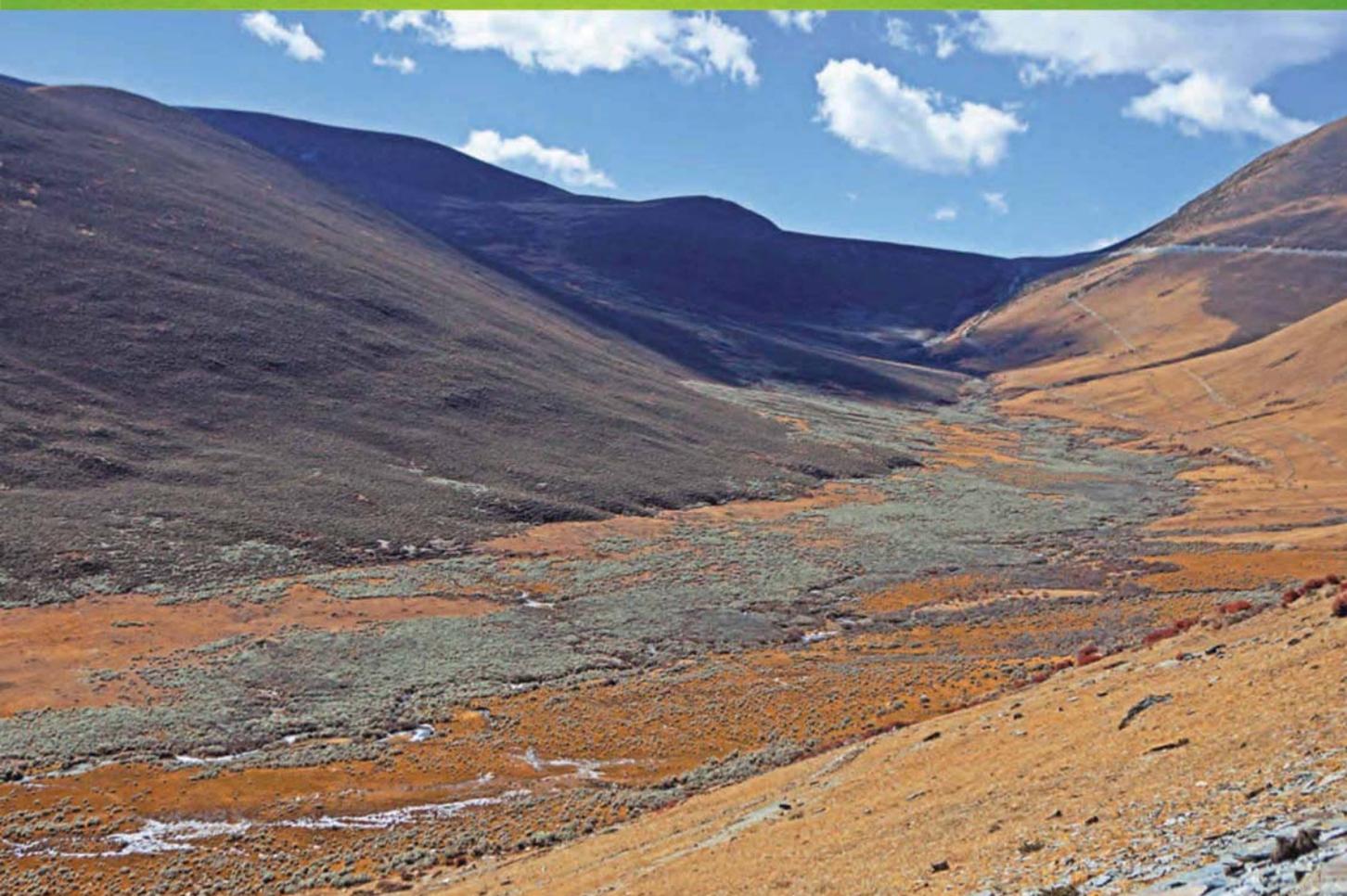


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

中国生态学会 2013 年学术年会专辑



第 33 卷 第 18 期 Vol.33 No.18 **2013**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 18 期 2013 年 9 月 (半月刊)

目 次

中国生态学会 2013 年学术年会专辑 卷首语

美国农业生态学发展综述	黄国勤, Patrick E. McCullough (5449)
水足迹研究进展	马 晶, 彭 建 (5458)
江西省主要作物(稻、棉、油)生态经济系统综合分析评价	孙卫民, 欧一智, 黄国勤 (5467)
植物干旱胁迫下水分代谢、碳饥饿与死亡机理	董 蕾, 李吉跃 (5477)
生态化学计量学特征及其应用研究进展	曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等 (5484)
三峡库区紫色土植被恢复过程的土壤团粒组成及分形特征	王轶浩, 耿养会, 黄仲华 (5493)
城市不同地表覆盖类型对土壤呼吸的影响	付芝红, 呼延佼奇, 李 锋, 等 (5500)
华南地区 3 种具有不同入侵性的近缘植物对低温胁迫的敏感性	王宇涛, 李春妹, 李韶山 (5509)
沙丘稀有种准噶尔无叶豆花部综合特征与传粉适应性	施 翔, 刘会良, 张道远, 等 (5516)
水浮莲对水稻竞争效应、产量与土壤养分的影响	申时才, 徐高峰, 张付斗, 等 (5523)
珍稀药用植物白及光合与蒸腾生理生态及抗旱特性	吴明开, 刘 海, 沈志君, 等 (5531)
不同温度及二氧化碳浓度下培养的龙须菜光合生理特性对阳光紫外辐射的响应	杨雨玲, 李 伟, 陈伟洲, 等 (5538)
土壤氧气可获得性对双季稻田温室气体排放通量的影响	秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等 (5546)
免耕稻田氮肥运筹对土壤 NH ₃ 挥发及氮肥利用率的影响	马玉华, 刘 兵, 张枝盛, 等 (5556)
香梨两种树形净光合速率特征及影响因素	孙桂丽, 徐 敏, 李 疆, 等 (5565)
沙埋对沙米幼苗生长、存活及光合蒸腾特性的影响	赵哈林, 曲 浩, 周瑞莲, 等 (5574)
半干旱区旱地春小麦全膜覆土穴播对土壤水热效应及产量的影响	王红丽, 宋尚有, 张绪成, 等 (5580)
基于 Le Bissonnais 法的石漠化区桑树地埂土壤团聚体稳定性研究	汪三树, 黄先智, 史东梅, 等 (5589)
不同施肥对雷竹林径流及渗漏水中氮形态流失的影响	陈裴裴, 吴家森, 郑小龙, 等 (5599)
黄土丘陵区不同植被土壤氮素转化微生物生理群特征及差异	邢肖毅, 黄懿梅, 安韶山, 等 (5608)
黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响	赵 彤, 闫 浩, 蒋跃利, 等 (5615)
林地覆盖对雷竹林土壤微生物特征及其与土壤养分制约性关系的影响	郭子武, 俞文仙, 陈双林, 等 (5623)
降雨对草地土壤呼吸季节变异性的影响	王 旭, 闫玉春, 闫瑞瑞, 等 (5631)
基于土芯法的亚热带常绿阔叶林细根空间变异与取样数量估计	黄超超, 黄锦学, 熊德成, 等 (5636)
4 种高大树木的叶片性状及 WUE 随树高的变化	何春霞, 李吉跃, 孟 平, 等 (5644)
干旱荒漠区银白杨树干液流动态	张 俊, 李晓飞, 李建贵, 等 (5655)
模拟增温和不同凋落物基质质量对凋落物分解速率的影响	刘瑞鹏, 毛子军, 李兴欢, 等 (5661)
金沙江干热河谷植物叶片元素含量在地表凋落物周转中的作用	闫帮国, 纪中华, 何光熊, 等 (5668)
温带 12 个树种新老树枝非结构性碳水化合物浓度比较	张海燕, 王传宽, 王兴昌 (5675)
断根结合生长素和钾肥施用对烤烟生长及糖碱比、有机钾指数的影响	吴彦辉, 薛立新, 许自成, 等 (5686)
光周期和高脂食物对雌性高山姬鼠能量代谢和产热的影响	高文荣, 朱万龙, 孟丽华, 等 (5696)
绿原酸对凡纳滨对虾抗氧化系统及抗低盐度胁迫的影响	王 芸, 李 正, 李 健, 等 (5704)

