

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.04.013

寒区河流冰体中污染物融出对水质的影响

孙少晨^{1,2}, 肖伟华², 于翔¹, 王浩²

(1. 中国环境管理干部学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 以松花江水污染事件为例, 通过污染物在冰-水相的分配实验, 确定出冰体冻结的硝基苯污染物浓度为原水样浓度的6.2%~13.4%。在此基础上, 利用前期开发的冰封期水动力水质模型, 得出松花江干流2.5 km长度江段冰体融化释放污染物导致水体硝基苯浓度增加了0.02~0.025 ug/L。进一步推算结果表明, 融冰导致松花江末端同江断面硝基苯浓度增加上限为12.5 ug/L, 不会对水质造成重大影响。建立在冰-水相分配实验基础上的冰封期水质模拟, 能够简单、快速的分析寒区河流污染冰体融化导致的二次污染问题。

关键词: 冰封期; 水动力水质模型; 污染冰体; 河冰融化; 二次污染

中图分类号: X522 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2015)04-0664-03

Effects of polluted ice thawing on water quality in cold area

SUN Shaochen^{1,2}, XIAO Weihua², YU Xiang¹, WANG Hao²

(1. Environmental Management College of China, Qinhuangdao 066004, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Taking the pollution incident in the Songhua River as an example, the experiments of pollutant distribution in ice and water phases were performed to determine that the nitrobenzene concentration under icing conditions is 6.2 to 13.4% of that in the original water samples. On the basis, the developed hydrodynamics and water quality model during the icebound season was applied, which suggested that nitrobenzene concentration increases by 0.02 to 0.025 ug/L in the 2.5 km long main stream of the Songhua River due to the effects of nitrobenzene from ice melting. Furthermore, it showed that nitrobenzene concentration increases by a maximum value of 12.5 ug/L caused by the ice melting in Tongjiang section in the end of the Songhua River, which would not affect water quality significantly. The water quality simulation based on the experiments of pollutant distribution in ice and water phases can analyze the secondary pollution problems caused by polluted ice melting in cold regions simply and quickly.

Key words: icebound season; hydrodynamics and water quality model; polluted ice; ice melting; secondary pollution

2005年11月13日中国石油吉林石化公司双苯厂发生爆炸, 导致大量苯类污染物进入松花江, 最终流入中俄界河黑龙江, 对下游哈尔滨等沿江城市居民生活用水和环境造成了严重影响。污染事件发生在结冰期, 部分污染物冻结在冰体中, 因此很多学者针对污染冰体融化的环境影响问题开展了很多研究工作, 包括硝基苯在松花江冰体内分布特征^[1]、硝基苯在水-冰体系中的分配比的模拟实验^[2], 以及结冰速度对硝基苯在冰相与水相中分配的影响^[3]、通过低温、静置条件下, 硝基苯在水体中分布状态的模拟实验^[4]等等。但是, 围绕污染冰体对水质影响展开的模拟方法计算过程复

杂, 对基础资料要求高^[4,5], 不利于在短时间内对污染冰体融化释放污染物导致的水

本文利用前期研究成果, 结合相关实验结果对污染冰体融化导致的二次污染问题进行了探讨。在前期的研究中^[6], 已经根据寒区河流特点建立了冰封期水动力水质模型, 能够很好地适用于寒冷。

1 研究方法

1.1 硝基苯冰冻过程中在水相和冰相中的分配实验
冰冻过程中硝基苯在水相和冰相中分配实验的目的在

收稿日期: 2014-10-12 修回日期: 2015-06-15 网络出版时间: 2015-07-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150723.2033.027.html>

基金项目: 中国环境管理干部学院博士科研启动基金(B201405); 中国环境管理干部学院院级课题(2014009); 河北省社会科学基金项目(HB14GL006); 河北省科技计划项目(13454222)

作者简介: 孙少晨(1982-), 男, 黑龙江人, 讲师, 博士, 主要从事环境管理、污染物迁移转化模拟方面研究。E-mail: sunshaochen@126.com

通讯作者: 肖伟华(1981-), 男, 湖南人, 工程师, 博士, 主要从事水环境模拟方面研究。E-mail: xiaoweihua@iwhr.com

于了解污染物在冰-水相的分配规律,进一步推断现实中污染团过境时在冰体中冻结的浓度比例,为研究冰体融化释放污染物对水质的影响提供重要参数。

1.1.1 实验研究流程

在松花江哈尔滨江段采集天然水样,经预处理后作为溶剂配制一系列浓度不同的硝基苯溶液,浓度符合污染事件污染团实际质量浓度范围。实验步骤见图1。

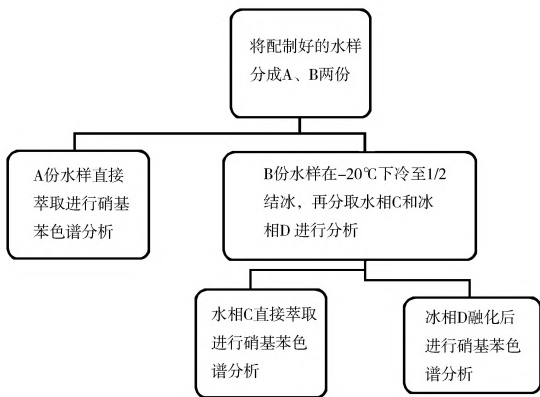


图1 硝基苯的冰-水相分配实验流程
Fig.1 Flowchart of the experiment of nitrobenzene in ice and water phases

1.1.2 样品的处理

摇匀水样,准确量取 100~200 mL 置入 0.5 L 分液漏斗;加入 10.0~20.0 mL 苯,摇动放出气体,再振荡萃取 3~5 min,静置 5~10 min,两相分层弃去水相,将苯液移入事先盛有少许无水硫酸钠的具塞 K-D 浓缩瓶中,备色谱分析用。冰相在常温下融化后移入 0.5 L 分液漏斗,按上述方法进行萃取。

1.1.3 定量分析

采用外标法计算,水样中硝基苯浓度按下式计算:

$$X(\mu\text{g/L}) = \frac{E_i A_E Q_E}{A_i Q_K} \quad (1)$$

式中: E_i 为标样中组分 i 的浓度($\mu\text{g/L}$); A_E 为标样测得组分 i 的峰面积(mm^2); A_i 为水样测得组分 i 的面积(mm^2); Q_E 为标样进样体积(μL); Q_i 为水样萃取液进样体积(μL); K 为浓缩系数。

1.2 模型理论

1.2.1 冰封期水动力模型

寒区河流冬季冰盖漂浮在水面上,冰盖能够随着水位的变化自由升降,同时水面线坡度基本不发生变化,因此圣维南方程(Saint Venant equation)在冰封期仍然适用。水动力模型控制方程如下。

连续性方程

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = q \quad (2)$$

运动方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial z}{\partial s} + g \frac{Q|Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (3)$$

式中: s 表示距离(m); q 表示冰体融化导致的侧向入流流量(m^3/s); Q 表示水量(m^3/s); A 表示过流断面面积(m^2); t 表示时间(s); g 表示重力加速度(m/s^2); C 表示谢才系数($\text{m}^{0.5}/\text{s}$); R 表示水力半径(m)。

实践证明,通过修正水力要素,可以达到由冰层覆盖导致河道壅水的效果^[7]。冰封期河道水力半径 R 、湿周 χ 、谢才系数 C 、综合糙率系数 n_c 表达式如下:

$$R = A/\chi \quad (4)$$

$$\chi = \chi_{\text{riverbed}} + \chi_{\text{icesheet}} \quad (5)$$

$$C = R^{1/6}/n_c \quad (6)$$

$$n_c = \left(\frac{n_b^{3/2} + n_i^{3/2}}{2} \right)^{2/3} \quad (7)$$

冰封期河道断面湿周 χ 由河床湿周 χ_{riverbed} 和冰盖宽度 χ_{icesheet} 组成,综合糙率相当于冰盖糙率 n_i 和河床糙率 n_b 两部分糙率的综合效应。

利用 Preissmann 4 点加权隐式差分格式,对水流连续方程式和运动方程式进行离散,得到线性方程组,再采用追赶法求解^[8-11]。

1.2.2 冰封期水质模型

图2为冰体融化入流示意图,考虑冰体融化过程的水质方程如下:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = E \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - kc + \frac{q_{\text{ice}} c_{\text{ice}}}{A} \quad (8)$$

式中: c 为整个断面的平均硝基苯质量浓度(mg/L); x 为河道长度(m); u 为水流流速(m/s); E 为纵向离散系数^[12-15](m^2/s); t 为时间(s); k 为衰减系数(s^{-1}); A 为断面面积(m^2); q_{ice} 为冰融化侧向入流(m^3/s); c_{ice} 为冰融化入流硝基苯质量浓度(mg/L)。

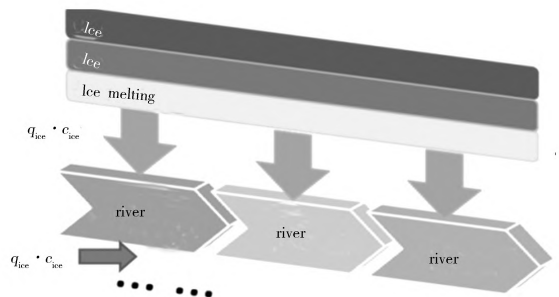


图2 冰体融化污染物进入河流示意图

Fig.2 Schematic diagram of pollutants from ice melting into the river

2 结果与分析

2.1 模拟范围

2005年12月污染事件发生,在2006年2月冰体开始融化,所以模拟时间选在融冰期2006年2月1号至2月28号。模拟范围为从哈尔滨市上游的苏家屯断面开始的2.5 km 长河段,具体位置见图3。假设硝基苯降解系数 K 、上游边界来水硝基苯浓度均为零,则河流污染物浓度的增加完全由本段冰体融化造成。

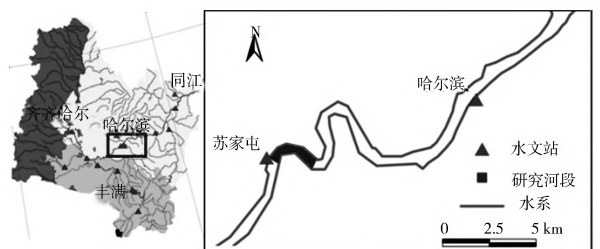


图3 研究区域

Fig.3 The study area

利用已建立的冰封期水动力水质耦合模型分析苏家屯断面开始的 2.5 km 长河段硝基苯污染冰体融化对水环境的影响程度,进而可以推算整个干流污染冰体融化导致的水质变化。

