

厦门城市降雨径流氮、磷污染特征^{*}

杨德敏^{1,2} 曹文志^{1,*} 陈能汪¹ 王吉苹¹ 徐玉裕¹

(¹ 厦门大学环境科学研究中心近海海洋环境科学国家重点实验室, 厦门 361005; ² 佛山市顺德区农产品质量监督检验测试中心, 佛山 528333)

摘要 以厦门岛为研究对象, 通过收集代表性样点的降雨径流水样, 研究了厦门城市降雨径流中氮、磷浓度及输出特征。结果表明, 来源不同的城市降雨径流中氮、磷浓度差异较大, 溶解态总氮、硝态氮、氨态氮与总磷的含量分别为 1.96~6.77、0.62~4.89、0.35~1.18 和 0.04~0.66 mg·L⁻¹。降雨过程中氮、磷浓度总体上呈下降趋势, 氮浓度波动较大, 磷相对稳定。城市降雨径流氮、磷污染受降雨强度、车流量等多种因素影响。城市道路、商住区及工业区径流中氮、磷浓度较高, 是城市非点源污染的主要来源, 因此对这些区域应重点控制管理。

关键词 城市降雨径流, 氮、磷污染, 厦门

中图分类号 X522 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2006)06-0625-04

Nitrogen and phosphorus pollution from urban stormwater runoff in Xiamen City. YANG Demin^{1,2}, CAO Wenzhi¹, CHEN Nengwang¹, WANG Jiping¹, XU Yuyu¹ (¹ State Key Laboratory of Marine Environmental Science Environmental Science Research Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China; ² Supervises & Tests Center of Primary Products of Shunde District, Foshan 528333, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(6): 625~628.

In this study, the stormwater samples of 4 storm events occurred in April and May 2005 were collected from different representative sites including road, roof, and residential, commercial and industrial districts in Xiamen Island. All the samples were delivered to laboratory within 24 h, and their NO₃⁻-N, NH₄⁺-N, dissolved total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) contents were analyzed. The water quality data showed there was a significant difference in the nitrogen and phosphorous concentrations of the stormwater runoff from different sites with the mean value of TN, NO₃⁻-N, NH₄⁺-N and TP ranged as 1.96-6.77, 0.62-4.89, 0.35-1.18 and 0.04-0.66 mg·L⁻¹, respectively. In general, the nitrogen and phosphorus concentrations decreased gradually in the process of precipitation due to water dilution, but the nitrogen concentration fluctuated more intensively than phosphorus. Many factors such as precipitation intensity, land cover and vehicle exhaust affected the patterns of nitrogen and phosphorus transportation. The urban stormwater runoff collected from road and commercial and industrial districts contributed a higher nutrient loading, and thus the management of urban stormwater runoff should be focused on these sites.

Key words urban stormwater runoff, nitrogen and phosphorus pollution, Xiamen.

1 引言

城市降雨径流污染是指地表沉积物与大气沉降物等在降雨冲刷作用下进入水体, 造成城市水环境质量下降的过程, 它包括输入(污染物积聚)、转化(污染物冲刷)、输出(污染物输送)等 3 个子系统^[2]。20 世纪 60 年代以来, 国外首先注意到了城市降雨径流污染导致地表水质退化的问题^[10, 14], 并在城市降雨径流的水质特性、对地表水环境的影响评价、模型模拟以及污染控制措施等方面进行了大量的工作^[9, 11~13]。我国城市人口增加很快, 城市降雨径流污染不容忽视。目前对城市降雨径流污染特

征的研究不多, 且监测指标主要以 COD、SS 和重金属为主^[1, 5, 6], 仅有上海、珠海等城市对富营养化元素氮、磷进行过监测^[3, 7, 8]。了解城市降雨径流水质特性、污染输出特征是制定城市降雨径流污染控制措施的基础。本文以地处南亚热带气候带的厦门市为研究对象, 比较其城市街道、庭院和屋面 3 种降雨径流中氮、磷营养盐的平均浓度, 着重分析城市降雨径流氮、磷的输出特征, 为城市非点源污染负荷定量估算及控制措施制定提供科学依据。