基于盐分梯度的荒漠植物多样性与群落、种间联接响应	张雪妮, 吕光辉, 杨晓东, 等 (5714)
广西马山岩溶植被年龄序列的群落特征	温远光, 雷丽群, 朱宏光, 等 (5723)
戴云山黄山松群落与环境的关联	刘金福, 朱德煌, 兰思仁, 等 (5731)
四川盆地亚热带常绿阔叶林不同物候期凋落物分解与土壤动物群落结构的关系	王文君, 杨万勤, 谭波, 等 (5737)
中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段土壤活性有机碳含量及季节动态	范跃新, 杨玉盛, 杨智杰, 等 (5751)
塔克拉玛干沙漠腹地人工植被及土壤 C N P 的化学计量特征	李从娟, 雷加强, 徐新文, 等 (5760)
鄱阳湖小天鹅越冬种群数量与行为学特征	戴年华, 邵明勤, 蒋丽红, 等 (5768)
营养盐加富和鱼类添加对浮游植物群落演替和多样性的影响	陈纯, 李思嘉, 肖利娟, 等 (5777)
西藏达则错盐湖沉积背景与有机沉积结构	刘沙沙, 贾沁贤, 刘喜方, 等 (5785)
西藏草地多项供给及调节服务相互作用的时空演变规律	潘影, 徐增让, 余成群, 等 (5794)
太湖水体溶解性氨基酸的空间分布特征	姚昕, 朱广伟, 高光, 等 (5802)
基于遥感和 GIS 的巢湖流域生态功能分区研究	王传辉, 吴立, 王心源, 等 (5808)
近 20 年来东北三省春玉米物候期变化趋势及其对温度的时空响应	李正国, 杨鹏, 唐华俊, 等 (5818)
鄱阳湖湿地景观恢复的物种选择及其对环境因子的响应	谢冬明, 金国花, 周杨明, 等 (5828)
珠三角河网浮游植物生物量的时空特征	王超, 李新辉, 赖子尼, 等 (5835)
南京市景观时空动态变化及其驱动力	贾宝全, 王成, 邱尔发 (5848)
川西亚高山-高山土壤表层有机碳及活性组分沿海拔梯度的变化	秦纪洪 王琴 孙辉 (5858)
城市森林碳汇及其抵消能源碳排放效果——以广州为例	周健, 肖荣波, 庄长伟, 等 (5865)
基于机器学习模型的沙漠腹地地下水含盐量变化过程及模拟研究	范敬龙, 刘海龙, 雷加强, 等 (5874)
干旱区典型绿洲城市发展与水资源潜力协调度分析	夏富强, 唐宏, 杨德刚, 等 (5883)
海岸带区域综合承载力评估指标体系的构建与应用——以南通市为例	魏超, 叶属峰, 过仲阳, 等 (5893)
中街山列岛海洋保护区鱼类物种多样性	梁君, 徐汉祥, 王伟定 (5905)
丰水期长江感潮河口段网采浮游植物的分布与长期变化	江志兵, 刘晶晶, 李宏亮, 等 (5917)
基于生态网络的城市代谢结构模拟研究——以大连市为例	刘耕源, 杨志峰, 陈彬, 等 (5926)
保护区及周边居民对野猪容忍性的影响因素——以黑龙江凤凰山国家级自然保护区为例	徐飞, 蔡体久, 琚存勇, 等 (5935)
三江源牧户参与草地生态保护的意愿	李惠梅, 张安录, 王珊, 等 (5943)
沈阳市降雨径流初期冲刷效应	李春林, 刘森, 胡远满, 等 (5952)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 514 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 59 * 2013-09



封面图说: 川西高山地带土壤及植被——青藏高原东缘川西的高山地带坡面上为草地, 沟谷地带由于低平且水分较充足, 生长有很多灌丛。川西地区大约在海拔 4000m 左右为林线, 以下则分布有亚高山森林。亚高山森林是以冷、云杉属为建群种或优势种的暗针叶林为主体的森林植被。作为高海拔低温生态系统, 高山-亚高山地带土壤碳被认为是我国重要的土壤碳库。有研究表明, 易氧化有机碳含量与海拔高度呈显著正相关, 显示高海拔有利于土壤碳的固存。因而, 这里的表层土壤总有机碳含量随着海拔的升高而增加。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201305211132

李春林, 刘森, 胡远满, 徐岩岩, 孙凤云, 陈探. 沈阳市降雨径流初期冲刷效应. 生态学报, 2013, 33(18): 5952-5961.

Li C L, Liu M, Hu Y M, Xu Y Y, Sun F Y, Chen T. Analysis of first flush in rainfall runoff in Shenyang urban city. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5952-5961.

沈阳市降雨径流初期冲刷效应

李春林^{1,2}, 刘 森¹, 胡远满^{1,*}, 徐岩岩^{1,2}, 孙凤云^{1,2}, 陈 探^{1,2}

(1. 森林与土壤生态国家重点实验室, 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 研究探讨城市降雨径流的初期冲刷效应对于城市水环境治理和水污染防治具有重要意义。以沈阳市典型区域为例, 对坡顶屋面、平顶屋面和路面 3 种典型下垫面的降雨径流进行了监测, 分析的污染物包括总悬浮颗粒物 (TSS)、总氮 (TN)、总磷 (TP)、化学需氧量 (COD) 和主要重金属 (Cd、Cr、Cu、Ni、Zn)。利用 $M(V)$ 曲线和污染物初期冲刷率 (MF_{30}), 分析了不同降雨径流事件的初期冲刷强度和发生强冲刷、弱冲刷的概率。结果显示: 研究区较易产生初期冲刷现象, 约有 50%—90% 的降雨事件能产生初期冲刷现象。3 种下垫面发生初期冲刷的强度依次是: 平顶屋面 > 坡顶屋面 > 路面。降雨历时和干期长度与初期冲刷效应具有正相关关系, 降雨量和降雨强度与初期冲刷先是正相关关系, 但当稀释效应大于冲刷效应时, 呈现负相关关系。重金属污染物较容易发生初期冲刷现象, 而 TN 易发生强初期冲刷。

关键词: 降雨径流; 初期冲刷; 非点源污染; 沈阳市

Analysis of first flush in rainfall runoff in Shenyang urban city

LI Chunlin^{1,2}, LIU Miao¹, HU Yuanman^{1,*}, XU Yanyan^{1,2}, SUN Fengyun^{1,2}, CHEN Tan^{1,2}

1 State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110016, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: As urbanization progresses, urban land use changes, leading to an increase in the area of impervious surfaces and, as a consequence, increases in runoff volume and peak flow rates. Studies have shown that urban stormwater runoff contains a variety of pollutants, such as sediment, organic material, micro-organisms, nutrients and heavy metals, which can seriously affect public health and threaten the quality of environment. The distribution and concentration of these pollutants depends on the characteristics of the urban surface, and dry and wet atmospheric depositions. Urban runoff pollution problems are more difficult to control than steady-state point discharges because of the intermittent rainfall and runoff, the large variety of pollutants, and the complex natural conditions. In a storm event, a first flush phenomenon occurs when the main proportion of the pollution load is transported in the first part of the runoff volume. However, the peak concentration may vary for different pollutants during the same storm event, or in the same watershed during different storm events. Many factors influence the first flush intensity. Watershed area, rainfall intensity, impervious percentage, antecedent dry weather period and sampling methods are the common influences.

As an established industrial base in China, Shenyang has experienced rapid urbanization. The impervious area is increasing rapidly due to the revitalization of the northeast old industrial base and other policies in recent years. As a result, non-point source pollution from urban runoff is becoming more and more serious. Various experimental catchments were equipped in order to assess the quality characteristics of urban runoff in the past. And it is very important to examine runoff from different surfaces. So in the present study, roof and road runoff quality in Shenyang was monitored and analyzed.

Samples of roof runoff were collected at the pipe outlets and road runoff was collected at rain grate. The rainfall depth through events was recorded by automatic gauge. Once runoff flow was observed, we collected samples every 10 min for the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41171155, 40801069); 国家科技重大专项水专项 (2012ZX07505-003)

收稿日期: 2013-05-21; 修订日期: 2013-07-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huym@iae.ac.cn

first 60 min, every 30 min between 60 and 180 min and then every 60 min beyond 180 min. Flow rates for the three surfaces were simulated by SWMM (Storm Water Management Model). The samples were collected, treated and analyzed in the laboratory within 24 h. Total suspended solids (TSS), chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and some typical heavy metals (Cd, Cr, Cu, Ni, Zn) using standard methods.

$M(V)$ curve and MF_{30} was used to analyze the first flush intensity and occurrence probability of different rainfall-runoff events. The study demonstrated that first flush occurred for between 50% and 90% of the monitored rainfall events. The intensity of the first flush intensity varied by surface and was most intense for the flat roof, followed by the slope roof and then the road. Rainfall duration and antecedent dry weather period were positively correlated with the first flush. Rainfall intensity was positively correlated with the first flush at first, but when dilution effect is greater than the flushing effect, the correlation changed to negative. Heavy metal pollutants frequently occurred in the first flush, while TN prone to occur in strong flushes.