2.2 硝基苯污染物在冰-水相的分配实验结果

原水样、水相和冰相中硝基苯含量检测结果见表 1。从表 1 可以看出,水相 C 中硝基苯浓度高于原水样 A 浓度,冰相 D 中硝基苯浓度低于原水样 A 中浓度。冻结在冰体中的硝基苯浓度与原水样中硝基苯浓度的比值 μ 为 0.062~0.134。

表 1 原水样、水相和冰相中硝基苯含量检测结果

Tab. 1 Detected nitrobenzene contents in the original water, aqueous phase, and ice phase

样品编号	水样 A		水相 C		冰相 D		冰相与原溶液浓度比 μ
	取样体积 / mL	浓度 / (mg · L ⁻¹)	取样体积 / mL	浓度 / (mg · L ⁻¹)	取样体积 / mL	浓度 / (mg · L ⁻¹)	
1	200	0.39	175	0.693	225	0.034	0.087
2	200	0.37	180	0.650	220	0.040	0.108
3	200	0.33	200	0.533	200	0.040	0.121
4	200	0.32	160	0.590	240	0.043	0.134
5	200	0.29	175	0.537	225	0.018	0.062
6	200	0.27	180	0.491	220	0.027	0.100

2.3 模拟研究结果

2.3.1 模型参数

根据当时环保部公布的监测数据,污染团经过苏家屯断面质量浓度峰值为 0.5805 mg/L,冰中硝基苯浓度与污染团过境时浓度比值 μ 已通过实验确定为 0.062~0.134,模型中 μ 值取算数平均值 0.1,进一步可以推算本区域冰中硝基苯浓度上限为:

$$c_{ice} = 0.5805 \text{ mg/L} \approx 0.06 \text{ mg/L}$$

此期间冰层的融化速度约为 1.25 cm/d,河宽 360~400 m(数据来源于 2006 年松花江水文年鉴),可以计算出冰融化侧向入流:

$$q_{ice} \approx 1.25 \times 10^2 \times 400 = 5 \text{ m}^3 / (\text{d} \cdot \text{m}) = 5.8 \times 10^5 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m})$$

2.3.2 模拟结果

苏家屯下游 2.5 km 处断面河流硝基苯浓度变化模拟结果(2006-2-1~2006-2-28)详见图 4,水体流经 2.5 km 后硝基苯浓度增加量约为 0.02~0.025 ug/L。

污染事故发生地吉林市距离松花江末端的同江断面 1250 km,按污染最严重情况计算,注入国际界河黑龙江的硝基苯质量浓度增加上限约为:

$$C_{max} = 1250 \text{ km} / 2.5 \text{ km} \times 0.025 \text{ ug/L} = 12.5 \text{ ug/L}$$

2.4 模拟结果分析

经计算 2.5 km 处硝基苯浓度增加量在研究时段内有一定波动(见图 4),模拟假设硝基苯降解系数 K 、上游边界来水硝基苯浓度均为零,所以断面硝基苯浓度变化的原因主要是受到上游来水流量变化影响。

12.5 ug/L 的浓度增加量是在假设污染冰体连续稳定释放污染物的基础上得到的,想要更加准确判断污染冰体融化导致的二次污染问题还需要考虑以下因素:污染物进入河流后会不断衰减;污染事件发生时第二松花江还没有完全结冰;

污染团在苏家屯断面仅持续了 40 h,能够冻结硝基苯的冰层厚度只有几厘米;污染冰体融化的时间并不相同,污染物进入水体的时间不集中;污染团在随着水流向下游传输过程中浓度峰值不断减小;春季积雪融化、河冰解冻形成春汛,期间河水流量增大等。多种因素导致实际结果会远小于模拟结果,远低于集中式《生活饮用水地表水源地水质标准》(GB 3838-2002)的 17 ug/L 和前苏联饮用水标准的 200 ug/L。

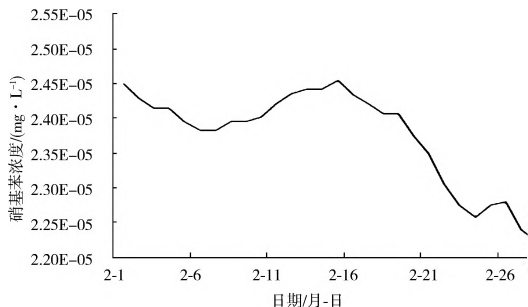


图 4 苏家屯断面下游 2.5 km 处断面硝基苯浓度变化模拟结果

Fig. 4 Simulation results of nitrobenzene concentration variations at the section in the distance of 2.5 km downstream of Sujiatun section

3 结论

本文通过冰-水相分配实验,确定了冰体中的硝基苯浓度与原水样中硝基苯浓度的比值范围为 0.062~0.134。

利用冰封期水动力水质耦合模型,估算融冰释放硝基苯污染物导致松花江末端同江断面浓度增加上限为 12.5 ug/L,通过分析实际水环境特点,得出实际水质状况会远小于模拟结果,污染冰体融化不会对下游水质造成重大影响。

参考文献(References):

[1] 英瑜雯. 松花江污染冰体中有机物残留量的分析与计算[D]. 大连:大连理工大学,2008. (YING Yurwen. Residue analysis and calculation of polluted ice in Songhua river[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese))

[2] 李志军,王昕,李青山,等. 不同条件下硝基苯在水-冰体系中的分配研究[J]. 中国科学 E 辑:技术科学,2008,38(7):1131-1138. (LI Zhi jun, WANG Xin, LI Qing shan, et al. Study on the distribution of the water-ice system under different conditions of nitrobenzene[J]. Science in China(Series E: Technological Sciences), 2008, 38(7): 1131-1138. (in Chinese))

[3] 刘广民,任南琪,沈吉敏,等. 自然冰冻对松花江冰与水中硝基苯分配的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报,2008,40(6):982-984. (LIU Guang min, REN Nan qi, SHEN Ji min, et al. Natural icing effects on nitrobenzene distribution in ice and water of Songhua river[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(6): 982-984. (in Chinese))

[4] 徐向舟,许士国,孙万光,等. 低温水中硝基苯沉降分布的试验研究[J]. 水资源保护,2009,25(1):67-70. (XU Xiang zhou, XU Shi guo, SUN Wan guang, et al. Experimental study on nitrobenzene distribution in cold river water[J]. Water Resources Protection, 2009, 25(1): 67-70. (in Chinese))

(下转第 680 页)

温榆河北京段水体和沉积物中 主要水化学离子及重金属特征

王 贺, 谷洪彪, 迟宝明, 李海君, 周经纬, 姜海宁

(防灾科技学院, 河北 三河 065201)

摘要: 在对1980年-2010年温榆河水环境质量资料分析的基础上, 通过现场调查取样, 分析了温榆河离子特征、水质变化趋势以及水体与沉积物污染物的相关性。结果表明, 2013年温榆河 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 HCO_3^- 含量较1980年-2006年呈上升趋势, Cl^- 、 SO_4^{2-} 呈下降趋势, Mg^{2+} 含量较稳定, 水化学类型由 $\text{C}^{\text{Ca}}\text{II}$ 转化为 $\text{C}^{\text{Na}}\text{I}$, 河水矿化度呈增大趋势的同时也向碱化发展。 NH_4^+ -N 和硝酸盐仍为温榆河及各支流的主要污染物, 超标倍数虽降低, 但依然在2~7倍范围内, 沉积物重金属中仅Cr和Cd地累积指数在0~1之间, 处于轻度污染水平。温榆河北京段水体与沉积物污染物间相关性显著, 氨氮、硝酸盐以及Cr、Pb呈显著正相关, Cd、As呈显著负相关, 其中Pb的相关性最为显著。

关键词: 温榆河; 水体和沉积物; 水环境质量; 重金属

中图分类号: X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)04-0667-07

Water chemical ions and heavy metal characteristics of water and sediment in Beijing section of Wenyu River

WANG He, GU Hong biao, CHI Bao ming, LI Hai jun, ZHOU Jing wei, JIANg Hai ning
(Institute of Disaster of Prevention, Sanhe 065201, China)

Abstract: On the basis of data analysis of water environmental quality in Wenyu River from 1980 to 2010, the ion characteristics, water quality variation trend, and the correlation between water and sediment were analyzed through field sampling. The results showed that (1) Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , and HCO_3^- contents are higher in 2013 compared to those from 1980 to 2006, while Cl^- and SO_4^{2-} contents are lower in 2013 and Mg^{2+} content is relatively stable in the Wenyu River; (2) water chemistry type varies from $\text{C}^{\text{Ca}}\text{II}$ to $\text{C}^{\text{Na}}\text{I}$, indicating an increasing trend of salinity and alkaline; (3) NH_4^+ -N and nitrates are the main pollutants in the Wenyu River and its tributary. Although the over standard ratio decreases over the years, it is still in the range of 2 to 7; (4) only Cr and Cd of the heavy metal in the sediment have the cumulative index between 0 and 1, which indicates that the sediment pollution level is light; and (5) water and pollutants in the sediment have significant correlations in the Wenyu River, such that NH_4^+ -N and nitrate show positive correlations with Cr and Pb whereas Cd and As show negative correlations with Cr and Pb, and the correlation with Pb is the strongest.

