

平原河网区降雨径流污染负荷测算——以太湖流域望虞河西岸为例*

庞琰瑾, 袁增伟**

(南京大学环境学院污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210023)

摘要: 如何精细量化降雨径流污染负荷是流域尺度实现面源精准治污全过程控制的重要前提. 本研究以水污染较为严重的望虞河西岸综合示范区为例, 通过开展不同土地利用类型的降雨观测实验, 修正 SCS-CN 模型中的初损率, 并基于土地利用类型遥感解译和降雨径流污染物浓度测定, 精细刻画降雨径流中总磷 (TP)、总氮 (TN)、氨氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$)、化学需氧量 (COD) 4 类主要污染物的时空分布格局. 结果表明: 研究区绿地和农田、硬质地表的降雨初损率分别为 0.3 和 0.9; 径流深、污染负荷与降雨深之间存在显著的正相关性. 随着降雨量逐年递减, 研究区降雨径流中 TP、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD 四类污染物的负荷量分别从 2017 年的 190、1359、445 和 16041 t 减少至 2019 年的 118、949、314 和 11250 t; 单位面积 TN 和 COD 负荷最高的用地类型是农村住宅用地, 草地的四种污染物单位面积负荷均最低, 林地次之. 相关研究结果为望虞河流域水污染控制提供了基础数据, 也为定量测算平原河网区面源污染负荷提供了方法参考.

关键词: SCS-CN 模型; 降雨径流; 面源污染; 污染负荷; 流域治理; 用地类型; 望虞河; 太湖流域

Quantification of pollutants in rainfall-runoff in plain areas with dense river networks: A case study in the Western Bank of Wangyu River, Taihu Basin *

Pang Yanjin & Yuan Zengwei **

(State Lab of Pollution Control and Resources Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, P.R. China)

Abstract: Quantifying the pollutant loads in rainfall-runoff plays a critical role in non-point water pollution control at the watershed level. In this study, rainfall-runoff experiments were conducted on various land use types in the western bank area of Wangyu River to localize the initial abstraction ratio in the SCS-CN model. Then, by incorporating the remote sensing interpretation of land use types and the measurement of pollutant concentration in the rainfall-runoff, this study explored the temporal and spatial patterns of four kinds of pollutants, namely total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), ammonia nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$) and chemical oxygen demand (COD). The results indicate that the recommended initial abstraction ratios for grassland/forest/farmland and impervious surface in the study area are 0.3 and 0.9, respectively. Besides, the rainfall-runoff depths and pollutant loads are found to be significantly and positively correlated with the rainfall depths. Along with the decrease of annual rainfall in this region, the annual amount of TP, TN, $\text{NH}_3\text{-N}$ and COD loads in rainfall-runoff have reduced from 190, 1359, 445 and 16041 t in 2017 to 118, 949, 314 and 11250 t in 2019, respectively. Rural resident land, among all the land use types, has the highest TN and COD loads per area, while grassland and forest rank the bottom. This study provides precise information about pollutants in rainfall-runoff to facilitate the development of water pollution control strategies in Wangyu River watershed and can be used as a methodological reference for future quantification of non-point source pollution practices in plain areas with dense river networks.

Keywords: SCS-CN model; rainfall-runoff; non-point source pollution; pollutant load; basin management; land use type; Wangyu River; Taihu Basin

* 2020-05-12 收稿; 2020-07-05 收修改稿.

国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07204001) 和国家自然科学基金项目 (41871214, 41801212) 联合资助.

** 通信作者; E-mail: yuanzw@nju.edu.cn.

伴随我国城镇化和工业化的快速推进,不透水地面和大气污染物沉降量快速增加,这不仅加剧了城市内涝^[1],而且造成降雨径流污染负荷激增.有学者指出,在城市化程度较高的地区,若不重视面源污染控制尤其是降雨径流污染,即使点源污染得到全面控制,受纳水体的水质仍无法得到明显改善^[2-3].在“河长制”先行的区域,污染治理全面推行精准化,逐渐实现从粗放治理向精准治污转变.而精细量化降雨径流污染负荷是流域尺度实现面源精准治污全过程控制的重要前提.

传统的降雨径流污染负荷测算往往采用输出系数法,输出系数指单位时间单位面积负荷量,常采用多年平均值,这种方法虽然简便,但未能充分考虑污染负荷产生的时空异质性^[4-5].随着对降雨径流污染研究的精度要求不断提高,各水文模型被广泛应用于降雨径流污染研究中^[6-8],如 SWMM、SWAT、AnnAGNPS 等模型.但这些模型涉及参数过多、资料不易获取且计算过程复杂^[9-10].

SCS-CN(soil conservation service-curve number)是被广泛应用于降雨径流污染研究的经验水文模型之一^[11-13].该方法基于土壤的前期湿度条件(AMC)、土壤类型和土地利用类型特征综合确定了 CN 取值(变化在 0~100 之间),并通过经验公式进一步推算出土壤的最大可能入渗量(S).最后,基于降雨量(P)、初损值(I_a)和最大可能入渗量(S)之间的数学关系,即可计算得到降雨径流深(Q).一般情况下,根据降雨事件前 5 天的累积降雨量 P_5 ,将 AMC 划分为 3 种等级,即干旱条件(AMC I)CN1、一般条件(AMC II)CN2 和湿润条件(AMC III)CN3.该模型具有计算过程简单、所需参数少、操作简便、资料易于获取等特点,适用于资料缺乏且下垫面复杂的地区^[14].