Key Words: rainfall runoff; first flush; non-point source pollution; Shenyang City

随着我国城市化过程的加快,城市土地利用类型不断变化以及不透水面持续增加,从而降低了城市表面的下渗率,直接增加了降雨径流量,缩短了雨洪峰值到来的时间^[1-2]。城市降雨径流中含有的氮磷、微生物和重金属等众多污染物经过排水系统进入城市水体,从而直接危害水生生物的生存和城市生态系统的安全^[3-5]。城市降雨径流是污染物迁移转化的主要驱动力,国内外许多研究发现,在降雨径流的初期阶段,径流中往往会携带大量的污染物,这就是初期冲刷效应(FF)^[6-9]。初期冲刷是污染物冲刷的重要和独特的现象,会导致径流初期产生一个较高的污染物浓度峰值,大量的污染物质会排放到接纳水体,使城市水环境受到严重威胁^[10-12]。许多城市污水排放系统是基于初期冲刷效应对污染物负荷较大的初期径流采用截留措施,将其截流到污水处理厂进行处理。因此,研究初期冲刷现象对管理和治理城市暴雨径流具有重要的经济意义和环境意义^[13]。

初期冲刷受多种因素影响,汇流区面积、降雨强度和干期长度对初期冲刷效应都有显著影响,但大约有 60%—80%的降雨事件能产生初期冲刷现象^[14]。国内外学者的许多研究都对初期冲刷的影响因素进行了分析,发现相同影响因素在不同研究区的影响效果是不同的^[15-17]。Lee 研究发现,汇流区面积越小,干期长度越长,冲刷效应越强烈;而降雨强度对 COD、SS、TKN 和 Fe 有显著影响,但对 P、HEM 和 Pb 的影响不显著^[18-19]。而 Ma 研究发现初期冲刷与集水区面积无关,却与土地利用类型有关^[8]。Li 研究发现初期冲刷的强度与雨强呈负相关,其原因主要是与降雨的雨型有关^[20]。

国内外学者对初期冲刷的判定研究较多,初期冲刷现象的判定方法一般是基于无量纲累积污染物-径流量曲线,即 $M(V)$ 曲线(图 1)。累积污染物负荷是指一次降雨过程中,污染物随时间的累积量与污染物总量的比值。累积径流量是指一次降雨过程中,径流量随时间的累积量与径流总量的比值。Geiger 根据 $M(V)$ 曲线提出若曲线的斜率与对角线斜率的差值大于 0.2,则说明出现了初期冲刷^[21]。Gupta 认为如果 $M(V)$ 曲线完全位于对角线的上方,就表明出现了初期冲刷^[22]。Lee 则利用初期冲刷系数 b 是否小于 1 来判断,若初期冲刷系数小于 1,则发生了初期冲刷现象,若大于 1 则没有发生^[19]。 FF_n 表示前 $n\%$ 的径流量所携带的污染物的百分比,由于其计算较简便,且含义明确易懂,被众多研究者用来判定初期冲刷现象。例如, $FF_{30/80}$ 表示前 30% 径流量携带的污染物质,如果污染物质大于 80%,就说明发生了初期冲刷^[23]。其他学者也有利用 20/40^[15]、25/50^[24]、20/80^[25] 等评价标准。但由于初期冲刷判定标准和方法的不同,往往结果会有很大差异。例如 Saget 利用 30/80 的标准(径流初期 30% 的径流量含有 80% 的污染物负荷)研究了 197 场降雨径流事件,仅发现一场降雨存在初期冲刷现象^[23]。Bertrand-Krajewski 用同样的标准判断初期冲刷现象,结果没有检测到初期冲刷现象的存在^[10]。这是由于 30/80 的判定标准过于严格,仅有极少数事件能够满足这个判定标准。因此利用合理的评判标准才能准确把握初期冲刷现象的发生规律。

沈阳市作为东北老工业城市,由于近年“振兴东北老工业

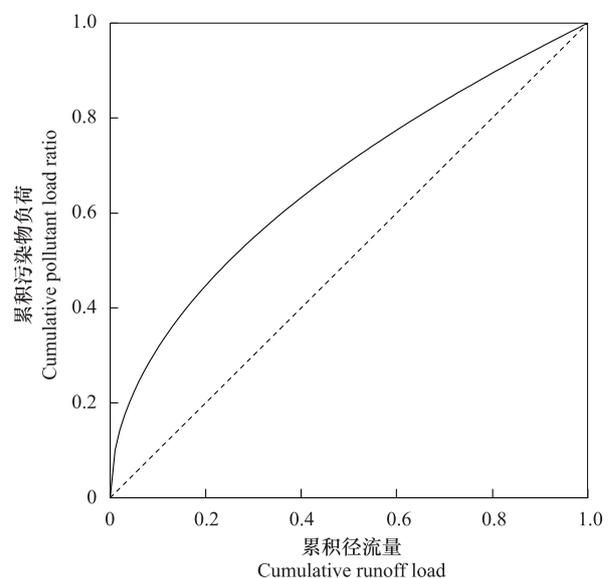


图 1 $M(V)$ 曲线

Fig.1 $M(V)$ curve

基地”等政策影响,城市扩展迅速,不透水面积迅速增加,从而使城市降雨径流的冲刷现象日益严重。本研究以沈阳为例,在前人的研究基础上,将初期冲刷的强度分为弱冲刷和强冲刷,通过分析坡顶办公楼瓦屋面、平顶居民楼水泥屋面和交通主干道路面降雨径流的不同强度初期冲刷的发生概率,探讨下垫面类型、降雨特征和污染物类型对初期冲刷效应的影响,以期为城市水环境治理和水污染防治提供依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

沈阳市地处辽宁省中部(41°11'51"—43°02'13"N, 122°25'09"—123°48'24"E),是辽宁省省会、东北地区最大的中心城市以及全国重要的工业基地。该市属温带大陆性季风气候,年均降水量 510—680 mm,降水集中在 6—8 月。本研究采样点选择在沈阳市区的典型文教-居住混合小区,总面积 24.2 hm²,不透水面积占 69.3%。

1.2 样品采集与分析

降雨采样点有 3 个,分别收集坡顶办公楼屋面径流、平顶居民楼屋面径流和交通主干道路面径流。坡顶屋面为砖瓦材料,坡度为 30°,汇水面积为 1800 m²,属于 3 层办公楼;平顶屋面材质为水泥混凝土,屋面水平,汇水面积为 1000 m²,属于 6 层居民楼;路面为沥青材料,汇水面积 2000 m²,位于沈阳五爱街交通主干道上。屋面径流的样品采集地点位于建筑物的落水管处,路面径流的采样点在雨水篦处。2012 年 7—10 月在 4 个采样点收集到 5 场较为典型的降雨事件,降雨特征如表 1 所示。因 10 月 9 日五爱街道路施工,该次降雨的路面径流未采集样品。自降雨产生径流开始采集样品,前 1 h 每隔 10 min 采集 1 次径流水样,1—3 h 是间隔 30 min 取样 1 次,超过 3 h 则每隔 1 h 取 1 次水样,水样采集方法遵守《水质采样技术指导》^[26],同时利用翻斗雨量计记录雨量信息。屋面和路面的汇水区条件单一,本研究参照相关文献^[27-29]利用暴雨径流管理模型(SWMM)模型对其地表径流状况进行了模拟。

表 1 降雨基本特征
Table 1 Characteristics of rainfall events

序号 No.	降雨日期 Data	降雨量 Rainfall/mm	降雨历时 Duration /h	平均雨强 Average intensity /(mm/h)	最大雨强 Max rainfall intensity /(mm/h)	干期长度 Antecedent dry weather period /d
1	2012-07-10	16.0	6.7	2.4	5.0	5
2	2012-07-22	33.8	2.8	12.1	28.7	10
3	2012-07-28	1.3	0.7	1.8	1.8	5
4	2012-08-28	4.6	3.5	1.3	2.4	9
5	2012-10-09	15.5	3.0	5.1	8.9	6

样品采集后,24 h 内在实验室降雨径流的污染物进行分析,分析指标包括总悬浮颗粒物(TSS)、总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)、镉(Cd)、铬(Cr)、铜(Cu)、镍(Ni)和锌(Zn)。TSS 的测定是用 0.45 μm 滤膜过滤,在 103—105℃ 烘干至恒重,然后称重(GB 11901—89);TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法(GB 11894—89);TP 采用钼酸铵分光光度法(GB 11893—89);COD 采用重铬酸钾法(GB 11914—89);重金属采用电感耦合等离子质谱法(ICP-MS)分析^[30]。

