

流域地表水体污染过程的时空差异及其影响机制分析：以温榆河中上游地区为例

杨丽蓉^{1,2}, 孙然好¹, 陈利顶^{1*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:以温榆河流域中上游地区作为研究区,通过 2009 年 6~8 月的地表水质监测,分析了水质的季节变化特征和空间差异。结果表明,温榆河上游与中游山前平原区的地表水体污染表现出明显不同的时空差异:①在温榆河上游山区,总氮、硝酸盐、氨氮及总有机碳在 6~8 月总体表现为先上升后下降的趋势,溶解氧及化学需氧量呈先下降后上升趋势;②在温榆河中游山前平原区,总氮、总磷、磷酸盐、化学需氧量从 6~8 月总体上呈先下降后上升趋势,溶解氧浓度呈下降趋势;③温榆河从上游山区至中游山前平原区,地表水质自净化能力在降低,营养盐污染趋势在加强;④温榆河流域上游山区和中游山前平原区水体污染过程和形成机制存在差异。山区水体在污染过程中具有短历时特性,雨季洪峰地表径流将大量陆地非点源污染物携带进入水体,加剧了地表水体污染;山前平原区因存在不同类型的污染源,水体污染过程特征不明显,雨季洪峰径流在一定程度上对地表水体污染起到了稀释作用。本研究结果可以为水生态功能分区提供科学依据。

关键词:地表水体污染;地表水质;时空差异;温榆河

中图分类号:X52 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2011)01-0073-07

Analysis of Seasonal Variations of Surface Water Quality in the Middle and Upper Reaches of Wenyu River

YANG Li-rong^{1,2}, SUN Ran-hao¹, CHEN Li-ding¹

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract:The middle and upper reaches of Wenyu River was chosen as a case study area, and the temp-spatial difference of surface water quality was systematically studied by water sampling from June to August of 2009. It was found that distinct seasonal variations was exhibited on surface water quality in the study area. In the mountain regions, TP, TN, NO_3^- -N, NH_4^+ -N and TOC concentration in the water increase from June to July, and then decline remarkably, whereas the DO and COD concentration in the water display an opposite pattern. However, in the piedmont plains of Wenyu River middle reaches, TN, TP, PO_4^{3-} -P and COD concentration decrease sharply from June to July and then increase substantially in August, while DO concentration shows a decline tendency from June to August. Furthermore, from the upper stream mountains to middle reaches of Wenyu river, self-purification capacity of surface water is reduced with its nutrient pollution aggravates, and the water pollution process and its formation mechanism are different. Altogether, the process of water pollution in the mountainous areas has a pulse pollution process in the rainy season, and the surface run-off in the rainy season may aggravate the pollution process by bring a large volume of non-point source pollutants into surface water from the land. Because of various types of pollution sources in the piedmont regions, the water pollution processes are unstable and peak surface run-offs in the rainy season may dilute the surface water pollutions. The results provide a scientific basis for ecological function regionalization.

Key words:surface water pollution; surface water quality; temp-spatial variation; Wenyu River

河流水体作为人类活动的重要场所,在水源供应、输水泄洪、交通运输、水产养殖、水生生物栖息、纳污降解、调节气候、补给地下水、观赏娱乐等多方面为人类提供了服务^[1-4],同时也为各种动植物提供其生存所必须的淡水和栖息环境。然而,随着经济快速发展,不断加剧的人类活动将大量工业废水、生活污水及农业灌溉退水排入河流,使得河流水体遭到了严重污染^[5];同时,河流地表水体受到人类活动与生态水文过程的共同作用,使水体表现出—

定的时空异质性^[6,7]。目前,许多发达国家针对本国的水污染状况开展了水质管理技术的研究,如日本

收稿日期:2010-01-18;修订日期:2010-03-04

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07526-002-02);国家杰出青年基金项目(40925003);城市与区域生态国家重点实验室自主项目(SKLURE2008-4)

作者简介:杨丽蓉(1985~),女,硕士研究生,主要研究方向为景观生态学与水环境保护,E-mail: yanglirong390@yahoo.com.cn

* 通讯联系人,E-mail: liding@cees.ac.cn

东京湾、赖户内海等流域的总量控制计划^[8]、欧盟莱茵河总量控制管理^[9]及美国的 TMDL 计划^[10]，这些总量控制计划和技术手段成为保护地表水达到水质目标的重要手段。

