

中小城市不同功能区降雨径流氮污染特征及其对水体的影响*

李飞星¹ 王舒馨¹ 史坤博¹ 吕玉甲¹ 荣 琨²

(1.兰州大学资源环境学院,甘肃 兰州 730000;2.滨州学院资源环境系,山东 滨州 256600)

摘要 研究了典型中小城市滨州的降雨径流中的氮污染特征及其对水体污染的影响。结果表明,滨州市城区不同功能区降雨径流总无机氮(TIN)、氨氮、硝酸盐氮和亚硝酸盐氮质量浓度分别为0.22~10.19、0.01~1.73、0~6.61、0~1.84 mg/L。部分降雨径流样品的 TIN 已经超过了《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中总氮的Ⅴ类水体标准限值。各形态无机氮浓度在不同功能区存在显著差异。TIN 浓度均值表现为:农业区>文教区>工业区>居住区>商业区>交通要道。降雨径流中的氮元素主要以硝酸盐氮形式存在。河流中 TIN 主要来自氨氮,其浓度水平与降雨径流相当。因此,降雨径流的氮污染对河流有重要影响,应引起重视。

关键词 非点源 中小城市 降雨径流 氮 污染特征 滨州

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2017.02.005

Nitrogen pollution characteristics of rainfall runoff and its impact on river water in different functional areas of small-medium city LI Feixing¹, WANG Shuxin¹, SHI Kunbo¹, LYU Yujia¹, RONG Kun². (1. College of Earth Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou Gansu 730000; 2. Department of Resources and Environment, Binzhou University, Binzhou Shandong 256600)

Abstract: Binzhou is a typical small-medium city in China. Nitrogen pollution characteristics of rainfall runoff and its impact on river water in different functional areas of Binzhou were investigated. Results showed that mass concentrations of total inorganic nitrogen (TIN), ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) and nitrite nitrogen ($\text{NO}_2^-\text{-N}$) in rainfall runoff of Binzhou were 0.22~10.19, 0.01~1.73, 0~6.61, 0~1.84 mg/L, respectively. TIN of several rainfall runoff samples had exceeded total nitrogen class V standard of "Environmental quality standards for surface water" (GB 3838-2002). The forms of inorganic nitrogen in different functional areas had great difference. TIN average concentration revealed agricultural area>cultural area>industrial area>residential area>commercial area>transportation artery. The main nitrogen form in the rainfall runoff was $\text{NO}_3^-\text{-N}$ while that in river $\text{NH}_4^+\text{-N}$. The concentrations of TIN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in the river were at the same level as that in rainfall runoff, indicating that nitrogen pollution in rainfall runoff had significant influence on river water.

Keywords: non-point source; small-medium city; rainfall runoff; nitrogen; pollution characteristic; Binzhou

城市降雨径流污染是指大气污染物随雨水冲刷与地面污染物汇合后进入水体的过程^[1]。近年来,城市点源污染已得到较好地控制,非点源污染已成为城市水体水质恶化的主要原因^{[2]2634, [3]625}。国外从20世纪60年代开始就关注城市降雨径流污染引起的地表水非点源污染问题^[4-5],主要研究了城市降雨径流的水质特性、污染物时空分布、径流模型、对地表水水质的影响及污染控制措施等方面^[6-12]。1990年,美国环境保护署(USEPA)公布的不同污染物对河流污染贡献比中,城市降雨径流贡献率占到9%^[13]。1993年,USEPA更是把城市降雨径流列

为导致全美河流和湖泊污染的第三大污染源^[14]。我国对城市降雨径流污染的研究主要集中于北京^[15]、上海^{[16]17}、西安^[17]、武汉^[18]、厦门^{[3]628}等大城市,而针对中小城市降雨径流污染的研究很少。中小城市占我国城市总数的近4/5^[19]。与大城市相比,中小城市具有明显不同的社会经济运作机制,其污染特征也不同,因此有必要对中小城市的降雨径流污染问题给予充分关注。