* 国家自然科学基金资助项目(40301045)。

** 通讯作者

收稿日期: 2005-09-29 改回日期: 2006-01-20

2 材料与方法

2.1 样品采集

厦门市地处我国东南沿海——福建省东南部九龙江入海处。全市由厦门岛、鼓浪屿及内陆九龙江北岸沿海部分地区和同安组成，其主体厦门岛面积约 120 km²。受亚热带季风气候影响，厦门温和多雨，多年平均降雨量 1 100 mm 左右，其中 4~10 月雨量约占全年雨量的 70%。本研究在厦门岛内的厦门大学、湖里工业区、前埔居住区及环岛路选取城市街道、庭院和屋面 3 种城市降雨径流的代表性监测点，于 2005 年 4~5 月间的降雨天(表 1)，用聚乙烯瓶在各采样地点收集径流水样。同时每场降雨采集雨水样品，用于对比分析。

表 1 降雨事件的基本资料

Tab. 1 Profile of the storm events

降雨日期 (月-日)	降雨历时 (h)	雨量 (mm)	降雨强度 (mm·h ⁻¹)	备注
4-12	2.5	2.7	1.09	监测前 8 h 雨量小, 地表无产流
4-28	2.0	13.1	6.53	降雨中期(1 h)停雨 20 min 后继续降雨
5-5	1.7	12.7	7.46	降雨初期雨量集中, 后期雨量小
5-13	0.5	1.9	3.73	降雨集中, 历时短

注: 2005 年。

2.2 样品分析

采集的水样于 24 h 内用 0.45 μm 微孔滤膜过滤后，对水样中的氨态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、溶解态总氮(TN)和总磷(TP)分别用纳氏试剂光度法、紫外分光光度法和过硫酸钾消解-紫外分光光度法、钼锑抗分光光度法进行测定^[4]。无机氮(IN)为 NH₄⁺-N 与 NO₃⁻-N 之和，有机氮(ON)为 TN 与 IN 之差。

表 2 厦门城市降雨径流监测

Tab. 2 Water quality data for urban stormwater runoff from various sources

代码	样点类别	总氮 (mg·L ⁻¹)		硝氮 (mg·L ⁻¹)		氨氮 (mg·L ⁻¹)		总磷 (mg·L ⁻¹)		样品数
		浓度范围	$\bar{x} \pm SD$							
I	居住区	1.54~2.41	1.96±0.32	0.29~1.10	1.10±0.29	0.04~0.35	0.35±0.04	0.21~0.24	0.23±0.01	6
II	商住区	0.70~6.27	3.42±1.58	0.80~4.24	2.00±0.83	0.31~1.80	0.92±0.38	0.09~0.70	0.35±0.14	17
III	工业区	2.61~6.55	4.39±1.46	1.47~3.28	2.28±0.71	0.41~1.05	0.69±0.24	0.01~0.76	0.17±0.29	5
IV	文教区	1.16~5.09	3.10±1.36	1.15~3.61	1.96±0.68	0.30~1.85	0.88±0.48	0.07~0.41	0.30±0.10	15
V	屋面径流 1 (琉璃瓦)	0.90~3.81	1.97±0.80	0.42~1.00	0.62±0.14	0.25~1.37	0.71±0.31	0.01~0.39	0.11±0.12	15
VI	屋面径流 2 (油毡布)	0.80~12.30	6.77±3.22	0.72~9.82	4.89±2.77	0.46~1.29	0.74±0.24	0.19~1.20	0.66±0.36	14
VII	主干道 (沥青)	1.12~4.07	2.19±0.86	0.78~1.36	1.86±0.31	0.41~0.54	0.49±0.05	0.24~0.34	0.27±0.04	7
VIII	主干道 (水泥)	2.70~5.52	4.08±1.00	1.35~3.55	2.22±0.83	0.56~1.96	1.15±0.51	0.02~0.07	0.04±0.02	3
IX	次干道 (水泥)	4.11~4.50	4.31±0.16	2.55~2.60	2.58±0.02	0.73~1.62	1.18±0.36	0.08~0.50	0.29±0.17	2
X	雨水	0.98~2.61	1.54±0.63	0.27~1.01	0.57±0.26	0.31~1.17	0.49±0.28	0.01~0.06	0.03±0.02	6

3 结果与分析

3.1 降雨径流的污染物平均浓度

厦门城市降雨径流 4 次监测结果见表 2。不同来源城市降雨径流中的氮、磷浓度差异较大。TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 与 TP 的平均浓度分别为 1.96~6.77、0.62~4.89、0.35~1.18 和 0.04~0.66 mg·L⁻¹。上海城市不同功能区降水径流中 TIN(总无机氮)、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 的平均浓度分别为 4.11~11.92、2.41~4.13 和 0.73~2.43 mg·L⁻¹^[8]，而 TP 为 0.02~1.05 mg·L⁻¹^[7]；珠海地表径流污染物 TN、NH₄-N 和 TP 的平均浓度分别为 4.92~8.29、3.15~5.05 和 0.41~0.83 mg·L⁻¹^[3]。韩国城市住宅区与工业区降雨径流中的 TKN(凯氏氮)、NO₃⁻-N 与 TP 的平均浓度分别为 0.01~5.43、0.1~47.2 和 0.1~22.4 mg·L⁻¹^[13]。与这 3 个城市相比，厦门城市降雨径流中氮、磷浓度比韩国、上海的低，与珠海的相近。研究表明，目前厦门市城市降雨径流引起的氮、磷污染尚不属于最严重，但随着城市人口的增加，降雨径流的污染负荷必然增加。

