

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.04.01

高速公路雨水径流污染浓度的系统动力学模拟

沈金星^{1,2}, 王沛芳^{1,3}

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对降雨事件中高速公路雨水径流污染浓度变化的随机性复杂特征, 建立了雨水径流污染物浓度演化的系统动力学模型, 研究交通流特征、高速公路特征、降雨事件特征对雨水径流污染浓度的影响。利用模拟软件 Anylogic, 基于5条高速公路的21个降雨事件抽样数据, 对模型进行了拟合分析。通过对模型中降雨时间、径流深度、降雨量等参数进行敏感性分析, 阐明了不同降雨事件情景下雨水径流污染浓度的时变规律。结果表明: 提出的系统动力学模型可以很好地模拟降雨事件中雨水径流污染浓度的变化过程; 在持续时间短而强度高的降雨事件中, 高速公路雨水径流污染浓度较高, 对沿线受纳水体的影响较大; 雨水径流深度与污染浓度是正相关的, 降雨量大的雨水径流中污染物的最大析出浓度反而会比降雨量小的降雨事件提前出现; 在降雨事件的前期, 如果选择合理的控制措施, 可以显著降低雨水径流的平均污染浓度。

关键词: 雨水径流; 污染浓度; 高速公路; 系统动力学模型; 模拟仿真

中图分类号: X502 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2018)04-0001-07

System dynamics simulation of pollution concentration of rainwater runoff on expressway

SHEN Jinxing^{1,2}, WANG Peifang^{1,3}

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: As for the pollution concentration of rainwater runoff on the expressway changed randomly and complicatedly, a system dynamics model for pollutant concentration evolution in rainwater runoff was built to study the influence of traffic flow characteristics, expressway characteristics, and rainfall event characteristics on the pollution concentration of rainfall runoff. The simulation software, Anylogic, was applied to conduct fitting analysis on sample data of 21 rainfall events on five expressways. Through the sensitivity analysis on the parameters of rainfall duration, runoff depth, rain capacity, etc., the time-varying regularity of the pollution concentration of rainwater runoff in different rainfall events was clarified. The results shows that the system dynamics model proposed in this paper can simulate the changes of pollution concentration in the rainfall events accurately. In the certain rainfall event with high intensity and short duration, the pollution concentration of rainwater runoff on expressway is relatively high, which has great influence on the receiving water body along the expressway. There is a positive correlation between the rainfall runoff depth and pollution concentration, and the max release

基金项目: 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室开放基金(2015B06114); 江苏省博士后科研资助计划(1701086B)

作者简介: 沈金星(1985—), 男, 讲师, 博士, 主要从事流域交通污染控制与治理研究。E-mail: shenjx03@163.com

通信作者: 王沛芳, 教授。E-mail: pfwang2005@hhu.edu.cn

concentration of pollution emerges earlier in the high rainfall runoff than in the low rainfall runoff. Therefore, in the early stage of the rainfall event, the average pollution concentration of rainfall runoff can be significantly reduced if reasonable control methods are adopted.

Key words: rainwater runoff; pollution concentration; expressway; system dynamics model; simulation

近年来,高速公路在区域经济发展中承担着越来越重要的支撑作用。然而,在降雨事件中,高速公路表面积累的悬浮颗粒、营养盐、重金属和多环芳烃等污染物会被雨水径流冲刷、溶解、输运和扩散,成为沿线受纳水体的主要污染源之一^[1]。在美国,高速公路雨水径流已经成为沿线水污染的主要原因^[2]。以俄亥俄州为例,仅为全州面积10%的高速公路,向沿线流域中输运的总悬浮颗粒年度负荷超过了80万人生活污水中的年度负荷^[3]。在德国,高速公路雨水径流污染已成为地下水的第三污染源^[4]。为了减少降雨事件中高速公路雨水径流污染对沿线水环境的影响,加拿大部分高速公路雨水径流污染治理的费用已达到道路养护费用预算的30%~40%^[5]。在我国,雨水径流也已成为高速公路沿线河流湖泊水体富营养化的主要原因之一^[6],因此,研究高速公路建设运营对沿线水环境的影响越来越重要^[7]。

近年来,国内外学者通过对降雨事件中高速公路雨水径流的抽样调查,对雨水径流污染物的类型、来源、浓度、负荷和降雨事件的冲刷效应以及雨水径流污染物对生态环境的影响等内容进行了研究^[8]。结果表明,降雨强度、降雨历时、降雨量与降雨前期晴天数对雨水径流污染物赋存状态具有显著的影响^[9]。由于不同类型污染物之间的相互作用,不同地区的雨水径流污染治理需要选择不同的措施,甚至在同一地区雨水径流污染物的控制效果在不同时间也存在显著差异;因此,现有研究中采用回归统计方法构建的雨水径流污染负荷预测模型,虽然可以有效分析降雨事件中雨水径流污染物的平均污染浓度,但很难阐明降雨事件中雨水径流污染物浓度的