然而,早期的 SCS-CN 方法没有明确区分前期湿度条件且 AMC 分级方式会造成初损值突变.针对这些问题,学者们相继提出了 AMC 的量化修正方法,如 Mishra 等对前期土壤湿度做了量化修正,构建了 Mishra-Singh(MS)模型^[15];Geetha 等将 AMC 修正方法与前期湿度含量(AMA)修正方法进行了对比^[16].Li 等利用修正后的 MS 模型测算了沈阳市 2015 年不同用地类型的降雨径流深^[17].另外,SCS-CN 方法将初损值(I_a)与最大可能入渗量(S)的比值定义为初损率(λ),通常取标准值 0.2,但该取值未考虑其与研究区地理和气候因素的相关性^[18],因此,邓景成等^[19-20]分别对我国黄土区和三峡地区的降雨径流初损率做了本地化率定.总体来看,前期基于 SCS-CN 模型的降雨径流研究多是为了预测城市雨洪,只关注了地表径流量,并未关注径流造成的水污染物迁移传输,但这些改进和修正模型为提高地表径流量的计算精度提供了有力支持^[21],也为精准测算降雨径流污染负荷提供了方法保障.

望虞河西岸综合示范区位于太湖流域,是正在经历快速城市化的地区,又是“引江济太”工程的清水廊道流经区.该地区水污染较为严重,其水环境治理对于保障太湖水质具有重要意义.因此,本研究通过在研究区内开展不同土地利用类型的降雨观测实验,修正 SCS-CN 模型中的初损率,并基于土地利用类型遥感解译和降雨径流污染物浓度测定,精细刻画望虞河西岸河网区的降雨径流污染负荷时空分布格局.研究结果为流域面源污染负荷测算和水污染防治方案制定提供了更为详细具体的决策支撑.

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区(图 1)隶属于江苏省无锡市,属亚热带季风气候,降水丰沛,年降水量在 1100 mm 左右^[22].研究区占地面积 486 km²,位于望虞河西岸南部,以新吴区和锡山区为主,另有约 8% 面积属于梁溪区.新吴区是高新产业和现代工业区,锡山区是工农业共同发展的城村复合区,梁溪区为现代商住区.

1.2 污染负荷测算

1.2.1 降雨径流深测算 降雨径流深采用 SCS-CN 模型进行计算^[23],模型假设降雨实际入渗量与其潜在最大入渗量之比等于降雨径流深与潜在最大径流深之比.其模拟方程为:

$$Q = \frac{(P - \lambda \cdot S)^2}{P + (1 - \lambda)S} (P \geq \lambda \cdot S, \text{否则 } Q = 0) \quad (1)$$

式中, Q 为降雨径流深(mm); P 为降雨量(mm); S 为最大可能入渗量(mm); λ 为初损率,是初损值 I_a 与 S 的比值,无量纲.在硬质地表上,由于水分蒸发很快,土壤的前期湿度条件这一因素对径流产生的影响不明显,因此降雨径流深通过公式(1)计算.然而,对于绿地和农田这两种下垫面类型,本研究采用对前期土壤湿

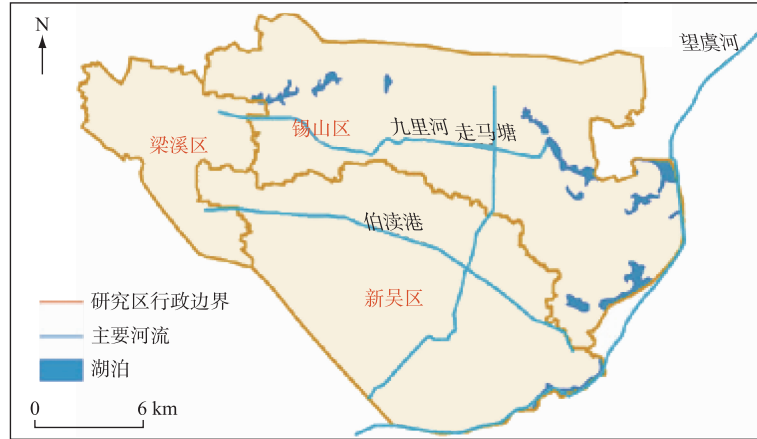


图 1 研究区内主要水系及行政区划

Fig.1 Main river systems and administrative division of the study area

度做了量化修正的 Mishra-Singh (MS) 模型^[15], 引入 M 参数, 降雨径流深通过公式(3)计算.

$$M = 0.5[-(1 + \lambda)S + \sqrt{(1 - \lambda)^2 S^2 + 4P_5 \cdot S}] \quad (2)$$

$$Q = \frac{(P + Ia)(P - Ia + M)}{P - Ia + M + S} \quad (3)$$

式中, P_5 为降雨事件前 5 d 的累积降雨量, 用来表征前期土壤湿度.

1.2.2 污染负荷测算 研究区产生的降雨径流污染, 可由“降雨径流深”、“污染物浓度”与“土地利用类型面积”这 3 个空间化图层数据在 ArcGIS 软件中用栅格计算器相乘叠加获得, 即:

$$W_j = \sum_{i=1}^n (Q_i \cdot C_{ij} \cdot S_i) \quad (4)$$

式中, W_j 为降雨径流第 j 类污染物总负荷; Q_i 为第 i 种土地利用类型的降雨径流深, 采用本地化修正后的 SCS-CN 模型计算; C_{ij} 为第 i 种土地利用类型上第 j 类污染物的浓度, 采用间隔采样的监测数据计算获得降雨事件平均浓度 EMC ; S_i 为第 i 种土地利用类型面积, 通过遥感解译获得; n 为流域内土地利用类型数.

