

弱透水性下垫面降雨径流污染物输移特性

安亚强^{1,3}, 孙三祥^{1,2,3}, 王国锋^{1,3}

(1.兰州交通大学 环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2.兰州交通大学

寒旱地区水资源综合利用教育部工程研究中心, 兰州 730070; 3.兰州交通大学 甘肃省黄河水环境重点实验室, 兰州 730070)

摘 要:为了研究弱透水性下垫面降雨径流污染物的输移特性,选择兰州市作为典型城市,基于其降雨分布特点和面源污染特点提出了弱透水性下垫面径流污染物输移模型。通过对大学校园内屋面、路面及其他弱透水性下垫面组合形式下的天然降雨径流取样检测,分析了浊度、 COD_{cr} 、TN 和 TP 等主要污染物浓度随时间的变化规律及污染物相关性研究,同时运用模型计算径流污染物初期负荷率。结果表明:校园弱透水性下垫面,降雨径流历时 10~20 min 各污染物浓度达到峰值。径流历时 30 min 内,降雨径流浊度、 COD_{cr} 、TN 和 TP 的污染物负荷率可达到 65%~85%。在中小降雨条件下,降雨径流过程中各污染物显著相关,径流污染物输移模型的适用性较好。

关键词:弱透水性; 降雨径流; 污染物负荷; 输移模型

中图分类号:X506

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)01-0133-07

Research on the Transport Characteristics of Pollutants in Rainfall Runoff on the Underlying Surface with Weak Water Permeability

AN Yaqiang^{1,3}, SUN Sanxiang^{1,2,3}, WANG Guofeng^{1,3}

(1.School of Environment and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaozhou University, Lanzhou 730070,

China; 2. Engineering Research Center of the Comprehensive Use of Water Resources in the Cold and

Dry Areas Ministry of Education, Lanzhou Jiaozhou Jiao university, Lanzhou 730070, China; 3.Key Laboratory
of Yellow River Water Environment of Gansu Province Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to study the transport characteristics of pollutants in rain-runoff on the impermeable underlying surface, Lanzhou was selected as a typical city, and based on its rainfall distribution characteristics and non-point source pollution characteristics, a model for the transport of pollutants from the impermeable underlying surface was proposed. Through sampling and testing of natural rainfall runoff under the combination of roof, road surface and other weakly permeable underlying surfaces on the university campus, turbidity, COD_{cr} , TN and TP and other major pollutants concentration changes over time were analyzed, the pollutant correlation was examined, and the model was used to calculate the initial load rate of runoff pollutants. The results show that the concentration of pollutants in the runoff reached the peak while the rainfall runoff on weak permeable surface on campus lasted for 10~20 minutes; while the runoff lasted within 30 minutes, the pollutant load rate of rain runoff turbidity, COD_{cr} , TN and TP could reach 65%~85%. The applicability of runoff pollutant transport model was better, and the pollutants were significantly correlated in the process of rainfall and runoff under the condition of small and medium rainfall.

Keywords: weak permeability; rainfall runoff; transport model; pollutant load

目前,城市雨水资源利用及径流污染问题日益得到重视,同时城市弱透水性下垫面占城市土地使用总面积的比重越来越大,屋面和各种弱透水路面是城市最常见的下垫面类型,不考虑降雨水质情况下,屋面

沉积物、屋面防水材料析出物及沥青路面沉积物、行人和车辆的交通垃圾等是径流面源污染产生的主要根源,其中含有大量的有机污染物、重金属、氮、磷等营养物质。对城市弱透水性下垫面降雨径流污染物

收稿日期:2021-02-08

修回日期:2021-02-28

资助项目:国家重点研发计划项目“城市雨水资源利用新模式研发和效益评价与示范”(2018YFE0206200);甘肃省科技计划资助(20JR2RA002);甘肃省黄河水环境重点实验室开放基金资助(21YRWEK002)