复杂时变过程。

鉴于此,本文针对降雨事件中高速公路雨水径流污染物浓度的变化特征,构建雨水径流污染浓度的系统动力学预测模型,研究降雨事件中雨水径流污染浓度的时变规律,阐明雨水径流污染物浓度变化的影响机理,以期雨水径流污染的过程控制提供技术依据,降低高速公路雨水径流污染治理的复杂性。

1 雨水径流污染物析出过程的影响分析

高速公路雨水径流污染物的析出是降雨事件、路面污染物累积及雨水冲刷交互作用的复杂过程(图1)。高速公路表面累积的污染物是机动车与路面材料相互作用的产物,交通流量的大小会影响污染物累积负荷的大小,交通组成的不同则会影响污染物的种类和粒径,而交通流密度以及高速公路的路面材料则会影响污染物在路面的累积速度。降雨事件中,降雨强度以及道路线形会影响污染物析出的速度,降雨量以及道路排水的方式会影响污染物相态的相互转变。以下具体研究交通流特征、高速公路特征以及降雨事件特征等因素对高速公路路面径流中污染物浓度的变化的影响。

1.1 交通流特征的影响分析

高速公路表面污染物的来源主要包括机动车轮胎的磨损物、机动车刹车制动产生的颗粒物、机动车运行中产生的油脂等^[10]。Kayhanian等^[11]利用多元线性回归方法对加利福尼亚高速公路雨水径流特征与年平均日交通量的相关性进行分析,研究结果表明,年平均日交通量大的高速公路具有更高的污染负荷。Huber等^[12]通过对美洲、欧洲、亚洲、非洲、澳洲等地294个监测点数据的分析结

降雨事件中污染物析出过程

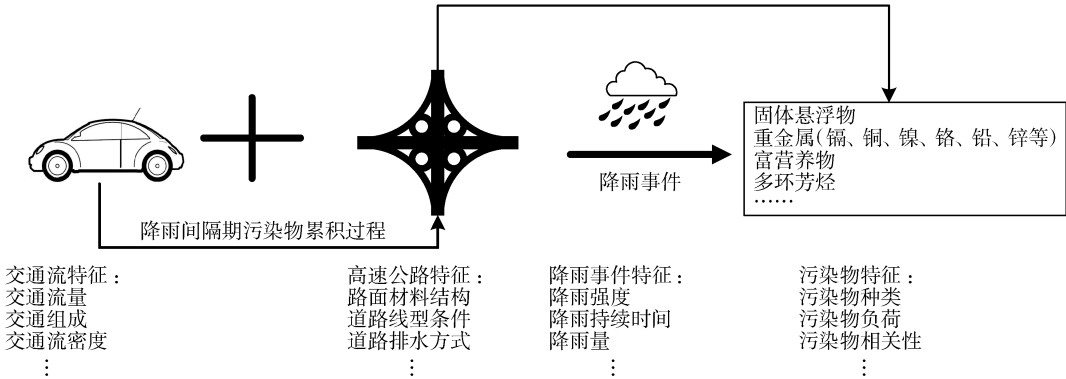


图1 影响高速公路雨水径流污染物析出过程因素的交互作用示意图

果表明,由于交通控制、车辆制动、燃料不充分燃烧等因素的影响,每天超过 5 000 辆机动车的拥挤道路往往比非拥挤的高速公路表面有更高的污染物负荷。

然而,由于污染物在高速公路表面的累积过程受到交通流状态,特别是运行速度、道路拥堵状况、车辆制动和燃料不均匀燃烧等因素的综合影响,很难确定不同交通流量与污染物负荷之间的定量关系,也很难通过高速公路的交通流量判断污染负荷的累积上限值^[13]。

1.2 高速公路特征的影响分析

高速公路的路面是雨水径流污染物的主要载体,也是污染物迁移循环的关键界面。高速公路的路面材料种类会影响路面对污染物的吸附效率,而路面材料的不同组成则会影响机动车轮胎磨损产生的污染物粒径。当高速公路不设置路缘石时,在降雨间隔期,高速公路表面累积的微小颗粒污染物会在气流的影响下,向高速公路沿线扩散。而设置路缘石后,污染物则会沿着路缘石累积,造成污染物在路面累积分布的差异。

