

永定河上游主要河流地表水水质时空变化特征

邵志江^{1,2,3}, 郑斌^{1,3}, 汪涛^{1,3}

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041)

摘要: 2022年冬奥会水质安全保障是目前永定河上游水环境保护的重要工作。通过对2013—2017年永定河上游张家口地区河流水质的长期监测, 研究永定河上游张家口地区主要河流地表水水质时空变化及其主要污染物年通量。结果表明: (1) 2017年永定河上游张家口地区洋河上游水质清洁, 中下游水质中度污染; 清水河上游水质清洁, 下游水质轻度污染; 桑干河水质清洁。(2) 不同河流水质年际变化差异明显。其中, 洋河上游年际变化较小, 中下游水质趋于恶化; 清水河和桑干河水质波动较小; 全流域五年综合污染指数为0.82, 对应水质级别为轻污染。(3) 洋河和清水河水质季节变化明显, 而桑干河水质季节变化不明显。洋河夏季水质较差, 清水河上游春季水质劣于夏秋季。总磷和氟化物是永定河上游主要污染物, 洋河是污染物主要贡献源, 其中总磷贡献率为74%, 氟化物贡献率为61%; 且总磷是水污染主要的限制因子, 一旦污染, 治理十分困难, 因此应引起相关部门的高度重视。

关键词: 永定河上游; 地表水; 时空变化; 内梅罗污染指数

地表水水质是全球重要的环境问题之一^[1-3]。海河水系在全国七大水系中水质污染状况较为严重, 总体为中度污染。永定河是海河流域的七个主要河流系统之一^[4], 也是官厅水库的主要水源涵养地^[5-10], 对京津冀的饮用水供应和可持续发展起着重要作用。河流水质是流域水环境管理部门最重视的关键问题, 其水质时空特征可为流域水环境管理者提供动态的信息^[10]。因此, 迫切需要识别流域水质时空变化特征, 为流域管理提供一定的科学依据及决策支撑。

基于环境系统的复杂性, 目前使用较为广泛的水质综合评价法主要有单因子指数评价法、模糊综合评价法、灰色评价法和内梅罗污染指数综合评价法等^[10-13]。其中, 单因子指数评价法是通过计算水质指数来评价水质等级, 其评价方法严格, 是识别主要污染物的最佳方法。而内梅罗污染指数综合评价法因其综合所选指标的水质指数进行分析, 评价结果最为适中, 被广泛应用于水质评价中^[12,13]。因此, 本文结合单因子指数评价法和内梅罗污染指数综合评价法对水质时空分布特征进行分析, 以期得到全面的水质信息。

永定河上游是官厅水库的主要水源涵养地, 其水质状况好坏与京津冀发展密切相关^[14,15]。近年来, 虽然永定河水质有所改善, 但其水质变化并不稳定。上游河道接纳大量工业废水、生活污水是永定河持续污染、难治理的主要原因^[9]; 同时河流水质演化与土地

收稿日期: 2019-07-01; 修订日期: 2019-12-10

基金项目: 国家水污染治理与控制专项 (2017ZX07101001)

作者简介: 邵志江 (1994-), 男, 江西九江人, 硕士, 研究方向为面源污染防治机理与控制措施。

E-mail: 405520880@qq.com

通讯作者: 汪涛 (1978-), 男, 湖北天门人, 博士, 副研究员, 研究方向为水污染治理。

E-mail: wangt@imde.ac.cn

利用类型的变化密切相关^[9], 枯水期主要污染物来源于农业面源污染、污水处理厂点源和农村生活污水等^[7]。高星琪等^[10]基于多元统计分析结果表明洋河和桑干河仍为重点治理河流。此外, 研究尚未发现有学者针对永定河主要污染物入库通量和贡献率研究进行报道^[16,17]。因此, 根据永定河上游张家口地区主要河流断面长时间尺度监测的数据, 采用单因子指数评价法和内梅罗污染指数综合评价法对永定河上游张家口地区主要河流进行水质现状评价与时空变化分析, 计算主要污染物通量和污染物贡献率, 结合现代河流湖泊治理技术与理念, 提出相应治理与保护措施, 以期永定河上游张家口地区水源供水安全和水生态安全保障提供依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

