

滇池流域城市降雨径流污染负荷定量化研究

黎巍, 何佳, 徐晓梅, 郑一新, 李跃勋, 陈云波, 张大为, 张丽平, 王丽
(昆明市环境科学研究院, 云南 昆明 650032)

摘要: 借助遥感影像处理软件 ERDAS IMAGINE 9.2 和 GIS 技术对研究区 QuickBird 影像图进行下垫面类型分类和统计, 在对降雨产流过程及地表径流污染特征研究的基础上, 根据 2008 年的降雨总量, 定量计算滇池流域全年城市降雨径流污染负荷。结果表明, 流域内城镇区域屋顶、庭院、道路、绿地及其他类型面积比例分别为 13.8%、11.6%、5.2%、3.8% 及 65.6%。2008 年滇池流域城市降雨径流污染负荷 COD、TN、TP 分别为 2.95×10^4 t、 1.24×10^3 t、103 t。滇池北岸昆明主城区内的建成区全年城市降雨径流污染负荷 COD、TN、TP 的产生量分别为 2.39×10^4 t、 9.89×10^3 t、 8.24×10^3 t, 对滇池流域 COD、TN、TP 的贡献率总和分别为 81.2%、79.5%、80.3%。

关键词: 降雨径流; 污染负荷; 化学需氧量; 总磷; 总氮; 滇池流域

中图分类号: X502 文献标识码: B 文章编号: 1006-2009(2011)05-0037-06

Study on Pollution Load of Urban Rainfall and Surface Runoff in Lake Dianchi Basin

LI Wei, HE Jia, XU Xiao-mei, ZHENG Yi-xin, LI Yue-xun, CHEN Yun-bo,
ZHANG Da-wei, ZHANG Li-ping, Wang Li
(Kunming Institute of Environmental Science, Kunming, Yunnan 650032, China)

Abstract: By using remote sensing image processing software ERDAS IMAGINE 9.2 and GIS technology, the underlying surfaces of QuickBird image were classified to count annual pollution load from rainfall runoff in lake Dianchi Basin. Results of total rainfall in 2008 showed that the area ratios of roofs, courtyards, roads, green space and other types of cities and towns within Dianchi Basin were 13.8%, 11.6%, 5.2%, 3.8% and 65.6%. The COD, TN, TP pollution loads from urban rainfall runoff of the year 2008 in lake Dianchi Basin were 2.95×10^4 t, 1.24×10^3 t, 103 t respectively. Those pollution loads of northern shore of lake Dianchi in Kunming urban areas were 2.39×10^4 t, 9.89×10^3 t, 8.24×10^3 t, which contributes to 81.2% COD, 79.5% TN, 80.3% TP of lake Dianchi Basin.

Key words: Rainfall-runoff; Pollution load; COD; Total phosphorus; Total nitrogen; Lake Dianchi Basin

城市面源污染也被称为城市暴雨径流污染,是指在降水的条件下,雨水和径流冲刷城市地面,污染径流通过排水系统的传输,使污染物进入受纳水体引起环境问题的现象。随着城市点源污染控制的效果日益显著和城市化进程的加快,如何定量计算和控制城市降雨径流污染成为当前亟待解决的重要课题。

国外 20 世纪 70 年代就开始城市降雨径流污染的研究^[1],结果证实了城市降雨径流污染的特性,美国江河湖海的污染负荷约有 2/3 来自于面

源。我国的城市面源污染研究起步较晚^[2-6],多数研究者认为面源污染负荷超过了点源污染。滇池流域的污染源主要来自于以城市生产、生活污水为主的点源和城市暴雨径流产生的面源。当前由

收稿日期: 2011-01-25; 修订日期: 2011-06-04

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项——滇池流域水污染治理与富营养化综合控制技术及示范基金资助项目 (2008ZX07102)

作者简介: 黎巍(1984—),女,湖南邵阳人,助理工程师,硕士,从事环境评价规划与管理。

降雨径流产生的面源污染受到关注,但在滇池流域缺乏对城市面源的深入研究^[7-8]。现旨在对滇池流域降雨径流污染特征及污染负荷量化研究的基础上,提出控制城市面源的有效措施,作为滇池流域污染源控制的补充。