当前，我国的流域水质管理体系是以行政区域为基本单位，无法解决日益严重的行政跨界污染问题，忽略了流域水体污染过程的水文特性和河流的整体性，严重制约我国水环境管理工作的进一步发展。因此，需要在借鉴国外先进经验的基础上，开展符合我国国情的基于流域控制单元水质管理技术研究^[11,12]。

目前，多采用河流水质模型应用于河流、流域的水质规划和管理中，河流水质模型可定量地描述污染物在水环境中的迁移转化规律及其影响因素之间的相互关系^[13]。国外在水质模型方面的研究起步较早且都取得了研究成果，如：Demuren^[14]、Jian^[15]、Sladkovich^[16]、Chau^[17,18]等，国内在水质模型方面研究较晚，但在水质模型的研究上也取得了一定的成果，如：李锦秀^[19]、吴挺峰^[20]、陈凯麟^[21]、李志勤^[22]、韩龙喜^[23]等。尽管目前河流水质模型的研究已取得了较多的成果，但是由于污染物在水环境中行为的复杂性，河流水质模型仅仅是给出了相对的变化值和趋势性的分析，与实际测量结果存在较大的误差。

本研究通过实测地表水体水质，分析了地表水体污染过程的时空差异及其影响机制，对于识别区域地表水体的水质净化能力和水生态功能的空间差异具有重要的意义，也可以为流域地表水质单元的划分、控制水环境污染提供科学依据。温榆河作为发源于北京市境内的唯一一条河流，是北京市防洪排涝、排污导污的主要河道，目前对温榆河的研究主要集中于下游干流地区的 COD、BOD、氮、磷等基本水质监测^[24,25]、沉积物中重金属的调查^[26]以及有机污染物分布的研究^[27]，对温榆河的中上游地区河流水质的时空分布特性的研究相对较少。本研究以温榆河流域中上游地区作为重点研究区，通过 2009 年 6~8 月对地表水质监测分析，比较研究了温榆河流域中上游地区地表水体污染的季节变化的空间差异及其形成机制。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

温榆河属于北运河上游水系，是北京市五大水系中唯一发源于本市境内的河流，它位于北京市的

北部地区，从北向南流经昌平、顺义、朝阳、通州 4 个区。温榆河来源于上游东沙河、北沙河和南沙河 3 条支流，在昌平区沙河镇汇集进入沙河水库，沙河闸到北关闸之间的河道为温榆河干流，全长约 47.5 km，流域总面积 6 166 km²，其中北京市界内 4 293 km²。温榆河作为北方城市区典型的大型河流，主要接收城市景观水体的退水，经过处理的城镇工业废水、生活污水和未经处理的农村生活污水、养殖废水和农田地表径流。

温榆河流域中上游水文站为沙河闸，根据温榆河流域沙河闸 42 a (1959~2000 年) 气象站实测数据，流域多年平均降雨量为 624.5 mm，年内降雨变化极不均匀，降雨多集中在汛期 6~9 月，约占全年的 84%，其中又以 7、8 月最多。根据温榆河流域 26 a (1970~1996 年) 水文站实测数据^[28]多年平均年径流量约为 4 亿 m³，近 30 年来由于河岸塌陷、河道淤积严重、拦河建筑物增多，河流的径流量在不断减少。同时，近年来，随着北京地区人类活动的增加和经济的快速发展，温榆河作为北京市最主要的排污河道，每年有大量的未处理的或处理过的污水排入温榆河中，温榆河干流水系水体受到严重的污染。

1.2 水样采集与室内分析

根据温榆河流域地理和水文特征，在温榆河山区选取 2 条较大的支流，设置 5 个监测断面，在温榆河山前平原区，选择 2 条夏季有水的主要支流及温榆河的干流，设置 12 个监测断面。样点选择的依据包括：典型性（汇水面积相对较大）、层次性（在不同级别的流域出口设置采样点）、易操作性（尽量选在桥梁或水工建筑物的位置上，便于采集样品、观测流量）等，选择的 17 个监测断面主要位于温榆河中上游地区（图 1），通过对 6~8 月降雨后地表水质监测，分析温榆河主要污染物及水质现状。依据温榆

