

张恒,曾凡棠,房怀阳,等. 2011. 连续降雨对淡水河流域非点源污染的影响[J]. 环境科学学报, 31(5): 927-934

Zhang H, Zeng F T, Fang H Y, et al. 2011. Impact of consecutive rainfall on non-point source pollution in the Danshui River catchment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(5): 927-934

连续降雨对淡水河流域非点源污染的影响

张恒^{1,2}, 曾凡棠^{1,*}, 房怀阳¹, 张恒军¹, 萧洁儿¹, 虢清伟³, 曾东³, 欧阳正³

1. 环境保护部华南环境科学研究所 环境模拟与污染控制研究中心, 广州 510655

2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

3. 环境保护部华南环境科学研究所 东江水环境研究中心, 惠州 516100

收稿日期: 2010-07-13

修回日期: 2010-11-10

录用日期: 2010-11-12

摘要: 利用淡水河流域污染物通量站的连续流量水质监测数据, 研究了 4 场连续降雨对流域非点源污染的影响. 相关分析结果表明, 在连续降雨期间, 污染浓度与流量相关性不显著, 但 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP 及 TN 通量与流量之间存在显著相关关系, 污染物通量与流量的相关系数大小顺序如下: $\text{TP} > \text{NH}_4^+ - \text{N} > \text{TN} > \text{SS} > \text{NO}_3^- - \text{N}$. 另外, 统计结果表明, 在降雨历时比较长的条件下, 降雨事件 3 中的 SS、TN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的输出通量与降雨事件 1 相比分别下降了 36%、29% 和 28%; 而在降雨历时较短的情况下, 降雨事件 4 中的 SS、TN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的输出通量与降雨事件 2 相比分别下降了 8%、32% 和 26%; 与 SS、TN 及 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 相比, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在连续降雨条件下的输出通量有显著增长(降雨 1 事件 VS 降雨 3 事件, 降雨 2 事件 VS 降雨 4 事件), 而 TP 的输出通量则保持稳定.

关键词: 淡水河流域; 连续降雨; 非点源污染; 污染物通量站

文章编号: 0253-2468(2011)05-927-08

中图分类号: X171

文献标识码: A

Impact of consecutive rainfall on non-point source pollution in the Danshui River catchment

ZHANG Heng^{1,2}, ZENG Fantang^{1,*}, FANG Huaiyang¹, ZHANG Hengjun¹, XIAO Jie'er¹, GUO Qingwei³, ZENG Dong³, OUYANG Zheng³

1. Research Center of Environmental Simulation and Pollution Control, South China Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655

2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640

3. Aquatic Environment Research Center of East River, South China Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Huizhou 516100

Received 13 July 2010;

received in revised form 10 November 2010;

accepted 12 November 2010

Abstract: The aim of this study was to investigate the impact of 4 consecutive rainfalls on non-point source pollution in the Danshui River catchment. Continuous measurements for water flows and water quality constituents were obtained at a pollutant flux station at the outlet of the Danshui River catchment. Results of regression analysis showed that there were no significant correlations between pollutant concentrations and water flows during consecutive rainfall, whereas significant correlations with water flows were found for pollutant fluxes. The sequence of correlations between pollutant fluxes and run off was as follows: $\text{TP} > \text{NH}_4^+ - \text{N} > \text{TN} > \text{SS} > \text{NO}_3^- - \text{N}$. Statistical analysis was performed to compare pollutant output in storm events under similar rainfall condition. For long duration rainfall, fluxes of SS, TN and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ of storm 3 decreased by 36%, 29% and 28% in comparison with storm 1. In the case of short duration rainfall, fluxes of SS, TN and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ of storm 4 dropped by 8%, 32% and 26% when compared with storm 2. In contrast, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ fluxes increased by 70% and 98% respectively (also storm 1 vs. storm 3, storm 2 vs. storm 4), while TP fluxes remained stable during consecutive rainfall events.

Keywords: Danshui River catchment; consecutive rainfall; non-point source pollution; pollutant flux station

基金项目: 国家科技重大专项(No. 2008ZX07011-0010)

Supported by the National Key Scientific and Technology Project (No. 2008ZX07011-0010)

作者简介: 张恒(1981—), 男, 博士, E-mail: zhangheng@scies.org; * 通讯作者(责任作者) E-mail: zengfantang@scies.org

Biography: ZHANG Heng (1981—), male, Ph. D. E-mail: zhangheng@scies.org; * Corresponding author, E-mail: zengfantang@scies.org

1 引言(Introduction)

近年来,随着点源污染逐步得到控制,非点源污染越来越引起人们的重视(Bowen *et al.*, 1981; Oneley *et al.*, 2010). 目前,对非点源污染的研究主要可分为非点源污染机理研究、非点源污染时空变化规律性研究及环境因子(包括地形、土地利用类型、土壤类型及降雨量等)对非点源污染影响的研究等,相关的研究方法大体可分为野外监测(Maniquiz *et al.*, 2010; Poor *et al.*, 2007; Yoon *et al.*, 2010)、径流场实验(汪涛等, 2010; 胡远安等, 2004; 梁铭基, 2008)及数值模拟(Holvoet *et al.*, 2005; Ullrich *et al.*, 2009; Walton *et al.*, 2009; 陈能汪等, 2009). 需要指出的是,由于非点源污染具有发生时间、地点、机理不确定性及地域特征性强的特点,因此,野外监测对非点源污染研究至关重要. 目前,出于对非点源污染规律研究的需要,同时为了从流域尺度考虑水环境保护工作,越来越多的学者在中、小流域出口进行水文、水质同步监测(Hunter *et al.*, 2008; Yoon *et al.*, 2010; 胡远安等, 2004), 以根据监测数据分析各种污染物的浓度及通量过程与径流量、降雨量等环境因素的关系,找出流域的非点源污染规律.