1 研究区域概况

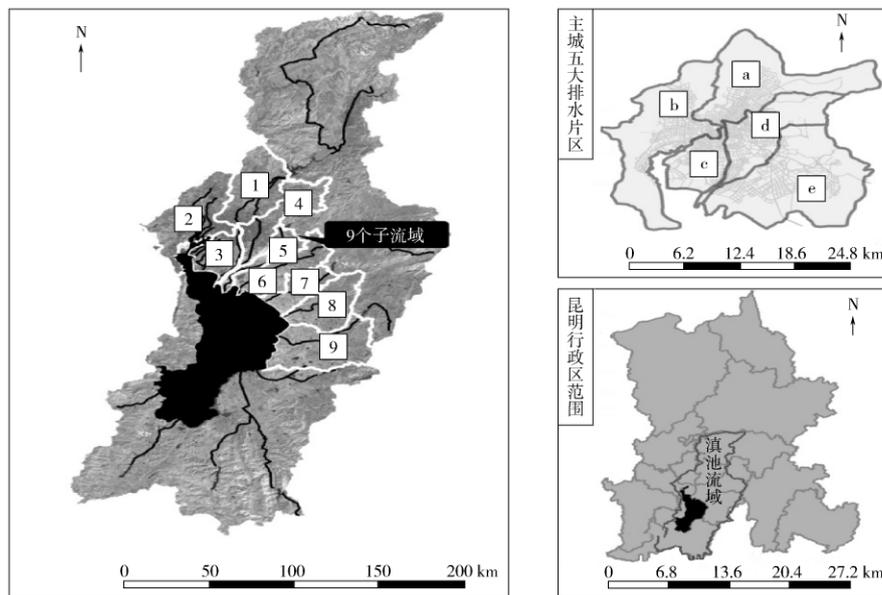
滇池是我国著名的高原淡水湖泊,为国家治理“三湖三河”的重点之一。滇池流域包含了 29 个子流域,流域总面积 2 920 km²,流域内的降雨径流污染均汇入滇池。其中盘龙江流域、新河—运粮河流域、船房河—采莲河流域、金汁河—枧槽河流域、东白沙河流域、宝象河流域下游、马料河流域、洛龙河流域和捞鱼河流域 9 个子流域为主要城镇分布区域,总面积 758.56 km²。根据滇池北岸主城区排水系统分布和污水处理厂纳污范围,将滇池流域

主城区分为城北、城西、城南、城东和城东南 5 个排水片区,是流域内城镇重污染区。5 个排水片区同时又分别基本对应盘龙江流域、新河—运粮河流域、船房河—采莲河流域、金汁河—枧槽河流域、东白沙河流域和宝象河流域下游 6 个子流域,对应关系见表 1。9 大子流域分布和主城区位置见图 1。

表 1 5 大排水片区和子流域的对应关系

Table 1 Correspondence between five dewatering districts and sub-basin

排水片区	子流域	A/hm ²
城北	盘龙江	10 720.18
城东	金汁河—枧槽河	8 152.09
城南	船房河—采莲河	5 147.41
城西	新河—运粮河	13 021.10
城东南	东白沙河、宝象河下游	11 420.55



1—盘龙江流域;2—新河—运粮河流域;3—船房河—采莲河流域;4—金汁河—枧槽河流域;5—东白沙河流域;6—宝象河流域下游;7—马料河流域;8—洛龙河流域;9—捞鱼河流域。
a—城北片区;b—城西片区;c—城南片区;d—城东片区;e—城东南片区。

图 1 滇池流域地理位置

Fig. 1 Location of lake Dianchi Basin

2 研究方法

2.1 径流水质特征研究

依托前期开展的暴雨径流采样工作,通过对采样点进行了水质监测,得出不同类型下垫面的降雨径流污染特征和降雨径流事件平均质量浓度

(EMC, Event Mean Concentration)。将滇池流域划分为中心商住区、居民商住区、休闲商住区、工业商住混合区、城郊结合部、交通道路 6 类功能区;根据不透水下垫面的地表功能,将下垫面划分为屋顶、庭院、道路、绿地 4 类。在此基础上选择有代表性

的6个采样点,收集降雨径流水样,同时充分考虑土壤中氮磷在该地含量较高的因素,水样澄清后测定。

2.1.1 样品采集及分析

2.1.1.1 采样方法

用量雨计记录计算整场降雨强度,在降雨开始并达到一定强度后开始采样。采样开始1 h内每10 min取样一次,其后2 h内每30 min取样一次,其后3 h内60 min取样一次,其后每120 min~180 min取样一次(视降雨历时而定),直至降雨结束。针对降雨过程中短暂停止,在第1次停止至第2次开始间隔时间超过6 h即视为该次降雨结束,否则继续采样。