研究区(图1)位于张家口市内, 该市位于河北省西北部, 处于 $113^{\circ}50' \sim 116^{\circ}30' E$ 、 $39^{\circ}30' \sim 42^{\circ}10' N$ 之间。整体地势西北高, 东南低, 是保障首都最近的一道生态屏障。河流由洋河与桑干河交汇后, 在张家口市怀来县朱官屯村处汇合, 始称永定河。永定河上游河流主要包括洋河、桑干河和清水河等。其中洋河全流域面积 $1.6 \times 10^4 \text{ km}^2$, 张家口市境内 $1.07 \times 10^4 \text{ km}^2$, 干流全长106 km; 桑干河发源于山西省宁武县, 控制流域面积8775 km^2 , 主河道在张家口市境内147 km; 清水河是位于市境内的一条河流, 发源于崇礼区, 在市区南部清水河村汇入洋河, 流域总面积2380 km^2 , 全长109 km。流域植被属于半干旱森林灌木、旱生灌木和少量草原类型, 植被的水平和垂直分布规律明显。工业分布主要沿洋河流域, 较为集中。土地利用主要以农用地为主, 占土地总面积67.9%, 其次为未利用地, 占土地总面积27.78%。气候属于温带大陆性季风气候, 多年平均降雨量为393.2 mm, 年内、年际降雨变化较大, 年内降雨集中在6-8月份, 约占全年的80%。夏季暖热多雨, 冬季寒冷干燥。近年来, 崇礼区以滑雪为主的旅游业发展较好。

1.2 数据来源

水质数据来自市环保局永定河流域2013—2017年共5年的流域监测站。实际水质监

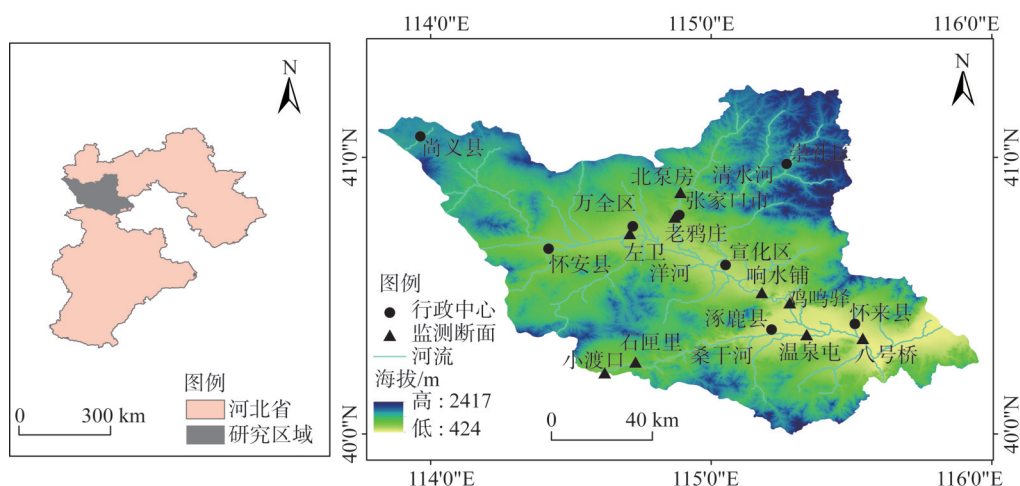


图1 研究区域概况及监测断面示意

Fig. 1 Overview of the study area and schematic diagram of the monitoring section

测指标共28项,结合近十几年张家口市环境公报结果显示,主要污染物指标为溶解氧(DO)、氨氮(NH₄⁺-N)、高锰酸盐指数、总磷(TP)、化学需氧量(COD)、生化需氧量和氟化物(F⁻),因此选择这七个水质指标进行分析^[5,7-11]。

1.3 数据处理与评价方法

1.3.1 单因子指数评价方法

根据地表水水域环境功能和保护目标,依据《地表水环境质量标准》(简称GB 3838-2002)Ⅲ级标准^[18],采用单因子指数评价法对张家口市水质进行评价。水质指数计算公式为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中: P_i 为*i*类指标的水质指数; C_i 为*i*类评价因子的实测质量浓度值; S_i 为第Ⅲ类水标准的*i*类质量浓度值。本文研究的各个监测断面年均浓度是由其所监测的月平均浓度值求出。