目前,多数中、小流域同步水文、水质监测是针对单场降雨的监测,只能反映监测期间的非点源污染规律,无法反映所研究流域非点源污染在年内的总体规律及随季节变化的状况. 同时,流域非点源污染本身是一个复杂的过程,每一场降雨过后非点源污染的产出过程都受到此前非点源产出、气象条件及由此导致的土壤特性变化的影响(Poor *et al.*, 2007; Ritter *et al.*, 2001). 因此,若将研究局限在单次降雨的非点源污染过程,有可能会在对整个流域非点源污染规律在年内的总体状况及季节变化的理解方面产生偏差,甚至出现错误的判断. 基于此,本文以广东省东江支流的淡水河流域为例,通过在淡水河流域出口建立一个有人值守的长期通量站,研究连续降雨过程对流域出口各种污染物的非点源污染输出的影响,以期为淡水河流域的非点源污染治理提供科学依据.

2 材料与方法(Material and methods)

2.1 研究区概况

本次研究区域为淡水河流域. 淡水河为广东省

东江的二级支流,流域南北跨越深圳、惠州两市,是广东省内一条典型的跨市河流(图1). 淡水河流域属亚热带海洋性季风气候,年内雨量充沛,多年平均降雨量为1800 mm,但降雨量年内分布不均匀,主要集中在4~9月,占全年总降雨量的85%;土壤类型以砂页岩赤红壤为主,目前流域内林地约占总面积的50%,水田、旱地合占30%,城镇用地约占20%;流域内深圳市的社会经济发展程度高,人口密集,而惠州市的社会经济发展程度较低,人口密度较低. 改革开放后,深圳市境内的淡水河上游流域社会经济迅速发展,人口急剧增加,土地利用类型变化显著. 产生的大量污染物进入河流后,不但使得当地水质恶化,而且还影响到下游的用水安全,也影响到当地的可持续发展(江涛等, 2009).

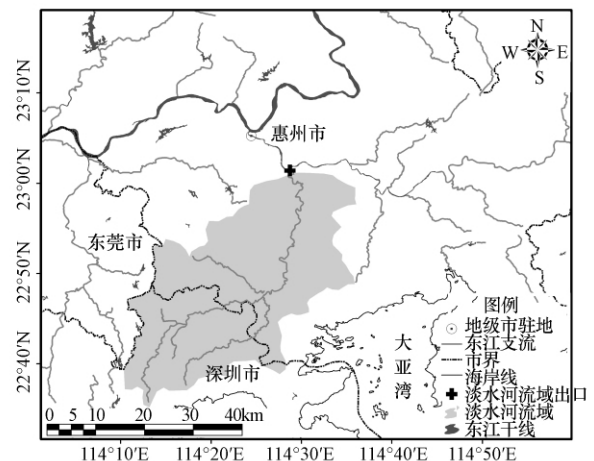


图1 淡水河流域示意图

Fig. 1 Map of the Danshui River catchment

2.2 污染物通量站的建设

本研究在参考国内外同类研究的基础上(Hunter *et al.*, 2008; Yoon *et al.*, 2010; 胡远安等, 2004) 在淡水河流域出口建立一个有人值守的污染物通量站,并将其安装在惠州市三栋镇鹿颈村内淡水河的桥梁上(图2).

从图2可以看出,构成通量站的仪器主要有两台,一台为多参数自动水质仪 YSI 6920,测量的参数包括溶解氧、氨氮、电导率、pH、水温、水深;另一台为安德拉海流计(SeaGuard RCM),用于记录水位及断面点流速,两台仪器的采样频率均为30min 1次. 为了获得长时间序列的流量数据,课题组每周利用 YSI 公司的 M9 多普勒流量计对通量站所在断面的流量、断面面积、断面流速进行测量(在降雨期间会临时加密测量) 结合安德拉海流计的水位、流速数

据, 建立断面流量与定点流速、水位数据之间的线性拟合关系, 进而推求逐时流量. 由于 YSI 6920 自动水质仪目前只能测量溶解氧及氨氮两类水质参

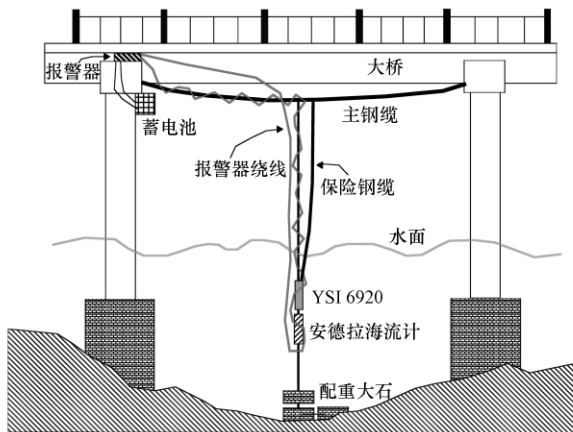


图2 污染物通量站安装示意图

Fig. 2 Schematic of the pollutant flux station

数, 同时, YSI 氨氮探头也需要与实验数据进行比较, 每月进行 1 次率定, 因此, 课题组安排两名研究人员长驻淡水河通量站, 每天实施人工水样采集 (流域内没有降雨期间, 每天早午晚共 3 次, 降雨期间根据实际情况加密采样). 水样采集后, 先放入驻地冰箱保存, 然后再送实验室进行分析. 主要分析项目有 BOD_5 、 COD_{Cr} 、 TN 、 TP 、 $NO_3^- - N$ 、 $NH_4^+ - N$ 和悬浮泥沙 (SS).