除此之外,高速公路雨水径流的排水方式对污染物的析出过程也存在显著影响。在降雨事件的影响下,根据高速公路雨水径流汇聚方式的不同,雨水径流污染物在输运过程中又会受到高速公路边沟类型、边坡植被截留类型的影响,导致高速公路沿线雨水径流汇聚区中污染物粒径大小、相态分布、浓度比例、累积负荷也不同^[14]。

1.3 降雨事件特征的影响分析

在降雨事件中,污染物在雨滴动能的作用下脱离高速公路表面,因此,降雨强度对高速公路表面污染物的析出起着重要的作用。Hwang 等^[15]开展了降雨过程中雨水径流的抽样分析,结果表明,高速公路雨水径流污染物负荷高度依赖于降雨的模式。一般情况下,降雨强度大的降雨事件会产生较高的雨水径流污染负荷。然而,在某些降雨事件中,降雨强度大的降雨事件也可能产生较低的雨水径流污染物平均浓度。因此,在特定的情况下,可以通过线性回归方程来描述降雨量、降雨强度等降雨事件特征与污染物平均浓度之间的复杂关系^[16]。

高速公路表面污染物的累积是一个复杂的过程,大量的污染物在降雨后的几天内停留在路面上。虽然,较长的降雨间隔期会增加污染物在高速公路表面的累积量,然而,较长的降雨间隔期也会导致污染物被自然或车辆引起的风从高速公路表面移除,减少高速公路表面污染物的累积负荷。因此,降雨间隔期被认为与高速公路表面污染物的积聚呈线性

或非线性正相关,在某些情况下会成为影响污染物累积的主要因素^[17]。

2 污染物析出过程的系统动力学模型

2.1 污染物析出过程的系统模型参数结构

根据雨水径流污染物析出过程,将其分为污染物沉积、降雨事件冲刷、污染物析出 3 个子系统。不同系统之间的相互作用,形成雨水径流污染物析出的分析环境。根据 3 个子系统之间的相互联系以及各变量间的作用关系,利用 Anylogic 软件建立雨水径流污染物析出的系统动力学模型(图 2)。

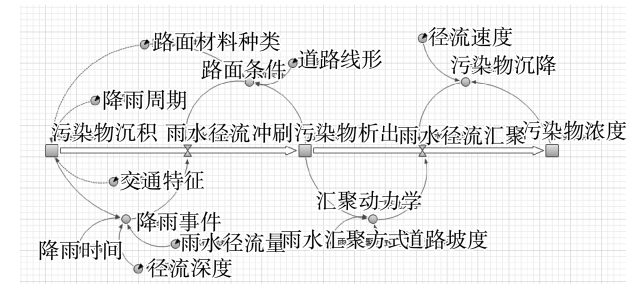


图 2 雨水径流污染物析出的系统动力学模型

系统中污染物沉积子系统和污染物析出子系统之间存在正反馈关系,污染物沉积量的增长会增加污染物析出量。降雨事件是污染物析出的必要条件,不同的降雨事件会影响污染物的析出的时变规律,因此降雨事件子系统与污染物析出子系统之间也存在正反馈关系。假设降雨持续时间为 T 的降雨事件中, t 时刻产生的雨水径流中污染物浓度为 $C(t)$, 此时雨水径流的流量为 $Q(t)$, 则雨水径流的标准化累积流量比 $V_n(t)$ 为

$$V_n(t) = \frac{\int_0^t Q(t) dt}{\int_0^T Q(t) dt} \quad (1)$$

通过 3 个子系统之间定性的因果关系,根据 Kim 等^[18]提出的污染物析出过程的时间微分方程,建立模型中各变量之间的反馈关系,可以表述为

$$C(t) = \delta + V_n(t) [\gamma + \beta e^{-\alpha V_n(t)}] \quad (2)$$

式中: δ 为降雨事件间隔期污染物在路面的累积情况,在交通流量和交通组成相对保持稳定的情况下, δ 的大小主要由降雨时间间隔长度决定; α, β, γ 均为考虑降雨事件自身特征的影响系数,其中 α 为与雨水径流量相关的影响系数, β 为雨水径流速度、径流量和降雨持续时间的综合影响系数, γ 为雨水径流速度相关的影响系数。

2.2 模型仿真分析

2.2.1 仿真数据分析

高速公路雨水径流污染物的种类有很多,本文

的重点是提出一种模拟降雨事件中污染物浓度变化的方法并验证此方法的有效性。由于高速公路雨水径流中不同类型污染物负荷与固体悬浮颗粒(全称TSS) 之间存在显著的相关性, 如果该模型能有效预测 TSS 析出浓度的时变规律, 也就可以证明, 该模型也可用于其他污染物负荷的时变规律分析。因此, 本文仅通过降雨事件中 TSS 浓度对模型进行验证。

