

设施农业生产区降雨径流和氮磷输出特征及模拟——以滇池东岸花卉大棚种植区为例*

曾晓岚^{1,2}, 王涛涛^{1,2}, 罗万申³, 刘 定^{1,2}, 丁文川^{1,2}, 王双双^{1,2}

(1: 重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

(2: 重庆大学低碳绿色建筑国际联合研究中心, 重庆 400045)

(3: 中国市政工程西南设计研究院有限公司, 成都 610081)

摘 要: 为掌握滇池流域花卉大棚种植区的非点源污染特征, 提高和改善滇池水环境质量, 本研究选取呈贡县斗南村花卉大棚种植区作为研究对象, 在实测降雨径流数据的基础上, 通过建立 Storm Water Management Model 模型分别对全年连续降雨条件下和典型设计降雨条件下的降雨径流水质、水量进行了模拟。研究表明: 1) 模型的流量、化学需氧量(COD_{Cr})、悬浮物(SS)、总氮(TN)和总磷(TP)的 Nash-Sutcliffe 效率系数分别为 0.858、0.835、0.803、0.712 和 0.752, 能够较好地模拟研究区域的水质、水量变化。2) 研究区域的平均径流系数为 0.59, COD_{Cr}、SS、TN 和 TP 的单位面积负荷率分别为 118.34、82.90、54.64 和 5.46 kg/(hm² · a), TN 和 TP 是主要控制的污染物。3) 各污染物浓度峰值的出现时间均早于流量峰值出现的时间, 因此对滇池东岸花卉大棚种植区应进行污染物尤其是 TP、TN 浓度与流量错峰控制。

关键词: 非点源污染; 花卉大棚; SWMM 模型; 滇池流域; 污染负荷

Characteristics and simulation of rainfall runoff and nitrogen & phosphorus outputs in facility agricultural area: A case study of flower greenhouse region in the East Coast of Lake Dianchi

ZENG Xiaolan^{1,2}, WANG Taotao^{1,2}, LUO Wanshen³, LIU Ding^{1,2}, DING Wenchuan^{1,2} & WANG Shuangshuang^{1,2}

(1: Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P.R.China)

(2: National Centre for International Research of Low-Carbon and Green Buildings, Chongqing University, Chongqing 400045, P.R.China)

(3: Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China, Chengdu 610081, P.R.China)

Abstract: In order to improve water quality of Lake Dianchi, the characteristics of non-point source pollution from flower greenhouse area along the east bank of the Lake Dianchi were explored. The Storm Water Management Model (SWMM) was built with measured rainfall runoff data to simulate the quantity and quality of rainfall runoff under both continuous and typical rainfall conditions in a flower greenhouse area in Dounan Village, Chengong County. The results indicate that: 1) The Nash-Sutcliffe efficiency coefficients of the flow, chemical oxygen demand (COD_{Cr}), suspended solids (SS), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in the SWMM are 0.858, 0.835, 0.803, 0.712 and 0.752, respectively, so that the SWMM model can be used to predict the quantity and quality of rainfall runoff in the area. 2) The average runoff coefficient of the area is 0.59. The annual loads per unit area of COD_{Cr}, SS, TN and TP are 118.34, 82.90, 54.64 and 5.46 kg/(ha · a), respectively. TN and TP are major pollutants. 3) The peaks of every pollutant concentrations appeared earlier than the flow peak so controlling the pollutant load should be advanced, especially for TN and TP controlling.

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07102-001)、高等学校学科创新引智计划项目(B13041)和重庆大学大型仪器设备开放基金项目(201506150013)联合资助。2016-04-27 收稿; 2016-11-17 收修改稿。曾晓岚(1972~), 女, 博士, 副教授; E-mail: wendyzeng@cqu.edu.cn.

Keywords: Non-point source pollution; flower greenhouse; SWMM model; Lake Dianchi basin; pollution load

农业非点源污染主要是指农业生产活动中,农田中的土粒、氮、磷、农药、化肥及其他有机或无机污染在降雨过程中,通过农田地表径流、农田排水和地下渗漏,进入水体所造成的污染^[1]. 随着工业污水和城市生活污水等点源污染逐步得到控制,非点源污染尤其是农业非点源污染正在成为水体污染的主要原因^[2]. 有报道指出,2014年滇池流域入湖污染物来源组成中,来源于农业非点源污染的总磷(TP)和总氮(TN)分别为175和829 t^[3]. 昆明是我国著名的鲜花生产基地,当地的塑料大棚栽培面积超过3333 hm²,其中以花卉种植为主的呈贡县斗南村位于滇池东岸,其塑料大棚种植面积达到总种植面积的90%^[4]. 一方面花卉种植的施肥强度大、种植茬数多、管理更集约、季节性更强,另一方面塑料大棚的使用不仅增加了地表径流量,而且会减少地表侵蚀和面源污染^[5],因此,滇池东岸花卉大棚种植区表现出不同于传统大田农业种植区的降雨产汇流特征和农田面源污染负荷.