第一作者:安亚强(1992—),男,甘肃康乐人,硕士研究生,主要从事水污染控制研究。E-mail:1091943280@qq.com

通信作者:孙三祥(1965—),男,甘肃天水人,硕士,教授,主要研究方向为流体力学、市政工程。E-mail:sunsanxiang@mail.lzjtu.cn

输移问题的研究十分必要^[1]。

Brezonik 等^[2]对美国城市降雨径流中 10 种常见污染物浓度负荷进行数据分析并建立了多元线性回归模型,结果表明降雨量、降雨强度以及排水面积是模型的重要变量;Dexiu Hu 等^[3]采用 Mann-Kendall 和对数平均 Divisia 指数(LMDI)方法确定了污染趋势和水质变化的驱动因素。结合这两项研究我们发现,降雨径流污染物的输移与降雨强度有着密切的关系,研究都采用污染物冲刷速率与降雨强度的函数关系,虽然下垫面冲刷与降雨过程具有一定关系,但降雨径流需要先汇集,从而导致了汇流时间差^[4]。将雨水径流量转换为有效降雨强度,建立合适的数学模型模拟降雨径流过程,才能更准确的研究降雨径流中污染物的输移规律。Helmreich 等^[5]对慕尼黑道路降雨径流中不同污染物浓度变化特性进行了分析,结果表明污染物 SS 与重金属和 TOC 具有明显的线性关系;赵剑强等^[6]通过对污染物浓度变化及降雨过程的同步监测,发现城市道路污染物排放过程并非呈现单调递减趋势;Shin 等^[7]对比研究了韩国南部 5 大河流在夏季降雨后河流中有机物的组成变化,结果表明,受夏季强降雨的影响,地表水体中溶解性有机物(DOM)的陆源有机物的贡献增加,五大河流在夏季强降雨期间,类腐殖质和富里酸物质所占比例均有所增加;肖敦宇等^[8]整理了我国降雨在屋面形成径流的资料发现,屋面雨水在我国大中城市所监测到的水质状况都呈现严重污染的现状,大多数污染物指标都难以达到地表 V 类水质标准。结合这几项研究我们发现,降雨强度、相邻降雨时间间隔、降雨历时和人类活动对径流水质的影响存在一定的争议^[9],因此分析各种影响因子对径流水质的影响程度,确定汇水面径流的污染程度,分析各污染物相关性,以及降雨量和降雨强度对径流水质的影响,还需进一步深入研究^[10]。

大学校园是城市的主要构成单元,具有多种城市常见下垫面类型,研究校园降雨径流污染物输移特性,能直观表达出城市降雨径流面源污染问题。本文从降雨径流模型优化出发,通过具体试验分析掌握大学校园降雨径流污染物变化规律及其相关性,并研究得出初期降雨径流污染物负荷,探讨降雨径流过程中污染物输移的特性,可以为城市径流污染治理以及未来进一步的雨水资源利用提供数据及理论支持。

1 研究方法

1.1 研究区概况

以兰州交通大学校本部为示范点,学校位于兰州市安宁区,由于受季风影响,降雨多集中于 6—9 月

份,占全年降水量的 80%左右,多年平均降雨量为 327 mm。校园地势北高南低,同时校园内没有设置雨水管渠,降雨发生后,大部分屋面和其他弱透水性下垫面雨水都汇集到校园的沥青道路上,最终随沥青路面径流经位于校园南区的排水口流入市政雨水管网。本次试验所选取的雨水采样点所包含的汇水面积为 9.6 万 m²,其中屋面占总汇水面积的 24%,沥青路面占总汇水面积的 16%,其他弱透水性下垫面占总汇水面积的 30%。总弱透水性下垫面占总汇水面积的 70%。

通过对校园雨水径流中浊度、化学需氧量(COD_{cr})、TN 和 TP 等指标的试验分析,研究径流水质变化,并结合初期雨水径流污染物负荷,探讨沥青路面降雨径流污染物输移特性。

1.2 取样与检测

试验中采样点位于兰州交通大学校本部第四教学楼前雨水篦子处,选取 5 场不同降雨节点进行径流试验研究,雨水在采样点产生连续径流后采集样品并计时。依据降雨径流形成的历时,按时间等比例方法安排采样,具体采样时间安排为:从径流形成开始到结束,前 30 min 内,每间隔 10 min 采集一次;30~60 min 内,每间隔 15 min 采集一次,试验仅研究径流 1 h 内的样品,每次采集 1 L。降雨量和降雨历时采用虹吸式雨量计进行测定,同时可以分析降雨强度。

1.3 试验方法

采集的样品要进行预处理,然后放入冰箱冷藏保存,试验以浊度、化学需氧量(COD_{cr})、总氮(TN)和总磷(TP)4 个指标进行分析,径流水质指标分别取 3 次同一样品化验数据的平均值。具体试验方法见表 1。

表 1 几种污染物常规的试验检测方法

检测内容	方法	标准
浊度	0—1000 NTU 浊度仪	GB/T13200-1991
化学需氧量(COD _{cr})	重铬酸钾快速密闭催化消解法	GB/T11914-1989
总氮(TN)	过硫酸钾氧化—紫外分光光度法	GB/T11894-1989
总磷(TP)	过硫酸钾消解—钼锑抗分光光度法	GB/T11893-1989

1.4 降雨径流污染物流输移模型

研究降雨径流对污染物的冲刷和输移规律对雨水利用系统的水质控制和非点源污染控制都有十分重要的意义。国外研究人员建立了一些相关模型,如统计模型和机制模型。然而,由于面源污染具有随机性,不连续性,滞后性等特征,其结构非常复杂,再加上降雨所在地域的差异,导致描述该模型结构和功能的某些公式的准确性和适用性大大降低,增加了径流污染研究定量分析有效控制的难度^[11]。