根据对现有文献和相关研究成果中雨水径流监测数据的分析, 综合考虑高速公路条件、气候、交通流量、雨水量等特征以及降雨事件中雨水径流污染物特征分析的要求, 选择 Stovin 等^[19] 调查的高速公路雨水径流数据作为仿真分析对比数据, 进行模型参数的拟合分析, 调查地点的特征见表 1。

表 1 高速公路雨水径流调查地点特征

高速公路名称	调查地点编码	年平均日 交通量/辆	重型货车 比例/%	有效汇水 面积/m ²
谢菲尔德 M1	HA01	108 500	19. 0	23 132
伯明翰 M5	HA08	94 000	20. 0	2 556
伯明翰 M42	HA09	92 000	19. 0	1 415
彭里斯 M6	HA11	44 800	22. 5	48 711
纽马克 A14	HA37	43 954	27. 0	18 521

根据不同调查地点的降雨事件抽样数据, 考虑调查数据的完备性, 选择 21 个降雨事件的调查数据进行分析, 结果见表 2。

表 2 降雨事件特征抽样汇总

数据用途	降雨事件编号	降雨深度/ mm	持续时间/ h	降雨间隔期/ d	径流量/m ³	平均污染 质量浓度/ (mg · L ⁻¹)
数据拟合	HA01-050724	10. 0	15. 3	918	102	227
	HA01-060111	2. 0	2. 8	168	168	56
	HA01-060111	2. 0	2. 8	168	168	56
	HA08-050724	14. 8	8. 4	504	126	35
	HA08-050929	1. 2	2. 3	138	138	4
	HA09-051018	9. 4	6. 3	378	126	7
	HA11-060113	1. 8	5. 3	318	106	69
	HA37-050819	4. 0	8. 3	498	166	155
	HA37-050910	15. 4	14. 3	858	143	184
	HA01-050812	4. 2	4. 3	258	129	64
效果分析	HA01-050822	14. 6	7. 3	438	146	331
	HA08-050813	8. 2	4. 2	252	126	29
	HA08-050915	3. 2	1. 3	78	78	4
	HA08-051021	5. 0	3. 3	198	198	6
	HA08-051106	12. 8	10. 6	636	106	17
	HA09-051230	13. 2	17. 9	1 074	179	12
	HA09-060214	3. 2	1. 0	60	60	2
	HA11-060211	1. 2	0. 4	24	24	55
	HA11-060420	2. 6	1. 2	72	72	73
	HA37-050811	6. 8	0. 5	30	30	69
	HA37-051012	9. 4	20. 2	1212	101	68

注: 降雨事件的编号以降雨事件的地点名称-调查日期的方式表达, 如 HA01-050724 代表 2005 年 7 月 24 日在 HA01 调查点调查的降雨事件数据, HA01 对应了表 1 中的谢菲尔德 M1 公路。

由表 2 可见, 统计的降雨事件具有较大的离散性, 降雨事件持续时间跨度范围 0. 4 ~ 15. 3 h, 数据能较好反映不同降雨事件特征下雨水径流污染物浓度的变化情况。除此之外, 为了研究的方便, 将 21 组数据分为两个部分, 其中一部分用于仿真模型的参数拟合, 另一部分用于仿真效果分析。根据表 2 中的拟合数据, 利用最大似然估计方法, 保证拟合相似性 0. 8 以上的情况, 得到系统模型参数标定的结果为

$$\begin{cases} \alpha = 0. 007T_r + 7. 53 \\ \beta = 2\,774. 09\ln A_r + 25\,689. 65 \\ \delta = 3. 21\ln A_d + 14. 76 \\ \gamma = -65. 36\ln T_r + 237. 92 \end{cases} \quad (3)$$