此外,溶解氧指标与其他指标不同,溶解氧浓度越高,水质情况越好,所以其水质指数计算公式为:

$$P_i = \frac{S_i}{C_i} \quad (2)$$

1.3.2 内梅罗污染指数综合评价法

内梅罗污染指数综合评价法^[12,13]是美国内梅罗(N. L. Nemerow)教授在其所著的《河流污染科学分析》书中提出的一种水污染指数。根据所选水质指标的实测质量浓度和标准值,分别计算内梅罗污染指数和标准指数,与相应的等级标准指数相对照,即可得到评价等级。评价等级计算公式为:

$$P = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{ij}}\right)^2 + \left(\max \frac{C_i}{C_{ij}}\right)^2}{2}} \quad (3)$$

式中: C_{ij} 为第*i*类评价因子的第*j*类标准质量浓度值; P 为某监测点的内梅罗污染指数; n 为参与评价污染物项数; \max 为各项污染物中的最大分指数。

1.3.3 污染物通量估算法——基准年通量 F_{ref} 的计算

采用每月监测的日平均数据计算基准年通量 F_{ref} ,计算公式^[16,17]如下:

$$F_{\text{ref}} = 0.0864 \times 30 \times n \times \sum_{i=1}^n (Q_i \times C_i) \quad (4)$$

式中: F_{ref} 为河口物质基准年通量(t/a); Q_i 为年每月平均流量(m³/s); C_i 为年每月物质的平均质量浓度值(mg/L); i 为月序号, $i=1, 2, \dots, 12$; n 代表不断流的月份数;30为每月按30天计算。

河流污染物贡献率计算公式为:

$$\text{贡献率}(\%) = \frac{RF_{\text{ref}}}{ARF_{\text{ref}}} \times 100\%$$

式中: RF_{ref} 为河流物质基准年通量(t/a); ARF_{ref} 为河流物质基准年通量之和(t/a)。

1.3.4 数据处理方法

使用Excel 2013软件对水质指数和内梅罗综合污染指数进行计算,空间插值采用反距离加权插值(IDW),使用Origin Pro 9.0和ArcMap 10.2软件作图。

1.4 污染等级划分

根据全国地表水环境质量标准，以第Ⅲ类水为标准进行计算（表1）。

表1 内梅罗污染指数与水质类别对应

Table 1 Nemero pollution index corresponding to water quality category

水质类别	I类	II类	III类	IV类	V类
P	$P < 0.80$	$0.80 \leq P < 0.87$	$0.87 \leq P < 1.00$	$1.00 \leq P < 1.61$	$1.61 \leq P < 2.33$
等级划分	清洁	较清洁	轻(度)污染	中(度)污染	重(度)污染

2 结果分析

2.1 水质现状评价

2017年水质现状评价结果如表2所示。由表2可知，单因子指数评价结果表明：温泉屯断面水质类别达到Ⅱ类水标准，水质最优；响水铺和八号桥断面水质类别均为Ⅳ类水，主要污染物分别为氟化物、总磷；其余断面水质类别均为Ⅲ类水。从整体上来说，清水河和桑干河水质类别均达到地表水的Ⅲ类水级别，洋河有部分断面水质指标浓度达到Ⅳ类水浓度值，说明水质受到污染。内梅罗污染指数综合评价法结果表明：水质级别为清洁断面有左卫、石匣里、温泉屯、小渡口和北泵房；水质级别为轻污染断面有响水铺和老鸦庄；水质级别为中污染的断面有鸡鸣驿和八号桥。从整体上来说，水质级别按评价指数排序：桑干河<清水河<洋河，水质综合指数越小表示水质越优。

表2 现状评价结果

Table 2 Evaluation of water quality in current situation

河流	断面名称	单因子评价		内梅罗指数法	
		水质类别	主要污染物	评价指数	水质级别
洋河	左卫	Ⅲ	—	0.77	清洁
	响水铺	Ⅳ	氟化物	0.91	轻污染
	鸡鸣驿	Ⅲ	—	1.05	中污染
	八号桥	Ⅳ	总磷	1.12	中污染
桑干河	石匣里	Ⅲ	—	0.74	清洁
	温泉屯	Ⅱ	—	0.67	清洁
	小渡口	Ⅲ	—	0.65	清洁
清水河	北泵房	Ⅲ	—	0.74	清洁
	老鸦庄	Ⅲ	—	0.98	轻污染