Key words: Wenyu River; water and sediment; water environment quality; heavy metal

随着北京地区人类活动的增加和经济的快速发展, 温榆河已成为北京市主要的排污河道^[1], 其补给水源由雨洪水为主逐渐转变为以工业废水、农田排涝以及城市退水为主。目前温榆河干支流主要入河污水口共计230个, 日入河污水总量为128.2万 m^3 , 污水日处理能力仅为77.9万 m^3 , 日处理率总体不足61%^[2], 河流的纳污量远远超过了河流的自净能力, 致使水质越来越恶劣^[3]。

对河流水体和沉积物水化学特征及水环境质量评价是地表水污染控制中较为有效的管理手段之一。1980年-2006年温榆河水化学类型为重碳酸盐钙、镁、钠型, 矿化度呈增大的趋势, 农田排涝和城市退水等人为因素对温榆河水化学特征演变过程具有显著的影响作用^[4]。1980年-2010年温榆河流域水环境质量经历了清洁-污染-污染遏制的过程, 但温榆河上段水质达不到IV类水标准, 下段水质达不到V

收稿日期: 2014-10-17 修回日期: 2015-04-15 网络出版时间: 2015-06-29
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150629.1535.002.html>
基金项目: 中国地震局教师科研基金项目(20130103)
作者简介: 王 贺(1991-), 女, 吉林人, 主要从事地下水资源与环境保护方面的研究。E-mail: whnuo2009@163.com
通讯作者: 谷洪彪(1984-), 男, 山东人, 副教授, 博士, 主要从事地下水资源与环境保护方面的研究。E-mail: hongbiaosw@126.com

类水标准。温榆河 COD、BOD₅ 浓度超标,且支流清河、坝河的 COD、BOD₅ 略高于支流汇入后的温榆河下段 COD、BOD₅^[5]。大量城市污水的排放导致温榆河道内的总磷、磷酸盐、总氮含量逐渐升高,富营养化问题日益加剧;温榆河水体重金属含量多数高于《地表水环境质量》(GB 3838-2002)的 I 类标准,沉积物中重金属含量已经出现了明显的富集累积趋势,高毒元素 As、Cd 的富集累积程度较为严重^[6-8]。除了富营养化问题和有机污染外,温榆河流域的微生物污染非常突出,在世界各河流中均处于高污染水平^[9]。

然而,现有研究只是探讨了温榆河水化学特征及水环境质量 2010 年以前的时空演变特征,缺乏对温榆河现状的调查研究。同时对温榆河水体与沉积物污染物相关性的研究也甚少,只是单项地分析了水体或沉积物的环境质量。本文通过现场调查取样,利用阿列金法、地累积指数法分析了温榆河主要水化学离子及沉积物中重金属含量空间分布特征,通过与 1980 年-2013 年数据序列的对比,分析了对温榆河水体及其沉积物水化学及重金属污染时空变化特征,最后阐明了温榆河水体与沉积物的相关性,研究成果为今后温榆河环境质量治理及绿色生态走廊的建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

根据温榆河流域地理和水文特征,综合考虑温榆河各主要支流及排污口的分布状况,于 2013 年 11 月(枯水季)在温榆河沿岸及各主要支流汇入口设置水样采样点 8 个(WY01-WY08),沉积物底泥(表层 0~10 cm)采样点 6 个(WY03-WY08),采样点布置见图 1。野外现场,采用哈希 40 d 便携式多参数水质仪测试水体温度、pH 值、氧化还原电位(ORP)、溶解氧(DO)和电导率(EC)等指标。水样采集后保存于 500 mL 聚氯乙烯瓶中;同时,在水样采集位置,相应采取 0~10 cm 深度的沉积物,采集后保存于不锈钢盒中,样品 4 °C 冷藏带回实验室分析。



图 1 温榆河流域基本特征及采样点分布
Fig. 1 The basic characteristics of Wenyu River and location of sampling sites

1.2 评价方法

水体总溶解性固体(TDS)的计算方法如下:

$$C(TDS) = C(Ca^{2+}) + C(Mg^{2+}) + C(Na^+) + C(K^+) + C(HCO_3^-) / 2 + C(SO_4^{2-}) + C(Cl^-) \quad (1)$$

式中: $C()$ 为各离子浓度(mg/L)。

本文采用阿列金法对温榆河的水化学特征进行分类。阿列金法是根据主要离子浓度和比例关系对天然水体化学类型进行分类最常用的方法^[10]。

内梅罗综合污染指数是一种兼顾极值和平均值的计权型多因子评价指数,本文采用内梅罗综合污染指数法对温榆河水环境质量进行评价,该方法的计算公式如下:

$$PI_j = \sqrt{\frac{C_j/C_0 \text{最大值} + (C_j/C_0) \text{平均值}}{2}} \quad (2)$$

式中: PI_j 为综合污染指数, C_j 、 C_0 为各指标的实测值和标准限值(mg/L)。内梅罗指数对应的污染等为: $PI_j < 1$, 清洁; $1 \leq PI_j < 2$, 轻度污染; $2 \leq PI_j < 3$, 污染; $3 \leq PI_j < 5$, 重度污染; $PI_j \geq 5$, 严重污染。

本文采用地累积指数法进行温榆河沉积物重金属污染水平的评价。地累积指数法由德国学者 Muller 于 1979 年提出^[11],是一种研究水体沉积物中重金属污染的定量指标,不仅考虑了自然地质过程造成的背景值的影响,而且也充分注意了人为活动对重金属污染的影响。该指数不仅反映了重金属分布的自然变化特征,而且可以评价人为活动对环境的影响,是区分人为活动影响的重要参数,其计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (1.5 \times B_i)] \quad (3)$$

式中: I_{geo} 为地累积指数,根据 I_{geo} 值的大小,可以将沉积物中重金属的污染程度分为 7 个等级, I_{geo} 值对应的污染水平见表 1; C_i 为重金属元素 i 在沉积物中的质量分数(mg/kg); B_i 为沉积物中重金属元素 i 的地球化学背景值(mg/kg),本文对温榆河沉积物中重金属污染评价采用北京市土壤重金属背景值(mg/kg): Cd 为 0.119、As 为 7.09、Cr 为 29.8、Pb 为 24.6。

表 1 地累积指数与污染程度等级

Tab. 1 Contamination degree corresponding to Geoaccumulation index							
I_{geo}	< 0	0~1	> 1~2	> 2~3	> 3~4	> 4~5	> 5
级数	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无	轻度	偏中度	中度	偏强度	强度	极强度

2 结果与分析

2.1 温榆河水化学特征

2.1.1 基本离子特征

水体的基本离子含量及比例表征了水质特征,温榆河水体的离子组成见表 2。2013 年温榆河优势阳离子为 Na^+ , 浓度占阳离子总量的 45.39%; 优势阴离子为 HCO_3^- , 浓度占阴离子总量的 80.01%。离子总量(TDS)的最小值为 534.99 mg/L, 最大值为 789.83 mg/L, 平均值为 705.17 mg/L, TDS 差异性较小, 上段至下段整体变化趋势为先增大后减小。温榆河各支流汇入口处,南沙河、清河、坝河的 TDS 分别为 661.79 mg/L、739.54 mg/L 及 20.67 mg/L, 其中清河总离子含量最大。因此,温榆河中段清河的汇入,导致中段的 TDS 大于上、下段的 TDS。由表 2 可知,温榆河沿程各离子含量的变化, K^+ 、 SO_4^{2-} 的变异系数 C_v 较大,分别为 31.42%、26.81%; Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的变异系数 C_v 较小,分别为 8.4%、7.35%,说明外界因素对温榆河 K^+ 、 SO_4^{2-} 含量的影响较大,对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量的影响较小。

表2 温榆河水样各指标浓度测试结果(2013年11月)

项目	最大值	最小值	平均值	标准差 S. D	变异系数 C _v
TDS /(mg·L ⁻¹)	789.83	534.99	705.17	75.15	10.66
pH	8.51	7.71	8.04	0.24	2.96
DO /(mg·L ⁻¹)	16.36	3.48	8.21	3.76	45.8
ORP /mV	156.7	63.5	136.2	28.41	20.86
EC /(μs·m ⁻¹)	1111	783	1004	34.18	3.4
Mg ²⁺ /(mg·L ⁻¹)	29.98	24.30	26.97	1.98	7.35
Ca ²⁺ /(mg·L ⁻¹)	76.37	55.84	68.10	5.72	8.4
Na ⁺ /(mg·L ⁻¹)	99.47	71.94	90.25	9.01	9.98
K ⁺ /(mg·L ⁻¹)	20.57	8.61	13.50	4.24	31.42
HCO ₃ ⁻ /(mg·L ⁻¹)	466.04	290.36	398.94	51.28	12.85
Cl ⁻ /(mg·L ⁻¹)	84.14	49.70	69.23	12.45	17.97
SO ₄ ²⁻ /(mg·L ⁻¹)	47.76	28.56	30.42	8.16	26.81
Ba /(mg·kg ⁻¹)	0.107	0.058	0.073	0.015	20.37
As /(mg·kg ⁻¹)	9.5×10 ⁻³	3.0×10 ⁻³	5.5×10 ⁻³	2.34×10 ⁻³	42.59
Se /(mg·kg ⁻¹)	2.4×10 ⁻³	3.6×10 ⁻⁴	1.18×10 ⁻³	7.4×10 ⁻³	63.06
Cd /(mg·kg ⁻¹)	2×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵	1.25×10 ⁻⁵	4.33×10 ⁻⁶	34.64
Pb /(mg·kg ⁻¹)	5×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵	2.6×10 ⁻⁵	1.32×10 ⁻⁵	50.66
Cr /(mg·kg ⁻¹)	0.017	0	5.38×10 ⁻³	4.7×10 ⁻³	88.22

温榆河 pH 值范围为 7.71~8.51, 变化幅度较小, 为弱碱性水; 溶解氧 DO 浓度在 3.48~16.36 mg/L, 较 2009 年温榆河溶解氧浓度变化范围 2.7~11 mg/L^[1] 有所提升, 达到了国家 IV 类地表水环境质量标准。温榆河上、下段的溶解

表3 温榆河 1991 年-2013 年离子浓度含量及水化学类型

Tab 3 Ion concentrations and water chemistry types of the Wenyu River from 1991 to 2013

年份	溶质浓度/(mg·L ⁻¹)								类型	文献
	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	TDS		
1991	75	75	31	7.5	300	50	65	620	C ₀ ⁰	[4]
1994	68	62	25	12	224	115	105	610	C ₀ ⁰	[4]
1997	40	55	28	10	290	55	61	575	C ₀ ⁰	[4]
2000	38	63	30	8	370	57	68	660	C ₀ ⁰	[4]
2003	68	63.5	27.5	18.5	325	95	70	673	C ₀ ⁰	[4]
2006	68.8	66.9	28.7	10.0	330.5	71.3	71.9	678.0	C ₀ ⁰	[4]
2013	90.3	68.1	26.9	13.5	398.9	69.2	30.4	705.2	C ₀ ⁰	本文

除了蒸发作用、岩石风化因素外, 自然条件降水量以及人为因素对河水离子化学的组成也有较大的影响。降水量

氧浓度较高, 呈先上升再下降的趋势, 说明温榆河上段水体中水生生物的繁殖和生长较下段好; 南沙河、清河、坝河的溶解氧浓度依次为南沙河>坝河>清河, 南沙河水体的自净能力较强, 清河较弱。温榆河及支流氧化还原电位 ORP 变化范围为 63.5~156.7 mV, 电导率 EC 的变化范围为 783~1111 μs/m, 说明温榆河及各支流水中含盐量较大, 矿物成分较高。温榆河水体电导率 EC 与 TDS 和 DO 呈显著正相关(表 7), 反映了温榆河水体 EC 的大小与 TDS、DO 的高低之间存在密切的联系。