径污染物流输移模型通常可分为功能模型和机理

模型^[12]。功能模型只是一种经验性模型,机理模型是以流体动力学方程为特征的研究,它将整个下垫面上的面源污染划分为污染物积累、产流、汇流、土壤侵蚀和冲刷等过程,系统的分析降雨径流污染物输移全过程。表 2 列出了几种主要的径污染物流输移模型。

表 2 径污染物流输移模型

模型名称	参数形式	空间尺度	时间尺度	参考文献
SWMM	集中式	流域	短期和长期	
STORM	集中式	流域	长期连续	
HSPF	集中式	流域	长期连续	参考文献[13]
ANSWERS	分散式	流域	开始为单次暴雨,后发展为长期连续	
CREAMS	集中式	农田小区	长期连续	参考文献[14]

根据上述 5 种模型的特点,充分考虑兰州市降雨分布特点和城市住宅小区面源污染特点,本文选取了 CREAMS 模型,该模型比较适用于中小强度降雨地区的降雨径流污染物输移特性研究,输入降雨径流的基本参数,就能通过模型计算径流的水量和水质,同时 CREAMS 模型计算则相对简单,以降雨强度为自变量,根据降雨汇水面积、透水/弱透水面积比、地面下渗能力等参数,计算径流污染负荷。

结合 CREAMS 模型特点,我们对降雨径流污染物输移模型的优化如下:

大量研究表明,降雨径流污染物在弱透水性下垫面上的冲刷速率与积累的污染物量成正比,污染物的冲刷速率可用含有降雨强度的模型来表示^[15]:

$$W=-\frac{dP}{dt}=kP$$

(1)

式中: W 表示单位面积下垫面上污染物冲刷速率($\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$); P 表示弱透水地表表层可冲刷污染物的量(mg/m^2); t 表示降雨历时(s); k 表示衰减系数。

如前所述,污染物质的冲刷受到许多因素的影响,即衰减速率与许多因素有关,假设 k 与单位面积平均降雨强度 R (mm/s) 成正比,则有:

$$W=-\frac{dP}{dt}=cRP$$

(2)

式中: c 表示冲刷系数(经验值); R 表示单位面积平均降雨强度(mm/s)。

式中计算污染物冲刷量,没有考虑降雨开始阶段的集流时间,认为降雨即开始冲刷,计算结果存在误差。为了降低误差,采用有效降雨强度 R_{ef} 来代替降雨强度 R ,有效降雨强度与区域面的产流速度在数值上相同,径流时间 t_r 替换降雨历时 t ^[16]。径流时间利用 ASCE 运动波方程^[17]得出。

式(2)即为

$$W=-\frac{dP}{dt_r}=cR_{\text{ef}}P$$

(3)

其中:

$$R_{\text{ef}}=\frac{Q(t_r)}{A}$$

(4)

$$t_r=\frac{6.94\times L^{0.6}\times n^{0.6}}{R^{0.4}\times S^{0.3}}$$

(5)

式中: R_{ef} 表示有效降雨强度(mm/s); $Q(t_r)$ 表示 t_r 时刻的径流量(L/s); A 表示汇水面积(m^2); L 表示坡面方向长度(m); n 表示粗糙度; S 表示坡度。

将式(4)带入式(3)进行积分得:

$$p=cP_0e^{-\frac{Q(t_r)}{A}t_r}$$

(6)

式中: P_0 表示下垫面上的初始污染物量(mg/m^2)。

$$\text{令: } H_{\text{ef}}=\frac{Q(t_r)}{A}t_r$$

(7)

式中: H_{ef} 表示有效降雨深度(mm)。

将式(7)带入式(6)后得:

$$p=cP_0e^{-cH_{\text{ef}}}$$

(8)

将式(8)带入式(3)后得:

$$W=cP_0\frac{Q(t_r)}{A}e^{-cH_{\text{ef}}}$$

(9)

污染物输移浓度:

$$C(t_r)=\frac{A\times W}{Q(t_r)}$$

(10)

式中: $C(t_r)$ 表示径流污染物浓度(mg/L)。

将式(9)带入式(10)后得:

$$C(t_r)=cP_0e^{-cH_{\text{ef}}}$$

(11)

将式(11)进行整理得^[4]:

$$\ln[C(t_r)]=\ln(cP_0)-cH_{\text{ef}}$$

(12)

参照线性回归方程 $y=kx+b$,径流污染物浓度与有效降雨深度为线性关系。式(12)是在 CREAMS 冲刷模型的基础上,对城市小区降雨径流对汇水面污染冲刷物冲刷规律的一般表达的优化模型。该模型是一种功能模型与机制模型相结合的建模方法,优点是参数较少,逻辑关系清晰。该模型可用于村镇和小区降雨径流面源污染负荷的计算,确定初期降雨径流控制量。