3 结果 (Results)

3.1 污染物浓度与径流量变化特征

淡水河流域在 2010 年 4 月 29 日至 5 月 17 日期间有 4 场降雨事件发生, 并且在 4 月 29 日前连续 7d 流域内没有降雨. 现以 2010 年 4 月 23 日至 5 月 19 日的通量站数据为例, 分析在连续 4 场降雨事件期间 (表 1) 流量过程对降雨的响应及不同类型污染物的非点源污染规律.

表 1 监测降雨事件特征

Table 1 Characteristics of the monitored storm events

降雨事件	降雨发生时段	累计降雨时间/h	累计降雨量/mm	最大降雨强度/(mm·h ⁻¹)
1	2010-04-29 18:00 至 2010-05-02 23:00	12	24.0	4.5
2	2010-05-07 08:00 至 2010-05-08 23:00	4	7.5	2.5
3	2010-05-10 02:00 至 2010-05-12 21:00	15	25.5	5.0
4	2010-05-15 04:00 至 2010-05-17 04:00	5	11.0	3.5

流域出口流量过程与降雨量过程之间关系见图 3. 由图 3 可知, 流域出口流量过程与流域降雨过程基本保持同步, 洪峰基本在最大降雨量出现后的 7~12 h 内出现. 降雨事件 2 与降雨事件 4 的降雨强度较降雨事件 1 和 3 弱, 且持续时间短, 并没有形成

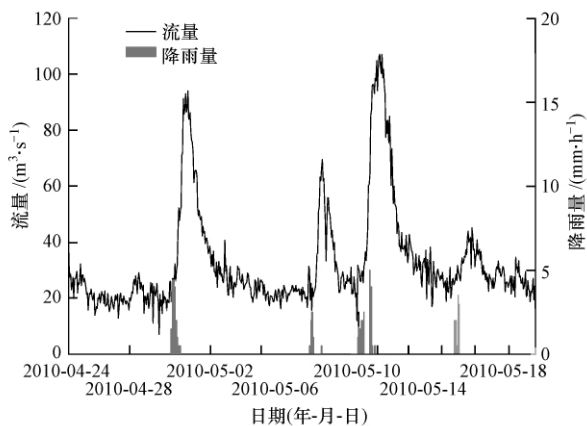


图3 淡水河流域出口流量与流域降雨量变化过程

Fig. 3 Runoff response to precipitation at the outlet of the Danshui River catchment

像降雨事件 1 和 3 级别的洪水.

淡水河流域出口污染物浓度与流量的变化过程见图 4. 在降雨事件 1 中, SS 的变化基本与流量过程同步. SS 变化过程在其后的两场降雨中 (降雨事件 2 和 3), 与降雨过程并不完全同步, 且 SS 浓度最大值与洪峰相比有明显提前或滞后现象, SS 浓度的回落速度要比洪水的消退速度慢, 且浓度变化过程波动较大.

流域出口各类营养盐浓度随流量变化的过程与 SS 的过程存在明显差异. TN 、 TP 及 $NH_4^+ - N$ 在降雨事件 1 中的峰值过程与洪峰过程较为同步, 在其后的降雨事件 2、3 中, TN 、 TP 及 $NH_4^+ - N$ 的浓度峰值都分布在两场降雨所形成的两个洪峰之间, 到降雨事件 4 时 TN 、 TP 及 $NH_4^+ - N$ 再次与洪峰同步. 值得注意的是, TP 浓度在连续降雨期间有十分明显的下降趋势; $NO_3^- - N$ 在降雨期间的产出规律与 TN 、 TP 、 $NH_4^+ - N$ 差异明显, $NO_3^- - N$ 峰值出现时间明显滞后于洪峰出现时间, 同时, $NO_3^- - N$ 在多场降雨事件中产出浓度的上升趋势十分明显.