滨州市位于黄河三角洲腹地,经济发达,城区人口50多万,面积1 041 km²,是我国典型的中小城市^[20]。2015年的“中国最佳表现城市”中,滨州市在

第一作者:李飞星,男,1991年生,硕士研究生,主要从事水污染控制、环境与健康方面的研究。

* 国家基础科学人才培养基金资助项目(No.J1210065)。



注:1#、2#、3#为居住区;4#、5#、6#为农业区;7#、8#、9#为文教区;10#、11#、12#为商业区;13#、14#、15#为工业区;16#、17#、18#为交通要道;19#、20#、21#为河流。

图1 采样点分布
Fig.1 Distribution of sampling sites

232个中小城市中位列第42位^[21]。近20年来,滨州经济发展迅速,但环境污染问题也日益突出^[22]。大气降尘、城市交通、建筑活动等不仅影响空气质量,还会通过降雨径流污染水体,影响水环境质量^[23]。因此,本研究对滨州城区不同功能区降雨径流样品进行采集,分析了其氮污染特征及对城区水体的影响,以期促进我国中小城市降雨径流污染的研究,为中小城市非点源污染控制与管理提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2014年5月10日,雨天,降雨量为193 mm,是5月份降雨量最大的一天。在滨州城区的居住区、农业区、文教区、商业区、工业区、交通要道6个具有代表性的功能区内选择汇水面积较大的雨水口汇水路面采集降雨径流样品,降雨后立即采集城区3条河流的样品作为对比,共设21个采样点,如图1所示。

由于降雨径流中的污染物存在初期冲刷效应,故采用“前密后疏”的采样方式^[23-25]。降雨持续时间为165 min,从降雨开始每隔5 min取1次样至30 min,共采集6个;之后每隔10 min取1次样至60 min,共采集3个;然后每隔20 min取1次样至120 min,共采集3个;再过45 min后降雨结束,采集1个样品,共采集1个。将各时间段采集的降雨径流样品混合后保存于500 mL聚乙烯瓶中,运回

实验室,24 h内完成样品分析。

降雨结束后,在河流表面采集河流样品,保存于500 mL聚乙烯瓶中,运回实验室,24 h内完成样品分析。

1.2 样品分析

样品经滤纸过滤后用0.45 μm微孔滤膜过滤,氨氮采用《水质 氨氮的测定 气相分子吸收光谱法》(HJ/T 195—2005)测定,硝酸盐氮采用《水质 硝酸盐氮的测定 气相分子吸收光谱法》(HJ/T 198—2005)测定,亚硝酸盐氮采用《水质 亚硝酸盐氮的测定 气相分子吸收光谱法》(HJ/T 197—2005)测定,总无机氮(TIN)为氨氮、硝酸盐氮和亚硝酸盐氮之和。分析仪器为GMA3360型气相分子吸收光谱仪。

2 结果与讨论

2.1 各降雨径流采样点中的氮污染

降雨径流对氮的迁移有重要影响^[24]。降雨径流中有机氮的含量很低,总氮大部分都是无机氮,TIN近似等于总氮^[25-26]。因此,本研究重点分析氨氮、硝酸盐氮和亚硝酸盐氮等不同形态的无机氮,结果如图2所示。根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),V类水体的总氮和氨氮限值均为2.00 mg/L。由图2可见,各降雨径流采样点中的TIN质量浓度为0.22~10.19 mg/L,氨氮为0.01~1.73 mg/L,硝酸盐氮为0~6.61 mg/L,亚硝酸盐氮为0~1.84 mg/L。大部分样品的TIN质量浓度都低于2.00 mg/L,但有3个样品超过了2.00 mg/L,其