目前滇池周边已经构建起从源头控制到末端截污的流域截污治污体系,其主要功能是根据不同区域的降雨径流污染产生特征对周边城市和农村初期降雨径流进行收集和处理^[6]. 国内现有的相关研究主要针对城市区域降雨径流污染的收集截流,而对农村区域则鲜有报道^[7-8],特别是针对花卉大棚种植这种特殊的土地利用类型径流污染的研究更少^[5].

SWMM模型(Storm Water Management Model)^[9]即暴雨雨水管理模型,是1971年美国国家环境保护局(USEPA)为解决日益严重的城市非点源污染而开发的城市暴雨管理模型,包括水文、水力和水质模块. 主要应用包括:进行城市地表径流分布式模拟,定量分析区域水质和排污情况,预报排水系统和受纳水体中各点水流和水质状况,适用于排水系统的规划、分析、设计以及管理措施的评估^[10]. SWMM模型作为分布式、连续模拟模型,在城市非点源污染模拟中得到了广泛应用^[11-13]. SWMM的通用性较好,对城市区和非城市区均能进行准确的模拟^[14-15],目前国内的模拟研究主要集中在城市区,非城市区的模拟研究鲜有报道^[16-17]. 为掌握滇池流域花卉大棚种植区的降雨径流和氮磷流失特征,本研究选取滇池东岸呈贡县斗南村花卉大棚种植区作为研究对象,尝试建立SWMM模型,根据实测降雨径流数据率定模型参数,在对模型进行验证的基础上,对滇池东岸花卉大棚区的降雨径流污染分别进行全年连续降雨条件下和典型设计降雨条件下的模拟,获得该区域的降雨径流污染水质水量特征,以期对滇池流域花卉大棚种植区域降雨径流污染的收集截流提供理论依据以及为在国内非城市区运用SWMM模型提供参考.

1 SWMM模型的构建

1.1 研究区概化

本研究区域位于滇池东岸呈贡县境内斗南村北侧的玫瑰大棚种植区,面积为73.2 hm². 根据地形和排水沟渠(包括农灌主渠和农灌支渠)布置特性,借助卫星地图,将研究区域按各沟渠的实际汇水范围划分为104个子汇水区域、74个节点、76段排水沟渠和1个排放口,排放口位于农灌主渠的末端(图1). 各子汇水区面积介于0.36~1.21 hm²之间. 农灌沟渠为明渠,渠宽为0.6~1.0 m,渠深为0.4~0.9 m. 该区域内的农业灌溉污水和雨水通过农灌支渠汇入区域中间的一条南北走向的农灌主渠排出,穿过环湖东路流入滇池,对滇池水体造成污染.

1.2 模型参数的灵敏度分析

本研究利用2013年8月16日的降雨数据,以5%为固定步长变化逐个参数值,分别取其值的80%、85%、90%、95%、105%、110%、115%、120%,采用修正的摩尔斯分类筛选法对模型的水文水力参数和水质参数进行局部敏感性分析,筛选出对模拟值影响大、敏感性大的参数,为下一步模型参数的率定、校验做准备. 其结果如表1所示.

参照文献[18]对敏感度进行分级: $|S_i| \geq 1$ 为高灵敏度参数; $0.2 \leq |S_i| < 1$ 为灵敏参数; $0.05 \leq |S_i| < 0.2$ 为中灵敏参数; $0 \leq |S_i| < 0.05$ 为不灵敏参数(i 为模型的第 i 个状态变量).

SWMM模型水文水力参数中影响径流总量和流量峰值的灵敏参数主要为Conduit roughness和N-imperv,这与其他研究者的结果相近^[19]. SWMM模型水质参数中影响污染负荷和浓度峰值的灵敏参数主