式中: T_r 为降雨事件中的总径流量; A_d 为降雨事件的间隔期; A_r 为降雨事件的平均径流速度。

2. 2. 2 参数拟合效果分析

为了分析仿真模型的有效性, 利用表 2 中的分析数据, 选择常见的相关性系数指标 R^2 、剩余质量系数指标 C_r 以及均方根误差 R_m , 研究模型预测数据与实际调查数据的拟合效果。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t'=1}^n [c(t') - p(t')]^2}{\sum_{t'=1}^n [c(t')]^2} \quad (4)$$

$$C_r = \frac{\sum_{t'=1}^n [c(t') - p(t')]}{\sum_{t'=1}^n c(t')} \quad (5)$$

$$R_m = \sqrt{\frac{\sum_{t'=1}^n [c(t') - p(t')]^2}{n}} \quad (6)$$

式中: t' 为设定的统计时间间隔; $c(t')$ 为统计时间间隔内观测的污染物浓度; $p(t')$ 为统计时间间隔内考虑多种因素影响下污染物浓度的预测值。

R^2 被用来评估模型的预测结果与实际调查数据的相关性, R^2 越接近于 1 说明预测值与观测值之间的相关性越高。 R_m 和 C_r 指标则是对模型预测效果的附加评价指标。 R_m 反映了降雨事件中污染浓度观测值与预测值之间的差异。对于相关性越高的模型, R_m 越小, 表明预测效果越好。 C_r 用于分析预测值是否普遍高于或低于观测值, C_r 值越接近于 0, 表明模型的预测效果越好, C_r 值为负数, 表明预测模型在预测过程中, 预测结果大于实际观测值, 反之则为预测结果小于实际观测数据, C_r 绝对值越大, 说明偏离程度越高。降雨事件实际调查数据与仿真数据的分析结果如表 3 所示。

表 3 降雨事件实际数据与仿真数据分析结果

降雨事件编号	R^2	R_m	C_r
HA01-050812	0.96	36.00	9.14
HA01-050822	0.94	49.97	16.73
HA08-050813	0.72	68.93	64.87
HA08-050915	0.80	119.32	0.97
HA08-051021	0.76	50.20	32.73
HA08-051106	0.78	59.04	31.39
HA09-051230	0.73	162.19	113.05
HA09-060214	0.75	151.34	0.49
HA11-060211	0.97	30.10	6.76
HA11-060420	0.99	12.69	-0.09
HA37-050811	0.75	149.35	108.09
HA37-051012	0.73	132.02	0.23

由表 3 可见,系统动力学模型可以有效地预测降雨事件中污染物的浓度。但是模型对不同的降雨事件的预测效果存在一定的差异性。其中,HA01 和 HA11 两个地点预测数据与实际数据的相似性超过了 0.9,这些降雨事件对应了最佳的拟合效果,超过了拟合的精度。而 HA37 与 HA09 两个地点的拟合效果则相对较差。将统计效果比较好的 HA11-060420、HA11-060211 以及比较差的 HA37-051012、HA09-051230 的数据进行全过程的拟合对比分析,结果见图 3。

由图 3 可见,虽然两组数据在统计意义上相关性较高,但是实际的变化趋势线存在一定的差异性。对 HA11-060420 降雨事件而言,在污染浓度最高的左侧,实测数据与模拟数据几乎相同,而随着降雨事件的持续,模拟数据超过实测的数据。而对于 HA11-060211 降雨事件,在污染浓度最高左侧,实测数据低于模拟数据,而之后则是模拟数据小于实测数据。对 HA37-051012 以及 HA09-051230 两个降雨事件而言,雨水径流的最大污染浓度差距较明显。出现这种现象的原因可能在一定程度上取决于其他关键变量的影响,如降雨事件间隔期、高速公路所处环境、降雨事件特征等。然而,由于现有的调查数据样本量太小,因此还不足以进一步分析这些差异的具体原因。

3 雨水径流污染物析出负荷敏感性分析

模型敏感性分析的作用是了解模型不同参数的取值对模型分析结果的影响情况,为了确定影响高速公路路面污染物析出过程中的关键影响因素,本文以 HA11-060420 降雨事件调查数据为基础,对降雨持续时间、径流深度以及降雨量 3 个因素的敏感