2.1.1.2 样品分析方法

降雨径流水质分析指标包括:降雨量、化学需氧量(COD)、总氮(TN)、氨氮(NH₃-N)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)、总磷(TP)、可溶性总磷(TDP)。样品在规定的24 h保存时间内,按照国家环境监测标准方法进行污染指标测试^[2],方法分别为:COD测定采用重铬酸盐法;TN测定采用凯氏氮法;NH₃-N测定采用纳氏试剂光度法;NO₃⁻-N测定采用镉柱还原法;TP测定采用钼酸铵分光光度法;TDP测定采用过硫酸钾氧化-钼蓝比色法,测定偏差均<±10%。

2009年5月—2010年5月采集了5场降雨径流水样,采样降雨特征见表2。

表2 采样降雨基本信息

Table 2 Profile of the rainfall events

采样日期	降雨量 <i>h</i> /mm	降雨时间	降雨历时 <i>t</i> /min	雨强/(mm·min ⁻¹)	前期晴天累积时间 <i>t</i> /h
2009-05-19	6.7	10:30~11:40	70	0.10	36
2009-08-10~2009-08-11	33.5	22:50~03:00	230	0.15	112
2009-09-21	3.9	08:30~13:59	330	0.01	90
2010-04-26	12.2	14:36~18:36	300	0.04	24
2010-05-28	8.8	12:58~13:50	52	0.17	13

2.1.2 降雨径流污染特征分析

通过检测,得出了不同类型下垫面的降雨径流污染物EMC值,见表3。

表3 不同下垫面类型降雨径流污染物EMC值 mg/L

Table 3 Pollutant EMCs of runoff from different

下垫面	underlying surface mg/L					
	COD	TN	NH ₃ -N	NO ₃ ⁻ -N	TP	TDP
屋顶	36.6	4.53	1.64	0.70	0.24	0.25
庭院	118	5.04	1.20	1.13	0.47	0.22
道路	407	8.78	2.10	0.79	1.07	0.25
绿地	220	9.73	1.25	1.60	0.65	0.41

不同类型下垫面降雨径流污染特征差异性较大,在产生降雨径流的4种下垫面中,EMC顺序为:道路>绿地>庭院>屋顶。与其他国内外城市不同下垫面降雨径流各污染物浓度范围相比较,滇池北岸昆明主城区降雨径流EMC与其他地区研究结果大致相当^[9-13]。

2.2 降雨产流研究

降雨产流计算首先依据下垫面透水特征分为透水区和不透水区。不透水区产流时只需从降雨中扣除初损填洼量,未满足初损前不产流,满足初损后则全面产流;透水区除了填洼损失,还有下渗损失,下渗模型分为Horton模型、Green-Ampt模型、SCS模型3种。为充分考虑降雨下渗对径流污染的影响,采用Green-Ampt入渗模型计算降雨径流产生的污水量。Green-Ampt模型是1911年由Green和Ampt基于毛管理论提出的入渗模型^[14],该模型最初应用于干燥的土壤在薄层积水时的入渗问题,1973年Mein和Larson^[15]将其推广应用于稳定降雨入渗研究,1978年CHU^[16]又将其改进应用于自然变雨强的降雨入渗模型。下渗率 f 的计算公式如下:

$$f = \frac{K}{L_f} (H_o + H_c + L_f)$$

式中: K ——湿润峰面以上的土壤水力传导度(与下渗率 f 单位相同);

H_o ——地面表面水深(常忽略不计);

H_c ——毛细管作用水头;

L_f ——地面表面到湿润峰面的距离。

由以上可得产流的计算式为:

$$Q = i - I_r - \frac{\Delta V}{F} - f$$

其中: Q ——产流量;

i ——降雨量;

F ——汇流面积;

I_r ——累积入渗量;

ΔV ——汇流区新增水量。

参照 Tsihrintzis 等^[17]对美国 3 个典型城市的降雨径流模拟的研究成果,主要参考“高密度居民区”的值,同时也参考了 ASCE 推荐的参考值^[18],并根据滇池流域的城区特点,将土壤水力传导度 K 和湿润前峰的毛细水头 H_c 分别取值 2.5 mm/h、29.6 mm。