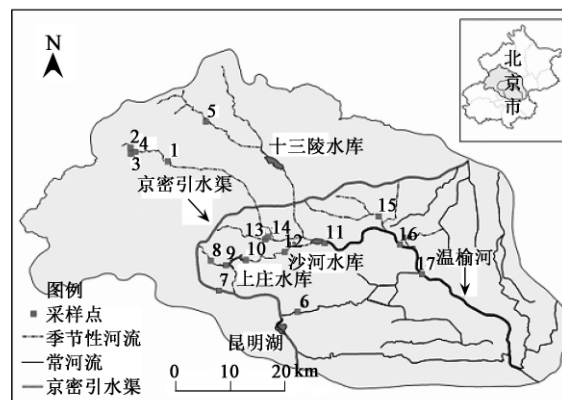


图 1 温榆河流域基本特征及地表水质采样点空间分布

Fig. 1 Location and sampling sites in the Wenyu River

河的研究背景,该地区氮、磷及有机污染物的污染较严重,选择 10 个监测指标,水质监测指标主要包括 pH 值、悬浮质 (SS)、溶解氧 (DO)、化学需氧量 (COD)、总有机碳 (TOC)、总氮 (TN)、硝酸盐 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、总磷 (TP)、磷酸盐 ($\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$),其中溶解氧采用便携式溶氧仪现场测量,总有机碳采用总有机碳分析仪进行测定,其他指标均采用国家水质监测方法^[29]。

2 结果与分析

2.1 温榆河地表水水质指标的空间分布特征

针对温榆河 6 月的采样数据进行了聚类分析,聚类分析的方法选择目前应用广泛的等级聚类法,以欧氏距离度量样本之间的距离^[30],运用 Ward 算法生成具有层次结构的聚类树^[31],根据各样点的相似性进行归并和分类^[32],可将所有样点分成 3 组 (图 2)。其中第 1 组样点包括 1~5 号点,它们位于温榆河的上游山区,流域内植被覆盖率高,人口密度低,河流水体受人类活动影响相对较小。第 2 组 6、7、9、10、11、12、14、15 号点,这 8 个采样点属于温榆河中游山前平原区,流域内村镇分布密集,岸边农田较多,生活污水及工业废水排放较多,水体污染严重。第 3 组包括 8、13、16、17 号点,这 4 个样点位于温榆河干流、南沙河上游地区和东沙河下游区。由于东沙河地区受怀昌路隔断,所以 13 号点的水质受人为干扰较大;8 号点位于南沙河上游的沙涧河段,南沙河上游靠近北京城区地带且周边人类干扰相对较少,沙涧河作为北京市的排洪河道,水源来于西山,目前水量较少,工业和生活污水的排入成为其主要水源;16、17 号点属于温榆河下游干流区,

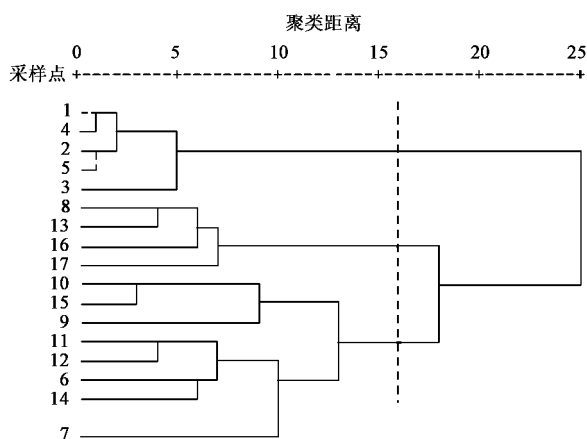


图 2 基于水质指标的温榆河样点聚类树图

Fig. 2 Cluster dendrogram of sampling sites based on water quality indexes of Wenyu River