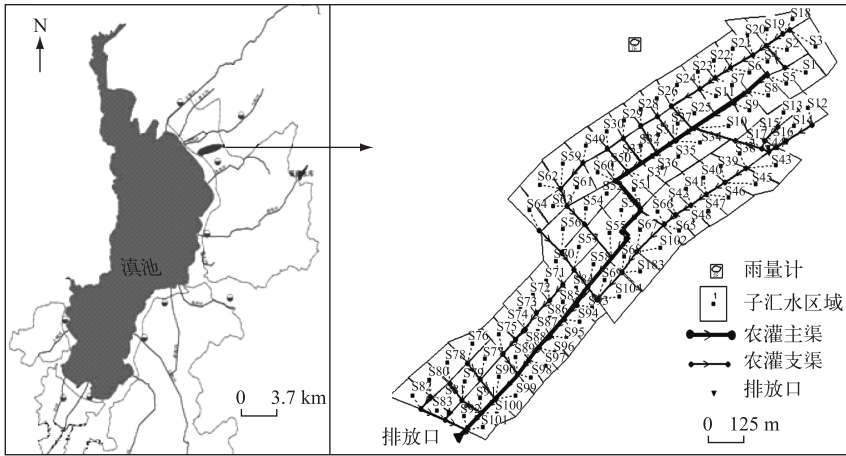


图 1 研究区域位置及子汇水区概化图

Fig.1 Location and conceptualization sketch of study area subcatchment

表 1 SWMM 模型参数局部灵敏度分析结果

Tab.1 Results of sensitivity analysis on parameters of SWMM model

参数类型	参数名称	参数	径流总量 S_1	流量峰值 S_2
水文水力参数	N-imperv	不透水性粗糙系数 N 值	-0.20	-0.21
	N-perv	渗透性粗糙系数 N 值	0.00	0.00
	Destore-imperv	不透水性洼地蓄水/mm	-0.04	0.01
	Destore-perv	渗透性洼地蓄水/mm	0.00	0.00
	% Zero-imperv	无洼地蓄水不透水性/%	0.05	-0.01
	Conduit roughness	渠道粗糙系数	-0.27	-0.95
	Max. infil. rate	最大入渗速率/(mm/h)	-0.01	0.00
	Min. infil. rate	最小入渗速率/(mm/h)	0.00	0.00
	Decay constant	衰减系数/ h^{-1}	0.01	0.00
参数类型	参数名称	参数	污染负荷 S_3	浓度峰值 S_4
水质参数	C_1	最大累积量/(kg/hm^2)	0.87	0.99
	C_2	累积常数/ d^{-1}	0.82	0.82
	R	冲刷系数	0.97	0.98
	n	冲刷指数	0.13	0.54

要为 C_1 、 C_2 和 R , 其中 C_1 在污染物峰值浓度的灵敏度接近 1, 影响非常大. 参数 n 是影响污染物浓度峰值的灵敏度参数, 而对污染负荷的影响则相对较小(表 1).

1.3 模型参数的率定

SWMM 模型的参数包括产汇流系统模块的水文水力参数, 水质模块的污染物累积、冲刷参数. 本研究选用 Horton 入渗模型模拟研究区的降雨入渗过程, 参考相关文献^[20-21], 将最大入渗速率、最小入渗速率、衰减系数和排干时间的初始值设为 96 mm/h、0.5 mm/h、 7 h^{-1} 和 7 d. 选用指数函数累计模型模拟污染物的累积, 需要输入的参数包括指数累积方程中的最大累积量和累积常数. 选用指数冲刷模型模拟污染物的冲刷过程, 输入参数包括指数冲刷方程中的冲刷系数和冲刷指数. 为反映不同土地利用类型的地表污染物累积冲刷过程, 将各子汇水区土地利用类型分为大棚、绿地和道路 3 种分别进行模拟, 选择化学需氧量(COD_{Cr})、悬浮物浓度(SS)、TN 和 TP 等 4 种污染物作为主要污染因子, 模型中各参数通过率定最终确定.

本研究于 2013 年 8 月 16 日、2014 年 8 月 18 日和 2014 年 9 月 17 日进行了 3 场有效的降雨径流采样.

水样采集从降雨径流产生开始,每 20 min 采集一次,直至降雨结束,同时监测排放口的流量变化. 采集的水样立即送往实验室,根据《水和废水监测分析方法》(第四版)^[22]分别采用重铬酸钾法、滤纸抽滤法(0.45 μm 滤膜)和过硫酸钾消解—紫外分光光度法对 COD_{Cr}、SS、TN、和 TP 浓度进行测定. 2013 年 8 月 16 日、2014 年 8 月 18 日和 2014 年 9 月 17 日分别采集水样 18、15、24 个.

表 2 SWMM 模型的水文水力参数率定值

Tab.2 Calibration results of hydrological and hydnronic parameters in SWMM

参数名称	含义	率定值
N-imperv	不渗透性粗糙系数 <i>N</i> 值	0.015
N-perv	渗透性粗糙系数 <i>N</i> 值	0.5
Destore-imperv	不渗透性洼地蓄水/mm	2
Destore-perv	渗透性洼地蓄水/mm	7
%Zero-imperv	无洼地蓄水不渗透性/%	40
Conduit roughness	渠道粗糙系数	0.17
Max. infil. rate	最大入渗速率/(mm/h)	94
Min. infil. rate	最小入渗速率/(mm/h)	0.6
Decay constant	衰减系数/h ⁻¹	7
Drying time	排干时间/d	7

本研究采用 2013 年 8 月 16 日和 2014 年 8 月 18 日两场降雨径流监测数据进行参数率定,采用 2014 年 9 月 17 日的降雨径流监测数据进行模型验证. 采用 Nash-Sutcliffe 效率系数 *NS*^[23] 作为目标函数来衡量模拟值与实测值之间的拟合度. *NS* 效率系数的计算公式为:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_{avr})^2} \quad (1)$$

式中,*NS* 为效率系数,*Q_m* 为实测瞬时值,*Q_p* 为模拟瞬时值,*Q_{avr}* 为实测平均值. 当 *NS*=1 时,说明模拟值与实测值相等,*NS*>0.5 时为可接受模拟值. 效率系数分级为: 0.5~0.7 为丙等,0.7~0.9 为乙等,*NS*>0.9 为甲等.

输入 2013 年 8 月 16 日和 2014 年 8 月 18 日两场降雨数据,结合 SWMM 模型用户使用手册,反复调整参数并进行模拟,使模拟结果最大程度和实测结果相吻合. 经率定的水文水力参数结果如表 2 所示,水质参数结果如表 3 所示.