2.3 城市土地利用与下垫面类型分析

土地利用类型不同,其污染特性也不同。下垫

面组成不同,造成的地表径流也有很大差异。以 QuickBird 影像为数据源,借助遥感软件 ERDAS IMAGINE 9.2 对影像数据进行预处理,在已有底图及实地考察的基础上完成校正、分类、评价和分类后处理等一系列过程实现研究区下垫面类型分类,并采用 GIS 技术对下垫面类型进行分类人工验证,将滇池流域 9 个子流域及主城 5 大排水片区的建成区下垫面分成屋顶、庭院、道路、绿地,以及其他类型(包括农田、荒地、水体)5 类。

3 结果与分析

3.1 下垫面分类结果

采用监督分类和人工目视解译修正的方法,分类得到滇池流域内屋顶、庭院、道路、绿地及其他类型面积比例分别为 13.8%、11.6%、5.2%、3.8% 及 65.6%,分类结果见表 4。

表 4 滇池流域下垫面组成

子流域名称	屋顶	庭院	道路	绿地	其他
盘龙江	1 821.05	1 560.62	580.29	411.49	6 346.73
新河—运粮河	2 315.70	1 843.74	1 009.01	803.64	7 049.01
船房—采莲河	1 412.59	1 381.87	621.91	289.04	1 442.01
金汁河—枳槽河	1 883.54	1 337.11	771.71	490.76	3 668.97
东白沙河	1 020.32	869.92	194.75	206.49	1 102.46
宝象河下游	1 028.15	969.92	444.17	304.54	5 279.82
马料河	191.50	167.11	46.50	56.01	4 286.31
洛龙河	208.77	169.69	79.90	96.25	7 365.20
捞鱼河	230.28	195.81	62.12	87.95	11 837.33
合计	10 111.90	8 495.79	3 810.36	2 746.17	48 377.84

其中滇池北岸主城区范围内建成区的屋顶、庭院、道路、绿地及其他类型面积比例分别为 33.0%、15.1%、8.2%、25.5% 及 19.8%,见表 5。

表 5 滇池北岸主城建成区下垫面组成

片区名称	绿地	屋顶	道路	庭院	其他	总面积
城北	3.81	15.21	5.40	12.61	9.57	46.60
城南	2.89	14.13	6.22	13.82	11.79	48.85
城西	4.44	18.16	8.09	13.44	8.62	52.75
城东	4.91	18.84	7.72	13.37	5.99	50.83
城东南	3.91	14.28	5.39	9.14	12.44	45.16
合计	19.96	80.62	32.82	62.38	48.41	244.19

3.2 降雨径流污染负荷

在对降雨产流过程及地表径流污染特征研究的基础上,计算 2008 年滇池流域城市降雨径流量及污染负荷,结果见表 6。

滇池流域径流量和污染负荷受子流域面积、下垫面等因素的影响,区域内降雨径流和污染负荷主要集中在新河—运粮河、金汁河—枳槽河流域、船房河—采莲河流域、盘龙江流域,COD、TN、TP 污染负荷累积贡献率约为 93.9%、93.6%、93.8%。

滇池北岸昆明主城区内的建成区对整个滇池流域降雨径流量、COD、TN、TP 的贡献率分别为 79.1%、81.2%、79.5%、80.3%。在昆明主城区中,城西片区和城东片区对昆明主城区降雨径流、

表 6 滇池流域 2008 年降雨径流污染分布
Table 6 Distribution of 2008 rainfall runoff pollutants in lake Dianchi Basin

子流域名称	径流量	COD	TN	TP
盘龙江	3.85×10^7	4.90×10^3	2.14×10^2	17.47
新河—运粮河	5.05×10^7	7.24×10^3	2.97×10^2	24.61
船房—采莲河	3.27×10^7	4.52×10^3	1.84×10^2	15.66
金汁河—枳槽河	3.89×10^7	5.43×10^3	2.24×10^2	18.61
东白沙河	2.03×10^7	2.26×10^3	1.09×10^2	8.51
宝象河下游	2.38×10^7	3.34×10^3	1.37×10^2	11.48
马料河	4.08×10^6	4.95×10^2	2.27×10^1	1.80
洛龙河	4.70×10^6	6.65×10^2	2.81×10^1	2.27
捞鱼河	4.97×10^6	6.34×10^2	2.86×10^1	2.25
合计	2.18×10^8	2.95×10^4	1.24×10^3	102.66