受人为干扰相对较多,位于北京市城市内河流,治理保护相对较好。鉴于上述原因,本研究重点比较温榆河上游山区和中游山前平原区地表水质的季节动态变化特征。

2.2 温榆河地表水水质指标的季节变化特征

2.2.1 温榆河上游山区地表水质季节变化特征

根据 6~8 月地表水质监测结果,可以看出温榆河流域上游山区地表水质有以下特点 [图 3 (样点 1~5) 表 1]。

(1) 温榆河上游山区总磷及磷酸盐在 6~8 月总体呈上升趋势。总磷浓度变化范围为 $0.31 \sim 0.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 6 月除样点 1 外,其他样点都达到国家 V 类地表水环境质量标准;7、8 月总磷浓度不断升高,最高达到 $0.51 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,超出了国家 V 类地表水环境质量标准。

(2) 总氮、硝酸盐及氨氮浓度呈先上升后下降的趋势。总氮浓度变化范围为 $0.2 \sim 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,达到了国家 II 类地表水环境质量标准,硝酸盐的浓度变化范围为 $0.2 \sim 4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,氨氮浓度变化范围为 $0.6 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,6 月达到国家 III 类地表水环境质量标准,7 月监测结果大幅升高,最高达到了 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,大大超出了国家 V 类地表水环境质量标准,8 月山区地表水体氨氮的浓度有所降低,其浓度最高为 $3.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,略微超出了国家 V 类地表水环境质量标准。

(3) 总有机碳也呈先上升后下降的趋势,浓度范围在 $14 \sim 33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

(4) 溶解氧及化学需氧量浓度呈先下降后上升的趋势。溶解氧浓度在 6 月含量较高,在 7 月大幅度降低,到 8 月时又大幅度上升,其浓度变化范围为 $2.7 \sim 11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,达到了国家 IV 类地表水环境质量标准;化学需氧量在 6 月浓度最高含量为 $316 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,严重超出国家 V 类地表水环境质量标准,7 月有了大幅度的降低,8 月其浓度变化相对平稳但有小幅度上升,其最高浓度为 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,略微超出了国家 V 类地表水环境质量标准。

从上述分析可以看出,溶解氧作为水体的氧化剂,其含量高低是判断水质好坏的重要指标,也是衡量水体自净能力强弱的先决条件,因为溶解氧的含量高低不仅直接影响水生生物的新陈代谢和生长,还间接影响水体中有机物的分解速率及物质循环^[33]。温榆河山区溶解氧呈先下降后上升的趋势且含量较高,说明温榆河水体中水生生物的繁殖和生长较好,水体中有机物的氧化分解速度较快,水体的自净化能力较

高. 在水体污染过程上, 尽管由于降雨冲刷带入了污
染物, 溶解氧呈下降趋势, 但其后由于温榆河水体自

净化能力较高, 溶解氧含量呈上升趋势, 温榆河山区
溶解氧表现出短历时的季节特征.