1.3 数据收集与处理

1.3.1 土地利用类型解译 土地利用类型划分参考《土地利用现状分类》国家标准 (GB/T 21010—2019), 研究区的土地利用类型分为不透水地表、透水地表两大类, 具体包含 9 种, 即商服用地、工矿仓储用地、城镇住宅用地、农村住宅用地、道路、林地、农田、草地、未利用地. 选取拍摄于 2017 年的 Landsat 8 卫星影像图和 GeoEye-1 高分辨率商业遥感影像图作为遥感数据源, 用 ENVI 5.2 软件进行遥感解译. 对监督分类得到的土地利用类型图进行人工目视解译调整, 最终得到 5 m×5 m 高分辨率的土地利用类型图 (图 2). 解译结果显示, 农田在各土地利用类型中占比最大, 其次是林地, 城镇居民用地、工矿仓储用地、商服用地和道路等硬质地表约占总面积的 40%. 从各行政区来看, 梁溪区近 40% 的面积为城镇住宅用地, 而锡山区 50% 以上的面积为农田和林地, 新吴区农田、林地、工矿仓储用地分别占该区总面积的 20% 左右. 考虑到透水和不透水两大类下垫面类型在产流原理和产流特征上有较大差异, 同时植被类型和人类活动 (如耕作) 也会影响产流特征, 因此, 本研究在研究产流特征时将土地利用类型划分为绿地 (包括草地和林地)、农田、硬质地面 (包括商服用地、工矿仓储用地、城镇住宅用地、农村住宅用地、道路和未利用地) 3 类; 在研究产污特征时, 考虑 10 种不同的土地利用类型 (道路又细分为城市道路和农村道路, 两者在遥感解译时难以区分, 后续计算时按城镇住宅和农村住宅的比例加权平均处理).

1.3.2 日降雨量 本研究收集了研究区内 10 个降雨观测站的日降雨量数据, 涵盖了 2017 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日, 并使用泰森多边形插值的方法进行空间插值 (图 3).

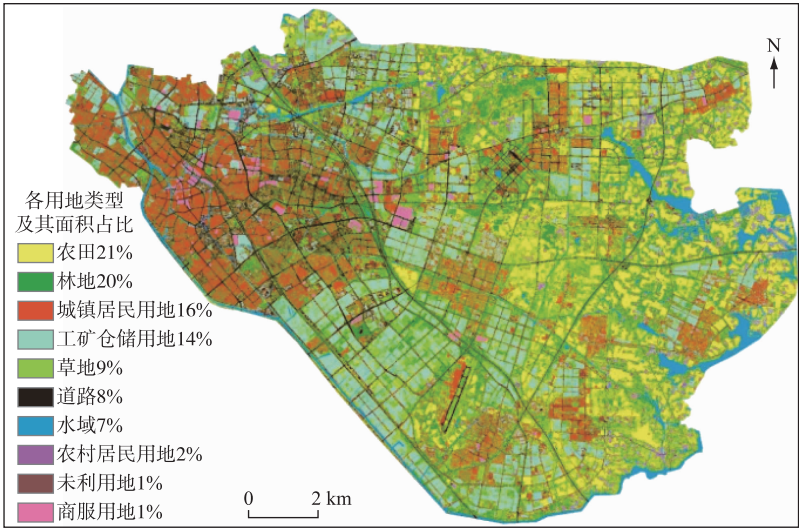


图 2 2017 年研究区土地利用类型
Fig.2 Land use type of the study area in 2017

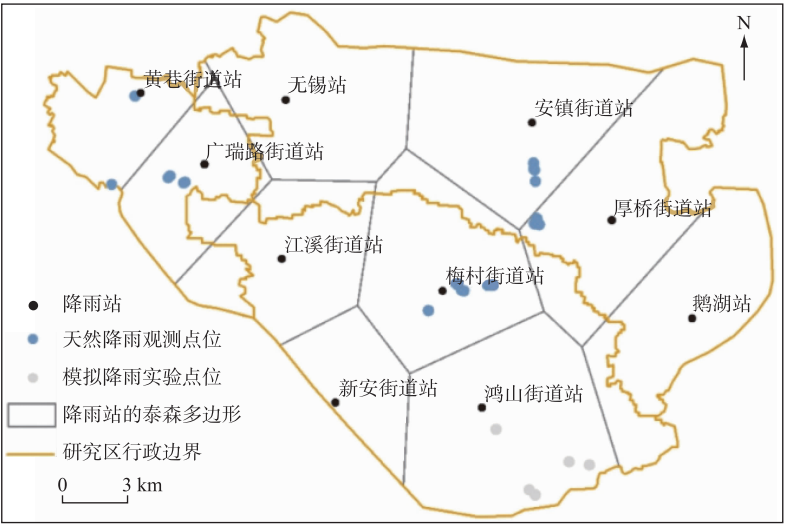


图 3 降雨径流实验空间点位分布及降雨站的泰森多边形分布
Fig.3 Spatial distribution of monitoring points conducting rainfall runoff experiments & Tyson polygon distribution of rainfall observation stations

1.3.3 初损率修正 为实现初损率 λ 的本地化修正,本研究于 2018 年 7 月 22 日至 2019 年 11 月 30 日分别开展了 3 次天然降雨观测实验和 9 次模拟降雨实验,测定 3 种下垫面类型的降雨初损值. 其中,模拟降雨实验采用 NLJY-10 型便携式人工模拟降雨系统,模拟大、中、小 3 种强度的降雨(小雨难以产流),径流场长 2.5 m、宽 2 m、高 3 m,其自带雨量感测装置,可以输出每 20 s 的降雨强度. 实验监测点位的空间分布如图 3 所示. 不同下垫面类型的降雨初损值见表 1. 通过与手册值进行对比,同时考虑到研究区全年降雨以中雨为主,因此采用模拟降雨实验中雨条件下的初损值进行后续的参数本地化修正. 在此基础上,本研究对 3 类下垫面的初损率从 0 开始做步长为 0.05 的迭代计算,并将初损率和实测的初损值代入 SCS-CN 模型,计算出相应的降雨径流深. 由降雨径流深除以降雨量计算出径流系数,并与《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)给

出的参考径流系数、文献中的径流系数^[25-26]进行对比,从而推定可靠性较高的初损率取值.