表 7 2008 年主城建成区污染负荷产生量比较
Table 7 Comparison of pollutants load in urban areas in 2008

片区名称	径流量	COD	TN	TP
城北	3.28×10^7	4.41×10^3	1.87×10^3	1.54×10^3
城西	3.92×10^7	5.58×10^3	2.26×10^3	1.90×10^3
城南	3.32×10^7	4.59×10^3	1.87×10^3	1.59×10^3
城东	3.91×10^7	5.45×10^3	2.25×10^3	1.87×10^3
城东南	2.85×10^7	3.89×10^3	1.64×10^3	1.34×10^3
合计	1.73×10^8	2.39×10^4	9.89×10^3	8.24×10^3

COD、TN、TP 的贡献率相当,略高于城北和城南片区。主要是由于西片区所含面源纳污面积较大,造成了径流污染略大;而城东片区则属于老城区,城镇化程度较高,降雨径流污染负荷比重也相对较大,见表 7。

综上所述,滇池北岸重污染排水区的 5 大排水片区产生的降雨径流污染在整个滇池流域中占绝大部分,将对滇池污染产生重要影响,因此滇池北岸 5 大排水片区的降雨径流污染控制,将是滇池污染治理点源控制的重要补充和有效手段。

3.3 降雨径流污染与点源污染比较

随着城市化进程的加速,降雨径流产生的污染也日益严重,同时由于降雨径流具有分散性、随机性、广泛性、滞后性等特点,对其治理较难。与 2008 年滇池流域的点源污染相比,结果表明降雨径流污染是滇池污染的主要组成之一,见图 2(a)(b)。

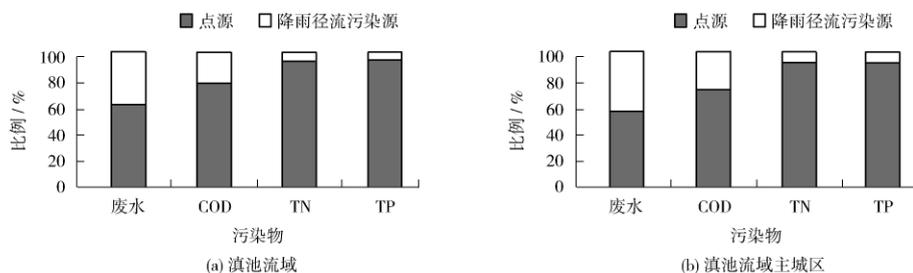


图 2 滇池流域及主城区点源和城市降雨径流污染比较

Fig. 2 Comparison between point source pollution and urban rainfall and surface runoff pollution

滇池流域 2008 年的城市降雨径流污水占总污水量的 40.6%,主要污染负荷 COD、TN、TP 分别占总污染源的 24.3%、7.4% 及 6.4%;滇池流域主城区的降雨径流污水占总污水量的 45.1%,主要污染负荷 COD、TN、TP 分别占总污染源的 28.7%、8.6% 和 8.4%。每年由城市降雨径流造成的污染负荷与点源污染负荷相当。

4 对策与建议

滇池流域由于缺乏科学的雨水综合管理设计,加之现阶段城市管网铺设不完善,城市面源污染日

益严重。针对目前滇池流域的现状,提出滇池城市降雨径流污染治理的对策与建议。

(1) 实施降雨径流污染源头控制。城市降雨径流污染控制的关键在于控制初期雨水,应充分利用自然地形、地势设计适当的雨水收集排放系统;同时在合理规划土地利用和功能分区的基础上,加强城市卫生管理,扩大城市街道清扫范围、增加清扫次数、提高清扫质量、减少污染物的累积数量,从源头上控制径流污染的产生。

(2) 加强对降雨径流污染物的输送、扩散途径控制。制定土地开发法规,改变城市地表的不透水

性,采用雨水和径流的渗透和过滤设施,增加植被覆盖率,以减少地表径流的排放。增加初期雨水的有效收集和处理,加大和完善管网铺设力度,完善合流制系统的截留设施,减少面源的污染范围。

(3) 实现径流污染的终端治理。为实现雨水的有效收集和达标处理,应加强雨水收集处理方法的研发,采用构筑截留雨水调蓄池、沉淀池,减少雨污混合水溢流量;利用传统的沉积塘、人工湿地、河岸湖地带和屋顶绿化等净化污染物,降低降雨径流中污染物的含量,从根本上解决末端控制问题。