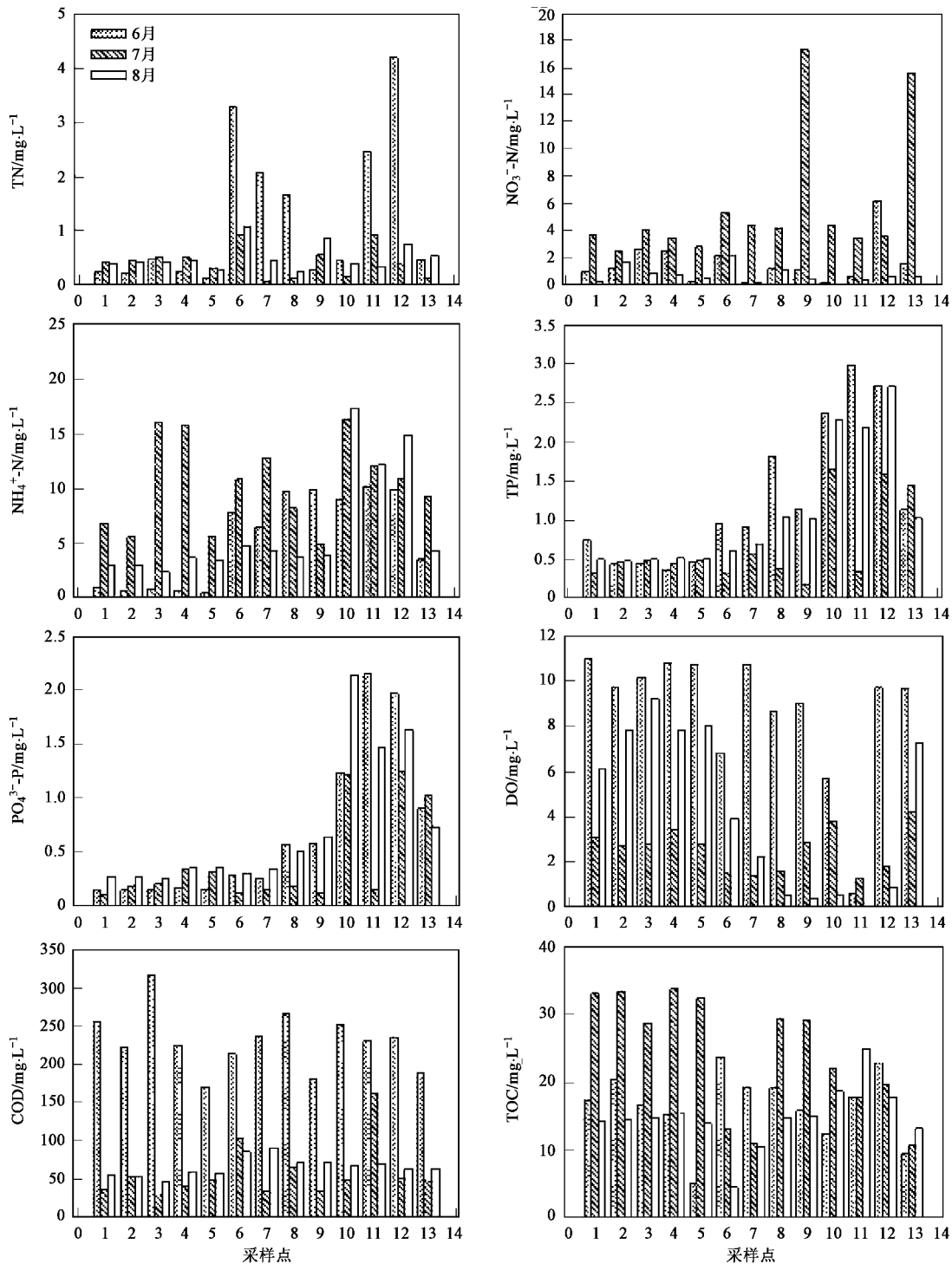


图 3 温榆河流域地表水质监测指标柱状分布图

Fig. 3 Column charts of surface water quality indices in the Wenyu River

2.2.2 温榆河中游山前平原区地表水质季节变化特征

根据 6~8 月地表水质监测结果, 可以看出温榆

河流域中游山前平原区地表水质有以下特点 [图 3 (样点 6~13), 表 1].

(1) 温榆河中游山前平原区, 总磷及磷酸盐浓

度总体呈先下降后上升趋势。总磷浓度范围在 $0.3 \sim 3.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 6~8 月, 除个别点外, 总磷浓度最高达到 $3.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 严重超出了国家 V 类地表水环境质量标准; 总氮呈先下降后上升趋势, 其浓度范围在 $0.1 \sim 4.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 除 6 月样点 5、6、10、11 超出国家 V 类地表水环境质量标准外, 其他样点都达到了国家 IV 类地表水环境质量标准, 7 月总氮浓度降

低, 8 月总氮含量有略微的增加, 最高浓度为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 各样点的浓度达到国家 III 类地表水环境质量标准; 硝酸盐浓度总体呈先上升后下降的趋势, 其浓度范围为 $0.2 \sim 4.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 氨氮浓度在 6~8 月, 总体变化趋势不明显, 浓度范围为 $3.36 \sim 14.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 各样点都超出了国家 V 类地表水环境质量标准。

表 1 温榆河流域地表水质季节变化特征¹⁾

Table 1 Temporal change of surface water quality in the Wenyu River

温榆河流域	总磷	磷酸盐	总氮	硝酸盐	氨氮	化学需氧量	总有机碳	溶解氧
温榆河上游山区	↑	↑	↑↓	↑↓	↑↓	↓↑	↑↓	↓↑
温榆河中游山前平原区	↓↑	↓↑	↓↑	↑↓	—	↓↑	—	↓