表 1 不同下垫面类型的降雨初损值
 Tab.1 Initial abstraction values of different underlying surfaces

下垫面 类型	模拟降雨获取的初损值/mm		天然降雨获取的初损值/mm		手册值/mm
	中雨	大雨	中雨	大雨	
绿地	17.36/17.62 *	16.69	1.30	4.05/3.00	14.33/13.50
农田	18.81	16.17	—	2.10	6.28
硬质 地表	3.59	—	0.35/0.20/0.40/0.40/1.40/0.69/ 1.15/0.69/0.68/0.92/0.23	0.30/0.30/0.25/0.10/ 0.15/2.50	2.67/3.82

* 不同 AMC 分级条件下,对绿地开展模拟降雨实验测定的初损值相差不大,若采用 AMC 分级方式会造成初损值突变而带来计算误差.

1.3.4 污染物浓度测定 在降雨径流观测实验中,同时采集径流样品测定其中的污染物浓度. 具体步骤是:对于各土地利用类型的观测点,自产流起前半小时每间隔 5 min 采集一次样品,后半小时每 15 min 采集一次样品. 采样完成后,将各采样点收集到的 8~9 瓶样品于 24 h 内送至实验室进行监测分析. COD、总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮(NH₃-N) 4 种污染物的浓度监测方法分别采用最新国标方法,即重铬酸钾法(HJ 828—2017)、钼酸铵分光光度法(GB/T 11893—1989)、碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 535—2009)和纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009). 各土地利用类型上的 EMC 取值与文献值^[25-35]的对比如图 4 所示.

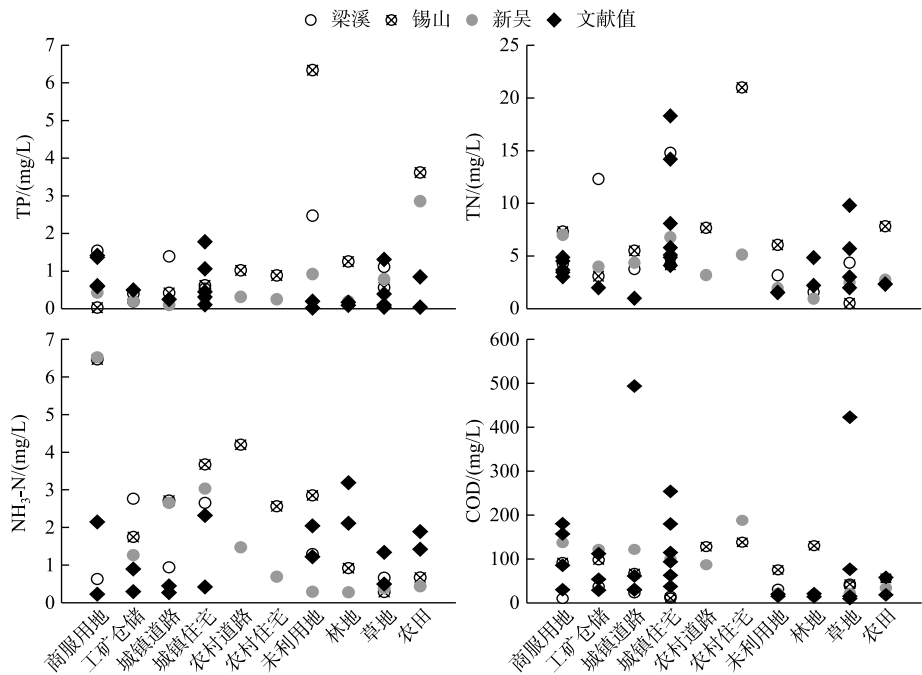


图 4 四种污染物 EMC 与文献值对比
 Fig.4 Comparison of EMC of four pollutants and literature values

2 结果与讨论

2.1 地表径流深

研究表明,研究区域绿地和农田的初损率值为 0.3,硬质地表的初损率值为 0.9. 这一参数修正结果对于

城市化程度较高的平原河网区具有一定的参考价值. 在硬质地表上, 从降雨向地表径流转化这一过程的主要损失在于产流前的初损部分, 因此初损值本身的大小对后续计算影响较大, 而硬质地表上产流较快, 在获取初损值时容易产生较大误差, 未来可以适当增加实验次数, 提高参数修正可靠性.

2017—2019 年研究区内各降雨观测站在 3 类下垫面上的径流深计算结果如表 2. 从表 2 可以看出: 1) 各站产生的径流深与降雨深之间存在显著的正相关性, 即随着各站降雨量的减少而递减, 且各观测站径流深的差异程度与降雨深差异基本相同; 2) 各用地类型上产生的径流深呈现如下特征: 硬质地表>绿地>农田.

表 2 各降雨观测站三类下垫面上的径流深

Tab.2 Runoff depth of three types of underlying surface in each rainfall observation station