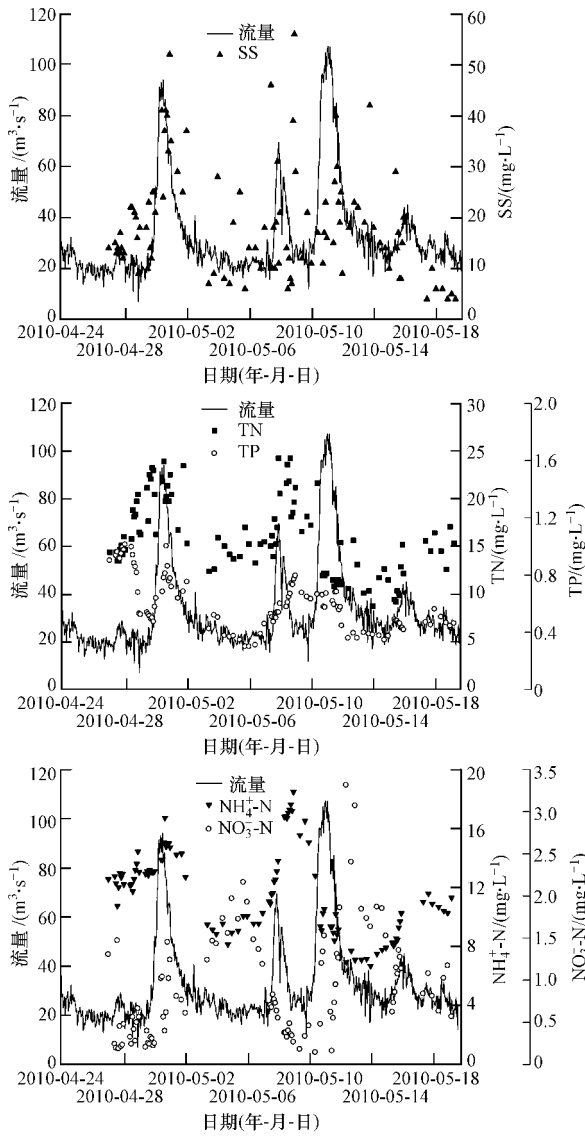


图4 淡水河流域出口流量与各类污染物浓度变化过程

Fig. 4 Pollutant concentration response to runoff at the outlet of the Danshui catchment

3.2 污染物通量负荷与径流变化特征

淡水河流域出口通量站在连续降雨中径流量及污染物监测结果表明,径流过程中径流量与污染物浓度随时间变化幅度大,污染物浓度与径流量之间并没有显著的规律可寻.因此,在本文中利用通量站的流量和浓度数据对淡水河流域在连续降雨事件中的污染物输出通量进行计算,计算公式如下:

$$F = \sum Q_i \times C_i \quad (1)$$

式中 F 为所需计算时段内各类污染物的输出通量 (t); Q_i 为第 i 小时内的径流量 ($m^3 \cdot h^{-1}$); C_i 为污染物在第 i 小时内的浓度 ($mg \cdot L^{-1}$).采用式(1)分别对淡水河流域在连续降雨事件中的通量随时间变

化过程、污染物累积通量及单个降雨事件中的污染物输出通量进行计算.

从计算结果(图5)可以看出,SS及各营养盐的通量随时间变化的过程明显与流量过程较为一致,同步性优于浓度与流量过程.流量与SS及各营养盐通量之间 Pearson 相关分析结果也显示,通量与流量之间呈显著的相关关系,相关性优于浓度与流量关系(表2),其中,TN、TP、 NH_4^+-N 三种营养盐通量与流量之间的相关系数较高,分别达到0.89、0.94和0.91,SS与流量之间的相关系数稍低,为0.81. $NO_3^- -N$ 通量与流量的相关系数最低,为0.77,但仍然远高于 $NO_3^- -N$ 浓度与流量之间的相关系数.从图5中还可以看出,SS通量虽然与流量过程较为同

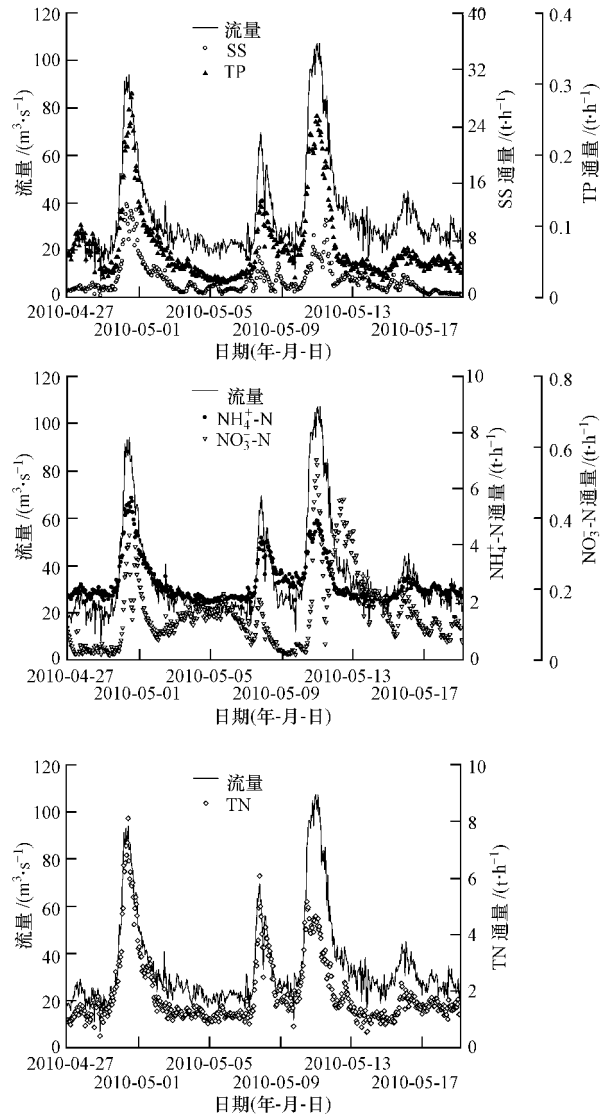


图5 淡水河流域出口流量与各类污染物通量变化过程

Fig. 5 Pollutant fluxes response to runoff at the outlet of the Danshui catchment

步,但通量过程在洪水期间呈锯齿状,变化较大. SS 通量过程这一特点主要是由于 SS 浓度在洪水期间变化较大,使得在流量一定的情况下,影响到其通量过程. NO_3^- -N 通量过程虽表现出比浓度过程与流量过程更好的一致性,但却在洪水期间存在“双峰值”这一特征主要是受 NO_3^- -N 浓度过程影响. 如图 4 所示, NO_3^- -N 在降雨事件期间的高值滞后于洪锋过程,这一现象使得在洪水期间, NO_3^- -N 的高通量主要由高流量引起,表现为高流量、低浓度;而在洪水过后, NO_3^- -N 浓度峰值出现,其高通量主要由浓度引起,表现为低流量、高浓度. NO_3^- -N 浓度过程这一特点使得 NO_3^- -N 通量在洪水期间出现“双峰”结构.