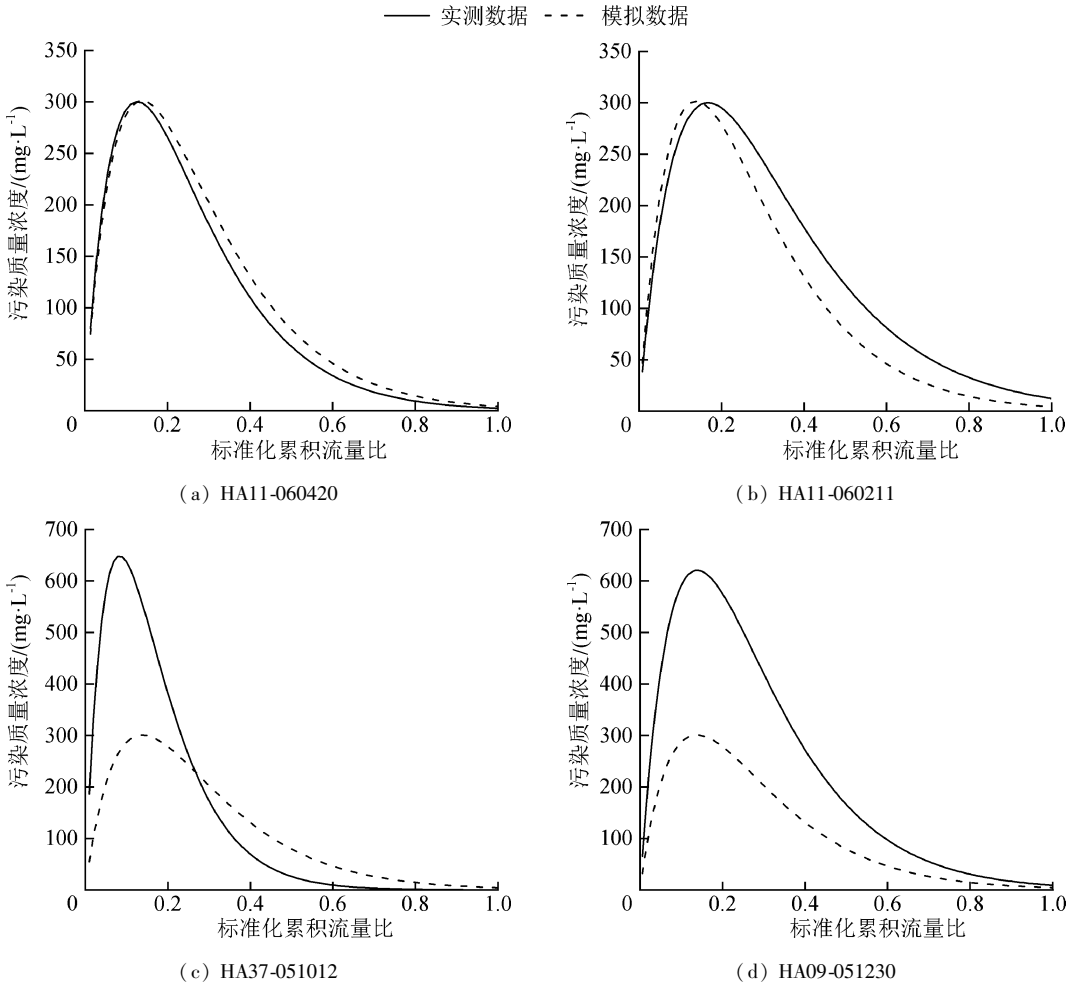


图 3 实测数据与模拟数据的对比

性进行分析。为了确定不同参数的影响程度,某一输入参数发生变化时,其他参数变量保持不变,具体分析结果如下。

3.1 降雨持续时间的影响分析

为分析降雨持续时间对污染物析出浓度的敏感性,模拟 HA11-060420 降雨事件持续时间 T 以 0.1 h 的幅度增加情况下,雨水径流污染物浓度的变化情况,结果见图 4。

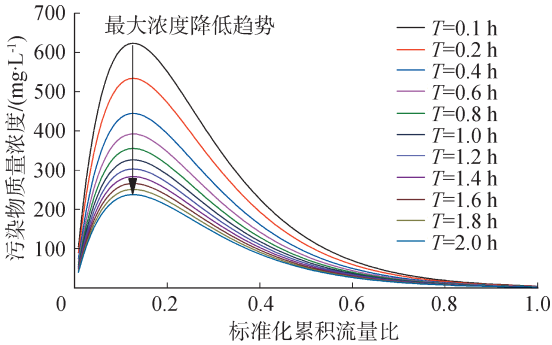


图 4 降雨持续时间的敏感性分析

由图 4 可见,在降雨事件中,雨水径流的冲刷效应会随着降雨时间的增加而逐渐减弱,增加的降雨事件持续时间可能产生较低的污染物平均浓度。随着降雨持续时间的增加,雨水径流中污染物浓度最大值的下降趋势逐渐平缓。因此,短时而强度高的降雨事件中,如果高速公路雨水径流直接排放到沿线受纳水体中时,就会在短时间内提高受纳水体的污染浓度。

3.2 降雨径流深度的影响分析

根据 HA11-060420 降雨事件,模拟降雨径流深度 R_d 由 0.6 mm 以 0.2 mm 为步长逐渐增加到 2.6 mm 的情况下,雨水径流污染物浓度的变化情况,结果见图 5。