注：以上监测结果均为年均值，“—”表示无污染指标。

2.2 不同河流年通量结果

根据2017年水质现状评价结果（统计的数据为1-9月份），进行污染物年通量统计，结果如表3所示。永定河在2017年上游总径流量为 $0.71 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其中洋河径流量最大，占总径流量54%，其次是桑干河占总径流36%，而清水河径流量较小，出水断面有五个月无径流，占总径流10%。2017年主要污染物总磷和氟化物的排放总量与年径流相似，洋河的总磷贡献率为74%，氟化物贡献率61%，桑干河总磷贡献率为16%，氟化物贡献率为31%。综上可知，洋河是永定河主要的污染物贡献源。

表3 2017年不同河流污染物年通量统计

Table 3 Annual flux statistics of different river pollutants in 2017

污染物	清水河	贡献率/%	桑干河	贡献率/%	洋河	贡献率/%
DO/(t/a)	5.90	9	22.56	36	34.82	55
NH ₄ ⁺ -N/(t/a)	0.19	10	0.46	23	1.36	67
高锰酸盐指数/(t/a)	3.45	14	7.25	30	13.87	56
TP/(t/a)	0.08	10	0.12	16	0.60	74
COD/(t/a)	11.07	11	34.76	35	53.88	54
生化需氧量/(t/a)	2.90	23	2.96	24	6.53	53
F/(t/a)	0.41	8	1.66	31	3.19	61
流量/亿m ³	0.07	10	0.26	36	0.38	54

2.3 水质时空变化

2.3.1 空间变化

张家口地区不同断面五年平均综合污染指数的空间分布如图2所示。整体上,不同断面的五年平均综合污染指数在0.67~0.98之间,整体平均值为 0.82 ± 0.12 ,对应水质类别为轻度污染。但是,洋河四个监测断面中,响水铺、鸡鸣驿和八号桥三个断面五年平均综合污染指数为0.98,较接近于中污染级别,水质相对较差;左卫是洋河四个断面中水质最优,指数为 0.76 ± 0.07 ,水质级别为清洁。可见,洋河水质在空间上表现为上游水质优于中下游水质。桑干河三个监测断面的五年平均综合污染指数分别为 0.67 ± 0.04 、 0.76 ± 0.05 和 0.68 ± 0.04 ,对应水质级别均为清洁。清水河的老鸦庄断面五年平均综合污染指数为 0.83 ± 0.12 ,水质类别为轻污染;北泵房断面指数为 0.78 ± 0.08 ,水质类别为清洁;清水河整体表现为上游水质优于下游。

2.3.2 各断面综合污染指数时间变化

永定河上游张家口地区不同监测断面综合污染指数时间变化如图3所示。由图3可知,洋河左卫断面水质在2013—2017年内,水质波动小,水质级别在较清洁及以上。响水铺水质在2013—2015年内,水质级别为中度污染,出现恶化趋势;但是在2015—2017年水质波动明显,水质明显改善,其中在2016年水质最优。洋河鸡鸣驿断面水质在2013—2014年水质逐渐变差,随后在2015年和2016年水质有明显改善,但是在2017年



图2 张家口地区五年平均综合污染指数空间变化

Fig. 2 Spatial variation of five-year average comprehensive pollution index in Zhangjiakou

水质又出现恶化趋势。八号桥断面水质在2013—2015年波动范围小,水质级别在中度污染;在2016年水质明显改善,但2017年水质又突然恶化。桑干河的三个监测断面,在2013—2017年水质波动均较小,仅在2014年水质综合指数略微上升,但随后2015年水质又趋于变好。清水河的老鸦庄断面在2013—2016年波动趋势较相似,水质逐渐改善,但在2017年老鸦庄水质明显比北泵房差。总体来看,水质有改善趋势。永定河上游张家口地区在2014年综合污染指数均出现不同幅度上涨,说明水质出现变差趋势;在2015年除响水铺断面外,其余断面水质综合污染指数均发生下降,说明水质呈现转好趋势;在2016年综合污染指数最小,水质均为较清洁及以上;在2017年有部分断面(八号桥、鸡鸣驿和老鸦庄)水质出现波动,水质级别为中度污染,响水铺断面水质为轻污染,其余断面水质均为清洁。

2.3.3 各断面水质季节变化特征

各个断面不同季节的综合污染指数见表4。由于冬季出现冰冻现象未进行水质监测,所以冬季未计算出对应的综合污染指数。由表4可知,左卫在春季和秋季水质级别为清洁,夏季水质出现轻微波动;八号桥在季节变化上水质级别未发生改变,均为轻污染;响水铺在春季和夏季综合污染指数大于1,水质级别为中污染,秋季水质稍微改善,水质级别为轻污染;鸡鸣驿在春季水质级别为中污染,水质较差,夏季和秋季水质级别为轻污染。整体来看,洋河的中游断面季节变化表现为春夏季水质较差,秋季水质