2 结果与分析

2.1 降雨资料

我们选取 5 场降雨过程来研究降雨径流污染物的输移规律,校园降雨监测信息见表 3。

2.2 实测降雨径流过程污染物变化趋势

降雨径流污染物的变化主要受降雨强度、降雨量、径流历时和相邻两次降雨时间间隔的影响^[18]。由于大学校园的开放性较高,各类下垫面上的污染物

受车辆和人类活动影响同样明显。由图 1 可知,各污染物浓度随径流时间的变化趋势比较相似,在初始阶段由于降雨径流对各下垫面的冲刷作用使得污染物浓度快速上升,并很快达到峰值^[19],到一定阶段后污染物浓度随径流时间下降,最后趋于稳定。其中 2020 年 7 月 17 日径流时间第 10 min COD_{cr} 质量浓度达到 425.21 mg/L,第 20 min 浊度达到 726.03 NTU,TN 和 TP 质量浓度分别达到 51.80 mg/L,2.79 mg/L,污染物各项指标明显高于其他时期,其主要原因是降雨前干期长度大,校园内弱透水性下垫面上积累的污染物较其他时期多,降雨强度和降雨量小,对污染物的冲刷和稀释作用弱,最终导致径流污染物浓度高。2020 年 7 月 5 日和 2020 年 8 月 10 日降雨径流污染物浓度变化情况不明显,而且污染物浓度明显低于其他降雨时段,主要原因是相邻两次降雨间隔较短导致径流冲刷时污染物浓度衰减较弱。径

流污染物各项指标都在径流时间第 10~20 min 达到峰值,并于 45 min 后逐渐趋于平稳,这是由于弱透水性下垫面上积累的污染物在降雨的冲刷作用下在径流初期迅速汇集,使污染物浓度很快达到峰值,降雨径流后期弱透水性下垫面上大部分污染物已经被冲刷怠净,各污染物浓度随径流时间整体呈下降趋势且变化速率较缓,最后逐渐趋于稳定。

表 3 校园降雨监测信息

日期	降雨 历时/min	平均降雨强度/ (mm·min ⁻¹)	降雨量/ mm	降雨 间隔/d
2020-7-5	95	0.08	7.60	3
2020-7-17	68	0.03	2.04	12
2020-7-23	112	0.07	7.84	6
2020-7-31	56	0.04	2.24	8
2020-8-10	135	0.09	12.12	4