1) ↑表示上升; ↓表示下降; —表示趋势不明显; ↑↓表示先上升后下降; ↓↑表示先下降后上升

(2) 化学需氧量浓度总体呈先下降后上升趋势, 浓度范围为 $30 \sim 250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。除样点 7 及样点 9 在 7 月达到地表水环境质量的 V 类水标准, 其他样点的化学需氧量含量均超出了国家 V 类地表水环境质量标准, 最大浓度为 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

(3) 总有机碳的浓度范围为 $4 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 各样点总体变化趋势不明显。

(4) 溶解氧浓度总体呈下降趋势, 其浓度范围为 $0 \sim 11.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。6 月除样点 10 外, 各样点都达到了国家 III 类地表水环境质量标准, 在 7~8 月, 溶解氧含量急剧降低, 其浓度的最低值为 0, 超出了国家 V 类地表水环境质量标准。

从上述分析来看, 各监测点水质相对于山区其变化特征更加复杂, 人为因子对山前平原水质影响增强。溶解氧总体变化趋势呈下降趋势且在较多取样点其含量极低, 说明水体自净化能力较低, 并随着雨季的到来呈下降趋势, 7~8 月, 溶解氧含量急剧降低, 降雨冲刷下不同陆源污染物进入水体, 使得有机物的积累增多, 温榆河山前平原区水环境质量下降, 溶解氧含量降低, 在 8~9 月, 尽管部分样点溶解氧有所回升, 山前平原区因为存在不同类型的污染源, 地表水体污染过程特征不明显, 雨季洪峰径流在一定程度上对地表水体污染起到了稀释缓解作用, 部分样点溶解氧含量有所回升。

3 讨论

3.1 温榆河上游山区地表水体污染的影响机制

尽管温榆河上游山区水质相对于温榆河中游平原区水质污染较轻, 但在 6~8 月水质监测中, 总磷、氨氮、总有机碳指标都有超出了国家 V 类地表水环

境质量标准的现象, 且总体呈现先上升后下降的趋势。

温榆河上游山区地表水体污染的主要污染源为非点源污染, 通过调查发现, 该区主要的污水来源为生活污水、养殖废水及果园退水。进入夏季后, 随着 6、7 月降雨的增加, 大量的雨水将周边积累下来的生活污水、养殖废水及果园退水带入河道中, 造成河道内的总磷、氨氮、总有机碳的含量增加。由于 7 月河道内浮游植物迅速繁殖, 造成山区水中总有机碳快速增长, 反映出水体有机污染的加重^[34]。而进入 8 月, 由于浮游植物吸收处于平稳状态, 生长较少, 并且原来地表积累的陆源污染物大量减少, 因此地表水中总有机碳、总磷及氨氮含量呈现下降趋势。化学需氧量的降低很好地体现了水质的改善^[35~37], 这主要归因于温榆河山区在枯水期积累的大量陆源污染物, 在雨季中期很快被洪峰径流带入水体, 随着陆源污染物减少和雨季地表径流的持续增加, 山区水体的自净能力开始提高。

3.2 温榆河山前平原区地表水体污染的影响机制

温榆河山前平原区相对于上游山区, 6~8 月的水质指标浓度变异性较大, 样点间水质指标的变化规律不明显, 温榆河上游山区与温榆河中游山前平原区显现明显的机制上的差异。

总磷、磷酸盐、总氮、化学需氧量总体呈先下降后上升的趋势。温榆河山前平原区主要的污染源为点源污染。通过调查发现, 该区主要位于昌平区东南地区, 其土地利用呈城、郊过渡性, 主要担负分散北京市中心城市人口, 缓解城市人口与环境、能源等多方面矛盾的任务, 当前随着其快速的发展, 昌平东南地区建筑用地大幅度增加, 农用地减少, 其主要的