表 2 流量与水质因子浓度及通量的相关性分析

	SS	TN	TP	NO_3^- -N	NH_4^+ -N
流量与浓度	0.35 [*]	0.02	0.17	-0.01	0.04
流量与通量	0.81 ^{**}	0.89 ^{**}	0.94 ^{**}	0.77 ^{**}	0.91 ^{**}

注: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$.

根据以往国内外相关研究成果,流域出口的污染物浓度或通量多与径流量成线性关系(胡远安等 2004; 张荣保等, 2005). 为了定量分析淡水河流域出口的流量和污染物通量是否存在一定的关系,对流量与污染物通量作散点图,并进行线性回归分析,结果见图 6. 结果显示, TN、TP 及 NH_4^+ -N 通量与

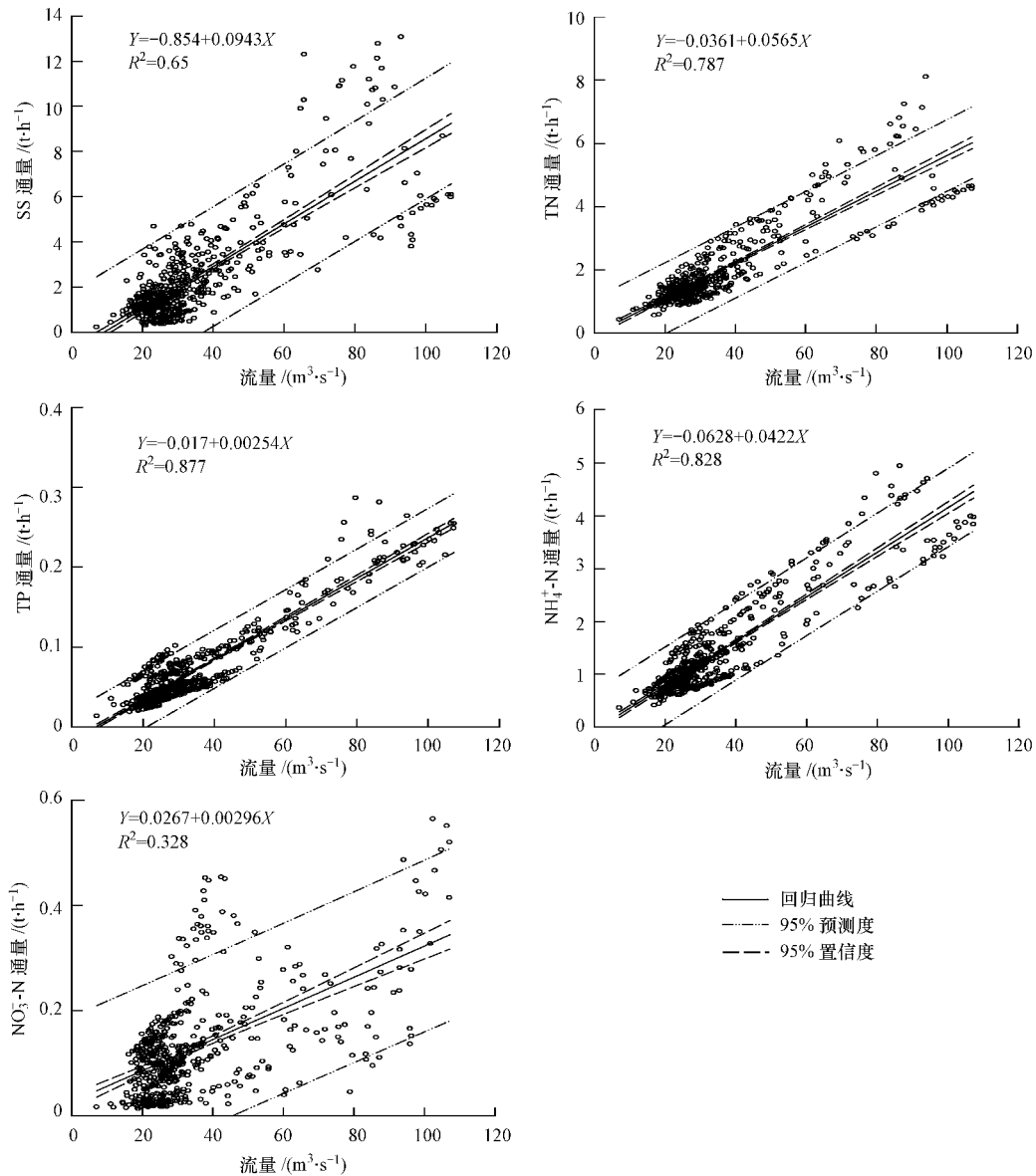


图 6 流量与污染物通量的线性回归结果

Fig. 6 Linear regression between flow and pollutant fluxes

流量之间呈较好的线性关系 ($R^2 > 0.75$) ,SS 通量与流量之间的线性关系相对较弱 ($R^2 = 0.65$) 而 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 通量与流量之间的拟合程度最差 ($R^2 = 0.328$) .