注:2020 年 8 月 6 日凌晨降雨未能及时取样检测,所以 2020 年 8 月 10 日降雨间隔为 4 d。

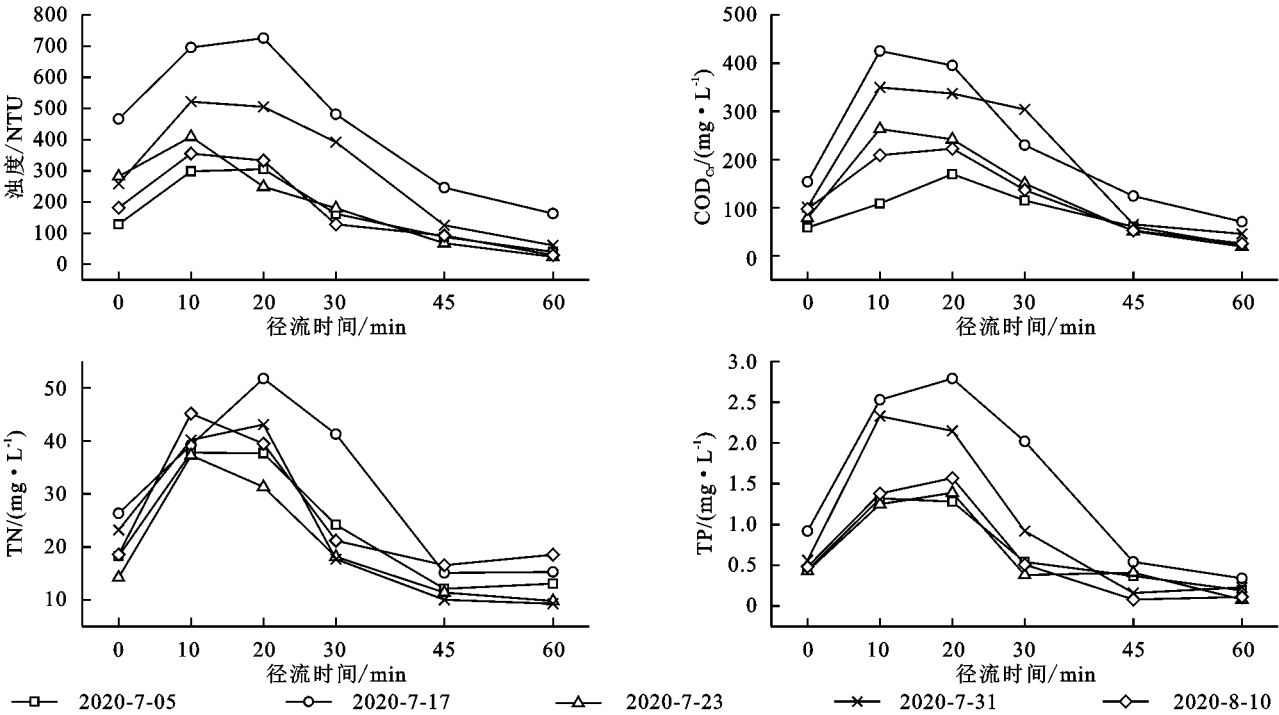


图 1 径流各污染物随径流时间的变化趋势

2.3 模型的验证

对于上面推出的径流浓度模型,选取 2020 年 7 月 5 日和 2020 年 7 月 23 日两场降雨验证其可靠性。由图 2 可知,有效降雨深度(H_{ef})与径流污染物浓度 $\ln[C(t)]$ 总体上呈现较好的线性关系^[20],对 2020 年 7 月 5 日和 2020 年 7 月 23 日两场降雨的浊度, COD, TN, TP 模拟的相关系数分别是 0.725,0.426, 0.776,0.807,0.775,0.699,0.902,0.748,从相关系数 R^2 的值来看,2020 年 7 月 5 日化学需氧量(COD_{cr})径流模型的精度与其他污染物指标相比稳定性稍差,其原因是降雨前期弱透水性下垫面上污染物积累过

程的差异造成。综合分析模型的稳定性是由多重因素决定,其中人类活动程度和车辆活动程度,两者的共同作用会进一步降低径流污染物输移模型精度,而降雨前期污染物积累程度会增加径流污染物输移模型的可靠性。

2.4 径流过程中污染物相关性

对 5 场降雨径流污染物相关性的研究见图 3,通过比较发现,污染物各项指标(浊度, COD_{cr} , TN, TP)在径流过程中有一定的相关性,其中 COD_{cr} 与浊度, TN 与浊度, TP 与浊度, TP 与 TN, COD_{cr} 与 TN, COD_{cr} 与 TP 的平均相关系数 R^2 的值分别为 0.835,

0.835,0.846,0.920,0.786,0.846。由此可知,浊度作为降雨径流污染物中主要的指标之一,同时也是污染物中最为直观的,其对径流中其他污染物的输移规律影响显著。故可将浊度作为校园弱透水性下垫面降

雨径流水质控制的侧重点。根据这一性质,通过对校园内弱透水性下垫面进行有效清扫和对初期降雨径流弃流、沉淀、过滤,可以有效控制浊度,COD_{cr},TN和TP等污染物的总量^[21]。

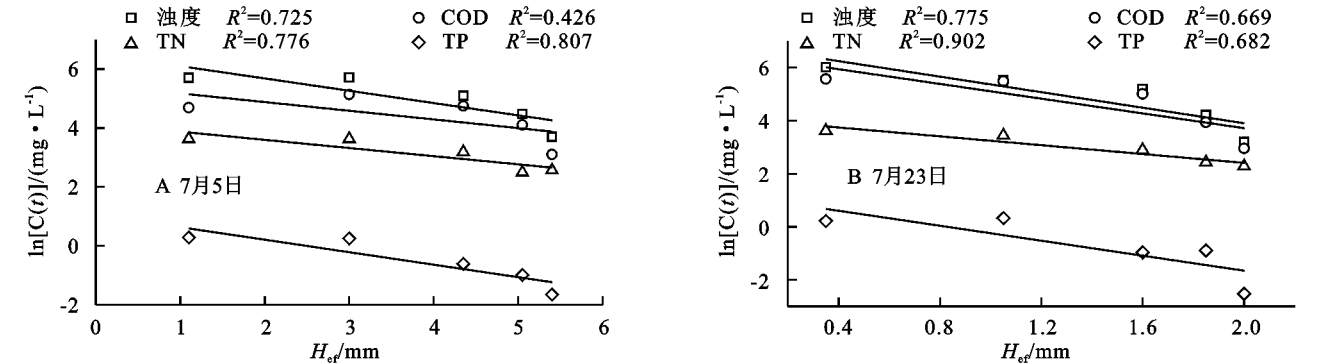


图 2 两场不同降雨条件下污染物冲刷规律模拟结果

大量研究表明:在不同的时间或空间分布条件下,雨水径流污染物明显具有一定的相关性。李畅^[22]通过对小、中、大、暴雨 4 种降雨类型的各污染物浓度相关性进行分析,发现不同降雨类型污染物在所有采样点中,建成区的 5 个污染物指标的相关性各异,SS, TN 与 NH₃⁻-N 呈极显著正相关性($p<0.01$),规划区 5 个指标均呈现显著正相关性($p<0.05$)。彭亮^[23]通过研究发现,径流污染物指标 SS,COD,BOD₅,TN,NH₃⁻-N 和 TP

