第 II 类断面以氮磷污染、生化降解有机污染为主,第 III 类断面则主要受有机污染影响。3 类断面 6 个水质指标分别不同程度地受到水体氮磷污染水平、有机污染水平以及其他不确定因素的影响。

## 参考文献:

[1] 陈兴茹. 城市河流生态修复浅议[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, 4(3): 226-231. (CHEN Xinru. Brief discussion on urban river course eco-restoration[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2006, 4(3): 226-231. (in Chinese))

[2] 王秀朵. 北方缺水城市景观水体污染控制[J]. 给水排水, 2011, 37(7): 1-3. (WANG Xiuduo. Scenic water pollution prevention measures of city water shortage in North China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37(7): 1-3. (in Chinese))

[3] 杨学福, 王蕾, 关建玲, 等. 基于多元统计分析的渭河西咸段水质评价[J]. 环境工程学报, 2016, 10(3): 1560-1565. (YANG Xuefu, WANG Lei, GUAN Jianling, et al. Comprehensive assessment of water quality in Xi'an-Xianyang section of Weihe River based on multivariate analysis method[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(3): 1560-1565. (in Chinese))

[4] 程琳琳, 杨开宇, 杜鹃, 等. 河北省河流水质时空变化特征及受人类活动影响的分析[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(1): 1-7. (CHENG Linlin, YANG Kaiyu, DU Juan, et al. Feature of spatial land and temporal variation of water quality and influence of human activities on it in Hebei Province[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, 26(1): 1-7. (in Chinese))

[5] 葛怀凤, 秦大庸, 周祖昊, 等. 基于污染迁移转化过程的海河干流天津段污染关键源区及污染类别分析[J]. 水利学报, 2011, 42(1): 61-67. (GE Huai Feng, QIN Dayong, ZHOU Zuhao, et al. Analysis of key source areas and pollution type in the lower Haihe River based on pollution loading movement and transformation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(1): 61-67. (in Chinese))

[6] 王刚, 李兆富, 万荣荣, 等. 基于多元统计分析方法的西苕溪流域水质时空变化研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(9): 1797-1803. (WANG Gang, LI Zhaofu, WAN Rongrong, et al. Analysis of temporal and spatial variations in water quality of Xitiaoxi watershed using multivariate

statistical techniques [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(9): 1797-1803. (in Chinese))

[7] BU Hongmei, TAN Xiang, LI Siyue, et al. Water quality assessment of the Jinshui River (China) using multivariate statistical techniques [J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 60(8): 1631-1639.

[8] 程学宁, 汤云, 卢毅敏. 基于多元统计分析的闽江水质时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(6): 89-94. (CHENG Xuening, TANG Yun, LU Yimin. Spatial and temporal characteristics of water quality using multivariate statistical analysis in Min River [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(6): 89-94. (in Chinese))

[9] BERKANT O, FATIH E. Monitoring water quality and quantity of national watersheds in Turkey [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, 133(1/2/3): 215-229.

[10] ANDRÉ S H, GUY B, SIMON C, et al. Multivariate analysis of water quality in the richibucto drainage basin (New Brunswick, Canada) [J]. Journal of American Water Resources Association, 2007, 40(3): 691-703.

[11] BAHMAN J A, KANEYUKI N. Modeling the linkage between river water quality and landscape metrics in the Chugoku District of Japan [J]. Water Resources Management, 2008, 23(5): 931-956.

[12] ZHANG Qi, LI Zhongwu, ZENG Guangming, et al. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques in red soil hilly region: a case study of Xiangjiang Watershed, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 152(1/2/3/4): 123-131.

[13] 徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 等. 漳卫南运河流域水质时空变化特征及其污染源识别[J]. 环境科学, 2012, 33(2): 359-369. (XU Huashan, XU Zongxue, TANG Fangfang, et al. Spatiotemporal variation analysis and identification of water pollution sources in the Zhangweinan River Basin [J]. Environmental Science, 2012, 33(2): 359-369. (in Chinese))

[14] 李婉, 张娜, 吴芳芳. 北京转河河岸带生态修复对河流水质的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(1): 80-87. (LI Wan, ZHANG Na, WU Fangfang. Influence of ecological restoration of riparian zone on water quality of Zhuanhe River in Beijing [J]. Environmental Science, 2011, 32(1): 80-87. (in Chinese))

[15] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[16] SHRESTHA S, KAZAMA F. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: a case study of the Fuji River Basin, Japan [J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 22(4): 464-475.