4 讨论 (Discussion)

4.1 连续降雨事件中 SS 及营养盐浓度变化规律分析

根据前面的分析,SS 浓度在连续降雨事件中的变化过程相对于营养盐而言,与流量之间有显著的相关关系.在 4 个降雨事件中,只有降雨事件 1 由于之前有足够长时间的累积陆面泥沙,陆面冲刷占主导作用,SS 的浓度才与流量过程较为同步,其后的 3 个降雨事件中,SS 浓度与流量同步性较差.SS 浓度过程这一变化特征主要受到河道 SS 冲刷再悬浮和流域空间尺度及流域内土地利用类型影响.淡水河流域中 SS 来源除了暴雨径流在陆面的冲刷带入河道外,还有大量的 SS 在洪水期间受冲刷作用影响,从河床再悬浮至水体中.从陆面冲刷进入河道的 SS 在有河床再悬浮 SS 补充后,浓度变化过程就变得较为杂乱.同时,与现有的一些土地利用类型单一的小流域研究相比,淡水河流域在单次降雨事件中的 SS 浓度过程与流量过程的同步性也较差.一方面是由于淡水河流域面积大,其中包含众多子流域,每个子流域的降雨、产流及产沙时间不一致,使得最后流域出口的浓度过程杂乱且滞后于流量;另一方面,由于淡水河流域内土地利用类型较为复杂,不同土地利用类型产沙产流及对 SS 的截流能力差异明显,也使流域出口的 SS 浓度变化过程复杂化.

4 种营养盐的浓度过程,除 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 外,都表现为浓度与流量过程不完全同步(图 4),但与降雨过程较为同步的特点.其原因主要是因为,在降雨初期,降雨对地表的冲刷作用占主导,污染物浓度相对较高;到了降雨后期,随着产流增加,河道流量增大,降雨的冲刷作用和稀释作用交互进行,稀释作用逐渐占主导地位,污染物浓度开始下降,这与不少学者对其它流域非点源产出过程的研究结果相近(胡远安等,2004;张荣保等,2005).淡水河流域 TN、TP 及 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 在降雨事件中这一浓度变化特点类似于非点源污染中的浓度初期冲刷.已有不少学者在小流域非点源研究中指出,无论是在城市、工业区及高速公路等不透水下垫面(Luo *et al.*, 2009; Maniquiz *et al.*, 2010; 傅大放等,2009),还是在农田、森林等透水下垫面(梁铭基,2008),像 SS、

COD、TP 及凯氏氮(TKN) 这些污染物都具有很明显的初期冲刷特征.另外,城市等不透水下垫面与农田、森林等透水下垫面非点源污染初期冲刷的污染物类型也有所区别.不透水下垫面有明显初期冲刷特征的污染物比较广泛,包括了各类溶解态和非溶解态污染物(如 SS、TKN、TP、COD 等)(Luo *et al.*, 2009);透水下垫面有明显初期冲刷主要以非溶解态及可以吸附在泥沙上的污染物为主(如 SS、TN、TP、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 等)(梁铭基,2008).淡水河流域内透水下垫面面积(有植被地)占流域面积的 80%,浓度过程提前于流量过程的营养盐也主要是能被泥沙吸附或本身为颗粒态的 TN、TP 及 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 等.需要指出的是,以往对非点源初期冲刷的研究主要集中在小流域或城市及农业用地的小型集水区,初期冲刷所发生时间只比洪峰到达时间提前 0.5 ~ 2.0 h.而目前淡水河流域 TN、TP、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 在降雨事件中出现浓度高值的时间比洪峰到达时间提前 24 ~ 48 h,提前时间比小流域的研究结果大为延长.淡水河流域与小流域之间的这种差异一方面是由流域面积差异所导致,另一方面连续降雨事件下淡水河流域各类营养盐的产出过程也比单次降雨事件复杂.流域面积和土地利用类型差异对污染物浓度峰值出现时间的影响还有待进一步研究.

4.2 连续降雨事件中 SS 及营养盐通量变化规律分析

与浓度和流量过程相关性不显著不同,淡水河流域污染物的通量过程与流量过程相关性显著,说明通量过程与流量过程较为同步.其中, TN、TP 及 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的通量过程与流量过程基本一致; SS 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 通量过程与流量过程虽较为一致,但通量过程不如其余 3 种污染物平滑,波动较明显.根据前面提到的浓度过程数据,在非降雨事件期间, TN、TP 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的最低浓度分别是 10、0.35 和 8 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,与各自在降雨期间的最高浓度值相差不超过 2.5 倍.这使得 TN、TP 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的通量过程主要由流量过程所控制,与流量变化过程一致;而 SS 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 在非降雨期间的最低浓度值分别为 3 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 0.13 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,与降雨期间各自的最大值分别相差 20 倍和 30 倍.这使得 SS 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的通量过程同时受到流量和浓度过程的影响,通量过程随浓度过程的剧烈变化而发生明显波动.各种污染物通量过程的这一差异主要由各种污染物来源不同所造成.从图 5 可以看出, TN、TP 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 在非降雨事件期

间的通量值为降雨事件期间通量最大值的 17% ~ 30% ,表明流域内点源排放对 TN、TP 及 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的贡献比较显著,这也直接导致这 3 种营养盐在降雨及非降雨期间的浓度差异较小。SS 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 在非降雨事件期间的通量值仅为降雨事件期间通量最大值的 4% ~ 8% ,这表明 SS 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的主要贡献来源为非点源。值得注意的是,淡水河流域 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的浓度峰值在降雨事件中与 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的峰值总是交替出现,并且出现时间滞后于 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的峰值出现时间。这表明在连续降雨过程中有相当一部分 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 。虽然由于淡水河接纳大量污染物,使水体在非汛期时溶解氧长期处于缺氧状态($\text{DO} < 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),使 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 难以通过硝化反应转化为 $\text{NO}_3^- \text{-N}$,令非降雨期间的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度较低。但在汛期,由于洪水频繁发生,流量流速与非汛期相比大幅增加,加速了水体的大气复氧过程,加上上游流域源头大量溶解氧含量较高的水体到达下游,促使水体中溶解氧上升($2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} < \text{DO} < 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。水体中溶解氧含量的上升使得水体中的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 通过硝化反应转化为 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 。