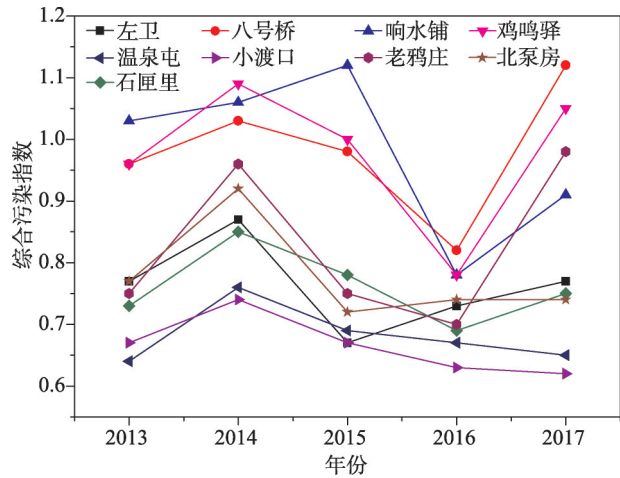


图3 张家口地区不同断面综合污染指数年际变化

Fig. 3 The variations of comprehensive pollution index of different sections in Zhangjiakou from 2013 to 2017

表4 不同季节的各个断面的综合污染指数

Table 4 Comprehensive pollution index of each section in different seasons

河流	监测断面	春季		夏季		秋季		冬季	
		综合污染指数	水质级别	综合污染指数	水质级别	综合污染指数	水质级别	综合污染指数	水质级别
洋河	左卫	0.76	清洁	0.84	较清洁	0.77	清洁	—	—
	八号桥	0.93	轻污染	0.96	轻污染	0.97	轻污染	—	—
	响水铺	1.12	中污染	1.02	中污染	0.95	轻污染	—	—
	鸡鸣驿	1.09	中污染	0.93	轻污染	0.94	轻污染	—	—
桑干河	石匣里	0.80	较清洁	0.79	清洁	0.78	清洁	—	—
	温泉屯	0.77	清洁	0.67	清洁	0.70	清洁	—	—
	小渡口	0.74	清洁	0.67	清洁	0.71	清洁	—	—
清水河	老鸦庄	0.85	较清洁	0.83	较清洁	0.76	清洁	—	—
	北泵房	0.87	轻污染	0.75	清洁	0.82	较清洁	—	—

注: 冬季河流冰封未监测, “—”表示无。

相对呈改善趋势。桑干河三个断面水质在季节中变化不明显,水质级别主要为清洁。清水河老鸦庄断面在春夏季水质级别为较清洁,秋季水质级别为清洁;清水河北泵房在春季水质级别为轻污染,夏季水质级别为清洁,秋季水质级别为较清洁。从整体而言,清水河上游在春季水质比夏秋季差。

3 讨论

3.1 水质时空变化的原因分析

本文中清水河和洋河在季节变化中表现较明显,这可能与集水区人类活动不同相关。清水河上游在春夏季水质变化差异较大可能原因为清水河发源于崇礼区,因近年来滑雪为主的旅游业发展迅速,游客众多等引起河流上游加重污染物的排放可能对春季水质产生影响。此外,冬季河道内水生植物自然凋落,植物吸收能力下降,水体流速下降,水质自净能力不足等造成污染物浓度累积也可能对春季水质造成影响。对于洋河中下游断面水质在春夏季水质较差,秋季水质相对改善。春季主要原因为洋河中下游是城市发展较为密集地,人口众多、活动频繁加上冬季河流自净能力不足等造成的。夏季水质较差原因可能和降水年内分配不均相关,张家口地区年降水量的75%~80%集中在6-9月,暴雨主要特点是覆盖面积小、强度大、历时短^[10],雨季土壤氮、磷流失量分别达96 kg/hm²和9 kg/hm²^[19]。此外,流域内农业种植在6-9月份作物以玉米为主,在粮食生产关键期(6-7月)追肥,无法被植物有效利用的氮磷营养元素随降雨径流或地下水下渗补充地表水进入河道,导致河流氮磷浓度上升,进一步恶化水质^[20]。本文研究结果表明,桑干河水质在季节中变化并不明显,且水质级别均为较清洁以上。其主要原因可能为桑干河集区内人口密集度较低、沿河工业欠发达和河内水生环境较好等。