从表 2 可看出，城市道路、商住区及工业区径流中氮、磷浓度高，是城市非点源污染的主要来源。同时，各样点的浓度标准差也存在较大差别，说明不同类别降雨径流的氮、磷浓度变化幅度不尽相同。

厦门城市降雨径流中的氮、磷浓度分类对比见图 1。由图 1 可见，庭院径流总氮的大小排列为：工业区>商住区>文教区>居住区，总磷则是商住区>文教区>居住区>工业区。工业区的氮浓度较高，是由于工厂废气对城市降雨径流的氮污染具有

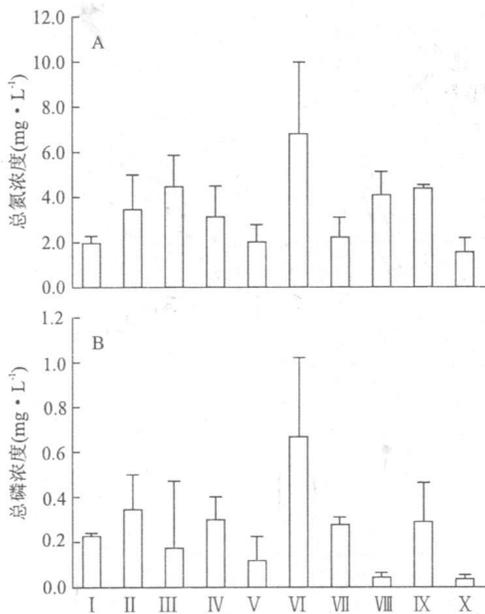


图1 厦门城市降雨径流氮、磷浓度分类对比
 Fig. 1 Comparison of nitrogen and phosphorus concentration in urban stormwater runoff from various sources of Xiamen City
 I 为居住区, II 为商住区, III 为工业区, IV 为文教区, V 为屋面径流 1, VI 为屋面径流 2, VII 为主干道-沥青, VIII 为主干道-水泥, IX 为次干道-水泥, X 为雨水。下同。

较大贡献; 商住区、文教区与居住区的磷浓度高于工业区, 是由于生活污染较大所致。屋面径流 2 的氮、磷浓度在所有样点类别中均处于最高水平, 是由于部分屋面使用油毡布影响了城市降雨径流的氮、磷污染。屋面径流 1 的氮浓度较低, 且与雨水浓度非常接近, 反映了琉璃瓦片屋面的径流在城市降雨径流的氮污染中贡献不大。路面径流总氮浓度大小顺序是次干道水泥路面> 主干道水泥路面> 主干道沥青路面, 总磷浓度大小顺序是次干道水泥路面> 主干道沥青路面> 主干道水泥路面。主干道与次干道水泥路面的氮浓度均高于沥青路面, 沥青路面的磷的浓度与次干道水泥路面较接近, 而水泥路的交通量大于沥青路, 说明汽车尾气排放对城市道路降雨径流的氮污染影响较大, 而对磷污染影响较小。

各类城市降雨径流中氨态氮、硝态氮与有机氮的组成见图 2。硝态氮在总氮中比例基本上都超过 50%, 说明城市降雨径流的氮污染多数是以硝态氮形态输出。居住区、工业区与主干道沥青路面的径流中有机氮较高, 这与其自身污染物排放特点有关。

综合以上分析, 城市降雨径流的流氮、磷污染在各类样点间差异较大, 径流中氮、磷浓度的高低受到车流量、下垫面等多种因素的影响。其中, 污染物排放状况是决定因素。

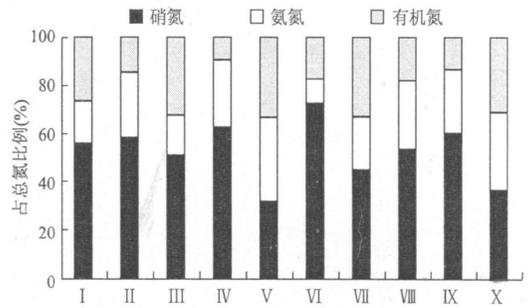


图2 厦门城市降雨径流各形态氮分类对比
 Fig. 2 Comparison of various forms of nitrogen in urban stormwater runoff from various sources of Xiamen City