与其它中、小流域的非点源研究(汪涛等, 2010; 胡远安等, 2004; 梁铭基, 2008) 中污染物通量与流量相关系数相比(一般为 0.95 以上),淡水河流域在连续降雨事件中的流量与污染物通量之间的相关系数较低, TN、TP 及 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 通量与流量的相关系数为 0.78 ~ 0.87, SS 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 通量与流量的相关系数则更低,仅为 0.64 和 0.32。淡水河流域出口在连续降雨中流量与通量过程的相关性弱于小流域,一方面与前面提到的淡水河流域面积较大及土地利用类型复杂导致流域出口流量过程与通量过程不完全同步有关,另一方面连续降雨也影响到降雨事件中流量与通量的相关性。为分析连续降雨过程对污染物通量与流量之间相关性的影响,在本研究中对连续 4 次降雨中的每一次降雨的流量与污染物通量进行 Pearson 相关分析,同时分析其相关性在连续降雨中的变化(表 3)。从表 3 可以看出,各类污染物在降雨事件 1 中,污染物通量与流量的相关性显著,除 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 外,其余污染物通量与流量的相关系数均接近或超过 0.9。 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 通量与流量之间的相关系数虽在首次降雨中相对较低,但仍达到 0.802。在随后的降雨事件中,SS、TN 及 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的相关系数明显逐渐变差,其中,SS、TN 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的相关系数减弱趋势最明显,各自的相关系数分别从

0.948、0.985、0.990 减至最后一次降雨事件中的 0.648、0.797、0.886; TP 通量与流量之间的相关系数在各次降雨事件中均保持平稳,基本稳定在 0.91 ~ 0.96 之间; $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 通量与流量的相关系数在连续降雨事件中变化比较剧烈,并不单纯随连续降雨的发展而下降。 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 通量与流量相关系数在降雨事件 1、2 中较为稳定,保持在 0.6 以上,但在降雨事件 3 中,相关系数降至 0.15。降雨事件 4 中, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 通量与流量相关系数上升为 0.927,达到最高值。

表 3 各场降雨事件中流量与污染物通量相关分析

Table 3 Correlation among flow and pollutant fluxes in each rainfall event

降雨事件	SS	TN	TP	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$
1	0.948 **	0.985 **	0.971 **	0.990 **	0.802 **
2	0.502 **	0.940 **	0.938 **	0.913 **	0.850 **
3	0.737 **	0.895 **	0.980 **	0.961 **	0.155
4	0.648 **	0.797 **	0.977 **	0.886 **	0.927 **

注: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ 。

在各次降雨事件中,污染物通量累积输出量的变化也能反映出各污染物通量与流量相关性的变化特点。连续降雨事件中,对相近降雨量的事件进行对比(降雨事件 1 VS 降雨事件 3,降雨事件 2 VS 降雨事件 4,下同)。如表 4 所示,SS、TN 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 在相近降雨量条件下输送通量显著下降,降雨事件 3 与降雨事件 1 相比分别减少 36%、29% 和 28%,降雨事件 4 与降雨事件 2 相比分别减少 8%、32% 和 26%; $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 通量分别增加 70% (降雨事件 3 VS 降雨事件 1) 和 100% (降雨事件 4 VS 降雨事件 2),而 TP 输送通量基本保持稳定。由此可见,SS、TN 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 通量过程与流量过程在各降雨事件中的相关系数越来越小,是因为在连续降雨事件中,SS、TN 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 输出通量并不完全随流量的增加而增加,降雨期间流量相近的情况下通量反而减少所致。这表明在连续降雨中,陆面的 SS、TN 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 由于受到连续冲刷而不断减少。 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 通量与流量的相关系数波动较大,是因为 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 进入河道主要是通过

表 4 各次降雨事件中各类污染物通量变化

Table 4 Pollutant fluxes variation during each storm event

降雨事件	各污染物通量/t				
	SS	TN	TP	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$
1	445.29	283.98	10.17	203.58	11.22
2	91.89	107.80	3.12	77.79	2.95
3	284.15	201.65	9.04	146.71	19.12
4	84.11	73.34	2.59	57.29	5.89

壤中流和地下水补充等比地表冲刷慢的途径,对降雨的响应有较长的滞后时间(Poor *et al.*, 2007; Ritter *et al.* 2001),使得 NO_3^- -N 通量与流量的相关性较弱。TP 输出通量及通量与流量的相关性在各场降雨中都保持稳定,显示流域中 TP 的源较为稳定,但具体的产汇机理还有待进一步研究。

5 结论(Conclusions)

1) 在连续降雨事件中,淡水河流域出口 SS 和各类营养盐的浓度过程并不与流量过程完全同步,相关性不显著;SS 和 NO_3^- -N 在连续降雨过程中,浓度变化过程波动明显,其中, NO_3^- -N 的浓度峰值明显滞后于洪峰。

2) 淡水河流域出口的 SS 和各类营养盐的通量过程与流量过程在连续降雨中相关性显著,相关系数大小顺序如下: TP > NH_4^+ -N > TN > SS > NO_3^- -N; TN、TP 及 NH_4^+ -N 通量过程与流量过程基本一致,SS 和 NO_3^- -N 通量过程存在明显波动。