1.3 研究方法

污染物初期冲刷率(MFF_n)是在 Geiger 的 $M(V)$ 曲线基础上提出来的,可以定量描述初期冲刷现象^[31]:

$$MFF_n = \frac{\int_0^t C_i Q_i d_i / M}{\int_0^t Q_i d_i / V}$$

式中, MFF_n 是污染物初期冲刷率,表示前 $n\%$ 径流量所含的污染物比例与径流量比例的比值; M 为总污染物排放量; V 为总径流量; t 为径流量达到 $n\%$ 的时刻; C_i 为 t 时刻污染物浓度; Q_i 为 t 时刻径流量。当 MFF_n 值大于 1 时,表示发生了初期冲刷现象,值越大表示初期冲刷效应越强烈。

本研究根据 MFF_{30} 值的大小将初期冲刷的强度分为强冲刷和弱冲刷两类,既能避免过于严格的判定标准不能有效的识别初期冲刷效应,又能对初期冲刷现象发生的强度和频率有个合理的评价。 MFF_{30} 值大于 1,表示发生了初期冲刷现象。当 MFF_{30} 值大于 1,小于 2 时,表示发生了弱冲刷;当值大于等于 2 时,说明前 30% 的径流量携带超过 60% 的污染物,表明发生了强冲刷。

2 结果与分析

2.1 TSS 和 COD 的初期冲刷效应

悬浮颗粒物主要来源于路面和屋面的侵蚀风化、大气沉降、车辆的磨损和排放等;COD 主要反映了人类活动和城市绿化的

枯枝落叶等产生的有机污染物。从图 2 TSS、COD 的 $M(V)$ 曲线可以看出,大多数曲线都在对角线的左上方,说明大多数事件中的 TSS 和 COD 都存在初期冲刷效应。但仍有部分曲线,如 7 月 10 日平顶屋面、7 月 22 日平顶屋面和 7 月 22 日路面径流中 TSS 的 $M(V)$ 曲线在对角线的下方,没有发生初期冲刷现象。根据 $M(V)$ 曲线,TSS 和 COD 的曲线大多数集中在对角线附近,说明两种污染物主要发生较弱的初期冲刷效应,且 COD 明显比 TSS 容易发生初期冲刷。

TSS 的最大 FF_{30} 的值出现在 7 月 10 日降雨的路面径流和 7 月 28 日的平顶屋面径流中,分别为 0.75、0.64,表明前 30% 径流中 TSS 的负荷为 75% 和 64% (图 2)。COD 的最大 FF_{30} 值出现在 10 月 9 日的坡顶屋面和 7 月 10 日的路面径流中,分别为 0.79、0.73 (图 2)。根据 3 种下垫面 FF_{30} 的平均值,TSS 的初期冲刷效应强度依次是:路面>坡顶屋面>平顶屋面,前 30% 的降雨径流中 TSS 的平均负荷分别为 42.1%、40.8% 和 37.9%。而不同下垫面的 COD 初期冲刷强度依次是:坡顶屋面>路面>平顶屋面,负荷分别为 50.3%、46.9% 和 36.0%。

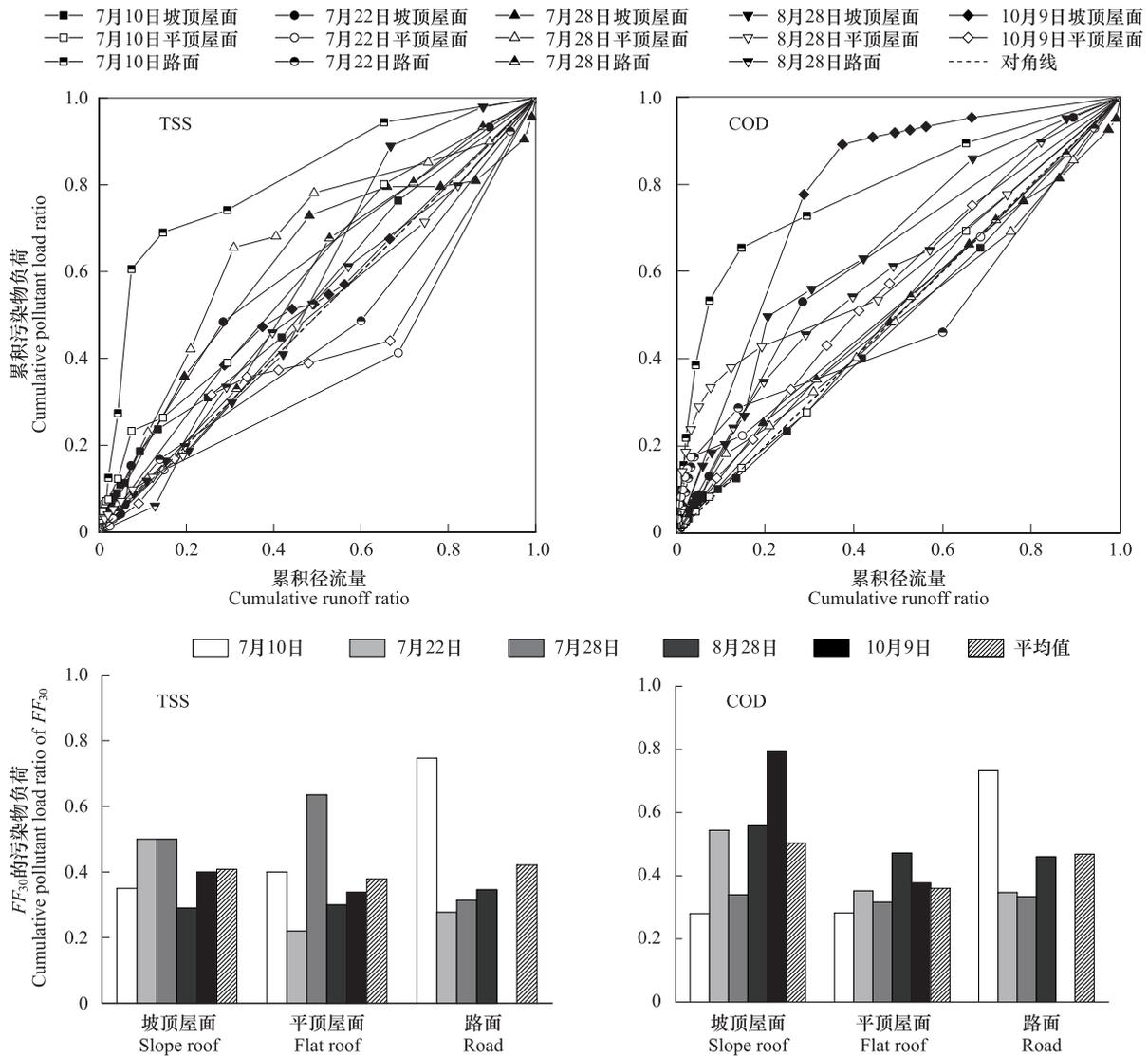


图 2 TSS、COD 的 $M(V)$ 曲线和 FF_{30} 值

Fig.2 $M(V)$ curves and FF_{30} values of TSS, COD

2.2 营养元素的初期冲刷效应

氮磷营养物质主要来源于土壤侵蚀、绿化带中农药化肥的冲刷、车辆轮胎磨损和尾气排放等。营养元素中,TN 的某些场次降雨径流事件的初期冲刷效应非常强烈,如图 3 中 7 月 10 日的路面径流和 8 月 28 日的平顶屋面径流中,TN 在不到前 10% 的径流中就含有超过 90% 的 TN,7 月 22 日和 8 月 28 日的坡顶屋面径流中 TN 的初期冲刷效应也非常强烈,前 30% 的径流携带 90% 以上的污染负荷。TP 的 $M(V)$ 曲线集中分布在对角线附近,说明其发生的初期冲刷效应相对较弱。对比图 3,TN 中有 7 个径流事件 FF_{30} 的值超过 0.6,而 TP 则只有 7 月 10 日的坡顶屋面径流中含有超过 60% 的污染负荷。因此,TN 易发生强初期冲

刷,TP 不易发生强初期冲刷。根据 FF_{30} 的污染负荷, TN 在不同下垫面发生初期冲刷的强度依次是:坡顶屋面>平顶屋面>路面, TP 的初期冲刷强度依次是:坡顶屋面>路面>平顶屋面。