3.2 城市降雨径流的氮、磷输出特征

降雨强度的改变径流中氮、磷浓度出现相应的变化(图 3)。由图 3 可以看出, 总磷浓度随降雨过程的变化比氮的变化小。图 3 的 A、B 与 E、F 分别是商住区与屋面径流 1 在不同降雨条件下的氮、磷浓度的变化, B、C、D、E 是同一场降雨中的不同采样地点的氮、磷浓度的变化。商住区在 2005 年 4 月 12 日的降雨中, 氮、磷浓度随降雨过程先升后降。在 4 月 28 日的降雨中, 氮浓度波动较大, 而总磷的浓度基本保持不变。从两场降雨的强度来看, 后一场降雨强度较大, 且在降雨约 1 h 后停雨 20 min, 总氮与无机氮浓度明显受降雨强度变化带来的影响, 水质有很大的变化。屋面径流 1 在 2005 年 4 月 28 日与 5 月 5 日的 2 场降雨中, 总磷浓度都基本保持不变, 总氮与无机氮浓度随降雨过程的变化有所不同。前者随降雨而下降, 而后者在降雨历时 20 min 前有所下降, 而 20 min 后有所上升, 约 30 min 后浓度已无太大变化。琉璃瓦屋面在暴雨时的水质变化波动较小, 磷浓度较低, 随着降雨的进行氮、磷浓度较快地达到稳定水平。

从同一场降雨的 4 个不同采样点来看(图 3B、C、D、E), 除屋面径流 1 以外, 其他 3 个采样点的总氮与无机氮浓度均受雨情影响, 在降雨 90 min 时有明显波动, 而 4 个样点的总磷浓度都比较稳定。随着降雨的进行, 4 个样点的氮、磷浓度都是初期上升, 达到峰值后下降。当然, 4 个样点氮、磷先升后降的变化模式稍有差异, 这可能与采样地点的下垫面有关。屋面径流 1、商住区与居住区的下垫面分别为琉璃瓦和水泥路面。商住区与沥青路面的水质可能还受汽车尾气排放等的影响, 氮、磷浓度变化规律不明显。