中除 TN 以外,其他指标均呈现正态分布特征,且各污染物存在明显相关性,通过限定不同条件的降雨事件后,相关性有显著提高。

从理论上讲,可溶性污染物或不溶性污染物均在总固体之中,因此雨水径流中的各种污染物含量均与总污染物含量有一定关系^[24]。因此从降雨径流过程中一些比较明显的污染物的研究出发,可以预测污染物输移过程的总污染负荷。

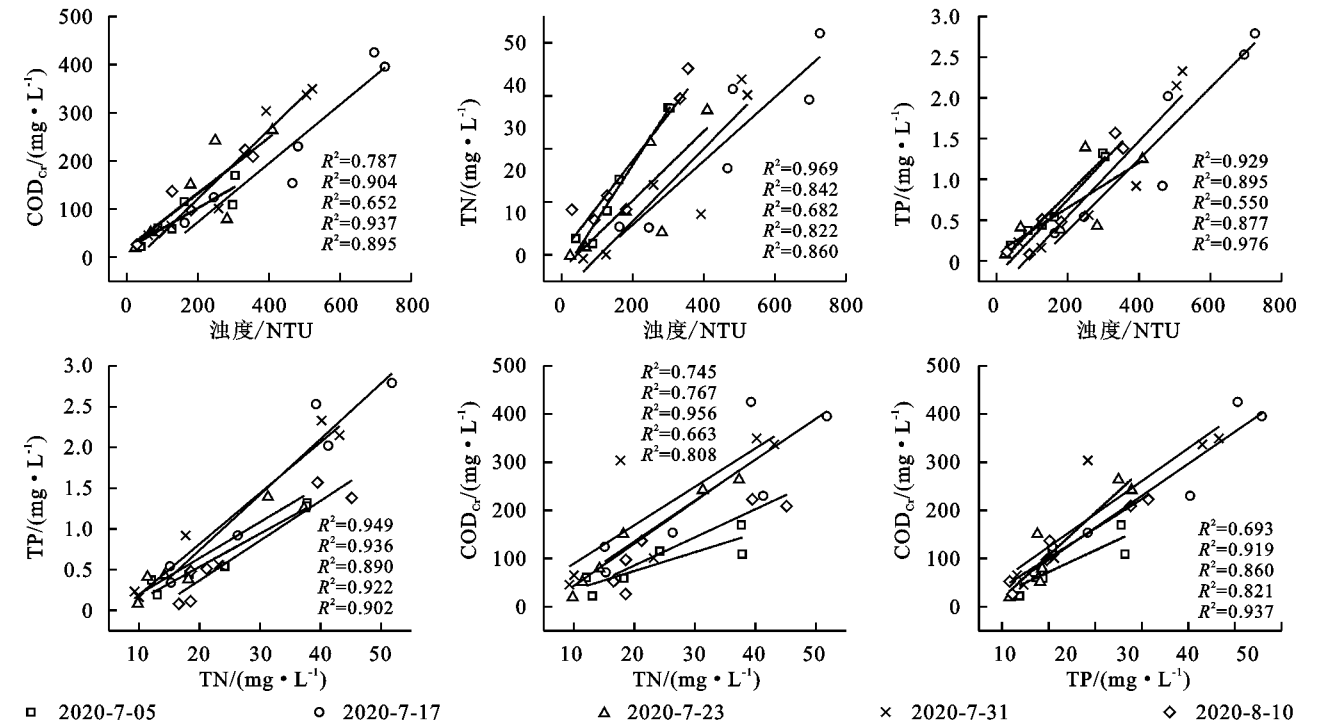


图 3 径流污染物相关性

2.5 初期降雨径流污染物负荷的计算

初期降雨径流一般是指降雨在初始阶段雨水冲刷地表形成的一部分径流,是基于特定降雨条件和下垫面类型下的冲刷规律总结而来的经验概念。由于不同降雨过程径流冲刷存在差异,对初期降雨径流时

间的定义总是存在争议,目前这仍是国内外学者解决降雨径流问题时的关键^[25]。

主要被接受的观点有两种:以径流产流历时为基础,在径流产生过程中,以某一时间节点之前的雨水定义为初期降雨径流,假如在从径流产生开始到径流

过程的某一时间节点这部分径流中包含了这场降雨径流的大部分污染物,在此之后水质明显变好,则这一时间节点之前的径流称为初期降雨径流^[22]。其次是以降雨量为研究基础,在降雨径流产生过程中,从径流开始到结束一定降雨量范围内引起的雨水径流定义为初期降雨径流,如果整场降雨径流的大部分污染物都包含在前 5 mm 降雨量的降雨径流中,5 mm 降雨量后径流污染物浓度有明显下降的趋势,则称前 5 mm 降雨量所形成的的径流为初期雨水径流^[26]。