表 3 SWMM 模型的水质参数率定值

Tab.3 Calibration results of water quality parameters in SWMM

用地性质	参数名称	COD _{Cr}	SS	TN	TP
大棚	最大累积量/(kg/hm ²)	10	10	3	0.3
	累积常数/d ⁻¹	0.20	0.15	0.25	0.18
	冲刷系数	0.040	0.040	0.030	0.030
	冲刷指数	1.9	1.9	1.9	2.0
绿地	最大累积量/(kg/hm ²)	60	55	15	2
	累积常数/d ⁻¹	0.21	0.20	0.22	0.22
	冲刷系数	0.030	0.030	0.030	0.030
	冲刷指数	1.9	1.9	1.9	1.9
道路	最大累积量/(kg/hm ²)	120	90	20	2.5
	累积常数/d ⁻¹	0.21	0.23	0.23	0.23
	冲刷系数	0.040	0.040	0.040	0.040
	冲刷指数	2.1	2.0	2.0	2.0

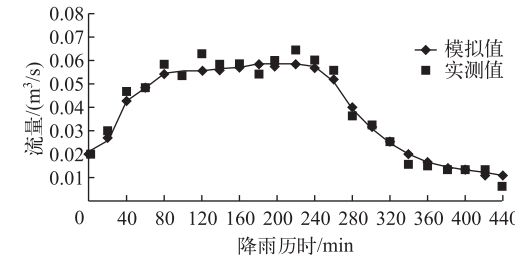


图 2 排放口流量的模拟值与实测值变化过程
Fig.2 Measurement and simulation values of rainfall runoff flow from the outlet of the area

1.4 模型的验证

采用 2014 年 9 月 17 日的降雨(降雨量为 5.6 mm,降雨历时为 5 h;其中前一个小时降雨量为 5 mm,后 4 个小时降雨量 0.6 mm)径流监测数据对模型进行验证. 图 2 和图 3 是模型模拟值与实测值的对比,根据公式(1)计算,流量、COD_{Cr}、SS、TN 和 TP 的 *NS* 效率系数分别为 0.858、0.835、0.803、0.712 和 0.752,均在 0.7 以上,说明 SWMM 模型可以较好地模拟该研究区域的地表径流变化过程和地表污染物质量浓度变化过程. 因此可认为针对该研究区域所设定的 SWMM 模型各项参

数均较为合理,所构建的 SWMM 模型准确可靠,可以用于后续的模拟研究.

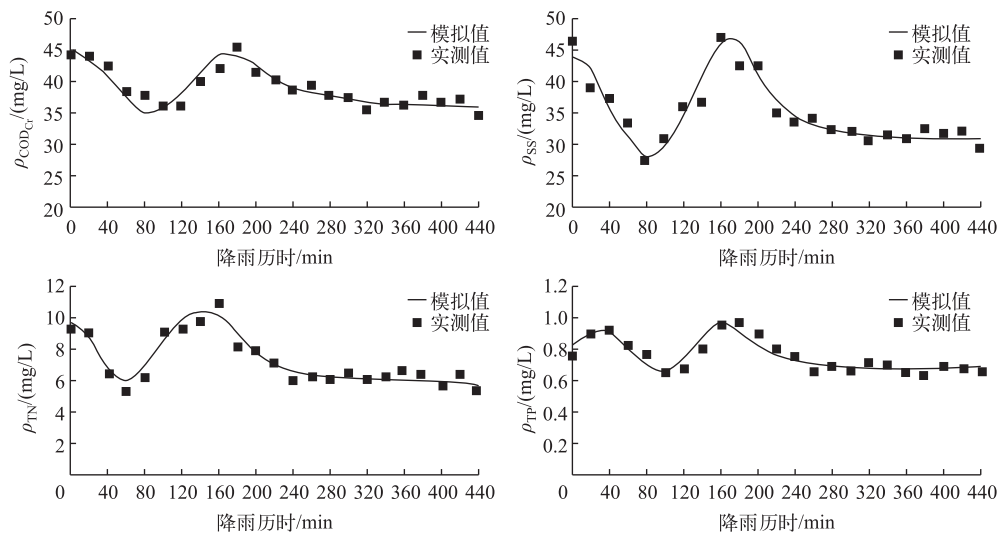


图 3 排放口污染物浓度的模拟值与实测值变化过程

Fig.3 Measurement and simulation values of contaminant concentrations from the outlet of the area

2 SWMM 模型的模拟运用

在 SWMM 模型基础上,本研究根据昆明市气象局提供的 1995—2008 年降雨数据,针对研究区域分别进行全年连续降雨条件下和典型设计降雨条件下的模拟. 其中,进行全年连续降雨的模拟可以充分反映降雨间隔时间对径流水质的影响以及降雨的随机性,真实反映年内不同降雨持续时间、不同雨量大小的降雨下污染物的流失情况,以估算流域全年的污染负荷^[19],识别主要污染物. 而进行典型设计降雨的模拟可以得到典型的流量过程和污染物浓度过程^[24],可用于指导截流方案的设计.