2.1.2 水化学类型及主要控制因素

表 3 为 1991 年-2013 年温榆河各离子浓度及水化学类型, 图 2 为其变化趋势。Cl⁻、SO₄²⁻ 呈下降趋势, Na⁺、Ca²⁺、K⁺、HCO₃⁻ 呈明显上升趋势, Mg²⁺ 无显著变化; 其中 Ca²⁺ 和 TDS 的变化趋势相似, Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 的变化趋势相似; 离子总量 TDS 由 620 mg/L 上升至 705.2 mg/L。2003 年-2013 年 Cl⁻、SO₄²⁻ 含量逐渐减少, 说明了温榆河盐渍化问题得以改善, 且无水质酸化问题。由图 2 可见, 温榆河的优势阴离子为 HCO₃⁻, 2013 年其含量显著增加, 1994 年-2002 年优势阳离子为 Ca²⁺, 2003 年以后逐渐转变为以 Na⁺ 为主, 且 2013 年 Na⁺ 含量急剧上升。优势阳离子的变化说明: 影响温榆河阳离子化学组分的自然因素, 由岩石风化作用逐渐转为以蒸发作用为主^[4]。2013 年 Na⁺、HCO₃⁻ 含量的急剧增加, 说明温榆河水质呈碱化趋势。

将温榆河 2013 年的数据与文献中世界各大河流的数据同绘于 Gibbs 图中, 见图 3(世界各大河流离子数据引用文献 [13], 1991 年-2006 年温榆河数据引用文献 [4], 2013 年温榆河数据为本文实验所测)。由图可见, 温榆河离子分布特征与北运河、黄河最为相近, 其中 1991 年-2006 及 2013 年温榆河 Na⁺/(Na⁺+1/2Ca²⁺) 的比值分别在 0.547~0.687 之间和 0.716~0.742 之间, Cl⁻/(Cl⁻+HCO₃⁻) 的比值分别在 0.133~0.339 之间和 0.107~0.180 之间。2013 年较 1991-2006 年相比, Na⁺/(Na⁺+1/2Ca²⁺) 的比值增大, Cl⁻/(Cl⁻+HCO₃⁻) 的比值减小, TDS 由 575~678 mg/L 增加到 705.2 mg/L, 说明温榆河阳离子主要受蒸发因素影响, 而阴离子主要受岩石风化作用控制。此外, 蒸发因素占优势的同时, Cl⁻ 含量却呈下降趋势, 说明工业废水、生活污水的排放以及农田排涝等人为因素对温榆河离子化学组成所造成的影响是不可忽视的。

增加, 则径流量加大, 从而对河水的稀释作用加强, 导致河水中离子浓度下降; 降水量减少, 则相反。据已有研究^[12], 北

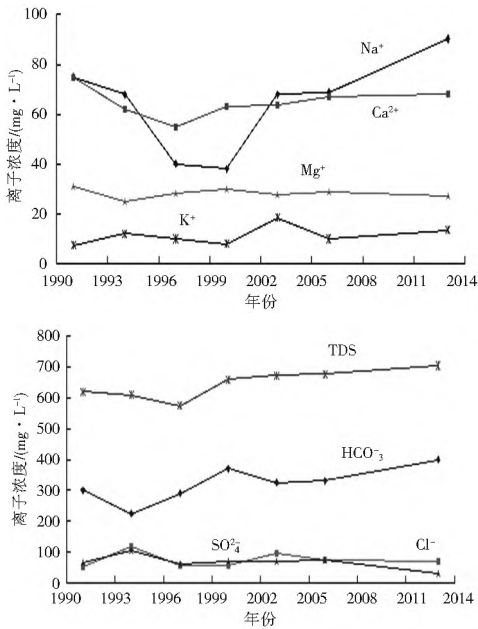


图 2 温榆河 1991-2013 年离子浓度变化趋势

Fig. 2 Variation trend of ion concentration in the Wenyu River from 1991 to 2013

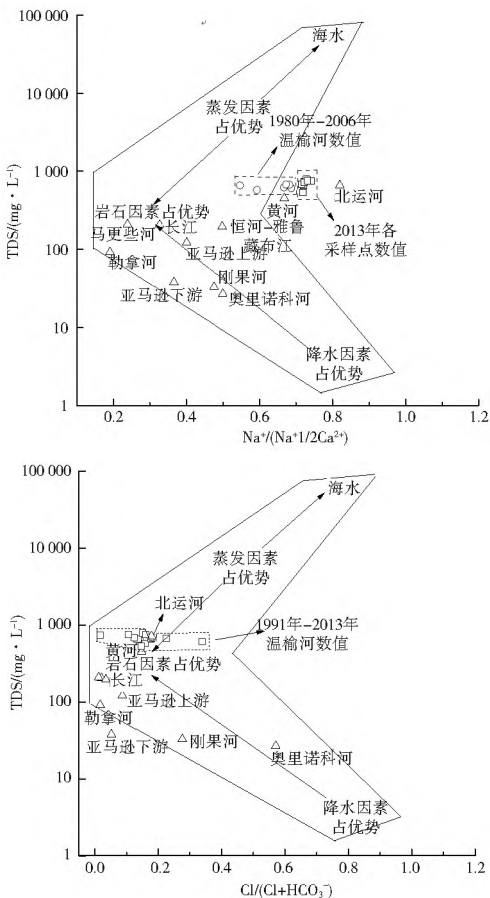


图 3 Gibbs 图解法比较温榆河与世界各大河的水化学特征^[4,13]

Fig. 3 Comparison of water quality characteristics between the Wenyu River and other major rivers in the world using the Gibbs graphical method^[4,13]

京年降水量 2000 年以来呈上升趋势,而 2003 年-2013 年温榆河 Ca^{2+} 、 K^{+} 、 HCO_3^{-} 的含量也呈显著上升趋势,矿化度逐年增加;温榆河离子组成在蒸发因素占优势的同时, Cl^{-} 含量

却呈下降趋势,这些现象说明,工业废水、生活污水的排放以及农田排涝等人为因素对温榆河 2003 年-2013 年离子化学组成起着更为显著的作用。

2.2 温榆河水环境质量特征

2.2.1 主要超标污染物

以内梅罗综合污染指数法评价温榆河各采样点的水质状况,结果见表 4。2013 年温榆河及清河、坝河均受到了重度污染,南沙河中段水质较清洁,下段水质状况为污染;温榆河上段至下段污染程度逐渐加剧,均比清河、坝河污染程度高。

表 4 2013 年温榆河水水质状况

Tab. 4 Water quality of the Wenyu River in 2013

采样点编号	位置	P_{I_5} 值	等级
WY01	南沙河中段	0.854	清洁
WY02	南沙河下段	2.06	污染
WY03	温榆河上段	3.888	重度污染
WY04	温榆河中上段	4.255	重度污染
WY05	清河	3.55	重度污染
WY06	温榆河中段	4.607	重度污染
WY07	坝河	3.53	重度污染
WY08	温榆河下段	4.883	重度污染

1980 年-2010 年温榆河、清河和坝河受到严重污染,并且支流污染重于干流,污染程度依次为清河>坝河>温榆河^[5]。温榆河 2013 年水质状况与 1980 年-2010 年水质状况相比,由严重污染提升为重度污染,尤其是清河污染程度,得到很大改善,主要来自清河近几年的截污治污等,现状污染程度依次为温榆河>清河>坝河。由表 5 可知,1980 年-2013 年温榆河的水质经历了清洁-轻度污染-严重污染-重度污染的过程;2000 年-2010 年,温榆河、清河及坝河的上、下段水质均不达标(干流和支流上、下段的功能区划分目标分别为 IV 类和 V 类),2008 年,通过河道整治、沿线截污和污水集中处理等大量工程,初步改善了温榆河流域的水环境质量^[5],至 2013 年温榆河及其支流的上、下段的水质均已恢复为 IV 类水。虽水环境质量有所改善,但温榆河仍为排污、排沥河道,继续升级治理温榆河流域至关重要。

表 5 1980 年-2013 年温榆河水水质状况

Tab. 5 Water quality of the Wenyu River from 1980 to 2013

年份	温榆河		清河		坝河		文献
	上段	下段	上段	下段	上段	下段	
1980	清洁	中度	重度		重度	严重	[2]
1990	轻度	重度	严重		重度		[2]
2000	严重	严重	严重	严重	严重	严重	[2]
2010	严重	严重	严重	严重	严重	严重	[2]
2013	重度	重度	重度	重度	重度	重度	本文

2013 年,温榆河及其支流的主要超标污染物为 $\text{NH}_4^{+}-\text{N}$ 和硝酸盐,由表 6 可知,温榆河 $\text{NH}_4^{+}-\text{N}$ 要高于汇入的支流南沙河、清河和坝河,各支流 $\text{NH}_4^{+}-\text{N}$ 超标倍数依次为清河>坝河>南沙河;温榆河上、下段的 $\text{NH}_4^{+}-\text{N}$ 分别为 12 550 mg/L 和 13 939 mg/L,下段 $\text{NH}_4^{+}-\text{N}$ 超标倍数大于上段,说明下段 $\text{NH}_4^{+}-\text{N}$ 主要受清河、坝河补给水源的影响;温榆

河及支流的硝酸盐沿程变化趋势与 NH_4^+-N 变化趋势相似,呈现不规则上升下降趋势,近似“M”型,但硝酸盐沿程变化较 NH_4^+-N 更为剧烈;温榆河硝酸盐浓度上段大于下段,各支流硝酸盐浓度超标倍数依次为坝河>清河>南沙河,清河、坝河的硝酸盐大于温榆河,说明温榆河水体中硝酸盐受支流补给水源的影响较小。

表 6 2013 年温榆河主要污染物的浓度和超标倍数

Tab. 6 Concentrations and over standard ratios of major pollutants in the Wenyu River in 2013