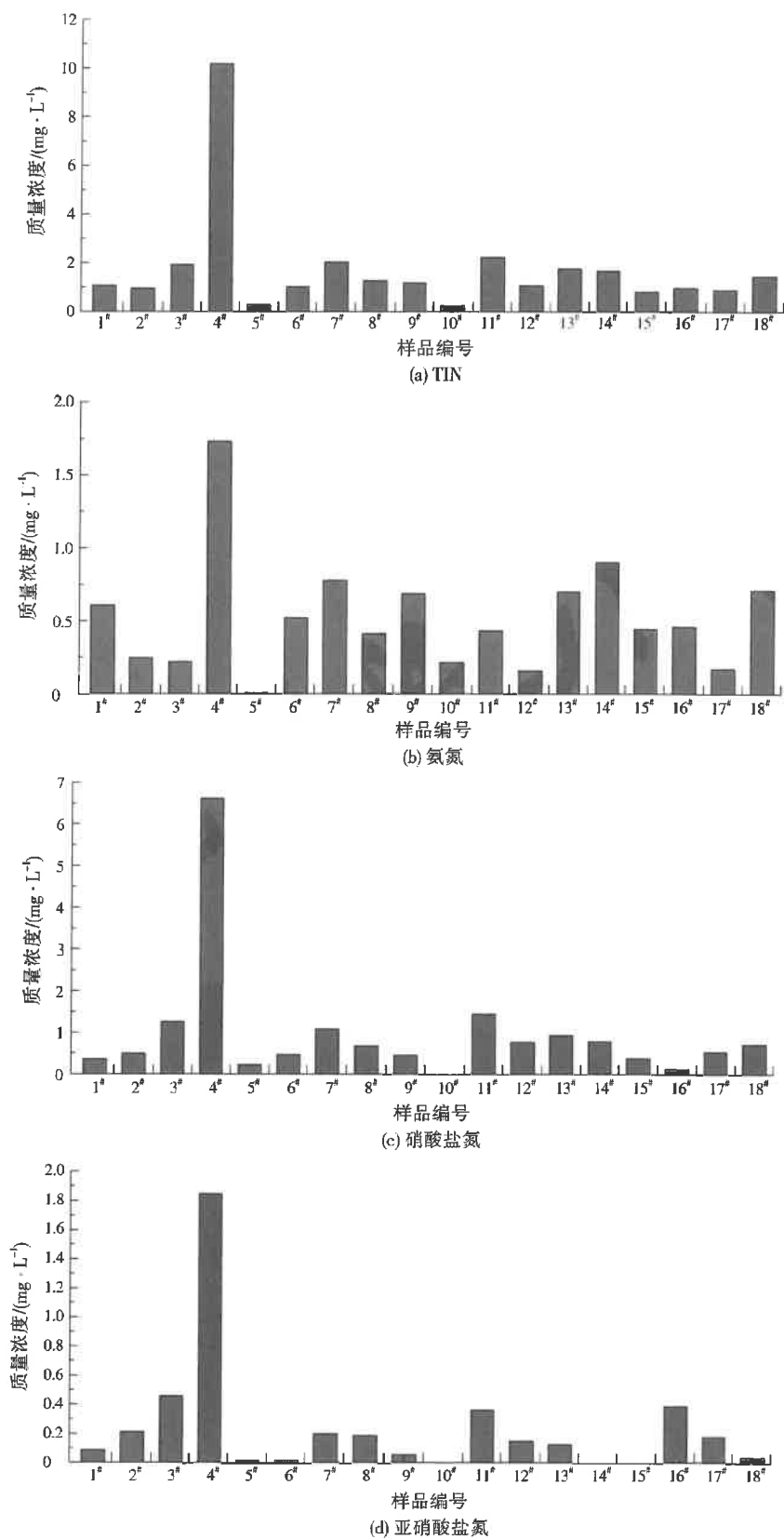


图2 各降雨径流采样点的不同形态氮质量浓度

Fig.2 Mass concentrations of different nitrogen forms in sampling sites of rainfall runoff