(下转第 18 页)

c. 缩比尺数值模拟结果表明,落距相同时,随着夯锤质量的增大,速度相应增大。夯锤底面静压强一定时,夯锤质量越小能量耗散越快,但  $C_r$  仍为不确定值,随着夯锤质量的增大  $C_r$  呈下降趋势。

### 参考文献:

[1] 李俊如,高建光,贺涛,等. 广西钦州港二期码头抛石基床的水下爆夯[J]. 岩土力学,2004,24(6):917-921. (LI Junru, GAO Jianguang, HE Tao, et al. Strengthening foundation by underwater explosive ramming for second phase dock of Qingzhou Harbor in Guangxi Region[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 24(6): 917-921. (in Chinese))

[2] 冯世晖,庞善喜. 重力式码头基础施工过程控制[J]. 水运科学研究,2007(2):21-24. (FENG Shihui, PANG Shanxi. Process control on foundation construction for gravity wharf[J]. Research on Waterborne Transportation, 2007(2):21-24. (in Chinese))

[3] 蔡劼刚. 用爆破夯实法处理水下抛石基床[J]. 港口工程,1990(5):26-28. (CAI Jigang. Rubble mound foundation with blasting tamping[J]. Port Engineering, 1990(5):26-28. (in Chinese))

[4] 李良英. 大质量夯锤在嵩屿码头水下基床夯实中的应用[J]. 港工技术,2009,46(5):46-49. (LI Liangying. High quality application of tamping hammer in Songyu Wharf in underwater bed compaction [J]. Harbor Engineering Technolog, 2009, 46(5): 46-49. (in Chinese))

[5] 董新春,叶锋,邱青长,等. 重力式码头抛石基床重锤夯实施工效率改进研究[J]. 水运工程,2013(3):199-203. (TONG Xinchun, YE Feng, QIU Qingchang, et al. Method for improving the efficiency of heavy tamping compaction of gravity wharf's rubble bed[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(3):203-199. (in Chinese))

[6] 滕丽娟,张志伟,武燕蕾. 湍流模型下双柱绕流升阻力系数数值模拟[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2009,26(2):51-54. (TENG Lijuan, ZHANG Zhiwei, WU Yanlei. Simulation of drag and lift coefficients on two cylinders in flow field with turbulence model[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Nature Science of Edition), 2009, 26(2):51-54. (in Chinese))

[7] 金大桥,王聪,魏英杰,等. 水下圆柱体带气泡轴向绕流研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2010,26(5):586-591. (JIN Daqiao, WANG Cong, WEI Yingjie, et al. Axial cavitating flow study of underwater circular cylinder [J]. Journal of Harbin University Commerce (Nature Science of Edition), 2010, 26(5): 586-591. (in Chinese))

[8] 陈凯华,石崇,梁邦炎,等. 水下抛石基床动态形成过程数值模拟研究[J]. 科学技术与工程,2014,31(14):314-319. (CHEN Kaihua, SHI Chong, LIANG Bangyan, et al. Numerical simulation research of the falling process for

the underwater ripraps [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 31(14): 314-319. (in Chinese))

[9] ZHU L, WANG J, CHENG N S, et al. Settling distance and incipient motion of sandbags in open channel flows [J]. American Society of Civil Engineers, 2014, 130(2): 98-103.

[10] 王德利. 不同夯锤的水下夯实效果及夯锤阻力理论在水下夯实中的运用探讨[J]. 水运工程,1990(3):51-53. (WANG Deili. Different rammer underwater compaction effect and tamper resistance theory in the application of underwater ramming [J]. Port & Waterway Engineering, 1990(3):51-53. (in Chinese))

[11] 韩世娜. 空心块体水流拖曳力的试验研究[D]. 南京: 河海大学,2007.

[12] 陈玉璞. 流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013:201-207.

[13] COLEMAN S E, MELVILLE B W, GORE L. Fluvial entrainment of protruding fractured rock [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 129(11): 872-884.

[14] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39:201-225.

[15] 谢立全,戚健文,盛旭圆,等. 水下抛石基床重锤夯实及夯锤工作性能数值分析[C]//夏才初. 和谐地球上的水工岩石力学:第三届全国水工岩石力学学术会议论文集. 上海: 同济大学出版社,2010:504-508.

(收稿日期:2016-08-15 编辑:熊水斌)

-----  
(上接第13页)

[17] SUNDARAY S K, PANDA U C, NAYAK B B, et al. Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of the Mahanadi river-estuarine system (India): a case study [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2006, 28(4):317-330.

[18] 余辉,燕姝雯,徐军. 汤浦水库及入库支流水质时空变化特征与影响因素分析[J]. 水生态学杂志,2013,34(5):9-15. (YU Hui, YAN Shuwen, XU Jun. Characteristics and influencing factors analysis of spatio-temporal variations of water quality in Tangpu Reservoir and its tributaries [J]. Journal of Hydroecology, 2013, 34(5):9-15. (in Chinese))

[19] JOHNSON H O, GUPTA S C, VECCHIA A V, et al. Assessment of water quality trends in the Minnesota River using non-parametric and parametric methods [J]. Journal of Environmental Quality, 2009, 38(3):1018-1030.

[20] PALMA P, ALVARENGA P, PALMA V L, et al. Assessment of anthropogenic sources of water pollution using multivariate statistical techniques: a case study of the Alqueva's Reservoir, Portugal [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 165(1/2/3/4):539-552.

(收稿日期:2017-01-05 编辑:熊水斌)