本试验中,由于降雨区域内汇流路径较长,故对校园设计初期径流时间拟定为 30 min。校园汇水面比较平整,我们假定:(1) 降落在汇流形成区间下垫面上的雨水完全构成径流(即径流系数=1),不考虑下垫面对径流的下渗和截留等作用;(2) 整个降雨区域内的降雨强度是均匀且连续的,汇水面积上径流的速度变化常数;(3) 降雨历时等于或大于径流时间,依据雨水管渠设计流量推理公式的推导思想和降雨径流对城市汇水面污染物的冲刷规律,可推导出由雨水径流带来的污染物负荷的计算公式^[27]。

径流水质计算方法:

$$M=\sum_{i=0}^n\frac{C_i+C_{i+1}}{2}\times\frac{Q_i+Q_{i+1}}{2}\times\Delta t_i\quad(13)$$

式中: M 表示污染物总量(mg); C_i 和 C_{i+1} 为与 Q_i 与 Q_{i+1} 节点相对应的污染物浓度(mg/L); Δt_i 表示相邻时间间隔(min)。

初期雨水污染物负荷率:

$$\mu_m=\frac{M_1}{M_n}\quad(14)$$

式中: μ_m 表示污染物负荷率; M_1 和 M_n 分别为初期雨水污染物负荷量和径流总污染物负荷量(mg)。

选取 2020 年 7 月 5 日和 2020 年 7 月 23 日两场降雨,分别采用实测数据和模型计算初期径流污染物负荷率,初期径流时间为 30 min,计算结果见表 4。

表 4 初期降雨径流污染物负荷率

污染物 指标	2020 年 7 月 5 日		2020 年 7 月 23 日	
	实测值/%	模型值/%	实测值/%	模型值/%
浊度	72	74	78	83
COD _{cr}	65	67	75	80
TN	68	66	69	68
TP	74	74	76	80
平均值	70	70	75	79

由表 4 可知,初期径流污染物负荷率的实测数据计算值与模型计算值相对误差很小,说明径流污染物输移模型的准确度很高。结合两场降雨的降雨间隔可知,降雨前期晴天数越多,初期降雨径流污染物的负荷率就越大。两场降雨的初期径流污染物负荷率

在 65%~85%,表明只要集中收集处理初期降雨径流,就可以控制 65%以上的径流污染物,避免含有大量污染物的降雨径流全部排入水体后造成周围水环境恶化。

3 结 论

(1) 本文提出的降雨径流污染物输移优化模型,对兰州市弱透水性下垫面中小雨强径流污染物输移特性适应性好。

(2) 弱透水性下垫面降雨径流主要污染物随径流时间的变化趋势性基本一致,在降雨径流形成初始阶段,由于径流冲刷作用使得污染物浓度快速上升,并很快达到峰值,随后污染物浓度随径流时间缓慢下降,最后趋于稳定。

(3) 径流初期的污染物指标明显偏高,且各污染物显著相关,初期雨水径流污染负荷率计算结果表明,径流历时为 30 min 时,弱透水性下垫面(由屋面、沥青路面和其他弱透水性下垫面组成)径流雨水浊度,COD_{cr},TN,TP 的污染物负荷率可达到 65%~85%,径流初期的雨水水质的处理,是降雨径流污染物控制的关键。

参考文献:

[1] 汉京超.城市雨水径流污染特征及排水系统模拟优化研究[D].上海:复旦大学,2013.

[2] Brezonik P L, Stadelmann T H. Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, minnesota, USA [J]. Water Research, 2002,36(7):1743-1757.

[3] Hu D, Zhang C, Ma B, et al. The characteristics of rainfall runoff pollution and its driving factors in Northwest semiarid region of China: A case study of Xi'an[J]. Science of the Total Environment, 2020,726:138384.

[4] 王宝山,黄廷林,聂小保,等.不透水表面雨水径流污染物冲刷规律研究[J].环境工程学报,2010,4(9):1950-1954.

[5] Helmreich B, Hilliges R, Schriewer A, et al. Runoff pollutants of a highly trafficked urban road-Correlation analysis and seasonal influences [J]. Chemosphere, 2010,80(9):991-997.

[6] 赵剑强,孙奇清.城市道路路面径流水质特性及排污规律[J].长安大学学报:自然科学版,2002,22(2):21-23.

[7] Shin Y, Lee E J, Jeon Y J, et al. Hydrological changes of DOM composition and biodegradability of rivers in temperate monsoon climates[J]. Journal of Hydrology, 2016,540:538-548.