中有 1 个样品高达 10.19 mg/L;大部分样品氨氮质量浓度都低于 1.00 mg/L,但有 1 个样品已经接近 2.00 mg/L。可见,目前滨州城区的降雨径流进入水体可能导致水体氮污染,虽然水体会对降雨径流有一定的稀释作用,不至于很严重,但随着城市化的不断推进,若不加强控制和管理,降雨径流引起的污染势必会增强。虽然 GB 3838—2002 并没有对地表水中硝酸盐氮和亚硝酸盐氮进行限定,但两者均有可能导致水体富营养化,特别是亚硝酸盐还对人体有毒。因此,分析了硝酸盐氮和亚硝酸盐氮,结果发现,大部分样品的硝酸盐氮质量浓度都低于 2.00 mg/L,只有 4# 样品达到了 6.61 mg/L;大部分样品的亚硝酸盐氮质量浓度都低于 0.50 mg/L,只有 4# 样品达到了 1.84 mg/L。TIN 浓度也是 4# 最高,因此后续研究应重点关注 4# 采样点的氮污染来源。

2.2 不同功能区降雨径流中的氮污染

降雨径流中氮的可能来源有大气干湿沉降、腐烂物质、化肥施用、机动车尾气排放及粪便等^[27],受到降雨强度、活动人群、车流量、排放的污染物种类等诸多因素的影响^{[3]627}。不同功能区在城市中所起的作用不同,导致各功能区降雨径流中氮污染差异较大。滨州城区不同功能区降雨径流中各形态的无机氮浓度如表 1 所示。不同功能区降雨径流中 TIN 浓度均值:农业区>文教区>工业区>居住区>商业区>交通要道;氨氮浓度均值:农业区>工业区>文教区>交通要道>居住区>商业区;硝酸盐氮浓度均值:农业区>商业区=文教区>居住区>工业区>交通要道;亚硝酸盐氮浓度均值:农业区>居住区>交通要道>商业区>文教区>工业区。可见,农业区降雨径流中的氮污染最严重。滨州的农业区多分布在城郊,传统化肥以及有机肥料施用是氮的主要来源;工业区主要分布在城区周边,涵盖纺织服装、石油化工、机械制造、建筑建材、能源环保、生物科技、电力供应等产业;文教区、居住区和商业区多

集中于城区,这些区域人口众多,车辆也多,氮污染主要来源于人们的生活;交通要道车流量大,汽车尾气排放的 NO_x 很容易造成降雨径流中氮污染。

从表 1 分析氮的形态组成,TIN 主要由硝酸盐氮和氨氮构成,尤其是硝酸盐氮,亚硝酸盐氮含量很低,说明滨州城区降雨径流中氮污染多以硝酸盐氮形态存在,与杨德敏等^{[3]628}的研究结果一致。亚硝酸盐氮是氮循环的中间产物,在水中很不稳定,极易被氧化为硝酸盐氮,因此亚硝酸盐氮在降雨径流样品中含量很低。

王吉苹等^[28]应用地理信息系统(GIS)技术研究了厦门岛内降雨径流的总氮污染特征,发现总氮浓度:道路>商住区>工业区>交通用地>文教区>滩涂>居住区>公园>绿地>林地。杨德敏等^{[3]626}发现,厦门降雨径流总氮浓度:工业区>商住区>文教区>居住区。蒋海燕等^{[16]16}研究了上海市区和郊区不同功能区内降水径流中氮的特征,发现无机氮浓度:工业区>交通要道>居住区>商业区。本研究的结果与大城市的研究结果差异较大,说明中小城市降雨径流氮污染特征可能与大城市不同,值得关注。