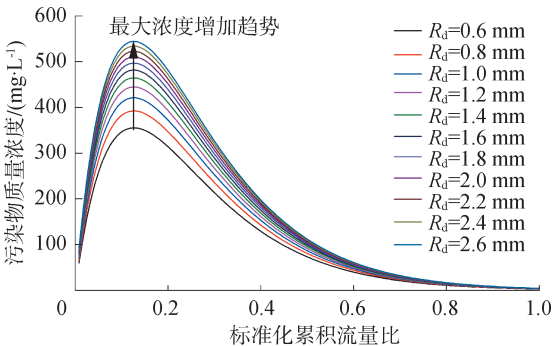


图 5 降雨径流深度敏感性分析

由图 5 可见,径流深度对高速公路表面污染物的析出起着重要的作用。降雨事件中,雨水径流的平均速度主要由降雨深度、总径流量、降雨持续时间以及集水区面积决定。当集水区面积一定,降雨时间一定时,降雨深度增加会造成径流速度的增加。此时,雨水径流与高速公路表面相互作用的动能会

增加,从而使高速公路表面累积的污染物析出。同时,当雨水径流深度增加,在排水效果较差的路段,雨水径流会在高速公路表面积聚并出现湍流现象,从而增加污染物的析出速度。一般情况下,降雨深度越大污染物的析出浓度越高。但是,高速公路表面污染物的累积量是有上限的,当污染物析出负荷达到污染物的累积上限时,由于稀释作用,增加的降雨强度却可能产生较低的雨水径流污染物平均浓度。

3.3 降雨量的影响分析

在 HA11-060420 降雨事件中,当道路条件、降雨持续时间保持不变,降雨量 T_r 以 55 m³ 的幅度增加时,污染物浓度的变化情况如图 6 所示。

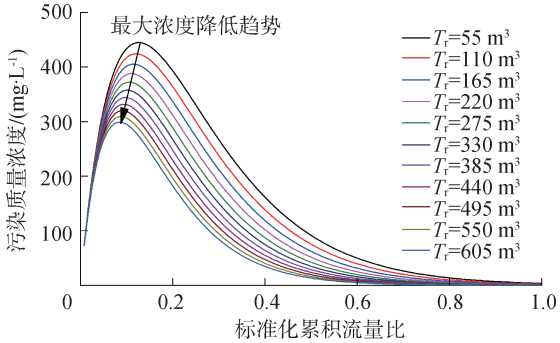


图 6 降雨量的敏感性分析

由图 6 可见,降雨事件中,在路面污染物累积负荷一定的情况下,污染物浓度随着降雨量的增加呈现下降趋势。这就表明,降雨量小但是降雨强度较大的降雨事件中,雨水径流具有较高的污染物浓度峰值,而且整个降雨事件中污染物平均污染浓度也较高。从降雨事件中污染物浓度峰值出现时刻的变化趋势可以看出,在降雨持续时间一定的情况下,降雨量大的雨水径流中污染物的最大析出浓度反而会比降雨量小的降雨事件提前出现。因此,对于降雨量大的降雨事件,如果合理设置雨水径流的贮存设施,而不是将其直接排放到沿线受纳水体中,降雨事件会自我降低污染物平均浓度。

4 结 论

高速公路雨水径流对沿线流域水资源的污染是一个具有环境、经济和社会综合影响的问题。由于高速公路表面污染物析出负荷受降雨事件的影响,仅预测降雨事件中污染物的平均污染浓度,很难判断影响污染物析出过程的关键因素。而通过分析污染物析出过程的时变规律,则可以采用过程控制的方式,有针对性地控制污染物的析出浓度,从而降低雨水径流污染治理的复杂性。

本文首先分析了高速公路表面污染物析出过程的影响因素,利用系统动力学模型从系统的角度分

析降雨事件中雨水径流污染浓度的动态演变过程。利用实际降雨事件调查数据对模型预测结果的分析表明,本文提出的系统动力学模型可以很好地模拟降雨事件中污染负荷的变化过程。最后,分别从降雨持续时间、降雨径流深度、降雨量 3 个方面设置不同的情景,对模型进行了敏感性分析。分析结果表明,在持续时间短而强度高的降雨事件中,高速公路雨水径流污染浓度较高,对沿线受纳水体的负面影响较大。一般情况下,降雨事件中,雨水径流深度越大污染物析出负荷越高。降雨量大的雨水径流中污染物的最大析出浓度反而会比降雨量小的降雨事件提前出现。因此,在降雨事件的前期,如果选择合理雨水径流污染控制措施,可以显著降低降雨事件中雨水径流的平均污染负荷。本文的研究可以用来分析降雨事件中雨水径流污染控制效果的变化过程,为高速公路雨水径流污染的过程治理措施的选择提供判断依据。

参考文献:

[1] POLKOWSKAŻ, SKARŻYŃSKA K, DUBIELLA-JACKOWSKA A, et al. Evaluation of pollutant loading in the runoff waters from a major urban highway (Gdansk beltway, Poland) [J]. Global Nest Journal,2007,9(3):269-275.