2.1 全年连续降雨条件下的模型模拟

单位面积负荷率是衡量区域污染程度的重要指标,通过污染物单位面积负荷率和研究区域的面积,可以初步测算出该研究区域径流污染对受纳水体总体污染的贡献率^[19]. 本研究根据 SWMM 模型要求的输入格式,将连续 14 a 的小时降雨资料进行了长时间序列模拟.

该区域 14 a 的总降雨量为 10857.7 mm,产生的总径流量为 6427.0 mm,则得知该研究区域的平均径流系数为 0.59. COD_{Cr}、SS、TN 和 TP 的单位面积负荷率分别为 118.34、82.90、54.64 和 5.46 kg/(hm²·a) (表 4).

表 4 14 a 连续降雨条件下的模型模拟结果*

Tab.4 The simulation results of SWMM with 14 years' continuous rainfall data

项目	COD _{Cr}	SS	TN	TP
本研究区域污染负荷总量/kg	121274.83	84955.92	55995.07	5595.41
本研究区域年均污染负荷/(kg/a)	8662.49	6068.28	3999.65	399.67
本研究区域单位面积负荷率/(kg/(hm ² ·a))	118.34	82.90	54.64	5.46
昆明城区单位面积负荷率/(kg/(hm ² ·a)) ^[19]	697.80	—	75.60	8.50

* 单位面积负荷率=年均污染负荷/研究区域面积,本研究区面积为 73.2 hm².

2.2 典型设计降雨条件下的模型模拟

设计不同降雨情景(即不同降雨重现期)是进行水量、水质模拟不可或缺的基本要素. 目前国内外普遍采用的设计降雨方法有芝加哥暴雨过程线法、Pilgrim and Cordery 法和 Huff 法等,其中 Huff 法是一种基于区

域多年降雨统计资料的方法,具有计算简单、代表性强等优点^[25]. 本研究利用 Huff 法对降雨数据进行分析,得到滇池东岸降雨特征为以单峰雨型为主,雨峰多位于降雨的前 1/4 处,即降雨强度峰值发生前的时间与总降雨历时的比值为 0.25. 基于昆明市暴雨强度公式(2),应用芝加哥降雨过程线设计降雨时程分布,构建降雨历时为 2 h,雨峰系数 $\gamma=0.25$,重现期分别为 0.3、0.5、1、3 和 5 a 的 5 种设计降雨过程作为降雨输入数据,进行不同降雨重现期下的模型模拟,假定降雨从 16:00 点开始,18:00 点结束. 水量模拟结果如图 4 所示,水质模拟结果如图 5 所示.

$$i = \frac{12.1 + 14.4 \lg P}{(t + 14.4)^{0.8}} \quad (2)$$

式中, i 为降雨强度 (mm/min), P 为降雨重现期 (a), t 为降雨历时 (min).

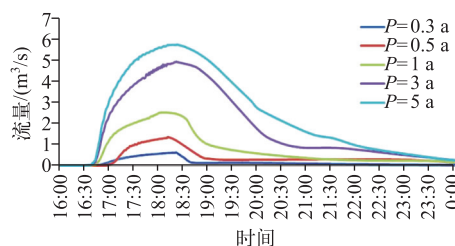


图 4 不同降雨重现期下
研究区域排放口流量过程线

Fig.4 Discharge hydrograph from the outlet
of the area under different rainfall return periods

根据不同降雨重现期下排放口流量过程线,可得相应的流量峰值及出现的时间. 由表 5 可知,重现期为 0.5、1、3 和 5 a 的径流峰值比重现期为 0.3 a 的分别增大了 1.1、2.7、6.3 和 7.5 倍;每个重现期降雨条件下的径流峰值比前一个重现期的分别增大了 106.2%、81.8%、93.8% 和 16.8%,这说明随着降雨重现期的增大,流量峰值也呈上升趋势,但上升幅度逐渐减小,峰值流量逐渐趋于平稳. 随着降雨量的增加,排放口流量不断增大,一般在降雨开始后 120~150 min 达到最大值,之后随着降雨强度的减小而逐渐减小(图 4). 相同降雨历时,降雨量越大排放口径流总量越大.

不同降雨重现期下研究区域排放口污染物浓度峰值随降雨强度的增大而增大,不同降雨重现期下的 SS、COD_{Cr}、TN 和 TP 浓度峰值均呈现出相同的变化规律,即 5 a 一遇 > 3 a 一遇 > 1 a 一遇 > 0.5 a 一遇 > 0.3 a 一遇(图 5). 降雨强度越大,质量浓度峰值出现的时间越早,并且降雨重现期越大,各污染物浓度在峰值后的下降速度越快. 在 5 a 一遇和 3 a 一遇的降雨强度下,SS、COD_{Cr} 和 TN 浓度经过峰值后迅速降至 1 a 一遇、0.5 a 一遇及 0.3 a 一遇过程线以下,表明与低降雨强度冲刷相比,经高强度降雨冲刷后地表产生的污染物浓度较小.