采样点 编号	位置	$\text{NH}_4^+-\text{N}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		硝酸盐/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	
		浓度	超标倍数	浓度	超标倍数
WY01	南沙河中段	0.404	-0.798	5.59	-0.441
WY02	南沙河下段	5.412	2.796	18.94	1.897
WY03	温榆河上段	12.550	6.275	29.05	2.905
WY04	温榆河上中段	10.668	5.334	6.69	-0.304
WY05	清河	9.410	4.705	35.13	3.513
WY06	温榆河中段	11.681	5.841	11.02	1.102
WY07	坝河	8.798	4.399	46.73	4.673
WY08	温榆河下段	13.393	6.697	19.44	1.944

图 4 为 1980 年-2013 年温榆河 NH_4^+-N 浓度变化,1980 年-2010 年温榆河上、下段 NH_4^+-N 浓度逐渐升高,较 2010 年相比,2013 年温榆河的上、下段 NH_4^+-N 浓度均有大幅度降低,由 18.68~27.73 mg/L 降低至 12.55~13.93 mg/L。据已有调查^[6],温榆河流域以城市污水处理厂排水为主要补给源,主要 4 家污水处理厂(清河、肖家河、北小河、酒仙桥污水处理厂)的排水量约占温榆河干流多年径流量的 70%,排水中 COD 和 NH_4^+-N 的入河污染负荷约占温榆河干流入河污染负荷的 80%。至 2013 年, NH_4^+-N 仍为温榆河及各支流的主要污染物,超标倍数虽降低,但依然在 2~7 倍范围内。

2.2.2 温榆河水体中重金属含量分布

温榆河采集的水样重金属含量的测定结果见表 2。温榆河水体中 Se、Cd、Pb、As 含量较少,均符合《地表水环境质

量》(GB 3838-2002)的 I 类标准;Ba 的含量较高,但符合地表水源地特定项目标准限值;南沙河、清河、坝河以及温榆河上、中段 Cr 的含量均符合《地表水环境质量》(GB 3838-2002)的 I 类标准;温榆河下段 Cr 的含量为 0.017 mg/L,超过了《地表水环境质量》(GB 3838-2002)的 I 类标准。温榆河中段 Cr 的含量与清河 Cr 的含量近似,而下段 Cr 的含量相对较高,原因是中段水的主要补给来源为清河污水的排放,下段接受了坝河的汇入补给。由表 2 水体中重金属 C_e 值可看出,温榆河水体沿程重金属变异系数较大,分布范围为 20.37%~88.22%,其中 Cr 的变异系数最大,体现了温榆河以城市退水为主要补给源的特点。

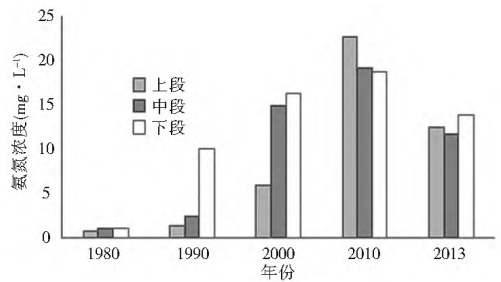


图 4 1980 年-2013 年温榆河 NH_4^+-N 浓度变化

Fig. 4 Concentration changes of NH_4^+-N in the Wenyu River from 1980 to 2013

2.2.3 温榆河沉积物中重金属含量分布

采用地累积指数法对温榆河沉积物重金属污染水平进行评价,结果见图 5。温榆河沉积物中重金属地累积指数顺序为 $\text{Cr}(-0.33) > \text{Cd}(-0.47) > \text{As}(-1.10) > \text{Pb}(-2.78)$,Cr 为主要累积元素;清河及坝河沉积物中重金属地累积指数分别为 $\text{Cd}(0.75) > \text{Cr}(0.58) > \text{As}(-0.04) > \text{Pb}(-2.33)$ 、 $\text{Cd}(0.81) > \text{Cr}(0.40) > \text{As}(-0.57) > \text{Pb}(-1.66)$,Cd 均为主要累积元素。由图 5 可知:温榆河、清河、坝河 Pb、As 的地累积指数均小于 0,污染水平等级为无污染;温榆河下段及清河、坝河 Cd、Cr 的地累积指数均在 0~1 之间,污染水平为轻度污染,因此,温榆河沉积物中 Cd、Cr 应成为重点防控的对象。

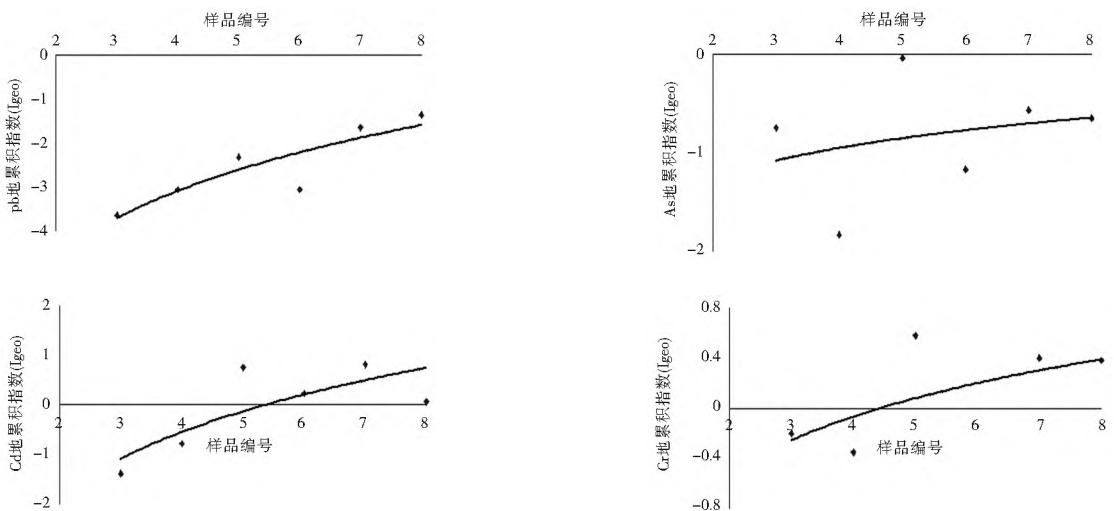


图 5 2013 年温榆河沉积物中重金属含量污染评价结果

Fig. 5 Evaluation results of heavy metal pollution in the sediment of the wenyu River sediment in 2013

2.3 温榆河水体与沉积物主要污染物相关性分析

2.3.1 水体与沉积物中水化学成分相关性

表 7 为温榆河水体与沉积物 Pearson 相关系数。由表可知, 水体中硝酸盐含量与 EC、TDS 呈显著正相关(P 分别为 0.939、0.906), 与 DO、pH 呈强正相关(P 分别为 0.765、0.661); 水体中氨氮与 ORP、EC 呈中等强度正相关(P 分别为 0.478、0.447), 与 TDS 呈中等强度负相关(P 为 -0.533)。沉积物中硝酸盐与 DO 呈强正相关(P 为 0.796), 与 EC、pH、TDS 呈中等强度正相关(P 分别为 0.565、0.51、0.505), 与 ORP 呈中等强度负相关(P 为 -0.486); 沉积物中氨氮与各理化指标相关性不显著。以上可以说明, 温榆河水体和沉积物中硝酸盐对各理化指标的影响较大, 对水体、沉积物中硝酸盐污染的评价可以结合对各理化指标中。据已有研究^[14], 泥沙的存在可大大促进河水中的氮转化为硝酸, 这也是温榆河水体中硝酸盐含量较高的原因。这些结果表明, 对温榆河氮氮的污染评价应主要依据沉积物中的含量, 对硝酸盐的污染评价应主要依据水体中的含量。

2.3.2 水体与沉积物中重金属的相关性

由表 7 可知, ORP 与水体中 Pb 呈显著负相关(P 为 -0.953), 与 Cr 呈强负相关(P 为 -0.793), 与 As 呈强正相

关(P 为 0.741), 其它理化指标与这 3 种重金属质量分数的相关性均不显著, 说明 ORP 与水体中 Pb、As、Cr 的分布密切相关, 可依据 ORP 的分布对水体中这 3 种重金属进行污染评价; ORP 与沉积物中 Pb 呈显著负相关(P 为 -0.928), 与 Cr 呈强负相关(P 为 -0.647), pH 与沉积物中 Cd 呈强负相关(P 为 -0.654), 各理化指标与 As 的相关性均不显著, 说明沉积物中 Pb、Cr 的分布受到了 ORP 的影响, Cd 的分布受到了 pH 的影响。因此, 对沉积物中 Pb、Cr 含量的污染评价应结合对 ORP 的评价, 对 Cd 含量的污染评价应结合对 pH 的评价。

温榆河水体与沉积物中 As 呈强负相关(P 为 -0.608), Cd 呈中等负相关(P 为 -0.459), Pb、Cr 呈正相关, 且 Pb 呈显著正相关(P 为 0.972), Cr 为中等正相关(P 为 0.414)。国内外的大量研究表明, 重金属环境行为的重要特点是易于由水相转入固相, 绝大部分情况下固相中的重金属含量比水相高 3~4, 甚至 5 个数量级^[14]。对样品数据进行分析研究, 发现温榆河沉积物和水体中重金属含量比例关系也有此现象, 沉积物中重金属含量比体中高 3~5 个数量级, 且均有显著的相关性, 其中 Pb 的相关性最为显著。因此, 对温榆河水体中重金属污染程度的评价, 既要考虑水体中含量, 更应重视沉积物中的含量。

表 7 温榆河水体与沉积物 Pearson 相关系数

Tab. 7 Pearson correlation coefficients between water and pollutants in the sediment of the Wenyu River

项目	水体								沉积物								
	pH	TDS	DO	ORP	EC	硝酸盐	氨氮	Cd	Pb	As	Cr	硝酸盐	氨氮	Cd	Pb	As	Cr
pH	1																
TDS	-0.535	1															
DO	0.377	-0.870	1														
ORP	0.169	-0.396	-0.041	1													
EC	0.683	0.976*	0.829*	0.346	1												
硝酸盐	0.661	0.906*	0.765	0.405	0.939*	1											
氨氮	-0.183	-0.533	0.28	0.478	0.447	0.326	1										
Cd	-0.003	0.199	-0.475	0.405	-0.226	-0.418	0.103	1									
Pb	-0.173	0.172	0.296	-0.953**	-0.166	-0.259	-0.347	-0.447	1								
As	0.53	-0.415	0.087	0.741	0.405	0.342	0.07	0.636	-0.671	1							
Cr	0.402	0.011	0.353	-0.793	0.097	0.094	-0.639	-0.51	0.782	-0.359	1						
硝酸盐	0.51	-0.508	0.796	-0.486	0.565	0.565	-0.255	-0.668	0.611	-0.185	0.835*	1					
氨氮	-0.351	-0.243	0.233	-0.103	0.207	0.14	0.768	-0.359	0.159	-0.566	-0.21	0.002	1				
Cd	-0.654	0.224	-0.008	-0.514	-0.268	-0.29	0.355	-0.459	0.511	-0.897	0.031	0.001	0.831*	1			
Pb	-0.122	0.115	0.294	-0.928*	-0.097	-0.254	-0.207	-0.335	0.972**	-0.636	0.728	0.564	0.266	0.542	1		
As	0.109	-0.313	0.366	-0.306	0.389	0.401	0.402	-0.67	0.302	-0.608	0.27	0.426	0.804	0.652	0.377	1	
Cr	-0.118	-0.055	0.259	-0.647	0.107	0.025	0.264	-0.543	0.641	-0.789	0.414	0.403	0.779	0.819*	0.726	0.883*	1