[2] 李俊奇,李小静,王文亮,等. 美国雨水径流控制技术导则讨论及其借鉴[J]. 水资源保护,2017,33(2):6-12. (LI Junqi, LI Xiaojing, WANG Wenliang, et al. Technical guidance for stormwater runoff control in United States and its significance[J]. Water Resources Protection,2017,33(2):6-12. (in Chinese))

[3] KAYHANIAN M, SUVERKROPP C, RUBY A, et al. Characterization and prediction of highway runoff constituent event mean concentration [J]. Journal of Environmental Management,2007,85(2):279-295.

[4] MALAMATARIS D. Evaluation of pollutant loadings in highway runoff and relevant legislative framework [J]. Global Nest Journal,2014,16(4):797-804.

[5] MAYER T, ROCHFORT Q, MARSALEK J, et al. Environmental characterization of surface runoff from three highway sites in Southern Ontario, Canada: 1. chemistry [J]. Water Quality Research Journal of Canada,2011,46(2):110-120.

[6] 袁宏伟,刘慧,王少丽,等. 淮北地区降雨径流特性及影响因素[J]. 河海大学学报(自然科学版),2011,39(1):5-8. (YUAN Hongwei, LIU Hui, WANG Shaoli, et al. Characteristics and influencing factors of rainfall runoff in Huaibei Region [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2011,39(1):5-8. (in Chinese))

[7] 赵金辉,陈卫. 高速公路降雨径流污染特征及其污染控制[J]. 环境工程学报,2006,7(11):66-70. (ZHAO

Jinhui, CHEN Wei. Highway runoff pollution characteristics and control measures [J]. Techniques and Equipment for Environmnmental Pollution Control,2006,7(11):66-70. (in Chinese))

[8] OPHER T,FRIEDLER E. Factors affecting highway runoff quality [J]. Urban Water Journal,2010,7(3):155-172.

[9] 解建光,张雪,李贺. 高速公路路面雨水径流有机污染物赋存状态研究[J]. 中国环境科学,2009,29(10):1047-1051. (XIE Jianguang, ZHANG Xue, LI He. Partitioning fraction of organic pollutants in expressway stormwater runoff [J]. China Environmental Science,2009,29(10):1047-1051. (in Chinese))

[10] WANG Yunjun, CHEN Chifeng, LIN Jinyang. The measurement of dry deposition and surface runoff to quantify urban road pollution in Taipei, Taiwan [J]. International Journal of Environmental Research & Public Health,2013,10(10):5130-5145.

[11] KAYHANIAN M,FRUCHTMAN B D,GULLIVER J S,et al. Review of highway runoff characteristics; comparative analysis and universal implications [J]. Water Research,2012,46(20):6609-6624.

[12] HUBER M,WELKER A,HELMREICH B. Critical review of heavy metal pollution of traffic area runoff:occurrence, influencing factors, and partitioning [J]. Science of the Total Environment,2016,541:895-919.

[13] TRENOUTH W R,GHARABAGHI B. Highway runoff quality models for the protection of environmentally sensitive areas [J]. Journal of Hydrology,2016,542:143-155.

[14] WIJESIRI B, EGODAWATTA P, MCGREE J, et al. Influence of pollutant build-up on variability in wash-off from urban road surfaces [J]. Science of the Total Environment,2015,527/528:344-350.

[15] HWANG C, WENG C. Effects of rainfall patterns on highway runoff pollution and its control [J]. Water & Environment Journal,2015,29(2):214-220.

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

[17] LI Minghan, BARRETT M E. Relationship between antecedent dry period and highway pollutant; conceptual models of buildup and removal processes [J]. Water Environment Research,2008,80(8):740-747.

[18] KIM L H,KAYHANIAN M,ZOH K D,et al. Modeling of highway stormwater runoff [J]. Science of the Total Environment,2005,348(1/2/3):1-18.

[19] STOVIN V R,GUYMER I. A practical model to describe temporal variations in total suspended solids concentrations in highway runoff [J]. Acta Geophysica,2013,61(3):706-731.

(收稿日期:2018-03-02 编辑:徐 娟)