[参考文献]

- [1] 王和意,刘敏,刘巧梅,等. 城市降雨径流非点源污染分析与研究进展[J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(6): 183-185.
- [2] 黄金良,杜鹏飞,欧志丹,等. 澳门城市路面地表径流特征分析[J]. 中国环境科学, 2006, 26(4): 469-473.
- [3] 赵建伟,单保庆,尹澄清. 城市旅游区降雨径流污染特征——以武汉动物园为例[J]. 环境科学学报, 2006, 26(7): 1062-1067.
- [4] 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.
- [5] 张德刚,陈永川,汤利. 城郊地表水环境非点源污染分析及研究进展[J]. 环境监测管理与技术, 2008, 20(4): 18-23.
- [6] 朱余,王凤. 巢湖流域水质状况与环境目标可达性分析[J]. 环境监测管理与技术, 2004, 16(6): 22-26.
- [7] 邢可霞,郭怀成. 流域非点源污染模拟研究——以滇池流域为例[J]. 地理研究, 2005, 24(4): 549-558.
- [8] 刘忠翰,贺彬,王宜明,等. 滇池不同流域类型降雨径流对河流氮磷入湖总量的影响[J]. 地理研究, 2004, 23(5): 593-604.
- [9] 赵磊,杨逢乐,王俊松,等. 合流制排水系统降雨径流污染物的特性及来源[J]. 环境科学学报, 2008, 28(8): 1561-1570.
- [10] 侯立柱,丁跃元,冯绍元,等. 北京城区不同下垫面的雨水径流水质比较[J]. 中国给水排水, 2006, 22(23): 35-38.
- [11] 张媛. 兰州市区地表径流污染初探[D]. 兰州: 兰州大学, 2005: 44-45.
- [12] 车武,刘燕,李俊奇. 国内外城市雨水水质及污染控制[J]. 给水排水, 2003, 29(10): 38-41.
- [13] GROMAIRE M C, GARNAUD S. Contribution of different source to the pollution of wet weather flows in combined sewers[J]. Water Research, 2001, 35(2): 521-533.
- [14] GREEN W H, AMPT G A. Studies on soil physics: I. Flow of air and water through soils[J]. J. Agric. Sci., 1911, 4(1): 1-24.
- [15] MEINR G, LARSON C L. Modeling infiltration during a steady rain[J]. Water Resources Research, 1973, 9(2): 384-394.
- [16] CHU S. Infiltration during an unsteady rain[J]. Water Resources Research, 1978, 14(3): 461-466.
- [17] TSHRINTZIS V A, HAMID R. Runoff quality prediction from small urban catchments using SWMM[J]. Hydrological Processes, 1998, 12(2): 311-329.
- [18] HARDCOVER. Design and construction of urban storm water management system[M]. New York: American Society of Civil Engineers, 1992.

本栏目责任编辑 薛光璞

• 征订启事 •

欢迎订阅 2012 年《环境监控与预警》

邮发代号: 28-414

《环境监控与预警》经中华人民共和国新闻出版总署批准,于 2009 年 10 月面向全国公开发行(双月刊)。刊物由江苏省环境保护厅主管、江苏省环境监测中心主办、南京大学环境学院和江苏省环境监测协会共同协办的期刊。国内统一刊号为 CN32-1805/X, 国际标准刊号 ISSN1674-6732。

本刊致力于传播和推广先进的环保科技成果,聚焦环境前沿科技,介绍国内外环境监测、环境预警、环境信息等领域的新技术、新成果、新发展,跟踪国家及地方的环境政策、环境标准的变化,推进环境保护科学研究和技术进步,为经济与环境保护协调发展作出力所能及的贡献。读者对象主要是从事环境管理、环境监测、环境监察、环境信息、环境治理、环境科学研究及其他领域的环境工作者。常设栏目有:环境预警、监测技术、信息应用、解析评价、控制技术、监管新论等。

本刊为双月刊,大 16 开国际标准版,58 页,每逢双月 15 日出版。国内定价(含邮费)9 元/期,全年 54 元

邮局汇款:收款人:《环境监控与预警》编辑部 邮编:210036 地址:南京市凤凰西街 241 号

电话(传真):025-86575218 邮箱:hjkyjy@163.com

银行转账:户名:江苏省环境监测协会 开户行:中国银行南京凤凰西街分行 账号:802226803708091001