土地利用方式从农业用地向非农业用地转换,建筑用地、居民点成为其主要土地利用方式^[38]。温榆河山前平原区主要接收周边的工业废水、生活污水及农田退水,河道内的存水大部分为城市所排放的生活污水和工业废水^[39],各采样点水质指标的变化与采样点周边的工业分布、污染物的来源、污水排放点及排放量等因素有较大的关系,当前该区由于存在未处理和处理的污水排入河道,河道内污染物积累较多,河道水体污染过程相对复杂。在枯水期,河道内随着工业和生活污水的排放,已存在不同程度的氮、磷元素及有机污染物污染,雨季初期(6月),地表径流带来大量枯水期积累下来的陆源污染物,导致地表水体水质浓度较高;进入丰水期,大量雨水进入河道,河道内的部分污染物得以稀释,污染物浓度降低。在雨季后期的8月,随着降雨量的逐渐减少,一些污染物浓度又有回升,但是与降雨初期相比,一般浓度较低。

通过分析,说明温榆河山前平原近郊区各样点水质受到人类活动的影响更重,而目前对温榆河的研究工作主要集中在河道的基本水质状况的监测^[25]、沉积物^[26,27]及水环境容量研究^[40],建立人类活动因子与河流水质的定量关系显得尤为重要,从而可以找到科学合理的保护河流环境的对策。

4 结论

(1) 在温榆河上游山区,总磷、硝酸盐、氨氮及总有机碳在6~8月的总体特征是呈先上升后下降的趋势,化学需氧量呈降低的趋势;温榆河中游山前平原区,总磷、磷酸盐、总氮、化学需氧量总体呈先下降后上升的趋势,溶解氧呈降低的趋势,氨氮及总有机碳各样点之间变化复杂,总体趋势不明显。温榆河中游山前平原区较山区水质的时间变化较大,样点间各监测指标变化规律不明显。

(2) 温榆河上游山区和中游山前平原区的水体污染过程和机制存在差异。山区以非点源污染为主,随着雨季径流的增加,污染物进入河道导致污染加重,而随着雨季降水的不断稀释,污染逐渐减轻。山前平原区的河道内在枯水期已存在各种类型的氮、磷元素及有机污染物的污染,大量的雨水进入河道,污染物的浓度不同程度地降低,变异性较大,但随着上游污染物和大量生活污水排入河道,使得河道内的总磷、磷酸盐、总氮及化学需氧量含量升高。

(3) 温榆河是北方城市河流的典型代表,受自然特征和人类活动的综合影响。尤其在下游,人类

活动是地表水质主要的影响因素,需要进一步建立人类活动与河流水体的定量关系,从而为科学合理地保护河流生态系统和进行水生态功能分区提供依据。

参考文献:

- [1] 栾建国,陈文祥. 河流生态系统的典型特征和服务功能[J]. 人民长江, 2004, 35(9): 41-43.
- [2] 蔡庆华,唐涛,刘建康. 河流生态学研究中的几个热点问题[J]. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1573-1577.
- [3] 欧阳志云,赵同谦,王效科,等. 水生态服务功能分析及其间接价值评价[J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2091-2099.
- [4] 李江华,王欢,韩霜,等. 水电开发下的河流生态系统管理[J]. 中国农村水利水电, 2006, 7(11): 51-55.
- [5] Singh K P, Malik A, Sinha S. Water quality assessment and apportionment of pollution sources of Gomuti River (India) using multivariate statistical techniques: a case study [J]. Analytical Chemical Acta, 2005, 538(1-2): 355-374.
- [6] 严登华,何岩,霏伟,等. 水资源地域耦合空间结构初探[J]. 东北师范大学学报(自然科学版), 2008, 32(4): 82-87.
- [7] 严登华,何岩,邓伟,等. 生态水文学研究进展[J]. 地理科学, 2001, 21(5): 46-53.
- [8] 高娟,李贵宝,华璐,等. 日本水环境标准及其对我国的启示[J]. 中国水利, 2005, (11): 41-43.
- [9] 邢乃春,陈捍华. TMDL计划的背景、发展进程及组成框架[J]. 水利科技与经济, 2005, 11(9): 535-537.
- [10] 王同生. 莱茵河的水资源保护和流域治理[J]. 水资源保护, 2006, (2): 60-62.
- [11] 孟伟,张远,郑丙辉. 水环境质量基准、标准与流域水污染总量控制策略[J]. 环境科学研究, 2006, 19(3): 1-6.
- [12] 孟伟,苏一兵,郑丙辉. 中国流域水污染现状与控制策略的探讨[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2(4): 242-246.
- [13] 杨天明,付艳阳. 南沙河水系污染现状分析及防治对策[J]. 北京水利, 2005, (6): 24-25.
- [14] 王玲杰,孙世群,田丰. 河流水质模拟问题的探讨[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2005, 28(3): 260-265.
- [15] Demuren A O, Rudi W. Calculation of flow and pollutant dispersion in meandering channels [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1986, 172(11): 65-72.
- [16] Jian Y, McCorquodale J A. Depth-averaged hydrodynamic model in curvilinear collocated grid [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(5): 380-388.
- [17] Sladkevich M. Simulation of transport phenomena in shallow aquatic environment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(2): 123-136.
- [18] Chau K W, Jin H S. Two-layered 2D unsteady eutrophication model in boundary-fitted coordinate system [J]. Marine Pollution Bulletin, 2002, 45: 300-310.
- [19] Chau K W. An unsteady three-dimensional eutrophication model in Tolo harbor, Hong Kong [J]. Marine Pollution Bulletin, 2005, 51: 1078-1084.