3) 在各场降雨中,通量与流量相关性分析及统计分析结果显示,SS、TN 及 NH_4^+ -N 通量与流量的相关系数在连续降雨中不断下降, NO_3^- -N 通量与流量的相关系数波动较大,而 TP 通量与流量的相关系数保持稳定;SS、TN 和 NH_4^+ -N 在相同降雨条件下输送通量显著下降,降雨事件 3 与事件 1 相比分别减少 36%、29% 和 28%,降雨事件 4 与事件 2 相比分别减少 8%、32% 和 26%; NO_3^- -N 通量分别增加 70% (降雨事件 3 VS 降雨事件 1) 和 100% (降雨事件 4 VS 降雨事件 2),而 TP 输送通量基本保持稳定。

责任作者简介:曾凡棠(1963—),男,环境保护部华南环境科学研究所环境模拟与污染控制中心主任、研究员,主要研究方向为水环境模拟与水污染控制,目前在水环境模拟与水污染控制领域发表论文 37 篇。E-mail: zengfantang@scies.org.

参考文献(References):

Bowen G D, Smith S E. 1981. The effects of mycorrhizae on nitrogen uptake by plants, in terrestrial nitrogen cycles, processes, ecosystem strategies and management [J]. *Ecological Bulletin*, 33: 237

陈能汪,洪华生,张珞平. 2009. 九龙江流域氮的源汇时空模式与机理初探[J]. *环境科学学报*, 29(4): 830-839

Chen N W, Hong H S, Zhang L P. 2009. Preliminary results concerning the spatio-temporal pattern and mechanism of nitrogen sources and exports in the Jiulong River watershed [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 29(4): 830-839 (in Chinese)

傅大放,石峻青,李贺. 2009. 高速公路雨水径流重金属污染初期效应[J]. *环境科学学报*, 29(8): 1672-1677

Fu D F, Shi J Q, Li H. 2009. First flush analysis of heavy metals in expressway stormwater runoff [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 29(8): 1672-1677 (in Chinese)

Holvoet K, Griensven AV, Seuntjens P, *et al.* 2005. Sensitivity analysis for hydrology and pesticide supply towards the river in SWAT [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30: 518-526

Luo H B, Lin L, Gu H, *et al.* 2009. Total pollution effect of urban surface runoff [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 21: 1186-1193

Hunter H M, Walton R S. 2008. Land-use effects on fluxes of suspended sediment, nitrogen and phosphorus from a river catchment of the Great Barrier Reef, Australia [J]. *Journal of Hydrology*, 356: 131-146

胡远安,程声通,贾海峰. 2004. 芦溪流域非点源污染物流失的一般规律[J]. *环境科学*, 25(6): 108-112

Hu Y A, Cheng S T, Jia H F. 2004. Regular pattern of non-point source pollutants losses in Luxi Watershed [J]. *Environmental Science*, 25(6): 108-112 (in Chinese)

江涛,张晓磊,陈晓宏,等. 2009. 东江中上游主要控制断面水质变化特征[J]. *湖泊科学*, 21(6): 873-878

Jiang T, Zhang X L, Chen X H *et al.* 2009. The characteristics of water quality change for the main control sections in the middle and upper reaches of East River [J]. *Journal of Lake Science*, 21(6): 873-878 (in Chinese)

梁铭基. 2008. 农业区非点源污染初期冲刷之分析[D]. 台南: 国立成功大学

Liang M J. 2008. First flush analysis of agricultural non-point source [D]. Tainan: National Cheng Kung University (in Chinese)

Maniquiz M C, Lee S, Kim L H. 2010. Multiple linear regression models of urban runoff pollutant load and event mean concentration considering rainfall variables [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 22(6): 946-952

Oneley E D, Xiaolan Z, Tao Y. 2010. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China [J]. *Environmental Pollution*, 158: 1159-1168

Poor C J, McDonnell J J. 2007. The effects of land use on stream nitrate dynamics [J]. *Journal of Hydrology*, 332: 54-68

Ritter W F, Shirmohammadi A. 2001. *Agricultural Nonpoint Source Pollution* [M]. New York: Lewis Publishers

Ullrich A, Volk M. 2009. Application of the soil and water assessment tool (SWAT) to predict the impact of alternative management practices on water quality and quantity [J]. *Agricultural Water Management*, 96: 1207-1217

Walton R S, Hunter H M. 2009. Isolating the water quality responses of multiple land uses from stream monitoring data through model calibration [J]. *Journal of Hydrology*, 378: 29-45

汪涛,朱波,况福红,等. 2010. 有机-无机肥配施对紫色土坡地耕地氮素淋失的影响[J]. *环境科学学报*, 30(4): 781-788

Wang T, Zhu B, Kuang F H *et al.* 2010. Effects of a combination of organic and inorganic fertilization on nitrogen leaching from purple soil with sloping cropland [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 30(4): 781-788 (in Chinese)

Yoon S W, Chung S W, Oh D G *et al.* 2010. Monitoring of non-point source pollutants load from a mixed forest land use [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 22(6): 801-805

张荣保,姚琪,计勇,等. 2005. 太湖地区典型小流域非点源污染物流失规律[J]. *长江流域资源与环境*, 14(1): 94-98

Zhang R B, Yao Q, Ji Y, *et al.* 2005. A study on law of non-point source pollutants losses in a typical small watershed of Taihu basin [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 14(1): 94-98 (in Chinese)