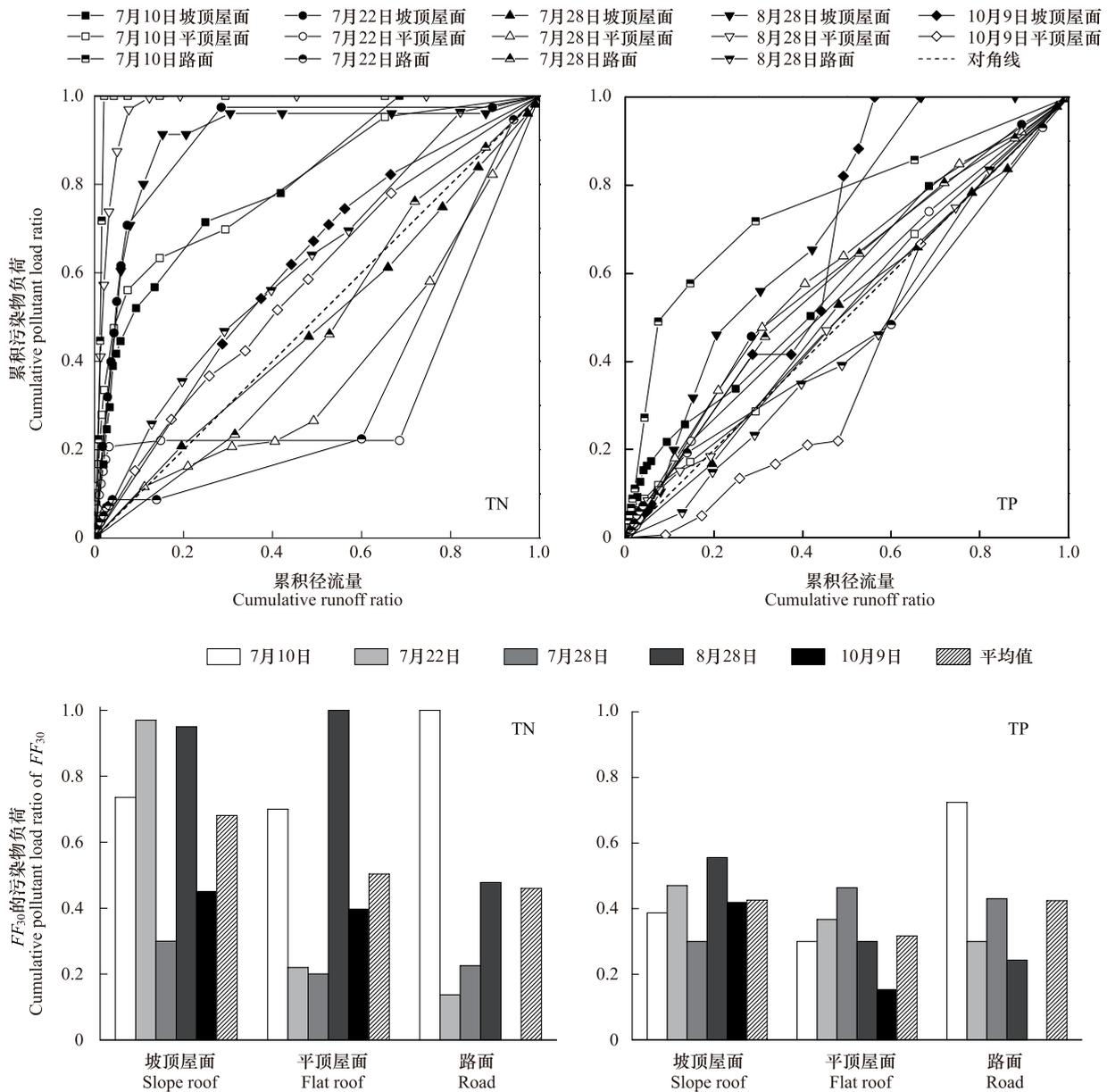


图3 TN、TP的 $M(V)$ 曲线和 FF_{30} 值

Fig.3 $M(V)$ curves and FF_{30} values of TN, TP

2.3 重金属的初期冲刷效应

重金属主要来源于车辆磨损、屋面防水层的侵蚀和落水管的腐蚀等。本研究选取的重金属为城市降雨径流中常见的、对水体危害较大的6种重金属污染物。6种重金属中Pb和Zn的 $M(V)$ 曲线绝大多数在对角线左上方,说明Pb和Zn比其他重金属易发生初期冲刷现象。Pb、Ni和Zn的 $M(V)$ 曲线偏离对角线较大,且其 FF_{30} 值超过0.8的事件较多,表明这3种重金属容易发生强初期冲刷现象。与TSS、TN和营养元素相比,重金属普遍易发生强初期冲刷。对比6种重金属的 FF_{30} 平均值(图4),绝大多数重金属在3种下垫面上的初期冲刷强度依次是:平顶屋面>坡顶屋面>路面,说明屋面径流中重金属的初期冲刷效应较强,而路面径流中重金属的初期冲刷效应则较弱。这可能是由于屋面径流的重金属排放源是屋顶防水层和落水管的腐蚀,排放较稳定;而路面径流中的重金属则主要是车辆磨损产生的,会随着交通状况的不同而发生巨大变化,从而干扰了初期冲刷效应的产生。

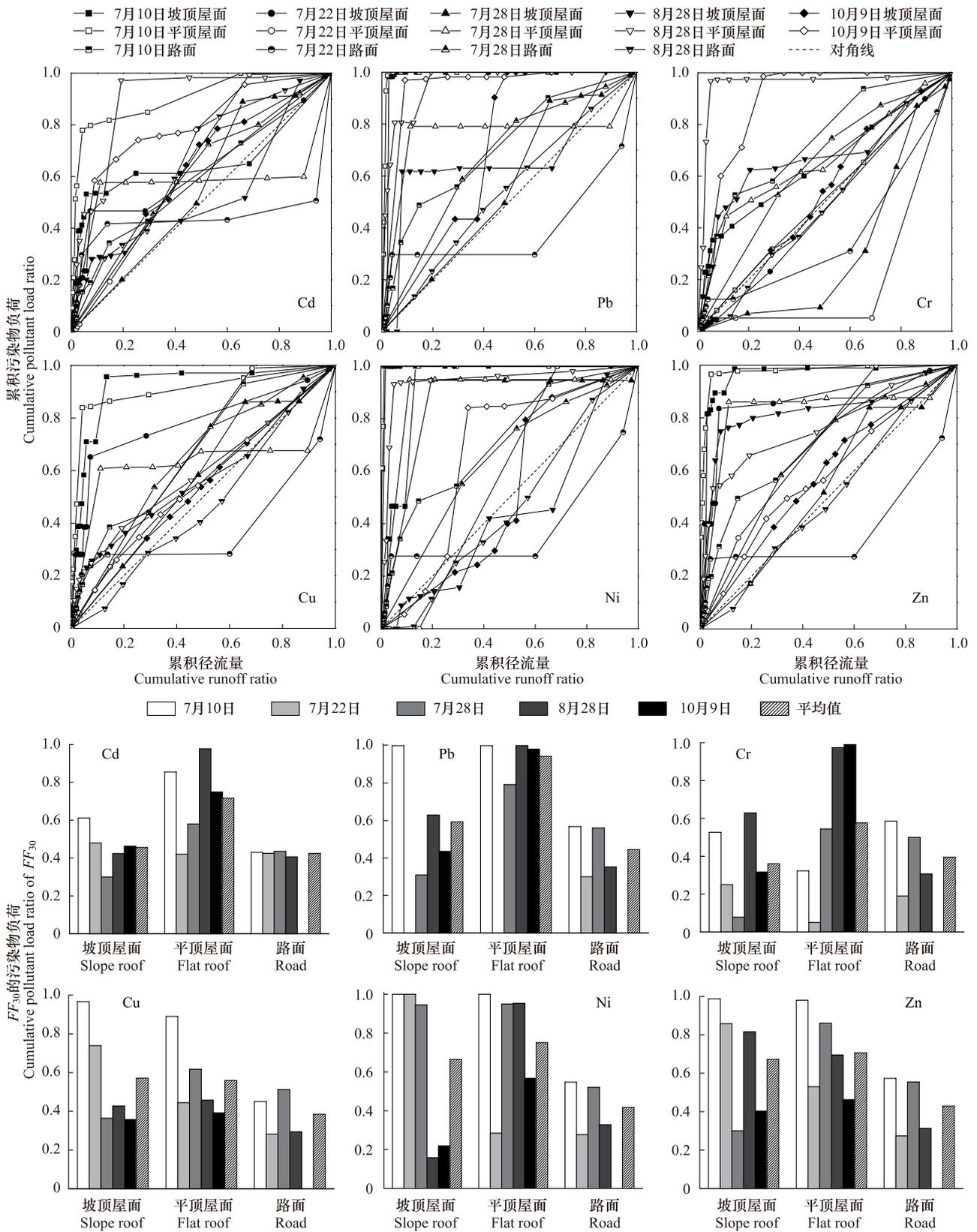


图4 重金属的 $M(V)$ 曲线和 FF_{30} 值

Fig.4 $M(V)$ curves and FF_{30} values of heavy metals

3 讨论

3.1 不同下垫面的初期冲刷

本研究根据 $M(V)$ 曲线,分别计算了坡顶屋面、平顶屋面和路面 3 种下垫面的前 30% 径流量所携带的累积污染物负荷,即 FF_{30} 的值。从图 5 FF_{30} 污染物负荷的箱线图可以看出,坡顶屋面、平顶屋面和路面 3 种下垫面的降雨径流中 FF_{30} 的范围主要集中在 0.34—0.74、0.34—0.97 和 0.3—0.53,即前 30% 的降雨径流中,坡顶屋面含有 34%—74% 的总污染物,平顶屋面含有 34%—97% 的总污染物,而路面只仅含有 30%—53% 的总污染物。3 种下垫面 FF_{30} 的平均值分别为 0.53、0.57 和 0.43,表明坡顶屋面、平顶屋面和路面前 30% 径流中分别含有 53%、57% 和 43% 的累积污染物。