注: * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

3 结论

(1) 2013 年温榆河各离子含量较 1980 年-2006 年相比, Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 和 HCO_3^{-} 含量呈上升趋势; 而 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 Cl^{-} 含量呈下降趋势。水化学类型由 $\text{C}^{\text{ca}}\text{II}$ 转化为 $\text{C}^{\text{na}}\text{I}$, 呈矿化度增大的趋势。1980 年-2006 年温榆河优势阳离子为 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, 优势阴离子为 HCO_3^{-} ; 2013 年温榆河优势阳离子为 $\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$, 优势阴离子为 HCO_3^{-} , 说明温榆河的

离子化学组成由主要受碳酸盐类控制逐渐转变为主要受蒸发岩类控制, 同时不可忽视人为因素对河水造成的影响。

(2) 1980 年-2013 年温榆河流域的水环境质量时空演变特征主要为: 水环境质量经历了清洁-轻度污染-严重污染-重度污染的过程。至 2013 年, 温榆河、清河、坝河以及南沙河上、下段水质均已恢复为 IV 类水, 主要超标污染物为氨氮和硝酸盐。1980 年-2010 年温榆河、清河及坝河污染程度为清河 > 坝河 > 温榆河, 现状污染程度为温榆河 > 清河

> 坝河,其中清河污染程度得到很大改善,主要来自清河近几年的截污治污等。

(3) 温榆河水体中 Se、Cd、Pb、As 的浓度均符合《地表水环境质量》(GB 3838-2002)的 I 类标准,温榆河下段水体中 Cr 的浓度超过了《地表水环境质量》(GB 3838-2002)的 I 类标准。温榆河下段、清河、坝河沉积物中 Cr、Cd 的地累积指数均在 0~1 之间,污染水平为轻度污染,Cr 和 Cd 为温榆河沉积物中重金属含量的重点防控对象。

(4) 温榆河水体与沉积物主要污染物的相关性显著,氨氮、硝酸盐以及 Cr、Pb 呈显著正相关,Cd、As 呈显著负相关,其中 Pb 的相关性最为显著,相关性指数 P 高达 0.972。温榆河沉积物中重金属的含量高出水体中 3~5 个数量级,对于温榆河重金属污染程度的评价,既要考虑水体中含量,更应重视沉积物中的含量。

参考文献(References):

- [1] 杨丽蓉,孙然好,陈利顶.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[J].环境科学,2011,32(1):74-79.(YANG Li rong,SUN Ran hao,CHEN Li ding.Analysis of seasonal variations of surface water quality in the middle and upper reaches of Wenyu River[J].Environmental Science,2011,32(1):74-79.(in Chinese))
- [2] 郑凡东,孟庆义,王培京.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.(ZHENG Fan dong,MENG Qing yi,WANG Pei jing.Study on status improvement strategies of water environment in Wenyu River of Beijing[J].Beijing Water,2007(5):5-8.(in Chinese))
- [3] 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):11-19.(SHI Hong mei.Study on water pollution of Wenyu River System in Changpin[J].Water Conservancy and Hydropower Technology,2008,39(5):11-19.(in Chinese))
- [4] 于淼,魏源送,郑祥,等.温榆河水化学特征演变及其影响因素分析[J].环境科学学报,2012,32(1):2-7.(YU Miao,WEI Yuan song,ZHENG Xiang,et al.Evolution of hydrochemical characteristics of Wenyu River and its influencing factors[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2012,32(1):2-7.(in Chinese))
- [5] 郁达伟,于淼,魏源送.1980-2010年温榆河的水环境质量时空演变特征[J].环境科学学报,2012,32(11):2804-2812.(YU Da wei,YU Miao,WEI Yuan song.Spatio-temporal evolution of water environment quality in Wenyu River during 1980-2010[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2012,32(11):2804-2812.(in Chinese))
- [6] 王亚伟,杜向群,郁达伟.温榆河氨氮污染控制措施的效果模拟[J].环境科学学报,2013,33(2):480-486.(WANG Ya wei,DU Xiang qun,YU Da wei.Assessment of ammonia nitrogen pollution control in Wenyu River by QUAL2K simulation[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2013,33(2):480-486.(in Chinese))
- [7] 杜晓丽,曲久辉,刘会娟.温榆河水体中重金属含量分布及赋存状态解析[J].环境科学学报,2012,32(1):38-41.(DU Xiao li,QU Jiu hui,LIU Hui juan.Distributions of trace metals in the surface water in Wenyu River[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2012,32(1):38-41.(in Chinese))
- [8] 李莲芳,曾希柏,李国学.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):290-297.(LI Lian fang,ZENG Xi bo,LI Guo xue.Heavy metal pollution of Wenyu River sediment and its risk assessment[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2007,27(2):290-297.(in Chinese))
- [9] 杨勇,魏源送,郑祥,等.北京市温榆河流域微生物污染调查研究[J].环境科学学报,2012,32(1):10-18.(YANG Yong,WEI Yuan song,ZHENG Xiang,et al.Investigation of microbial contamination in Wen River of Beijing[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2012,32(1):9-18.(in Chinese))
- [10] 王晓蓉.环境化学[M].南京:南京大学出版社,2003.(WANG Xiao rong.Environmental Chemistry[M].Nanjing:Nanjing University Press,2003.(in Chinese))
- [11] Forstner U. Lecture Notes in Earth Sciences(Contaminated Sediments).Berlin:Springer-Verlag,1989:107-109.
- [12] 李永坤,丁晓洁.北京市降水量变化特征分析[J].北京水务,2013(2):9-12.(LI Yong kun,DING Xiao jie.The analysis of characteristics of rainfall change of Beijing[J].Beijing Water,2013(2):9-12.(in Chinese))
- [13] 陈静生,王越飞,夏星辉.长江水质地球化学[J].地球前缘,2006,13(1):74-85.(CHEN Jing sheng,WANG Yue fei,XIA Xing hui.Geochemistry of water quality of the Yangtze River basin[J].Earth Science Frontiers,2006,13(1):74-85.(in Chinese))
- [14] 陈静生,余涛.对黄河泥沙与水质关系的研究[J].北京大学学报:自然科学版,2005,41(6):950-955.(CHEN Jing sheng,YU Tao.Effects of the suspended sediment on the water quality in the Yellow River[J].Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,2005,41(6):950-955.(in Chinese))

济南城市型水灾害特征分析

史丽华, 韩美, 张翠

(山东师范大学 人口·资源与环境学院, 济南 250014)

摘要: 随着我国城市化进程的加快, 财富与信息等在城市集聚的同时, 城市型水灾害的发生频数在增加, 灾害的损失也日益增加, 可以说城市型水灾害的发生在于人类社会系统与自然生态系统的相互作用, 是城市各个因素综合作用的结果。通过采用百分位法和 R/S 分析法等分析了济南市城市型水灾害降水、地形、水文特征, 得到济南市降水极端事件及暴雨次数与城市化率趋势一致, 而且水灾害出现的时间与暴雨出现次数最多的时间段相吻合, 同时济南市未来降水变化趋势延续过去降水量整体变化趋势的可能性较大; 加之南部山区和城市水系在人类土地利用方式和自然生态相互影响下脆弱的城市孕灾环境和承灾体共同作用导致济南市城市型水灾害产生。并针对此结合国外治水防水经验提出五项对策建议。通过本文的研究可以更加深入地的认识城市型水灾害的形成机制, 并在此基础上为更好地避免或防御城市型水灾害的发生提供理论支撑。

关键词: 济南市; 城市型水灾害; 降水; 城市化; 人类社会; 自然; 相互作用

中图分类号: X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)04-0674-07

Analysis of characteristics of urban water disasters in Jinan

SHI Lihua, HAN Mei, ZHANG Cui

(College of Population Resource and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

Abstract: With the rapid urbanization in China, wealth and information are gathering in the cities, which also leads to the increasing of urban water disasters and loss of disasters. The occurrence of urban water disasters is caused by the interaction between human social system and natural ecosystems, and is the result of the combined effects of various factors. In this paper, the characteristics of precipitation, topography, and hydrology in urban water disasters of Jinan City were analyzed using the percentile method and R/S analysis method. The results showed that the number of extreme precipitation events and the frequency of rainstorm are consistent with the urbanization trend, the time when urban water disasters occur is consistent with the period of time when rainstorm appears mostly, and the future trend of precipitation has the possibility of a continuation of the overall trend of precipitation in the past years. The fragile environment of developing hazards caused by the interactions between human land use patterns and natural ecosystems in the southern mountains and urban water systems combined with fragile hazard-bearing bodies lead to urban water disasters. Meanwhile, five suggestions were proposed according to the flood control and prevention experience in other countries. The research can provide a better understanding of the formation mechanism of urban water disasters, which can then offer theoretical support for the prevention of the occurrence of urban water disasters.