年份	指标	无锡 本站	黄巷 街道	安镇 街道	鹅湖 站	新安 街道	广瑞路 街道	江溪 街道	梅村 街道	鸿山 街道	厚桥 街道
2017	降雨深/mm	1332.7	1335.4	1325.6	1222.7	1102.7	1411.2	1289.9	1240.8	1120.2	1088.4
	绿地径流深/mm	289.51	288.78	302.53	220.51	184.26	282.00	230.83	240.67	185.76	174.92
	农田径流深/mm	272.11	272.43	283.82	202.47	170.12	263.77	213.49	225.71	169.76	161.41
	硬质地表径流深/mm	877.69	883.30	880.64	796.57	686.47	935.93	833.07	786.78	706.27	671.79
2018	降雨深/mm	1213.4	1161.9	1317.5	1295.1	1105.1	1428	1245.8	1260.5	1142.5	1250.2
	绿地径流深/mm	178.31	130.27	238.72	178.14	94.19	263.24	161.42	183.23	140.24	174.44
	农田径流深/mm	161.20	112.94	218.54	157.44	78.92	240.76	144.30	165.31	123.69	157.20
	硬质地表径流深/mm	731.53	677.90	845.75	804.52	647.37	920.15	758.80	777.90	681.56	751.96
2019	降雨深/mm	1082.1	1094.4	905.8	1007.4	1052.0	1047.3	950.6	1007.0	1020.3	1045.4
	绿地径流深/mm	123.47	160.85	114.21	145.04	162.36	134.40	110.41	118.09	144.07	124.15
	农田径流深/mm	108.16	144.67	101.75	129.21	145.29	119.09	95.74	103.06	129.51	107.84
	硬质地表径流深/mm	635.00	664.89	513.75	589.39	634.79	612.60	544.54	571.46	586.38	611.66

2.2 地表径流量

用径流深与各降雨观测站各类下垫面的面积相乘获得 2017—2019 年各站在三类下垫面上的径流量 (表 3). 从表 3 可以看出: 硬质地表产生的径流量远远大于绿地和农田产生的径流量, 这表明城市化增加了不透水地表面积, 城市降雨径流和洪涝发生风险也随之增加.

表 3 各降雨观测站三类下垫面上的径流量

Tab.3 Runoff volume of three types of underlying surface in each rainfall observation station

年份	指标	无锡 本站	黄巷 街道	安镇 街道	鹅湖 站	新安 街道	广瑞路 街道	江溪 街道	梅村 街道	鸿山 街道	厚桥 街道
2017	绿地径流量/(万 t)	418.03	163.95	180.55	294.26	358.28	188.20	512.25	426.90	374.19	233.61
	农田径流量/(万 t)	175.34	18.70	32.95	51.62	212.67	94.15	354.46	420.30	369.31	309.88
	硬质地表径流量/(万 t)	2434.86	1555.01	2221.96	2276.17	1606.78	1192.08	2247.66	1532.31	956.70	991.74
2018	绿地径流量/(万 t)	257.47	73.96	142.47	237.72	183.15	175.68	358.21	325.01	282.49	232.98
	农田径流量/(万 t)	103.87	7.75	25.37	40.14	98.66	85.94	239.57	307.83	269.09	301.79
	硬质地表径流量/(万 t)	2029.41	1193.41	2133.92	2298.90	1515.25	1171.98	2047.26	1515.01	923.23	1110.10
2019	绿地径流量/(万 t)	178.28	91.32	68.16	193.55	315.70	89.70	245.02	209.47	290.21	165.81
	农田径流量/(万 t)	69.70	9.93	11.81	32.94	181.63	42.51	158.96	191.90	281.74	207.04
	硬质地表径流量/(万 t)	1761.59	1170.51	1296.26	1684.17	1485.80	780.27	1469.20	1112.96	794.29	902.97

2.3 降雨径流污染物负荷

根据上述获得的各用地类型 EMC 值、地表径流量以及用地面积, 核算出研究区 2017—2019 年径流污染负荷, 如表 4 所示.

从图 5 中可以看出, 单位面积 TN、NH₃-N、COD 负荷的高值均分布于硬质地表, 其中单位面积 TN 和 COD 负荷最高值在农村住宅用地, 原因是农村住宅用地属于硬质地表, 雨水下渗量少, 产生的地表径流较

多,并且农村住宅用地位于农村,周围环境中存在大量有机肥、化肥、农药等物质,导致污染物浓度较高;而单位面积 TP 负荷最高值在未利用地,原因是未利用地产生的地表径流较多,并且未利用地上的 TP 浓度偏高(图 4),这说明未利用地是 TP 污染的重要来源之一,应加强对未利用地的规划利用;此外,草地的四种污染物单位面积负荷均最低,林地次之,在城市建设中可以适当增加草地、林地的面积,或将硬质化的建设用地与草地、林地合理配置,减少污染负荷的产生。

表 4 研究区 2017—2019 年污染负荷量

Tab.4 Pollution load of the study area during 2017–2019

污染负荷	2017 年	2018 年	2019 年
TP 年负荷/t	190	161	118
TN 年负荷/t	1359	1239	949
NH ₃ -N 年负荷/t	445	410	314
COD 年负荷/t	16041	14712	11250