本研究利用 MFF_{30} 计算出降雨径流事件的初期冲刷强度,然后根据强冲刷和弱冲刷事件占总事件的比例作为发生不同程度初期冲刷的概率。图 5 中 3 种下垫面的径流中发生强冲刷和弱冲刷的概率。不同下垫面的初期冲刷对比发现,路面的初期冲刷总发生概率为 72.5%,要明显低于屋面径流的总发生概率。坡顶屋面和平顶屋面的初期冲刷发生概率虽然都为 79.6%,但平顶屋面发生强冲刷的概率为 40.8%,大于坡顶屋面的 32.7%,且远大于路面径流 10% 的发生概率。总体来说,3 种下垫面发生初期冲刷的强度依次是:平顶屋面>坡顶屋面>路面。这是由于路面相对于屋面是一个较开放的区域,在不同降雨场次中,由于降雨量和降雨历时不同,监测点所采集到样品的汇水区域是不同的。因而随着降雨时间的延长或降雨量的增大,汇水区周围的污染物也会随径流汇入监测点,从而使得初期冲刷效应不明显。而且路面径流中污染物的变化也会随着交通状况的变化发生较大的扰动,从而干扰初期冲刷现象。这也与任玉芬的研究结果相一致^[32]。

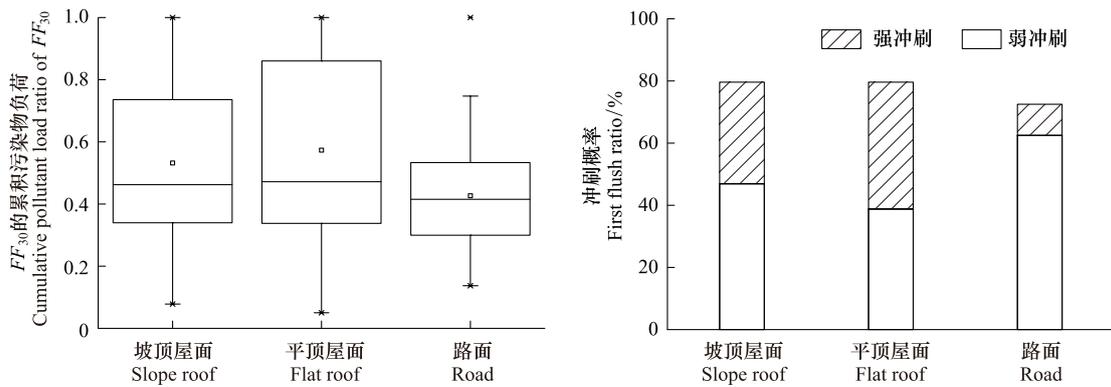


图 5 3 种下垫面 FF_{30} 的累积污染物负荷和冲刷概率

Fig.5 The FF_{30} cumulative pollutant load and first flush probability in three surfaces

3.2 不同降雨场次的初期冲刷

不同的降雨事件其降雨特征不同,因而会导致前 30% 径流中的累积污染物负荷也各不相同。7 月 10 日、7 月 22 日、7 月 28 日、8 月 28 日和 10 月 9 日降雨 FF_{30} 的平均值分别为 0.62、0.38、0.44、0.50 和 0.31。从图 6 FF_{30} 的累积污染物负荷和冲刷概率可以看出 7 月 10 日降雨的 FF_{30} 范围在 0.39—0.89 之间,且本次降雨的初期冲刷发生总概率和强冲刷概率均为五场降雨中的最高值,分别为 90% 和 53.3%。10 月 9 日降雨的初期冲刷总概率与 7 月 10 日降雨相同,也为 90%。但从图 6 冲刷概率图中可以看

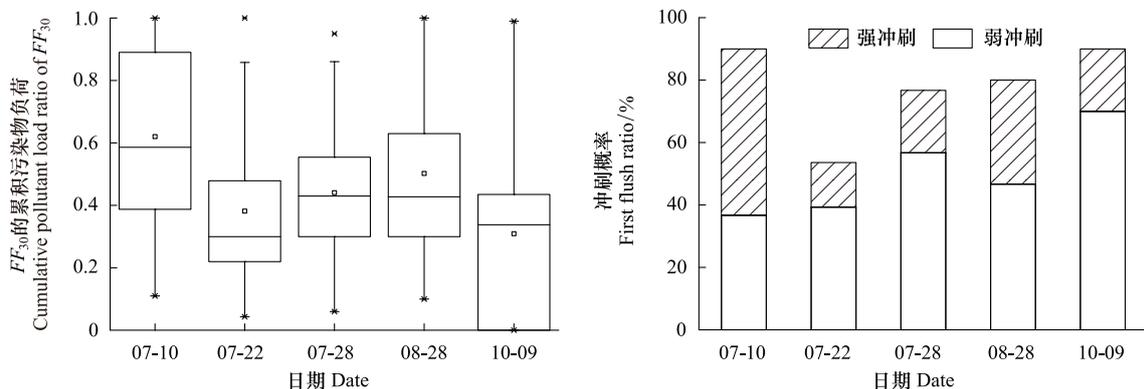


图 6 不同降雨场次 FF_{30} 的累积污染物负荷和冲刷概率

Fig.6 The FF_{30} cumulative pollutant load and first flush probability in different rainfall events

出,10月9日降雨主要发生的是弱冲刷,其 FF_{30} 的平均值仅为0.31,说明本次降雨30%径流中仅携带有31%的总污染物。这可能是由于这两场降雨的降雨量为16 mm和15.5 mm,均为中雨级别,该级别的降雨量适合污染物的迁移,更易产生初期冲刷现象。由于7月10日的降雨历时最长,为6.7 h。较长的降雨历时有利于污染物的溶解和随径流的迁移,因此该场降雨中发生较强冲刷的概率最大。如路面径流中TN、屋面径流中Pb、Cu、Ni、Zn的初期冲刷现象非常强烈,在前30%径流冲刷下这些污染物已经基本排放完全。

7月22日降雨事件的 FF_{30} 平均值和冲刷概率在五场降雨中均是最低的,这可能由于本次降雨的降雨量为33.8 mm,历时为2.8 h,属于大雨级别。该级别的降雨在短时间内降雨量过大,虽然加大了冲刷作用,但由于其冲刷作用小于雨水的稀释作用,反而使污染物浓度降低,不易产生初期冲刷现象。7月28日和8月28日降雨都属于小雨级别,初期冲刷总概率相差不多,但由于8月28日降雨的干期长度较长,为9天,污染物积累量大于7月28日的降雨,因此其 FF_{30} 平均值和强冲刷概率均大于8月28日降雨事件。

研究结果显示,降雨历时和干期长度与初期冲刷效应具有正相关关系,降雨历时和晴天天数越长,越容易发生初期冲刷效应。而降雨量和降雨强度对初期冲刷现象的影响较为复杂,因为降雨量和降雨强度对污染物不仅有冲刷效应,而且有稀释效应。当降雨的冲刷效应大于其稀释效应时,初期冲刷效应会随雨强增大而逐渐增强,但当稀释效应大于冲刷效应时(例如本文中的7月22日降雨事件),两者会呈现负相关关系,随着降雨量和雨强的继续增大,初期冲刷效应会减弱。

3.3 不同污染物的初期冲刷

由于各种污染物的来源、胶体形态、属性特征等不同,影响着污染物在径流中的溶解和迁移,从而使其初期冲刷现象有较大差异。本研究中污染物 FF_{30} 值的范围各不相同,TSS、TN、TP、COD、Cd、Pb、Cr、Cu、Ni和Zn的 FF_{30} 平均值分别为0.40、0.55、0.39、0.44、0.54、0.66、0.45、0.51、0.62和0.61(图7)。许多研究表明,TP和TSS具有很强的相关性,径流中TP主要是依附颗粒态存在的^[32],因此两者的初期冲刷强度相似,前30%的径流中分别含有40%和39%的TSS和TP。而大部分重金属的 FF_{30} 值较高,在0.5—0.7之间。