本研究发现永定河上游张家口地区河流整体表现为上游水质优于中下游水质(图2),河流主要污染集中于洋河中下游段。洋河的上游主要监测断面为左卫,五年水质清洁,波动小,综合污染指数小于0.85,主要集水区类型为农林混合集水区。中游监测断面为响水铺和鸡鸣驿,中游集水区主要属于工业和农业集水区,污染物主要有TP、NH₄⁺-N、氟化物和高锰酸盐指数。下游监测断面为八号桥,主要集水区类型为农业集水区,污染物主要为TP、COD和氟化物。洋河中下游水质污染原因主要有:(1)工业方面:企业分布密集,洋河流域中下游分布了全市62%的企业^[7],污染物排放总量大,洋河中下游企业废水排放量达到官厅水库排放总量89.12%^[21]。(2)生活污水方面:城区生活污水管网设施覆盖不完全^[9],部分废水直排现象依然存在,污水处理效率低^[7]。(3)农业方面:人为开垦力度大,水土流失严重,化肥和农药是主要的面源污染源^[9]。

3.2 洋河中下游水质保障防控策略

本文主要针对永定河上游污染较严重的洋河中下游断面,提出如下河流污染物消减和水质恶化防控策略:

(1)氟化物排放主要来源于水泥厂、氟化物工厂和冶炼厂等工业产业^[22]。着力解决宣化区和下花园区有色金属冶炼和水泥厂等高污染排放行业的污染问题,建议优化洋河中下游沿岸产业布局,以低污染、绿色化生产为主,改造升级传统产业,淘汰落后产能企业,引进高新产业。为控制各企业污染物排放量在合适范围内,可适当提高污染物排放标准。加强对临近河流的重工业进行严格监测,同时结合集水区河流环境对污染物净

化消减能力, 科学合理地确定工业排污量和产业规模, 实现河流污染物容量与工业污染物排放的时间和空间上合理分配。本文研究的不足之处在于未对不同产业污染物进行定量化计算, 因此无法针对性提出削减量, 需要进一步加强对洋河中下游区域不同产业污染物排放和水环境容量方面研究。

(2) 总磷、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 COD 主要来源于生活污水排放^[8]。建议加快城镇生活污水管网建设, 并结合区域城镇规模、人口数量、排水特点和经济发展状况进行科学设计, 集中收集处理, 达标后再排放。对于宣化区和怀来县农村生活污水, 建议结合小型生态工程措施进行削减, 比如: “池塘—湿地组合”等。此外, 还应加强响水铺至八号桥断面的沿岸生态修复和防护林建设。由于响水铺和鸡鸣驿断面污染较为严重, 因此建议在响水铺至鸡鸣驿断面适当增加修建河滩湿地、人工生态浮岛和湿地公园等以净化河流水质, 改善水环境。

4 结论

(1) 随着环保监管力度的加大, 2013—2017年永定河上游张家口地区水质总体趋于改善。水质综合指数分析表明, 2016年水质最优, 洋河中下游春夏季水质污染程度比秋季严重, 清水河上游春季水质污染程度比夏秋季严重。

(2) 水质空间分析结果表明, 洋河上游水质清洁, 中下游水质中度污染; 桑干河水质清洁; 清水河上游水质清洁, 下游水质轻污染。整体表现为上游水质优于下游, 全流域综合污染指数均值为0.82, 水质级别为轻污染。

(3) 永定河污染物总磷和氟化物主要的贡献来源于洋河、桑干河, 其中洋河的总磷贡献率为74%, 氟化物贡献率61%; 桑干河总磷贡献率为16%, 氟化物贡献率为31%。

(4) 洋河中下游水质污染较为严重, 结合污染物特征分析, 建议优化洋河中下游地区产业布局, 淘汰落后产能企业, 加强临近河流重工业监管; 同时加快完善城镇污水管网建设, 加强河岸带生态修复等措施改善水环境。

参考文献(References):