2.3 降雨径流样品与河流样品对比

河流样品中硝酸盐氮和亚硝酸盐氮含量低于检出限,因此 TIN 和氨氮浓度相同,结果如表 2 所示。总体而言,河流样品的 TIN 和氨氮浓度水平与降雨径流数量级相当,所以降雨径流的氮污染对河流有重要影响。与降雨径流不同的是,河流中 TIN 基本都是氨氮,其质量浓度均值为 2.09 mg/L,属于劣 V 类水体。氨氮易被硝化细菌转化为硝酸盐氮,所以正常水体中氨氮含量通常小于硝酸盐氮。但本研究中河流样品氨氮浓度过高,说明河流受到了污染,有研究表明高浓度氨氮可能是人畜排泄物及生活污水所致^[29]。滨州城区内的水体多为“死水”,流动性差,自净能力有限,可能有大量生活污水及部分高氨氮工业废水不加处理直接排入。

表 1 不同功能区降雨径流中不同形态氮质量浓度
Table 1 Mass concentrations of different nitrogen forms in different functional areas of rainfall runoff mg/L

功能区	TIN		氨氮		硝酸盐氮		亚硝酸盐氮	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
工业区	0.82~1.76	1.42	0.44~0.99	0.68	0.38~0.93	0.70	0~0.13	0.04
商业区	0.22~2.24	1.18	0.16~0.43	0.27	0~1.45	0.74	0~0.36	0.17
居住区	0.96~1.93	1.32	0.22~0.61	0.36	0.36~1.26	0.71	0.09~0.46	0.25
文教区	1.19~2.06	1.51	0.41~0.78	0.63	0.45~1.08	0.74	0.06~0.20	0.15
农业区	0.25~10.19	3.82	0.01~1.73	0.75	0.22~6.61	2.44	0.02~1.84	0.63
交通要道	0.90~1.47	1.11	0.17~0.71	0.45	0.11~0.72	0.46	0.04~0.39	0.20

表2 河流样品中不同形态氮质量浓度
Table 2 Mass concentrations of different nitrogen forms in river mg/L

氮形态	19#	20#	21#	均值
TIN	2.92	0.21	3.15	2.09
氨氮	2.92	0.21	3.15	2.09

3 结论

(1) 滨州城区不同功能区各采样点降雨径流中 TIN、氨氮、硝酸盐氮和亚硝酸盐氮的质量浓度分别为 0.22~10.19、0.01~1.73、0~6.61、0~1.84 mg/L。部分降雨径流样品的 TIN 已经超过了 GB 3838—2002 中总氮的 V 类水体标准限值。

(2) 不同功能区降雨径流中 TIN 浓度均值: 农业区>文教区>工业区>居住区>商业区>交通要道, 主要以硝酸盐氮形态存在。

(3) 河流样品的 TIN 和氨氮浓度水平与降雨径流数量级相当, 所以降雨径流的氮污染对河流有重要影响。

参考文献:

- [1] 李养龙, 金林. 城市降雨径流水质污染分析[J]. 城市环境与城市生态, 1996, 9(1): 55-58.
- [2] 周栋, 陈振楼, 毕春娟, 等. 温州城市降雨径流磷的负荷及其初始冲刷效应[J]. 环境科学, 2012, 33(8).
- [3] 杨德敏, 曹文志, 陈能汪, 等. 厦门城市降雨径流氮、磷污染特征[J]. 生态学杂志, 2006, 25(6).
- [4] FIELD R, PITT R E. Urban storm-induced discharge impacts: US Environmental Protection Agency research program review [J]. Water Science and Technology, 1988, 22(10/11): 1-7.
- [5] NOVOTNY V, OLEM H. Water quality: prevention, identification and management of diffuse pollution[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1994.
- [6] BRAUNE M J, WOOD A. Best management practices applied to urban runoff quantity and quality control[J]. Water Science and Technology, 1999, 39(12): 117-121.
- [7] SANSALONE J J, KORAN J M, SMITHSON J A, et al. Physical characteristics of urban roadway solids transported during rain events[J]. Journal of Environmental Engineering, 1998, 124(5): 427-440.
- [8] LEE J H, BANG K W. Characterization of urban storm-water runoff[J]. Water Research, 2000, 34(6): 1773-1780.
- [9] GROMAIRE MERTZ M C, GARNAUD S, GONZALEZ A, et al. Characterization of urban runoff pollution in Paris[J]. Water Science and Technology, 1999, 39(2): 1-8.
- [10] GRUM M, AALDERINK R H. A statistical approach to urban runoff pollution modelling[J]. Water Science and Tech-