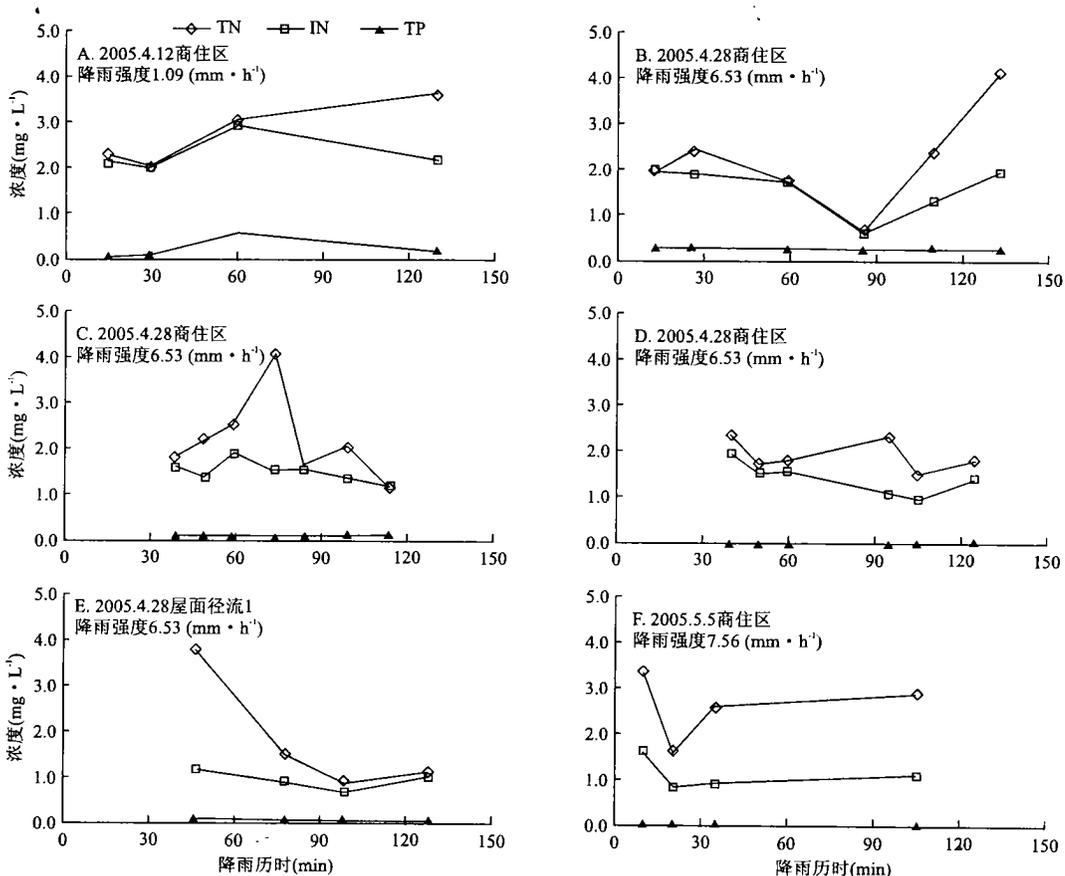


图 3 厦门城市降雨径流氮、磷污染输出特征

Fig. 3 Output patterns of nitrogen and phosphorus in urban stormwater runoff of Xiamen City

4 结论

4.1 厦门各类城市降雨径流中的氮、磷浓度差异较大,总氮、硝态氮、氨态氮与总磷的平均含量范围分别为 1.96 ~ 6.77、0.62 ~ 4.89、0.35 ~ 1.18 和 0.04 ~ 0.66 mg · L⁻¹。

4.2 厦门城市降雨径流中氮主要以硝态氮形态输出,较大程度地受其污染物排放特点的影响。

4.3 降雨过程中氮、磷浓度在雨水冲刷下总体上呈下降趋势,氮浓度变化幅度较大,磷相对稳定。降雨径流中的氮、磷浓度受降雨强度、下垫面、汽车尾气排放等多种因素影响。城市道路、商住区及工业区径流中氮、磷浓度高,是城市非点源污染的主要来源,对这些区域应重点控制管理。

参考文献

- [1] 车伍, 欧岚, 汪慧贞, 等. 2002. 北京城区雨水径流水质及其主要影响因素[J]. 环境污染治理技术与设备, 3(1): 33 ~ 37.
- [2] 李养龙, 金林. 1996. 城市降雨径流水质污染分析[J]. 城市环境与城市生态, 9(1): 55 ~ 58.
- [3] 卓慕宁, 吴志峰, 王继增, 等. 2003. 珠海城区降雨径流污染特征初步研究[J]. 土壤学报, 40(5): 775 ~ 778.

- [4] 国家环境保护局. 2002. 水和废水监测分析方法(第4版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社.
- [5] 赵剑强, 刘珊, 邱立萍, 等. 2001. 高速公路路面径流水质特性及排污规律[J]. 中国环境科学, 21(5): 445 ~ 448.
- [6] 赵剑强, 闫敏, 刘珊, 等. 2001. 城市路面径流污染的调查[J]. 中国给水排水, 17(1): 33 ~ 35.
- [7] 顾琦, 刘敏, 蒋海燕. 2002. 上海市区降水径流磷的负荷空间分布[J]. 上海环境科学, 21(4): 213 ~ 215.
- [8] 蒋海燕, 刘敏, 顾琦, 等. 2002. 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, 15(1): 15 ~ 17.
- [9] Braune M J, Wood A. 1999. Best management practices applied to urban runoff quantity and quality control [J]. *Water Sci. Technol.*, 39(12): 117 ~ 121.
- [10] Field R, Pitt RE. 1990. Urban storm-induced discharge impacts: US Environmental Protection Agency research program review [J]. *Water Sci. Technol.*, 22: 1 ~ 7.
- [11] Gromaire-Mertz MC, Gamaud S, Gonzalez A, et al. 1999. Characterization of urban runoff pollution in Paris [J]. *Water Sci. Technol.*, 39(2): 1 ~ 8.
- [12] Gnm M, Alderink RH. 1997. A statistical approach to urban runoff pollution modeling [J]. *Water Sci. Technol.*, 36(5): 117 ~ 124.
- [13] Lee JH, Bang KW. 2000. Characterization of urban stormwater runoff [J]. *Water Res.*, 34(6): 1773 ~ 1780.
- [14] Novotny V, Olem H. 1994. Water quality: Prevention, identification and management of diffuse pollution [M]. New York: Van Nostrand Reinhold.

作者简介 杨德敏, 女, 1982年生, 学士, 主要从事水环境污染控制研究. E-mail: ydlm-027@163.com
责任编辑 梁仁禄