从图7冲刷概率可以看出,不同的污染物类型中,Cd和Pb发生初期冲刷的概率最大,分别为92.9%和91.7%,而COD、Cu和Zn的冲刷概率也都在85%以上。TN发生初期冲刷的概率为64.3%,但其多发生强初期冲刷,概率为42.9%。

本文研究的10种主要污染物其初期冲刷状况各不相同,总体来说,重金属污染物比较容易发生初期冲刷现象,而TN易发生强初期冲刷。

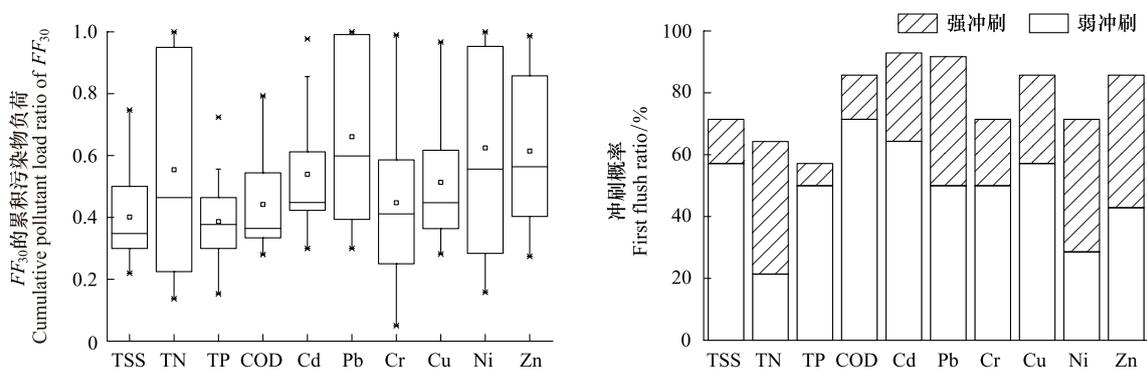


图7 不同污染物 FF_{30} 的累积负荷和冲刷概率

Fig.7 The FF_{30} cumulative pollutant load and first flush probability of different pollutants

4 结论

(1)不同下垫面类型、不同降雨场次和不同污染物类型的降雨径流中,会发生不同程度的初期冲刷现象。初期冲刷影响因素复杂,本研究区大约有50%—90%的降雨事件能产生初期冲刷现象。

(2)3种下垫面类型发生初期冲刷的强度依次是:平屋顶屋面>坡屋顶屋面>路面。

(3)降雨历时和干期长度与初期冲刷效应具有正相关关系,降雨量和降雨强度与初期冲刷先是正相关关系,但当稀释效应大于冲刷效应时,呈现负相关关系。

(4)重金属污染物较容易发生初期冲刷现象,而TN易发生强初期冲刷。

References:

- [1] 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. *Water Research*, 2002, 36(7): 1743-1757.

- [2] Walsh C J, Fletcher T D, Burns M J. Urban stormwater runoff: A new class of environmental flow problem. *PLoS ONE*, 2012, 7(9): e45814.
- [3] Selvakumar A, Borst M. Variation of microorganism concentrations in urban stormwater runoff with land use and seasons. *Journal of Water and Health*, 2006, 4(1): 109-124.
- [4] Krometis L H, Drummey P N, Characklis G W, Sobsey M. Impact of microbial partitioning on wet retention pond effectiveness. *Journal of Environmental Engineering*, 2009, 135(9): 758-767.
- [5] Rauch W, Ledin A, Eriksson E, Deletic A, Hunt W F III. Stormwater in urban areas. *Water Research*, 2012, 46(20): 6588-6588.
- [6] Taebi A, Droste R L. First flush pollution load of urban stormwater runoff. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2004, 3(4): 301-309.
- [7] Ren Y F, Wang X K, Han B, Ouyang Z Y, Miao H. Chemical analysis on stormwater-runoff pollution of different underlying urban surfaces. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3225-3230.
- [8] Ma Z B, Ni H G, Zeng H, Wei J B. Function formula for first flush analysis in mixed watersheds: A comparison of power and polynomial methods. *Journal of Hydrology*, 2011, 402(3/4): 333-339.
- [9] He Q, Wang S M, Ai H N, Wang Z T, Yan W T. A novel approach in assessing the first flush effect in urban stormwater runoff. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(11): 2432-2439.
- [10] Bertrand-Krajewski J L, Chebbo G, Saget A. Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon. *Water Research*, 1998, 32(8): 2341-2356.
- [11] Ou L B, Hu D, Huang Y, Cui S Y, Guo T J, Zhang W, Wang X J. First flush analysis of PAHs in roof runoff in Beijing. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2011, 32(10): 2896-2903.
- [12] Hathaway J M, Tucker R S, Spooner J M, Hunt W F. A traditional analysis of the first flush effect for nutrients in stormwater runoff from two small urban catchments. *Water Air and Soil Pollution*, 2012, 223(9): 5903-5915.
- [13] Li C L, Hu Y M, Liu M, Xu Y Y, Sun F Y. Urban non-point source pollution: Research progress. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(2): 492-500.
- [14] Hall M J Dr, Ellis J B. Water quality problems of urban areas. *GeoJournal*, 1985, 11(3): 265-275.
- [15] Deletic A. The first flush load of urban surface runoff. *Water Research*, 1998, 32(8): 2462-2470.
- [16] Obermann M, Rosenwinkel K H, Tournoud M G. Investigation of first flushes in a medium-sized mediterranean catchment. *Journal of Hydrology*, 2009, 373(3/4): 405-415.
- [17] Che W, Zhang W, Li J Q. Analysis of urban initial rainwater and first flush. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(14): 9-14.
- [18] Lee J H, Bang K W. Characterization of urban stormwater runoff. *Water Research*, 2000, 34(6): 1773-1780.
- [19] Lee J H, Bang K W, Ketchum L H, Choe J S, Yu M J. First flush analysis of urban storm runoff. *Science of the Total Environment*, 2002, 293(1/3): 163-175.
- [20] Li L Q, Yin C Q, He Q C, Kong L L. First flush of storm runoff pollution from an urban catchment in China. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(3): 295-299.
- [21] Geiger W. Flushing effects in combined sewer systems // Gujer W, Krejci V, eds. *Proceedings of the Proceedings of 4th Int Conf on Urban Storm Drainage*. Lausanne, Switzerland, 1987.
- [22] Gupta K, Saul A J. Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows. *Water Research*, 1996, 30(5): 1244-1252.
- [23] Saget A, Chebbo G, Bertrand-Krajewski J L. The first flush in sewer systems. *Water Science and Technology*, 1996, 33(9): 101-108.
- [24] Vorreiter L, Hickey C. Incidence of the first flush phenomenon in catchments of the Sydney region. *Water Down Under 94: Surface Hydrology and Water Resources Papers; Preprints of Papers*, 1994: 359-359.
- [25] Stahre P, Urbonas B. *Stormwater Detention: for Drainage, Water Quality, and CSO Management*. New Jersey: Prentice Hall, 1990.
- [26] CEPA. *Analyses Methods for Monitoring Water and Wastewater (HJ494—2009)*. Beijing: Environmental Science Press, 2009.
- [27] Dong X, Du P F, Li Z Y, Wang H C. Parameter identification and validation of SWMM in simulation of impervious urban land surface runoff. *Environmental Science*, 2008, 29(6): 1495-1501.
- [28] Zhao D Q, Dong Q Y, Wang H Z, Xing W. Global sensitivity analysis of a rainfall-runoff model using continuous simulation. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(4): 717-723.
- [29] Zhang Q, Su B L, Yuan J Y. Simulating rainfall-runoff in urban residential area based on SWMM. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2012, 48(3): 276-281.

- [30] CEPA. Analyses Methods for Monitoring Water and Wastewater. 4th ed. Beijing: Environmental Science Press, 2002.
- [31] Luo H B, Luo L, Huang G, Liu P, Li J X, Hu S, Wang F X, Xu R, Huang X X. Total pollution effect of urban surface runoff. Journal of Environmental Sciences-China, 2009, 21(9): 1186-1193.
- [32] Ren Y F, Wang X K, Ouyang Z Y, Hou P Q. Analysis of first flush effect of typical underlying surface runoff in Beijing urban city. Environmental Science, 2013, 34(1): 373-378.