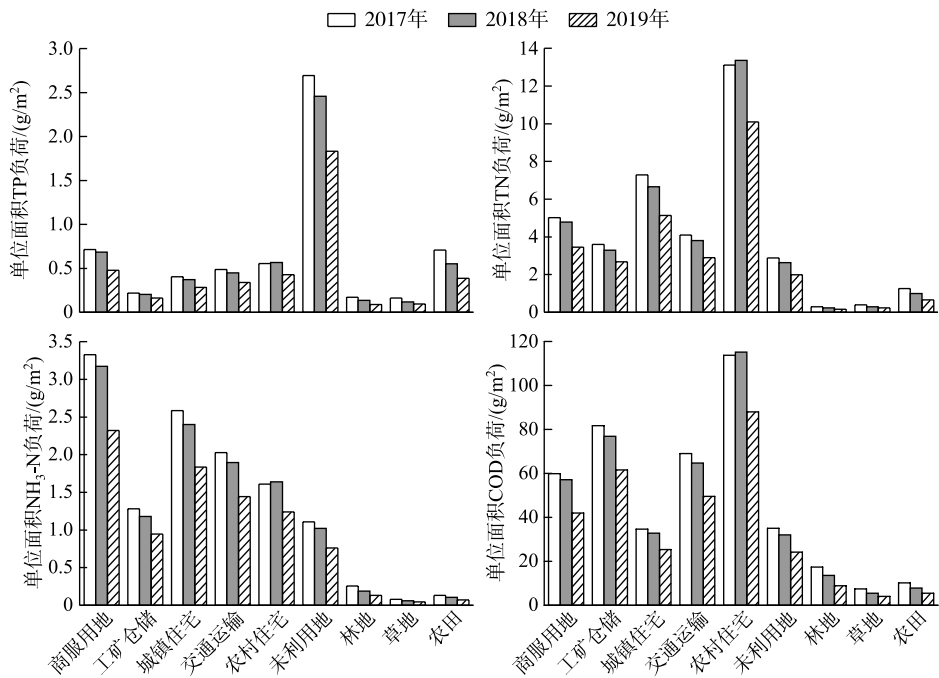


图 5 研究区 2017—2019 年各用地类型的单位面积污染负荷

Fig.5 Pollution load per unit area of each land use type of the study area during 2017–2019

考虑到污染负荷总量往往与占地面积紧密相关,并不能反映各行政区污染程度的高低,因此本研究采用单位面积污染负荷量来识别重点污染管控区域.从图 6 中可以看出,锡山区单位面积 TP、TN、NH₃-N 负荷最高,新吴区次之,梁溪区最低,尤其是单位面积 TP 负荷,锡山区有大面积农田覆盖,而农田径流的 TP 浓度更高,导致锡山区单位面积 TP 负荷更高;新吴区工业较发达,其单位面积 COD 负荷最高,锡山区次之,梁溪区最低.由此看出,研究区径流水质管控需重点关注锡山区和新吴区.

2.4 可靠性分析

将本研究测算出的单位面积污染负荷与我国其他区域相比较^[25,31-32,35-36],如表 5 所示.可以看出,本研究测算出的各污染物单位面积负荷值均落在已有研究的区间范围内.不同区域的各类污染物单位面积负荷相差较大,主要是因为各研究区域地理位置、气候条件、土地利用类型、区域发展阶段的差异,相比于辽河流域、潮河流域、白河流域、十五里河流域、抚仙湖流域、海河干流流域,望虞河西岸综合示范区城市化程度更高,硬质化地表面积大.

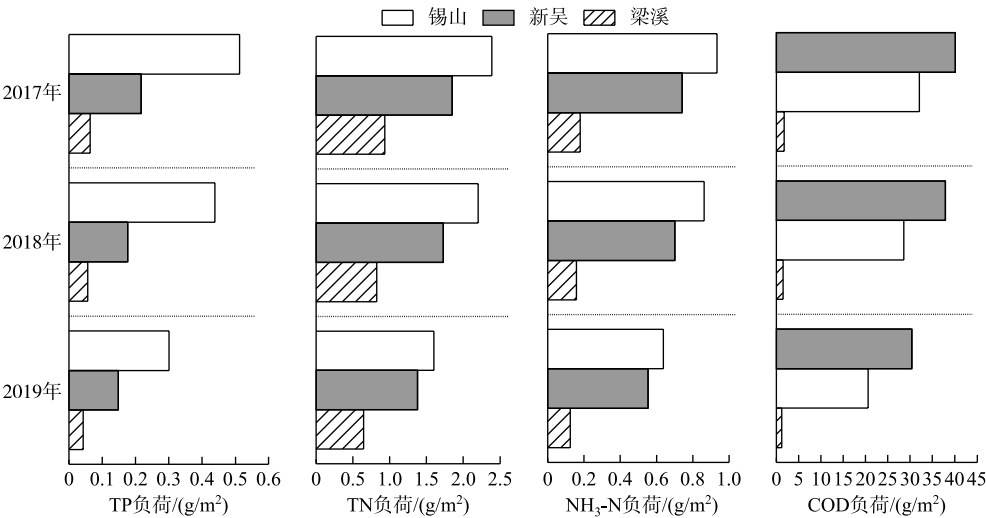


图 6 各行政区的单位面积污染负荷
Fig.6 Pollution load per unit area of each administrative region

表 5 不同研究区域单位面积径流污染负荷比较

Tab.5 Comparison of runoff pollutant load per unit area in different study areas

单位面积 污染负荷	本研究			研究 1	研究 2	研究 3	研究 4	研究 5	研究 6
	望虞河西 岸综合 示范区 2017 年	望虞河西 岸综合 示范区 2018 年	望虞河西 岸综合 示范区 2019 年	辽河流域 2010 年 ^[35]	潮河流域 1997 年 ^[32]	白河流域 1997 年 ^[32]	十五里 河流域 2014 年 ^[36]	抚仙湖 流域 2016 年 ^[31]	海河干 流流域 2016 年 ^[25]
TP/(t/km ²)	0.39	0.33	0.24	0.07	0.01	0.001	9.99	0.58	0.12
TN/(t/km ²)	2.80	2.55	1.95	1.06	0.05	0.03	5.42	2.11	0.41
NH ₃ -N/(t/km ²)	0.94	0.86	0.66	0.19	0.02	0.001	0.58	0.27	0.18
COD/(t/km ²)	33.01	30.27	23.15	1.35	0.10	0.21	55.07	60.61	7.56

3 结论

- 1) 研究区绿地和田田的建议初损率取值为 0.3, 硬质地表的建议初损率取值为 0.9, 修正后的 SCS-CN 模型能更好地模拟降雨径流深.
- 2) 径流深与降雨深之间存在显著的正相关性, 随着各站点降雨量减少, 径流深也呈现递减趋势; 各用地类型上的径流深表现为: 硬质地表>绿地>农田; 研究区径流深最大的地方集中在梁溪区, 该区城市化程度最高, 分布着大量硬质地表, 雨洪管理需重点关注.
- 3) 硬质地表产生的径流量远远大于绿地和农田产生的径流量. 城市化增加了不透水地表面积, 城市洪涝发生风险也随之增加. 这一结论对于高度城市化的太湖流域具有普遍性.
- 4) 污染负荷与降雨深之间存在显著的正相关性, 研究区降雨径流中 TP、TN、NH₃-N、COD 4 类污染物的负荷量分别从 2017 年的 190、1359、445 和 16041 t 减少到 2019 年的 118、949、314 和 11250 t. 单位面积 TP、TN、NH₃-N 负荷锡山区最高, 新吴区次之, 梁溪区最低; 单位面积 COD 负荷新吴区最高, 锡山区次之, 梁溪区最低. 从用地类型上来看, 单位面积 TN 和 COD 负荷的最高值在农村住宅用地, 单位面积 TP 负荷最高值在未利用地. 此外, 草地的 4 种污染物单位面积负荷均最低, 林地次之.