- [1] ZHANG P W, ZHOU H D, LI K, et al. Occurrence of pharmaceuticals and personal care products, and their associated environmental risks in Guanting Reservoir and its upstream rivers in North China. *RSC Advances*, 2018, (8): 4703-4712.
- [2] DAOU C, SALLOUM M, LEGUBE B, et al. Characterization of spatial and temporal patterns in surface water quality: A case study of four major Lebanese rivers. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(8): 478-485.
- [3] SENNER S, SENNER E, DAVRAZ A. Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey). *Science of the Total Environment*, 2017, (584): 131-144.
- [4] 张世禄, 周绪申, 许维, 等. 官厅水库水体富营养化现状及变化趋势分析. *海河水利*, 2012, (2): 25-26. [ZHANG S L, ZHOU X S, XU W, et al. Analysis on the status quo and trend of eutrophication of Guanting Reservoir. *Haihe Water Resources*, 2012, (2): 25-26.]
- [5] CHENG P, LI X Y, SU J J, et al. Recent water quality trends in a typical semi-arid river with a sharp decrease in streamflow and construction of sewage treatment plants. *Environmental Research Letters*, 2018, (13): 14-26.
- [6] 宏哲, 武海俊, 高永华, 等. 张家口市水体污染现状分析及控制对策. *中国环境管理干部学院学报*, 2010, 20(1): 59-61. [HONG Z, WU H J, GAO Y H, et al. Analysis and control of water pollution in Zhangjiakou city. *Journal of Environmental Management College of China*, 2010, 20(1): 59-61.]
- [7] 杨大杰, 徐磊. 官厅水库水质现状分析与趋势预测. *北京水务*, 2009, (2): 30-32. [YANG D J, XU L. Current status

- analysis and future trend prediction on the water quality of the Guanting reservoir. *Beijing Water*, 2009, (2): 30-32.]
- [8] 赵建国, 李洪波, 李霄宇, 等. 永定河怀来段水质污染特征及污染源解析. *环境科学与技术*, 2018, 41(s1): 299-306. [ZHAO J G, LI H B, LI X Y, et al. Water pollution characteristics and pollution source of Yongdinghe River in Huailai. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(s1): 299-306.]
- [9] 庞博, 王铁宇, 吕永龙, 等. 洋河流域张家口段河流水质演化及驱动因子分析. *环境科学*, 2013, 34(1): 379-384. [PANG B, WANG T Y, LYU Y L, et al. Temporal variation of water quality and driving factors in Yanghe Watershed of Zhangjiakou. *Environmental Science*, 2013, 34(1): 379-384.]
- [10] 高星琪, 董志, 李令军, 等. 官厅水库上游河流水质空间变异多元统计分析. *湿地科学*, 2019, 17(1): 106-111. [GAO X Q, DONG Z, LI L J, et al. Multivariate statistical analysis on spatial variability of water quality in Guanting Reservoir Upstream Rivers. *Wetland Science*, 2019, 17(1): 106-111.]
- [11] 梁涛, 王浩, 丁士明, 等. 官厅水库近三十年的水质演变时序特征. *地理科学进展*, 2003, 22(1): 38-44. [LANG T, WANG H, DING S M, et al. An evolution of water quality in Guanting Reservoir during the past three decades. *Progress in Geography*, 2003, 22(1): 38-44.]
- [12] 者萌, 张雪芹, 孙瑞, 等. 西藏羊卓雍错流域水体水质评价及主要污染因子. *湖泊科学*, 2016, 28(2): 287-294. [ZHE M, ZHANG X Q, SUN R, et al. Assessment of water quality and the pollution factors of waters in Yamzhog Yumco Basin, Tibet. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(2): 287-294.]
- [13] 徐彬, 林灿尧, 毛新伟. 内梅罗水污染指数法在太湖水质评价中的适用性分析. *水资源保护*, 2014, 30(2): 38-40. [XU B, LIN C Y, MAO X W. Analysis of applicability of Nemerow pollution index to evaluation of water quality of Taihu Lake. *Water Resources Protection*, 2014, 30(2): 38-40.]
- [14] 陈影, 哈凯, 贺文龙, 等. 冀西北间山盆地地区景观格局变化及优化研究: 以河北省怀来县为例. *自然资源学报*, 2016, 31(4): 556-569. [CHEN Y, HA K, HE W L, et al. Study on the change and optimization of landscape pattern in the basin of Northwest Hebei Mountains: A case study of Huailai county, Hebei province. *Journal of Nature Resources*, 2016, 31(4): 556-569.]
- [15] 赵雪, 黄庆旭, 何春阳. 城市扩展过程对湿地影响的情景模拟研究: 以河北怀来为例. *自然资源学报*, 2017, 32(9): 1469-1481. [ZHAO X, HUANG Q X, HE C Y. Scenarios simulation of the spatial stress on wetlands by urban expansion: A case study of Huailai county. *Journal of Nature Resources*, 2017, 32(9): 1469-1481.]
- [16] 郝晨林, 邓义祥, 汪永辉, 等. 河流污染物通量估算方法筛选及误差分析. *环境科学学报*, 2012, 32(7): 1670-1676. [HAO C L, DENG Y X, WANG Y H, et al. Study on the selection and error analysis of riverine pollutant flux estimation methods. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(7): 1670-1676.]
- [17] 黄志伟, 曾凡棠, 范中亚, 等. 北港河流域水质特征及主要污染物通量估算研究. *环境科学学报*, 2018, 38(10): 4063-4072. [HUANG Z W, ZENG F T, FAN Z Y, et al. Study of pollution characteristics and fluxes of the main contaminants in Beigang River. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(10): 4063-4072.]
- [18] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准. [GB 3838-2002, Environmental Quality Standard for Surface Water.]
- [19] GUO W X, FU Y C, RUAN B Q, et al. Agricultural non-point source pollution in the Yongding River Basin. *Ecological Indicators*, 2014, 36: 254-261.
- [20] 徐力刚, 张奇, 徐进, 等. 不同降雨强度对营养盐垂向迁移过程和淋失量的影响. *土壤学报*, 2008, 45(3): 437-444. [XU L G, ZHANG Q, XU J, et al. Migration and leaching losses of nutrients in relation to rainfall intensity. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(3): 437-444.]
- [21] 李俊杰, 李静洁. 张家口市洋河、桑干河流域水环境健康风险评价. *中国环境监测*, 2008, 23(5): 92-95. [LI J J, LI J J. Environmental health risk assessment of water quality in Yanghe and Sangganhe Watershed of Zhangjiakou. *Environmental Monitoring in China*, 2008, 23(5): 92-95.]
- [22] 卜红梅, 刘文治, 张全发. 多元统计方法在金水河水质时空变化分析中的应用. *资源科学*, 2009, 31(3): 429-434. [BU H M, LIU W Z, ZHANG Q F. Application of multiple statistical analysis to spatial-temporal variations of water quality of the Jinshui River. *Resources Science*, 2009, 31(3): 429-434.]