Key words: Jinan; urban water disasters; precipitation; urbanization; human society; nature; interaction

在全球气候变化和极端天气增加的大背景下, 城市型水灾害是快速城市化过程中国内外许多国家都面临的新问题^[1]。建国以来, 我国城市化速度加快, 尤其是 20 世纪 90 年代以来, 我国城市建成区面积和城市建设用地面积增加了近 4 倍, 城市人

口密度也由 279 人/km² (1990 年) 增加到 2 307 人/km² (2012 年), 但随之而来的是各城市水灾害的发生, 据资料显示^[2] 至 2010 年 8 月底, 我国遭受洪涝灾害的县级以上城市已经超过了 200 座, 其中大多数为暴雨内涝, 这些城市有北京、上海、

收稿日期: 2014-12-18 修回日期: 2015-02-04 网络出版时间: 2015-07-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150724.1123.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41371537); 山东省科技计划项目(2013GSF11706)

作者简介: 史丽华(1990-), 女, 山东德州人, 主要从事环境演变与区域可持续发展研究。E-mail: shilihua30@163.com

通讯作者: 韩美(1963-), 女, 山东寿光人, 博士生导师, 主要从事环境演变与可持续发展和流域水资源与湿地生态评价。E-mail: hamei568568@126.com

南京、广州、重庆、武汉、济南、郑州、西安、杭州、福州、长沙等。1982年7月23日日本长崎水灾害的发生使人们注意到快速城市化带来这次水灾害不同于以往的传统水灾害,这就是“城市型水灾害”概念的提出。城市型水灾害侧重于以人类活动主导的发生在城市中的水灾害,就致灾因子与孕灾环境而言,城市型水灾害更多涉及到人类活动作用,可以说城市型水灾害的发生在于人类社会系统与自然生态系统的相互作用,城市型水灾害的形成是城市各个因素综合作用的结果,是时间与空间的结合,也可以说是城市系统的反馈。我国对于城市型水灾害的研究主要集中在两方面,在定性方面,主要包括城市型水灾害特征、发生原因分析和防灾减灾措施等方面^[13],在定量方面,真正提到城市型水灾害的几乎没有,但在以某城市为例进行定量分析的涉及到城市型水灾害的研究不少,主要集中在城市暴雨洪水分析,如采用经验相关、双累积曲线和统计检验等方法估算城市洪水^[4];城市暴雨灾害评估,如采取数学分析与图面分析相结合的研究方法进行暴雨灾害风险评估^[5]、采用成因分析法提出危险性评价指标体系,编制了中国城市水灾危险性评价图^[6];城市雨洪模拟,国外的模型主要有SWMM^[7]和Wallingford Model^[8],国内主要有城市雨水径流计算模型(SSCM)^[9]、城市雨水径流模型(CSYJM)^[10]和城市暴雨内涝数学模型^[11]等。

而对于济南市城市型水灾害的研究较少,主要集中在对于济南市区暴雨洪水灾害的成因及措施的定性分析^[12-15],定量分析主要集中在城市雨洪模型的模拟方面。如利用SWMM模型模拟不同雨洪利用措施下降雨径流过程,得出最佳雨洪利用模式^[16],或用MIKE21软件构建水动力模型对暴雨洪水进行数值模拟,研究区域内的水流情况及洪水淹没范围^[17]等。总之,上述研究对于济南市水灾害成因等的分析缺乏较为定量的分析,因此本文通过分析济南市城市型水灾害降水、地形、水文特征,尤其侧重降水序列特征的分析,运用百分位法和R/S分析法等方法从降水量和降水强度两方面进行定量分析,并在此基础上提出相关建议。此研究有利于正确认识城市型水灾害的影响因素,也可以为本市及其他城市(如海口、重庆等)提供理论与实践支撑。

1 研究区概况

济南市位于36°01′-37°32′N, 116°11′-117°44′E,面积8177 km²,南部为泰山山地,北部为黄河平原,正处于鲁中南低山丘陵区与鲁西北冲积平原带的过渡地区,地势南高北低,南北相差约1100 m。济南市属于暖温带半湿润季风气候,年平均气温13.5℃~15.5℃,降水量600~900 mm。同时,济南市区地表水系有黄河、小清河两大水系和湖泊,属黄河水系的有南、北沙河和玉符河,有卧虎山水库、锦绣川水库、玉清湖水库、鹊山水库等;属小清河水系的有腊山河、兴济河、全福河、大辛河、巨野河等,主要湖泊为大明湖和城市规划中的北湖。地下水主要指深层岩溶水,岩溶水因特殊地质构造影响,在市区出露成泉,主要有趵突泉、黑虎泉、珍珠泉、五龙潭4大泉群^[18]。

济南市现辖6区(市中区、历下区、天桥区、槐荫区、历城区、长清区)、3县(平阴县、济阳县、商河县)和1个县级市

(章丘市),但2001年之前,市区不包括长清县,在2001年6月撤县设区后,市区包括长清区。2012年,济南市人口达到609.21万人,生产总值为4812.68亿元。同时,济南市战略地位重要,它东通渤海,沟通韩国、日本等国家,西连中西部地区,南北连接华北、华东地区,而且又是环渤海经济圈和黄河流域的中心城市,交通便利,航空、铁路、公路一应俱全。尤其是公路建设,包括东西、南北纵贯的主干道、高架桥、立交桥、轨道交通线网以及快速公交系统,研究区概况见图1。

济南市相对较早的雨涝灾害出现于唐代,元代、明代、清代也都有雨涝灾害的记录。自解放至1990年,济南市共发生较大水灾16次^[19],随后1962年、1987年、2007年发生了不同程度的水灾害,其损失呈明显上升趋势^[12]。

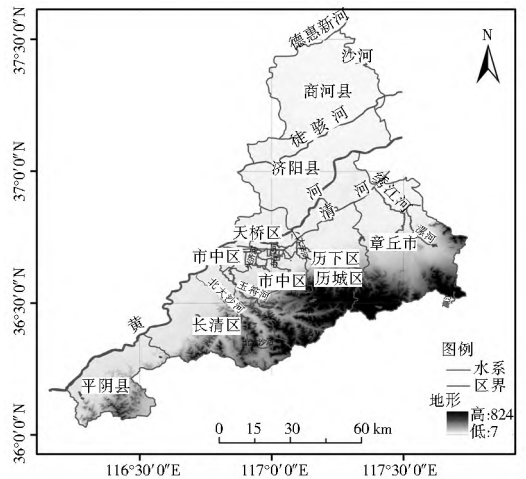


图1 济南市区域概况图

Fig. 1 Regional overview of Jinan City

2 数据来源和研究方法

本文1961年-2010年日降水数据来源于济南市气象站,其数据准确性经核实,可信度高;1992年-2012年全市降水量数据、年降水日数(≥0.1 mm)、年平均气温数据来源于1993年-2013年济南统计年鉴;城市化率数据来源于1984年-2013年济南统计年鉴和2008年-2013年山东省统计年鉴,暴雨灾害资料、济南市自然社会资料来源于中国知网、万方、读秀等数据库中与济南市水灾害相关的文献等。济南市土地利用的相关数据来源于济南市土地利用总体规划(1997年-2010年)和济南市土地利用总体规划(2006年-2020年)。

本文主要研究方法百分位法和R/S分析法。百分位法是从概率统计的角度来定义极端事件^[20],即把日降水量序列按升序排列,定义日降水量≥0.1 mm的子样本的第95个百分位值为极端降水阈值^[21-22]。R/S分析法是1965年英国学者Hurst提出的一种处理时间序列的分形结构分析方法^[23],本文主要用于研究降水序列变化过去与未来是否存在相同或相反的变化特征,着重揭示未来降水序列的变化特征^[24]。其原理如下:设时间序列{x(t)}, t=1, 2, ..., 对于任意正整数τ≥1,定义均值序列:

$$x_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} x(t) \quad (1)$$

累积离差X(t, τ)序列:

$$X(t, \tau) = \sum_{i=1}^t (x(i) - x_\tau) \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (2)$$

极差 R 序列: $R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau)$, 标准差 S 序列:

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (x(i) - x_\tau)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

引入无量纲比值 R/S , 对 R 进行重新标度, 经证实, 其结果满足下式:

$$R/S = (\alpha\tau)^H \quad (\alpha \text{ 为常数}) \quad (4)$$

H 即为 Hurst 指数。 H 取值区间为 $[0, 1]$, 当 $H = 0.5$ 时, 表示该降水序列是随机的, 各事件是随机的和不相关的; 当 $H > 0.5$ 时, 表示该降水序列未来的趋势与过去一致, H 越接近 1, 持续性越强, 未来的降水量整体变化趋势与过去的越接近; 当 $H < 0.5$ 时, 表示未来的总体趋势与过去相反, H 越接近 0, 反持续性越强^[25]。

3 城市型水灾害特征分析

纯粹自然条件下, 即不受人类影响的条件下, 就无所谓灾害了, 我们所说的灾害是相对于人类而言的, 即自然灾害是由自然事件或力量为主因造成的生命伤亡和人类社会财产损失的事件^[26]。灾害 (D) 是地球表层孕灾环境 (E)、致灾因子 (H)、承灾体 (S) 综合作用的产物^[27], 随着济南市城市化进程的加快, 人类活动对自然的干预大大加强, 因此, 在人类社会与自然生态系统相互作用下, 降水因素、地形因素和水文因素是导致济南市城市型水灾害的主要因素。

3.1 降水特征分析

3.1.1 济南市市区与济南全市降水量对比分析

由于 2001 年之前, 市区不包括长清县, 故本文首先计算 2001 年前、后 9 年市区年平均降水量的极差, 得到 2001 年后 9 年的年平均降水量极差约为前 9 年的 2 倍, 因此可以忽略区划因素对市区降水量数据的较大影响, 市区降水量数据是可以使用的。根据 1992 年-2012 年济南市区和全市年平均降水量, 得出济南市区年降水量为 732.7 mm, 济南全市年平均降水量为 675.9 mm, 济南市区年降水量较全市年降水量多出 56.8 mm。通过计算济南市区与济南全市降水量的增加比率, 并与济南市城市化率相比较, 见图 2。

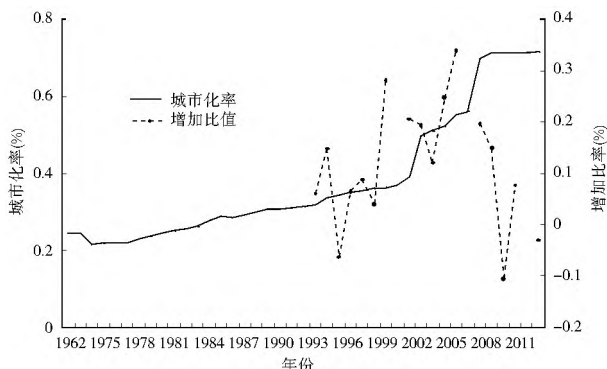


图 2 1992 年至 2012 年济南市区年降水量增加比率与济南市城市化率

Fig. 2 Comparison of increasing rate of annual precipitation and urbanization rate in Jinan from 1992 to 2012