4 参考文献

- [1] Zampella RA, Procopio NA. Relationship of land-use/land-cover patterns and surface-water quality in the Mullica River basin. *Journal of the American Water Resources Association*, 2007, **43**: 594-604.
- [2] Brezonik PL, Stadelmann TH. Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Minnesota, USA. *Water Research*, 2002, **36**(7): 1743-1757. DOI: 10.1016/S0043-1354(01)00375-X.
- [3] Lee JG, Heaney JP, Lai FH. Optimization of integrated urban wet-weather control strategies. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2005, **131**(4): 307-315. DOI: 10.1061/(asce)0733-9496(2005)131:4(307).
- [4] Cai M, Li HE, Zhuang YT *et al.* Application of modified export coefficient method in polluting load estimation of non-point source pollution. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, **35**(7): 40-45. [蔡明, 李怀恩, 庄咏涛等. 改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用. 水利学报, 2004, **35**(7): 40-45.]
- [5] Angrill S, Petit-Boix A, Morales-Pinzón T *et al.* Urban rainwater runoff quantity and quality—A potential endogenous resource in cities? *Journal of Environmental Management*, 2017, **189**: 14-21. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.12.027.
- [6] Choi JY, Engel BA, Muthukrishnan S *et al.* GIS based long term hydrologic impact evaluation for watershed URBANIZATION₁. *Journal of the American Water Resources Association*, 2003, **39**(3): 623-635. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2003.tb03680.x.
- [7] Guan MF, Sillanpää N, Koivusalo H. Storm runoff response to rainfall pattern, magnitude and urbanization in a developing urban catchment. *Hydrological Processes*, 2016, **30**(4): 543-557. DOI: 10.1002/hyp.10624.
- [8] Xiong LJ, Huang F, Xu ZX *et al.* Characteristics of rainfall and runoff in urban drainage based on the SWMM model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(11): 3659-3666. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201611.030. [熊丽君, 黄飞, 徐祖信等. 基于 SWMM 模型的城市排水区域降雨及地表产流特征. 应用生态学报, 2016, **27**(11): 3659-3666.]
- [9] Hao FH, Cheng HG, Yang ST eds. Non-point source pollution model: theoretical method and application. Beijing: China Environmental Science Press, 2006. [郝芳华, 程红光, 杨胜天. 非点源污染模型: 理论方法与应用. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.]
- [10] Wang XF, Wang XY. Recent progress of diffuse pollution on loading, control and management. *Journal of Capital Normal University*, 2002, **23**(1): 91-96, 101. DOI: 10.19789/j.1004-9398.2002.01.020. [王晓峰, 王晓燕. 国外降雨径流污染过程及控制管理研究进展. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2002, **23**(1): 91-96, 101.]
- [11] Tedela NH, McCutcheon SC, Rasmussen TC *et al.* Runoff curve numbers for 10 small forested watersheds in the mountains of the eastern United States. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2012, **17**(11): 1188-1198. DOI: 10.1061/(asce)he.1943-5584.0000436.
- [12] Dong LH, Xiong LH, Lall U *et al.* The effects of land use change and precipitation change on direct runoff in Wei River watershed, China. *Water Science and Technology*, 2015, **71**(2): 289-295. DOI: 10.2166/wst.2014.510.
- [13] Satheeshkumar S, Venkateswaran S, Kannan R. Rainfall-runoff estimation using SCS-CN and GIS approach in the Pappireddipatti watershed of the Vaniyar sub basin, South India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2017, **3**: 24. DOI: 10.1007/s40808-017-0301-4.
- [14] Ponce VM, Hawkins RH. Runoff curve number: Has it reached maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, 1996, **1**(1): 11-19. DOI: 10.1061/(asce)1084-0699(1996)1:1(11).
- [15] Mishra SK, Singh VP. 'SCS-CN-based hydrologic simulation package, Ch. 13', *Mathematical Models in Small Watershed Hydrology and Applications*. Littleton, Colorado: Water Resources Publications, 2002.
- [16] Geetha K, Mishra SK, Eldho TI *et al.* Modifications to SCS-CN method for long-term hydrologic simulation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2007, **133**(5): 475-486. DOI: 10.1061/(asce)0733-9437(2007)133:5(475).
- [17] Li CL, Liu M, Hu YM *et al.* Effects of urbanization on direct runoff characteristics in urban functional zones. *Science of the Total Environment*, 2018, **643**: 301-311. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.211.
- [18] Hawkins RH, Jiang RY, Woodward DE *et al.* Runoff Curve Number Method: Examination of the Initial Abstraction Ratio. American Society of Civil Engineers World Water and Environmental Resources Congress, 2003.
- [19] Deng JC, Gao P, Mu XM *et al.* Study on calibrating parameters of SCS Model in loess area under simulated rainfall. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, **25**: 205-210. [邓景成, 高鹏, 穆兴民等. 模拟降雨条件下黄土区 SCS 模型的参数率定. 水土保持研究, 2018, **25**: 205-210.]