- [20] 李锦秀, 廖文根, 黄真理. 三峡水库整体一维水质数学模拟研究[J]. 水利学报, 2002, (12): 7-10.
- [21] 吴挺峰, 周愕, 崔广柏, 等. 河网概化密度对河网水量水质模型的影响研究[J]. 人民黄河, 2006, 28(3): 46-48.
- [22] 陈凯麟, 李平衡, 密小斌. 温排水对湖泊水库富营养化影响的数值模拟[J]. 水利学报, 1999, 1(1): 22-26.
- [23] 李志勤. 紫坪铺水库三维水质预警系统[J]. 西南科技大学学报, 2006, 21(2): 69-74.
- [24] 韩龙喜. 三峡大坝施工期水环境三维数值预测方法[J]. 水科学进展, 2002, 13(4): 427-432.
- [25] 郑凡东, 孟庆义, 王培京, 等. 北京市温榆河水环境现状及治理对策研究[J]. 北京水务, 2007, (5): 5-8.
- [26] 李莲芳, 曾希柏, 李国学, 等. 北京市温榆河沉积物的重金属污染风险评价[J]. 环境科学学报, 2007, 27(2): 289-297.
- [27] 雷炳莉, 黄圣彪, 王东红. 温榆河沉积物中 6 中雌激素的存在状况[J]. 环境科学学报, 2008, 29(9): 2419-2425.
- [28] 北京城区雨洪控制与利用项目总体组. 北京城区雨洪控制与利用技术研究与示范技术报告[R]. 2005.
- [29] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 266-268.
- [30] Fovell R G, Fovell M Y. Climate zones of the conterminous United States defined using cluster analysis[J]. Journal of Climate, 1993, 6(11): 2103-2135.
- [31] Sharma S. Applied Multivariate Techniques [M]. New York: Wiley, 1995. 355-356.
- [32] Danielsson A, Cato I, Carmen R, et al. Spatial clustering of metals in the sediments of the Skagerrak/Kattegat [J]. Applied Geochemistry, 1999, 14(6): 689-706.
- [33] 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[J]. 水利学报, 2003, (11): 64-72.
- [34] 江志平, 黄小平, 张景平. 大亚湾海水中总有机碳的时空分布及其影响因素[J]. 海洋学报, 2009, 31(1): 70-75.
- [35] 何本茂, 韦蔓新. 钦州湾的生态环境特征及其水体自净条件的关系分析[J]. 海洋通报, 2004, 23(4): 50-53.
- [36] 何本茂, 韦蔓新. 防城湾的环境特征及其水体自净特点分析[J]. 海洋环境科学, 2006, 25(21): 64-67.
- [37] 何本茂, 韦蔓新. 铁山港湾水体自净能力及其与环境因子的关系初探[J]. 海洋湖沼通报, 2006, (3): 21-26.
- [38] 王怀念. 北京市昌平区大比例尺土地利用现状调查[J]. 北京测绘, 2005, (3): 50-54.
- [39] 石红梅. 昌平区温榆河水系水污染研究[J]. 水利水电技术, 2008, 39(5): 10-13.
- [40] 刘明宇, 华珞. 温榆河水环境容量分析[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2008, 29(3): 18-28.