- nology, 1997, 36(5): 117-124.
- [11] DAVIS A P, HUNT W F, TRAVER R G, et al. Bioretention technology: overview of current practice and future needs[J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, 135(3): 109-117.
- [12] DIBLASI C J, LI H, DAVIS A P, et al. Removal and fate of polycyclic aromatic hydrocarbon pollutants in an urban stormwater bioretention facility[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(2): 494-502.
- [13] USEPA. Meeting the environmental challenge[R]. Washington, D.C.: USEPA, 1990.
- [14] 王和意, 刘敏, 刘巧梅, 等. 城市降雨径流非点源污染分析与研究进展[J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(6): 283-285.
- [15] 李立青, 吕书丛, 朱仁肖, 等. 北京市新建城区不透水地表径流 N、P 输出形态特征研究[J]. 环境科学, 2012, 33(11): 3760-3767.
- [16] 蒋海燕, 刘敏, 顾琦, 等. 上海城市降水径流营养盐氮负荷及空间分布[J]. 城市环境与城市生态, 2002, 15(1).
- [17] 陈莹, 赵剑强, 胡博. 西安市城市主干道路面径流污染及沉淀特性研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(2): 331-335.
- [18] 赵建伟, 单保庆, 尹澄清. 城市旅游区降雨径流污染特征——以武汉动物园为例[J]. 环境科学学报, 2006, 26(7): 1062-1067.
- [19] 白津夫, 袁晓勤, 李学锋, 等. 中国中小城市发展报告(2014) [R]. 北京: 中国城市经济学会中小城市经济发展委员会, 2014.
- [20] 郭晓琳. 滨州——环渤海经济圈依河傍海的美丽城市[J]. 中国地名, 2014(6): 69.
- [21] PERRY W, MICHAEL C Y. Best-performing cities China 2015[R]. Santa Monica: Milken Institute, 2015.
- [22] 李芸, 刘红心, 付云峰, 等. 滨州市城区水环境现状及治理对策[J]. 山东水利, 2011(7): 61-62.
- [23] 常静, 刘敏, 许世远, 等. 上海城市降雨径流污染时空分布与初始冲刷效应[J]. 地理研究, 2006, 25(6): 994-1002.
- [24] 祁莹莹. 城市降雨径流氮污染特征与生态箱净水技术研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2012.
- [25] 周玉文, 汪明明, 赵树旗, 等. 城市地表径流中营养物质来源的研究[R]. 北京: 《给水排水》编辑部, 2005.
- [26] 何强, 彭述娟, 王书敏, 等. 不同下垫面暴雨径流氮赋存形态分布特性及控制技术[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(5): 141-147.
- [27] 黄金良, 杜鹃飞, 欧志丹, 等. 澳门城市小流域地表径流污染特征分析[J]. 环境科学, 2006, 27(9): 1753-1759.
- [28] 王吉辛, 朱木兰. 厦门城市降雨径流氮磷非点源污染负荷分布探讨[J]. 厦门理工学院学报, 2009, 17(2): 57-61.
- [29] XING Guangxi, CAO Yacheng, SHI Shulian, et al. N pollution sources and denitrification in waterbodies in Taihu Lake region[J]. Science in China: Series B Chemistry, 2001, 44(3): 304-314.

编辑: 陈杨超 (收稿日期: 2016-03-31)