- [20] Shi ZH, Chen LD, Fang NF *et al.* Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China. *CATENA*, 2009, **77**(1): 1-7. DOI: 10.1016/j.catena.2008.11.006.
- [21] Mishra SK, Singh VP. Another look at SCS-CN method. *Journal of Hydrologic Engineering*, 1999, **4**(3): 257-264. DOI: 10.1061/(asce)1084-0699(1999)4:3(257).
- [22] Wan XL, Mao XW. Analysis of interannual variations of rainfall runoff Jiangsu Taihu Lake basin. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2013, **24**(6): 203-205, 210. [万晓凌, 毛晓文. 江苏太湖流域降雨径流年际变化分析. 水资源与水工程学报, 2013, **24**(6): 203-205, 210.]
- [23] Mishra SK, Sahu RK, Eldho TI *et al.* An improved I a S relation incorporating antecedent moisture in SCS-CN methodology. *Water Resources Management*, 2006, **20**(5): 643-660. DOI: 10.1007/s11269-005-9000-4.
- [24] National Engineering Handbook Hydrology Chapters, United States Department of Agriculture, 1985.
- [25] Li Y, Zhou B, Liu HL *et al.* Analysis of the non-point source pollution load from the storm runoff and its control strategy for Haihe River trunk stream, Tianjin. *Journal of Safety and Environment*, 2018, **18**(1): 230-235. [李屹, 周滨, 刘红磊等. 海河干流流域暴雨径流非点源污染负荷解析与控制策略. 安全与环境学报, 2018, **18**(1): 230-235.]
- [26] Zhou F, Cao MM, Ke F *et al.* Analysis of pollution characteristics and first flush effect in rainfall runoff in separate storm sewer system in upstream of Tangxi River, Chaohu Catchment. *J Lake Sci*, 2017, **29**(2): 285-296. DOI: 10.18307/2017.0204. [周峰, 曹明明, 柯凡等. 巢湖流域塘西河上游分流制系统降雨径流污染特征及初期冲刷效应. 湖泊科学, 2017, **29**(2): 285-296.]
- [27] Kang QY, Zhang F, Chen J *et al.* Spatial distribution characteristics of non-point pollution in the anjiagou watershed. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2015, **33**(4): 415-421. [康启燕, 张富, 陈瑾等. 安家沟流域面源污染空间分布特征. 四川农业大学学报, 2015, **33**(4): 415-421.]
- [28] Wu YG, Chen Y, Chen W *et al.* Characteristics of runoff pollution of different underlying surfaces in typical cultural and educational area of Xi'an. *China Environmental Science*, 2018, **38**(8): 3104-3112. [吴亚刚, 陈莹, 陈望等. 西安市某文教区典型下垫面径流污染特征. 中国环境科学, 2018, **38**(8): 3104-3112.]
- [29] Xuan YQ, Zhang J, Ye ZF *et al.* Pollution distribution characteristics and control strategies in Nansha New District of Guangzhou City. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, **46**(15): 67-71. [宣雍祺, 张俊, 叶智峰等. 广州市南沙新区流域污染分布特征及控制策略. 安徽农业科学, 2018, **46**(15): 67-71.]
- [30] Tu JJ, Ai NZ. Analysis on the pollution characteristics of urban rainwater runoff —Taking Foshan New Town as an example. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2018, (9): 33-39. [涂晶晶, 艾南竹. 城市雨水径流污染特征分析——以佛山新城为例. 广东水利水电, 2018, (9): 33-39.]
- [31] Kong Y, Feng HT, Nie JF. Research on pollution characteristics and emission load of urban rainfall runoff in the Fuxian Lake Watershed, Yunnan. *Environmental Science Survey*, 2018, **37**(5): 26-32. [孔燕, 冯海涛, 聂菊芬. 抚仙湖流域城镇降雨径流污染特征及排放负荷研究. 环境科学导刊, 2018, **37**(5): 26-32.]
- [32] Wang XY, Guo F, Cai XG *et al.* Non-point source pollution loading of Miyun reservoir, Beijing. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2003, **16**(1): 31-33. [王晓燕, 郭芳, 蔡新广等. 密云水库潮白河流域非点源污染负荷. 城市环境与城市生态, 2003, **16**(1): 31-33.]
- [33] Yan WJ, Wang XY. Preliminary study on non-point sources pollution in the Chaohu lake drainage basin. *Scientia Geographica Sinica*, 1998, **18**(3): 263-267. [阎伍玖, 王心源. 巢湖流域非点源污染初步研究. 地理科学, 1998, **18**(3): 263-267.]
- [34] Zhang RB, Yao Q, Ji Y *et al.* A study on law of non-point source pollutants losses in a typical small watershed of Taihu basin—A case study at Meilin watershed in Yixing City of Jiangsu Province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, **14**(1): 94-98. [张荣保, 姚琪, 计勇等. 太湖地区典型小流域非点源污染物流失规律——以宜兴梅林小流域为例. 长江流域资源与环境, 2005, **14**(1): 94-98.]
- [35] Nie TF. Calculating techniques research on Guangzhou urban non-point source pollution load caused by stormwater runoff [Dissertation]. Guangzhou: Master's dissertation of South China University of Technology, 2012. [聂铁锋. 广州市城区暴雨径流非点源污染负荷核算技术研究[学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2012.]
- [36] Wang XL, Cai MY, Zhong BQ *et al.* Research on spatial characteristic of non-point source pollution in Liaohu river basin. *Environmental Science*, 2013, **34**(10): 3788-3796. DOI: 10.13227/j.hjxx.2013.10.022. [王雪蕾, 蔡明勇, 钟部卿等. 辽河流域非点源污染空间特征遥感解析. 环境科学, 2013, **34**(10): 3788-3796.]