[8] 肖敦宇,姜文超,建娜.城市屋面径流水质特征及屋面材料对水质的影响[J].环境影响评价,2014(3):60-64.

[9] 张千千,李向全,王效科,等.城市路面降雨径流污染特征及源解析的研究进展[J].生态环境学报,2014,23(2):352-358.

[10] 任玉芬,王效科,韩冰,等.城市不同下垫面的降雨径流污染[J].生态学报,2005,25(12):3225-3230.

[11] 李青云.北京典型村镇降雨径流水文,水质及污染特性的研究[D].北京:北京交通大学,2011.

[12] 赵越.面向河流生境改善的水库调度建模理论与方法研究[D].武汉:华中科技大学,2014.

[13] Mulholland P J. Design and maintenance of residential streets[J]. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 1983, 48(1):55-58.

[14] Bouraoui F, Dillaha T A. ANSWERS-2000;Runoff and sediment transport model[J]. Journal of Environmental Engineering, 1996,122(6):493-502.

[15] Soonthornnonda P, Christensen E R, Liu Y, et al. A washoff model for stormwater pollutants[J]. Science of the Total Environment, 2008,402(2/3):248-256.

[16] 张超.基于改进型 SWMM 和单位投资环境效益的截流倍数优选[D].武汉:武汉理工大学,2013.

[17] 任俊雯,梁小光,陶涛,等.基于运动波方程的地面集水时间计算及参数研究[J].中国给水排水,2019,35(1):118-122.

[18] 袁宏林,熊壮,张路明,等.降雨特征与地表径流和雨水管内径流污染物变化特征[J].安全与环境学报,2018(4):1593-1597.

[19] 马英.城市降雨径流面源污染输移规律模拟及初始冲刷效应研究[D].广州:华南理工大学,2012.

[20] 汪楚乔,陈柔君,吴磊,等.典型村落不同下垫面降雨径流污染物积累与冲刷规律[J].净水技术,2018,37(4):21-27.

[21] 李俊奇,戚海军,宫永伟,等.降雨特征和下垫面特征对径流污染的影响分析[J].环境科学与技术,2015,38(9):47-52.

[22] 李畅.南宁市初期雨水径流污染特征研究[D].南宁:广西大学,2016.

[23] 彭亮.武汉市白沙洲大道雨水径流水质特征及污染物指标相关性分析[D].武汉:武汉科技大学,2013.

[24] 张杰,王洪禧,刘俊良.雨水污染物相关性研究[J].河北建筑工程学院学报,2006,24(1):23-25.

[25] 车伍,张伟,李俊奇.城市初期雨水和初期冲刷问题剖析[J].中国给水排水,2011,27(14):9-14.

[26] 廖雷.城市初期径流雨水水量与截留池容积计算方法的研究[D].长沙:湖南大学,2015.

[27] 车伍,刘燕,欧岚,等.城市雨水径流面污染负荷的计算模型[J].中国给水排水,2004,20(7):56-58.



(上接第 132 页)

[17] 齐矗华,甘枝茂,惠振德,等.太白山及其邻近地区冰川地貌的基本特征[J].陕西师大学报:自然科学版,1985(4):53-70.

[18] 刘俊杰,秦奋,赵芳,等.秦巴山地山体基面高度的提取及分布[J].地球信息科学学报,2018,20(10):1457-1466.

[19] 张珊,查小春,刘恺云.基于地貌区划的秦巴山区地性线密度系数空间分布特征[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2020,48(1):32-39.

[20] Liu D, Chen H, Zhang H, et al. Spatiotemporal evolution of landscape ecological risk based on geomorphological regionalization during 1980—2017: A case study of Shaanxi Province, China[J]. Sustainability, 2020, 12(3):941-956.

[21] 陈学兄,常庆瑞,毕如田,等.地形起伏度最佳统计单元算法的比较研究[J].水土保持研究,2018,25(1):52-56.

[22] 舒天竹,王晓红.基于 3S 技术的地形起伏度与区域土壤侵蚀的相关性研究[J].水土保持研究,2017,24(4):127-132.

[23] 王丽娜,丁文广,许丹阳.基于 DEM 的甘肃省地貌形态特征分类[J].水土保持通报,2019,39(1):258-263.

[24] 齐威,刘爱利,张雯.中国地形三大阶梯面向对象的定量划分[J].遥感信息,2017,32(2):43-48.

[25] 郭芳芳,杨农,孟晖,等.地形起伏度和坡度分析在区域滑坡灾害评价中的应用[J].中国地质,2008,35(1):131-143.

[26] 周成虎,程维明,钱金凯,等.中国陆地 1:100 万数字地貌分类体系研究[J].地球信息科学学报,2009,11(6):707-724.

[27] 莫申国.基于 DEM 的秦岭数字地貌格局研究[J].华东师范大学学报:自然科学版,2008(2):8-14.