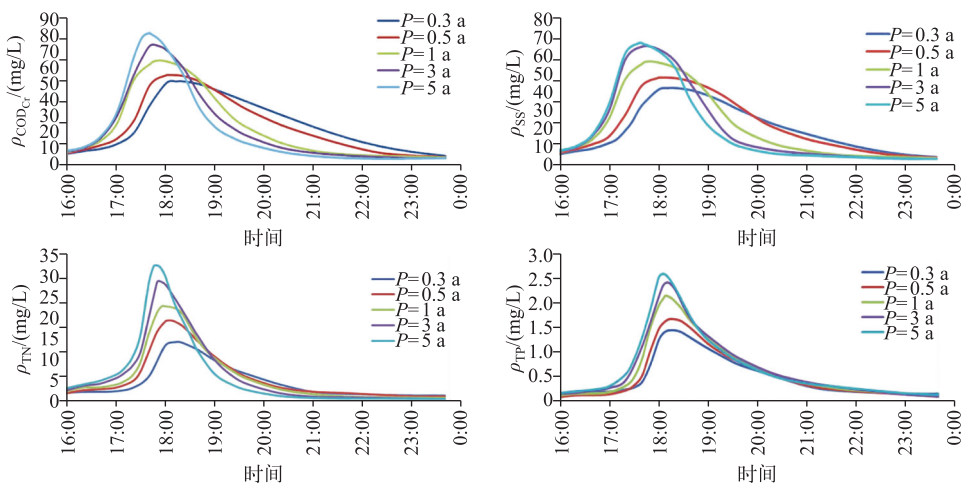


图 5 不同降雨重现期下研究区域排放口污染物浓度变化过程线

Fig.5 Variation of contaminant concentrations from the outlet of the area under different rainfall return periods

不同重现期下,降雨及径流对地表累积污染物的冲刷程度也不同,随径流产生并排放的非点源污染物

总量亦不同(表 5). 排放口的非点源污染负荷总量与降雨重现期呈正相关关系,即降雨重现期越大,污染物排放总量越大.

不同降雨重现期下污染物浓度峰值及出现的时间如表 5 所示. 分别将各污染物浓度峰值的时间节点与对应径流流量峰值时间节点进行对比,可知各污染物浓度峰值的出现时间均早于流量峰值的出现时间.

表 5 典型设计降雨条件下的模型模拟结果
Tab.5 The simulation results of SWMM under typical design rainfall conditions

指标	项目	降雨重现期				
		0.3 a	0.5 a	1 a	3 a	5 a
流量	排放总量/ m^3	5784.9	12697.1	22521.1	53134.2	69980.3
	流量峰值/ (m^3/s)	0.681	1.404	2.553	4.949	5.780
	流量峰值时间/min	143	133	125	143	144
COD_{Cr}	排放总量/kg	162.25	345.78	665.82	1622.92	2452.85
	浓度峰值/ (mg/L)	50.877	54.809	63.301	72.456	80.228
	浓度峰值时间/min	140(3)	123(10)	108(17)	100(43)	99(45)
SS	排放总量/kg	157.38	352.38	647.32	1589.75	2311.87
	浓度峰值/ (mg/L)	41.512	48.632	55.854	64.258	65.856
	浓度峰值时间/min	135(8)	121(12)	115(10)	107(35)	98(46)
TN	排放总量/kg	34.46	93.56	175.05	462.09	620.39
	浓度峰值/ (mg/L)	14.157	19.371	22.725	28.881	32.629
	浓度峰值时间/min	132(11)	123(10)	116(9)	127(16)	109(35)
TP	排放总量/kg	3.29	7.94	16.39	42.47	59.56
	浓度峰值/ (mg/L)	1.414	1.648	2.128	2.393	2.580
	浓度峰值时间/min	133(10)	133(10)	128(9)	130(13)	126(18)

()内数字为相同重现期下浓度峰值相比于流量峰值出现提前的时间.

3 模拟结果讨论

3.1 对全年连续降雨条件下的模型模拟结果的讨论

本研究区域为花卉大棚种植区域,大棚覆盖是该区域与传统大田种植的主要差别. 传统的平坦大田种植区域的综合雨量径流系数为 0.1~0.2,而该区域的综合雨量径流系数为 0.59,可见大棚的覆盖增加了区域的不渗透性,导致地表径流量的增加. 龙天渝等^[26]研究得出的三峡库区大田种植 TN 负荷为 2.6~4.2 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,TP 负荷为 0.432~3.186 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,可得知该大棚种植区域的 TN 和 TP 单位面积负荷率要高于其他大田种植区域. 这是因为虽然大棚覆盖阻碍了降雨对地表的直接冲刷,但是高度集约化的花卉种植产生了大量的花卉残枝、塑料薄膜等固体废弃物,这些固体废弃物通常堆放在露天场地和沟渠两边,腐败后就随着降雨冲刷进入地表径流中,使得该区域内的降雨径流中 TN 和 TP 浓度较高,成为大棚种植区降雨径流的主要污染物,是收集截流的主要对象. 滇池流域截污治污体系的服务范围主要为城市区域和农村区域,该区域的 COD_{Cr} 的单位面积负荷率明显低于昆明城区,而 TN 和 TP 的则相差不大(表 4). 可见对 TN 和 TP 而言,对本研究区域径流污染的收集截流和城区同样重要. 此外,滇池流域面积为 2920 km^2 ,其中耕地占 25%^[27],即耕地面积为 730 km^2 ,本研究区面积为 0.732 km^2 ,所以本研究花卉大棚区面积占滇池流域耕地面积的比例为 0.1%,但本研究区 TN 和 TP 的污染负荷总量(表 4)占滇池流域农业面源污染负荷^[3]的比例分别为 0.48%和 0.23%,所以滇池流域花卉大棚区径流污染是滇池流域农业面源污染的重要来源. 故应对滇池东岸花卉大棚种植区域降雨径流进行收集截流处理.