Spatiotemporal variations of surface water quality of main rivers in the upper reaches of Yongding River

SHAO Zhi-jiang^{1,2,3}, ZHENG Bin^{1,3}, WANG Tao^{1,3}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS and Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Mountain Surface

Process and Ecological Regulation, CAS, Chengdu 610041, China)

Abstract: Water quality improvement in the upper reaches of the Yongding River in Zhangjiakou city has become a most significant work for the water safety of the Winter Olympics in 2022. The spatiotemporal variations of surface water quality and the annual flux of main pollutants in the main rivers of Zhangjiakou were studied by the long-term monitoring in Zhangjiakou in the upper reaches of Yongding River from 2013 to 2017. Results showed that: (1) The water quality in the upper reaches of the Yanghe River in Zhangjiakou was good in 2017, while that in the middle and lower reaches was moderately polluted. The water quality in the upper reaches of the Qingshui River was good, while that of the lower reaches was slightly polluted. The water quality in the Sanggan River was good. (2) The differences between the water quality indexes in different rivers were obvious from 2013 to 2017. The variation of water quality in the upper reaches of the Yanghe River was small from 2013 to 2017, while that of the middle and lower reaches tends to deteriorate. The fluctuations of water quality in the Qingshui and Sanggan rivers were small, and the five-year comprehensive pollution index of the whole basin was 0.82, corresponding to the level of light pollution. (3) The seasonal changes of water quality in the Yanghe and Qingshui rivers were obvious; however, those in the Sanggan River were not obvious. The water quality indexes of the Yanghe River were higher in summer than those in spring and autumn. And the water quality indexes in spring were higher than those in summer and autumn. Total phosphorus and fluoride are the main pollutants in the upper reaches of the Yongding River, with Yanghe River being the main source of contribution. Among them, the contribution rates of total phosphorus and fluoride are 74% and 61%, respectively. Therefore, the local government should focus more on the prevention of phosphorus pollution because the phosphorus was the main factor that can limit water pollution. Once the water is polluted by phosphorus, it will be very difficult to be remedied.

Keywords: upper reaches of the Yongding River; surface water; spatiotemporal variations; Nemero pollution index