由上图可知, 济南市城市化率总体呈上升趋势, 尤其是

2000 年后, 济南市城市化速度加快, 出现了两个高峰阶段, 分别为 2000 年-2003 年和 2004 年-2008 年, 2009 年后济南市城市化速度呈现缓慢增长时期。再来看济南市区相对于济南全市降水量的增加比率, 可以分为三个阶段, 第一阶段为 20 世纪 90 年代, 济南市区相对于济南全市降水量的增加比率处介于正负值之间, 其波动区间为 $[-0.06, 0.28]$; 第二阶段为 21 世纪初(约为 1999 年-2008 年), 这时期济南市区相对于济南全市降水量的增加比率都在正值区, 其波动区间为 $[0.12, 0.34]$; 第三阶段为 2009 年至今, 这时期其增加比率主要在负值区, 其波动期间为 $[-0.10, 0.08]$ 。由以上分析来看, 济南市城市化率与济南市区年降水量的增加比率变化趋势相近, 尤其是济南市城市化的高峰期(2000 年-2008 年)与 21 世纪初(约为 1999 年-2008 年), 同时, 2009 年后, 当济南市城市化率处于低速增长阶段时, 济南市区相对于济南全市降水量的增加比率也呈下降趋势, 甚至出现负值, 因此可以说, 济南市城市化率与济南市区降水量的增加比率在时间段上具有一致性。

同时, 也可以看出市区降水量(排除数据不全的 1992 年、2000 年、2006 年和 2011 年)除了 1995 年和 2009 年外, 在 20 年间基本大于全市降水量, 济南市降水量主要集中在市区, 而且在 1992 年至 2012 年间, 济南市降水量(包括市区降水量和全市降水量)呈现明显的波动状态, 相比之下, 济南市区降水量波动更明显。根据多年降水资料统计, 20 世纪 90 年代济南市市区降水量比全市多 53.9 mm, 21 世纪以来又在此基础上增加了 38.7 mm, 呈明显增多趋势。

在城市化背景下, 在气温方面, 本文选择济南市近 10 年来济南市区与济南全市的年平均气温及年降水日数 (≥ 0.1 mm) 进行比较, 见图 3。由图可知, 济南市区比济南全市的年平均气温高约 0.67 °C, 而相对于年降水日数来说, 济南全市的年降水日数波动较大, 究其原因, 这与济南市南部山区降水量较多不无关系。由此, 可以推断出济南市区降水偏多、气温偏高, 这两个主要气候因素的变化, 在很大程度上是由于济南市区城市化造成的。因此, 后面将侧重济南市区降水状况的分析。

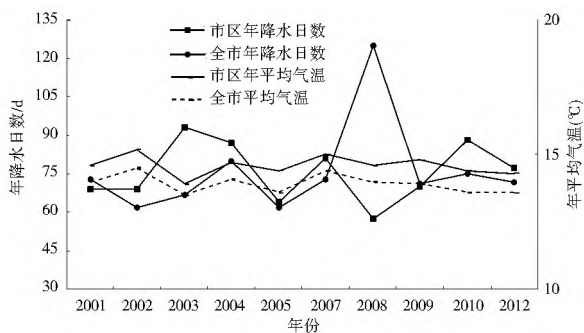


图 3 2001 年-2012 年济南市区与济南全市年平均气温及年降水日数 (≥ 0.1 mm) 比较

Fig. 3 Comparison of average annual temperature and annual precipitation days (≥ 0.1 mm) in Jinan from 2001 to 2012

3.1.2 济南市区降水量分析

在全球变化的大背景下, 全球气候变化所带来的极端事件同样也适用于区域, 而城市是区域变化最明显的地方, 城

- [J]. Journal of Geographical Sciences, 2003, 58 (Supplement): 1-10. (in Chinese)
- [23] 黄勇, 周志芳, 王锦国, 等. R/S 分析法在地下水动态分析中的应用[J]. 河海大学学报, 2002, 30(1): 83-87. (HUANG Yong, ZHOU Zhi fang, WANG Jin guo, et al. Application of R/S method to dynamic groundwater analysis[J]. Journal of Hohai University, 2002, 30(1): 83-87. (in Chinese)
- [24] 徐宗学, 李占玲, 史晓崑. 石羊河流域主要气象要素及径流变化趋势分析[J]. 资源科学, 2007, 29(5): 121-128. (XU Zong xue, LI Zhan ling, SHI Xiao kun. Long-term trends of major climatic variables and runoff in the Shiyang River Basin[J]. Resource Science, 2007, 29(5): 121-128. (in Chinese)
- [25] 潘雅婧, 王仰麟, 彭建, 等. 基于小波与 R/S 方法的汉江中下游流域降水量时间序列分析[J]. 地理研究, 2012, 31(5): 811-830. (PAN Ya qian, WANG Yang lin, PENG Jian , et al. Precipitation change in middle and lower reaches of Hanjiang River: based on wavelet analysis and R/S analysis[J]. Geography Research, 2012, 31(5): 811-830. (in Chinese)
- [26] 黄崇福. 自然灾害基本定义的探讨[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(5): 41-50. (HU ANH Chong fu. A discussion on basic definition of natural disasters[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(5): 41-50. (in Chinese)
- [27] 史培军. 灾害研究的理论与实践[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1991(自然灾害研究专辑): 37-42. (SHI Pei jun. Theory and practice of disaster study[J]. Journal of Nanjing University(Natural Sciences), 1991 (Album of Natural Disasters Research): 37-42. (in Chinese)
- [28] 郑昭佩. 恢复生态学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (ZHENG Zhao pei. Restoration Ecology Introduction[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [29] 侯艳晶. 快速城市化进程中济南南部山区土地利用/覆被变化研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2013. (HOU Yan jing. Rapid urbanization induced lucc in the southern mountainous region of Jinan City [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2013. (in Chinese)
- [30] 邓振华, 张晶, 于明洋, 等. 济南南部山区土地利用的时空变化分析[J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2010, 31(1): 69-79. (DENG Zheng hua, ZHANG Jing, YU Ming yang, et al. Spatio-temporal change of land use in south mountain of jinan [J]. Journal of Capital Normal University: Natural Science Edition, 2010, 31(1): 69-79. (in Chinese)
- [31] 孟庆斌, 曹升乐, 赵承忠. 济南防洪实践与探索[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. (MENG Qing bin, CAO Sheng le, ZHAO Cheng zhong. Practice and exploration of flood control in Jinan [M]. Beijing: China Water Power Press, 2008. (in Chinese)
- [32] 赵建, 张咏梅. 济南市城市水系及其变化研究[J]. 山东师范大学学报: 自然科学版, 2007, 22(1): 86-90. (ZHAO Jian, ZHANG Yong mei. Study on the changes structure and functions of the urban drainage system in Jinan City[J]. Journal of Shandong Normal University: Natural Science, 2007, 22(1): 86-90. (in Chinese)
- [33] 陈翠英, 娄山崇, 王军. 对济南市城市防洪的认识和思考[J]. 山东水利, 2006(1): 17-19. (CHENG Cui ying, LOU Shan chong, Wang Jun. Thought of flood control in Jinan [J]. Shandong Water Conservancy, 2006(1): 17-19. (in Chinese)
- [34] 李瑞青. 小清河流域防洪减灾对策研究[D]. 济南: 山东大学, 2009, 10. 20. (LI Rui qing. Study on flood control measures and mitigation of Xiaoqing River Basin [D]. Jinan: Shandong University, 2009, 10. 20. (in Chinese)
- [35] 安科, 郑聪. 济南市土地利用现状探析[J]. 山东国土资源, 2012, 28(5): 60-62. (AN Ke, ZHENG Cong. Study on present condition of land use in Jinan City [J]. Shandong Provincial Land & Resource, 2012, 28(5): 60-62. (in Chinese)

(上接第 666 页)

- [5] WANG Ce, FENG Yu jie, ZHAO Shan shan. A dynamic contaminant fate model of organic compound: A case study of Nitrobenzene pollution in Songhua River, China [J]. Chemosphere, 2012, 88(1): 69-76.
- [6] 孙少晨, 魏怀斌, 肖伟华, 等. 冰封期水动力水质模型在松花江水质污染事件中的应用[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(5): 1548-1553. (SUN Sha o chen, WEI Hua bin, XIAO Wei hua, et al. Application of the freezing period hydrodynamics and water quality model to water pollution accident in Songhua River [J]. Journal of Jilin University: Earth Science, 2011, 41(5): 1548-1553. (in Chinese)
- [7] SUN Sha o chen, XIAO Wei hua, ZHOU Zu hao WANG Hao. The Study and Application of Hydrodynamic Numerical Simulation Method in Cold Region [C]. 2010 Conference on Modern Hydraulic Engineering, 2010: 182-186.
- [8] LI Hu i min, ZHOU Xue zhi, CHEN Hai ping. Numerical simulation and field experiment validation of atmospheric pollution chemical accidents based on canopy model [J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 12: 30-37.
- [9] S N Lane, S C Reid, V Tayefi, et al. Reconceptualising coarse sediment delivery problems in rivers as catchment-scale and diffuse [J]. Geomorphology, 2008, 98(3/4): 227-249.
- [10] Weir jing, LIN Xue yu, SU Xiao si. Transport and fate modeling of nitrobenzene in groundwater after the Songhua River pollution accident [J]. Journal of Environmental Management, 2010, 90(11): 2378-2384.
- [11] LI Zong-lai, YANG Min, LI Dong. Nitrobenzene biodegradation ability of microbial communities in water and sediments along the Songhua River after a nitrobenzene pollution event [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20(7): 778-786.
- [12] YING Lan lan, HOU Xiyong, LU Xiao. Long-term impacts of land use change on non-point source pollution in the Dagujia River watershed of Shandong peninsula [J]. Knowledge Acquisition and Modeling, 2011, 2(131): 482-486.
- [13] L J Alvarez V zquez, A Mart nez, M E V zquez M ndez. Flow regulation for water quality restoration in a river section: Modeling and control [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2010, 234: 1267-1276.
- [14] Atul Kumar, Dilip Kumar Jaiswal, Naveen Kumar. Analytical solutions to one-dimensional advection-diffusion equation with variable coefficients in semi-infinite media [J]. Journal of Hydrology, 2010, 380(3/4): 330-337.
- [15] Z HANG Bo, QIN Yu, HUANG Ming xiang. SD-GIS based temporal-spatial simulation of water quality in sudden water pollution accidents [J]. Computers & Geosciences, 2011, 37(7): 874-882.