3.2 对典型设计降雨条件下的模型模拟结果的讨论

从场次降雨的模拟分析中可以看出,降雨强度是影响径流量大小和污染物流失的主要因素. 降雨强度较大时,污染物浓度峰值较大,浓度峰值出现时间会提前,因此对该区域进行降雨径流污染收集时,应该收

集污染浓度相对较高的部分,相应的收集截流时间也应该提前.由于场次降雨中的污染物浓度和径流量变化不同步,污染物浓度峰值出现时间要早于流量峰值,可以考虑合理利用污染物浓度峰值和流量峰值出现的时间差,实现低流量高浓度污水和高流量低浓度污水的分流,从而达到高效收集截流的目的.

4 结论

控制和治理滇池东岸花卉大棚种植区产生的农业非点源污染对滇池水环境治理至关重要.本研究通过构建 SWMM 模型对研究区域进行了全年连续降雨条件下和典型设计降雨条件下的降雨径流水质水量模拟,得到如下结论:

- 1) 构建的 SWMM 模型流量、 COD_{Cr} 、SS、TN 和 TP 的 NS 效率系数分别为 0.858、0.835、0.803、0.712 和 0.752,能够较好地模拟研究区域的水量和水质变化.
- 2) 研究区域的平均径流系数为 0.59, COD_{Cr} 、SS、TN 和 TP 的单位面积负荷率分别为 118.34、82.90、54.64 和 5.46 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$.其中,TN 和 TP 的单位面积负荷率与昆明市区接近,是主要控制的污染物.
- 3) 各污染物浓度峰值的出现时间均早于流量峰值出现的时间,对滇池东岸花卉大棚种植区应进行污染负荷尤其是 TP、TN 浓度与流量错峰控制.

5 参考文献

- [1] Meng Fanxiang, Zhao Qian, Ma Jian *et al.* Evaluation of agricultural non-point source pollution loadings in Dasu River. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, (S1): 145-150. [孟凡祥, 赵倩, 马建等. 农业非点源污染负荷及现状评价——以大苏河地区为例, 农业环境科学学报, 2010, (S1): 145-150.]
- [2] Zhang Rongshe, Zhou Qi, Shi Yunpeng *et al.* Study on storm runoff characteristics in agricultural area in the Dianchi Valleys. *China Water & Wastewater*, 2003, 19(2): 13-16. [张荣社, 周琪, 史云鹏等. 滇池流域农业区的暴雨径流特征研究. 中国给水排水, 2003, 19(2): 13-16.]
- [3] Xu Xiaomei, Wu Xue, He Jia *et al.* Research on the pollution characteristics of Dianchi watershed (1988-2014) and identification of countermeasures. *J Lake Sci*, 2016, 28(3): 476-484. DOI: 10.18307/2016.0302. [徐晓梅, 吴雪, 何佳等. 滇池流域水污染特征(1988-2014年)及防治对策. 湖泊科学, 2016, 28(3): 476-484.]
- [4] Li Jing, Yang Hao, Xie Biao *et al.* Distribution and source diagnosis of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soil at the shore of the Dianchi Lake. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(12): 31-35. [李婧, 杨浩, 谢标等. 滇池湖滨农业土壤中 PAHs 分布特征及来源. 环境科学与技术, 2015, 38(12): 31-35.]
- [5] Shi Feng, Du Pengfei, Zhang Dawei *et al.* Nonpoint source pollution simulation in greenhouse region of Dianchi Basin. *J Tsinghua Univ (Sci & Tech)*, 2005, (3): 363-366. [石峰, 杜鹏飞, 张大伟等. 滇池流域大棚种植区面源污染模拟. 清华大学学报(自然科学版), 2005, (3): 363-366.]
- [6] He Jia, Xu Xiaomei, Yang Yan *et al.* Problems and effects of comprehensive management of water environment in Lake Dianchi. *J Lake Sci*, 2015, 27(2): 195-199. DOI:10.18307/2015.0201. [何佳, 徐晓梅, 杨艳等. 滇池水环境综合治理成效与存在问题. 湖泊科学, 2015, 27(2): 195-199.]
- [7] Li Yuexun, Xu Xiaomei, He Jia *et al.* Point source pollution control and problem in Lake Dianchi basin. *J Lake Sci*, 2010, 22(5): 633-639. DOI:10.18307/2010.0502. [李跃勋, 徐晓梅, 何佳等. 滇池流域点源污染控制与存在问题解析. 湖泊科学, 2010, 22(5): 633-639.]
- [8] Li Zhongjie, Zheng Yixin, Zhang Dawei *et al.* Impacts of 20-year socio-economic development on aquatic environment of Lake Dianchi Basin. *J Lake Sci*, 2012, 24(6): 875-882. DOI:10.18307/2012.0610. [李中杰, 郑一新, 张大伟等. 滇池流域近 20 年社会经济发展对水环境的影响. 湖泊科学, 2012, 24(6): 875-882.]
- [9] Rossman L.A. Storm water management model user's manual version 5.0. USA: United States Environmental Protection Agency, 2009.
- [10] Qin Yuhuan, Wang Hongwu, Zhang Yilong. Review of urban stormwater runoff models. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(1): 13-19. [秦语涵, 王红武, 张一龙. 城市雨洪径流模型研究进展. 环境科学与技术, 2016, 39(1): 13-19.]
- [11] Barco J, Wong KM, Stenstrom MK. Automatic calibration of the U. S. EPA SWMM model for a large urban catchment.

- Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, **134**(4): 466-474.
- [12] Shon TS, Kim SD. Estimation of NPS pollutant properties based on SWMM modeling according to land use change in urban area. *Desalination and Water Treatment*, 2012, **38**(1/2/3): 333-341.
- [13] Li B, Shao DG, Song M *et al.* Simulating the effect of reducing the non-point source pollution by buffer zone with SWMM. National Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2013: 996-999.
- [14] Jang S, Cho M, Yoon J. Using SWMM as a tool for hydrologic impact assessment. *Desalination*, 2007, **212**(1/2/3): 344-356.
- [15] Chen CL, Scanlin J, Feng A. Simulating the fate of diazinon in Castro Valley watershed by SWMM//Global Solutions for Urban Drainage. Reston: ASCE, 2002: 1-16.
- [16] Ma Xiaoyu, Zhu Yuanli, Mei Kun *et al.* Application of SWMM in the simulation of non-point source pollution load in urban residential area. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(1): 95-102. [马晓宇, 朱元励, 梅琨等. SWMM 模型应用于城市住宅区非点源污染负荷模拟计算. 环境科学研究, 2012, **25**(1): 95-102.]
- [17] Wang Zhibiao. Research of the non-point source pollution load in palm-spring residential district based on SWMM [Dissertation]. Chongqing: Chongqing University, 2007. [王志标. 基于 SWMM 的棕榈泉小区非点源污染负荷研究[学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2007.]
- [18] Lenhart L, Eckhardt K, Fohrer N *et al.* Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2002, **27**(9/10): 645-654.
- [19] Zhao Lei, Yang Fengle, Yuan Guolin *et al.* Simulation of the quantity and quality of the urban runoff. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(6): 1961-1972. DOI: 10.5846/stxb201310141523. [赵磊, 杨逢乐, 袁国林等. 昆明市明通河流域降雨径流量水质 SWMM 模型模拟. 生态学报, 2015, **35**(6): 1961-1972.]
- [20] Zhao Gang, Pang Bo, Xu Zongxue *et al.* Simulation of urban storm at Dahongmen drainage area by SWMM. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2014, **50**(5): 452-455. [赵刚, 庞博, 徐宗学等. 基于 SWMM 模型的北京大红门排水片区雨洪模拟研究. 北京师范大学学报(自然科学版), 2014, **50**(5): 452-455.]
- [21] Huber WC, Dickinson RE, Jr TOB. Storm water management model; version 4. Part A User's, 1988, **2**(4): 46-56.
- [22] "Water and wastewater monitoring and analysis method" editorial board of State Environmental Protection Administration of China ed. Monitoring and analysis methods of water and wastewater; fourth edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. [国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [23] Nash JE, Sutcliffe JV. River flow forecasting through conceptual models. Part I: A Discussion of Principles, 1970.
- [24] Chen J, Adams BJ. Development of analytical models for estimation of urban storm water runoff. *Journal of Hydrology*, 2007, **336**(s3/s4): 458-469.
- [25] Zhao Dongquan, Tong Qingyuan, Wang Haozheng *et al.* Application of SWMM model in urban rainwater elimination system. *Water & Wastewater Engineering*, 2009, **35**(5): 198-201. [赵冬泉, 佟庆远, 王浩正等. SWMM 模型在城市雨水排除系统分析中的应用. 给水排水, 2009, **35**(5): 198-201.]
- [26] Long Tianyu, Liu Min, Liu Jia. Development and application of non-point source pollution load model of spatial and temporal distribution in Three Gorges Reservoir Region. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(8): 217-223. [龙天渝, 刘敏, 刘佳. 三峡库区非点源污染负荷时空分布模型的构建及应用. 农业工程学报, 2016, **32**(8): 217-223.]
- [27] Environmental Protection Agency of Kunming, Chinese Research Academy of Environmental Sciences. Study report on "12TYP" of water pollution control in Dianchi Lake Basin. Kunming, 2010. [昆明市环境保护局, 中国环境科学研究院. 滇池流域水污染防治“十二五”规划研究报告. 昆明, 2010.]