参考文献:

- [7] 任玉芬, 王效科, 韩冰, 欧阳志云, 苗鸿. 城市不同下垫面的降雨径流污染. 生态学报, 2005, 25(12): 3225-3230.
- [9] 何强, 王书敏, 艾海男, 王振涛, 颜文涛. 城市暴雨径流初期冲刷现象识别模式. 环境科学学报, 2011, 31(11): 2432-2439.
- [11] 欧浪波, 胡丹, 黄晔, 崔司宇, 郭天娇, 张巍, 王学军. 北京城区屋面径流中 PAHs 的初期冲刷效应. 环境科学, 2011, 32(10): 2896-2903.
- [13] 李春林, 胡远满, 刘森, 徐岩岩, 孙风云. 城市非点源污染研究进展. 生态学杂志, 2013, 32(2): 492-500.
- [17] 车伍, 张伟, 李俊奇. 城市初期雨水和初期冲刷问题剖析. 中国给水排水, 2011, 27(14): 9-14.
- [26] 中华人民共和国环境保护部. 水质采样技术指导(HJ 494—2009). 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [27] 董欣, 杜鹏飞, 李志一, 王浩昌. SWMM 模型在城市不透水区地表径流模拟中的参数识别与验证. 环境科学, 2008, 29(6): 1495-1501.
- [28] 赵冬泉, 董鲁燕, 王浩正, 邢薇. 降雨径流连续模拟参数全局敏感性分析. 环境科学学报, 2011, 31(4): 717-723.
- [29] 张倩, 苏保林, 袁军营. 城市居民小区 SWMM 降雨径流过程模拟——以营口市贵都花园小区为例. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2012, 48(3): 276-281.
- [30] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [32] 任玉芬, 王效科, 欧阳志云, 侯培强. 北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析. 环境科学, 2013, 34(1): 373-378.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33 ,No.18 Sep. ,2013 (Semimonthly)
CONTENTS

Development of agroecology in USA	HUANG Guoqin, McCullough Patrick E. (5449)
Research progress on water footprint	MA Jing, PENG Jian (5458)
Analysis and evaluation of the eco-economic systems of the main crops (rice, cotton and rapeseed) in Jiangxi Province, China	SUN Weimin, OU Yizhi, HUANG Guoqin (5467)
Relationship among drought, hydraulic metabolic, carbon starvation and vegetation mortality	DONG Lei, LI Jiyue (5477)
Reviews on the ecological stoichiometry characteristics and its applications	ZENG Dongping, JIANG Liling, ZENG Congsheng, et al (5484)
Composition and fractal features of purple soil aggregates during the vegetation restoration processes in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Yihao, GENG Yanghui, HUANG Zhonghua (5493)
Impacts of different surface covers on soil respiration in urban areas	FU Zhihong, HUYAN Jiaoqi, LI Feng, et al (5500)
Chilling sensitivities of three closely related plants with different invasiveness in South China	WANG Yutao, LI Chunmei, LI Shaoshan (5509)
The flower syndrome and pollination adaptation of desert rare species <i>Eremosparton songoricum</i> (litv.) Vass.(Fabaceae)	SHI Xiang, LIU Huiliang, ZHANG Daoyuan, et al (5516)
Competitive effect of <i>Pistia stratiotes</i> to rice and its impacts on rice yield and soil nutrients	SHEN Shicai, XU Gaofeng, ZHANG Fudou, et al (5523)
Photosynthetic physiological ecology characteristics of rare medicinal plants <i>Bletilla striata</i>	WU Mingkai, LIU Hai, SHEN Zhijun, et al (5531)
Photosynthetic responses to Solar UV radiation of <i>Gracilaria lemaneiformis</i> cultured under different temperatures and CO ₂ concentrations	YANG Yuling, LI Wei, CHEN Weizhou, et al (5538)
The effect of soil oxygen availability on greenhouse gases emission in a double rice field	QIN Xiaobo, LI Yu'e, WAN Yunfan, et al (5546)
Effects of nitrogen management on NH ₃ volatilization and nitrogen use efficiency under no-tillage paddy fields	MA Yuhua, LIU Bing, ZHANG Zhisheng, et al (5556)
Study on characteristics of net photosynthetic rate of two kinds of tree shape and Impact Factors in Korla fragrant pear	SUN Guili, XU Min, LI Jiang, et al (5565)
Effects of sand burial on growth, survival, photosynthetic and transpiration properties of <i>Agriophyllum squarrosum</i> seedlings	ZHAO Halin, QU Hao, ZHOU Ruilian, et al (5574)
Effects of using plastic film as mulch combined with bunch planting on soil temperature, moisture and yield of spring wheat in a semi-arid area in drylands of Gansu, China	WANG Hongli, SONG Shangyou, ZHANG Xucheng, et al (5580)
Study on soil aggregates stability of mulberry ridge in Rocky Desertification based on Le Bissonnais method	WANG Sanshu, HUANG Xianzhi, SHI Dongmei, et al (5589)
Effects of fertilization on nitrogen loss with different forms via runoff and seepage under <i>Phyllostachy praecox</i> stands	CHEN Peipei, WU Jiasen, ZHENG Xiaolong, et al (5599)
Characteristics of physiological groups of soil nitrogen-transforming microbes in different vegetation types in the Loess Gully region, China	XING Xiaoyi, HUANG Yimei, AN Shaoshan, et al (5608)
Effects of vegetation types on soil microbial biomass C, N, P on the Loess Hilly Area	ZHAO Tong, YAN Hao, JIANG Yueli, et al (5615)
Influence of mulching management on soil microbe and its relationship with soil nutrient in <i>Phyllostachys praecox</i> stand	GUO Ziwu, YU Wenxian, CHEN Shuanglin, et al (5623)
Effect of rainfall on the seasonal variation of soil respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Yuchun, YAN Ruirui, et al (5631)
Spatial heterogeneity of fine roots in a subtropical evergreen broad-leaved forest and their sampling strategy based on soil coring method	HUANG Chaochao, HUANG Jinxue, XIONG Decheng, et al (5636)
Changes of leaf traits and WUE with crown height of four tall tree species	HE Chunxia, LI Jiyue, MENG Ping, et al (5644)
Sap flow dynamics of <i>Populus alba</i> L.× <i>P.talassica</i> plantation in arid desert area	ZHANG Jun, LI Xiaofei, LI Jianguai, et al (5655)
Effects of simulated temperature increase and vary little quality on litter decomposition	LIU Ruipeng, MAO Zijun, LI Xinghuan, et al (5661)
The effects of leaf stoichiometric characters on litter turnover in an arid-hot valley of Jinsha River, China	YAN Bangguo, JI Zhonghua, HE Guangxiong, et al (5668)
Comparison of concentrations of non-structural carbohydrates between new twigs and old branches for 12 temperate species	ZHANG Haiyan, WANG Chuankuan, WANG Xingchang (5675)
Combined effects of root cutting, auxin application, and potassium fertilizer on growth, sugar, nicotine ratio, and organic potassium index of flue-cured tobacco	WU Yanhui, XUE Lixin, XU Zicheng, et al (5686)
Effects of photoperiod and high fat diet on energy intake and thermogenesis in female <i>Apodemus chevrieri</i>	GAO Wenrong, ZHU Wanlong, MENG Lihua, et al (5696)
Effects of dietary chlorogenic acid supplementation on antioxidant system and anti-low salinity of <i>Litopenaeus vannamei</i>	WANG Yun, LI Zheng, LI Jian, et al (5704)

- Responses of desert plant diversity, community and interspecific association to soil salinity gradient ZHANG Xueni, LÜ Guanghui, YANG Xiaodong, et al (5714)
- Community characteristics in a chronosequence of karst vegetation in Mashan county, Guangxi WEN Yuanguang, LEI Liqun, ZHU Hongguang, et al (5723)
- Association between environment and community of *Pinus taiwanensis* in Daiyun Mountain LIU Jinfu, ZHU Dehuang, LAN Siren, et al (5731)
- The dynamics of soil fauna community during litter decomposition at different phenological stages in the subtropical evergreen broad-leaved forests in Sichuan basin WANG Wenjun, YANG Wanqin, TAN Bo, et al (5737)
- Seasonal dynamics and content of soil labile organic carbon of mid-subtropical evergreen broadleaved forest during natural succession FAN Yuexin, YANG Yusheng, YANG Zhijie, et al (5751)
- The stoichiometric characteristics of C, N, P for artificial plants and soil in the hinterland of Taklimakan Desert LI Congjuan, LEI Jiaqiang, XU Xinwen, et al (5760)
- A preliminary investigation on the population and behavior of the Tundra Swan (*Cygnus columbianus*) in Poyang Lake DAI Nianhua, SHAO Mingqin, JIANG Lihong, et al (5768)
- Effects of nutrient enrichment and fish stocking on succession and diversity of phytoplankton community CHEN Chun, LI Sijia, XIAO Lijuan, HAN Boping (5777)
- The depositional environment and organic sediment component of Dagze Co, a saline lake in Tibet, China LIU Shasha, JIA Qinxian, LIU Xifang, et al (5785)
- Spatiotemporal variation of interacting relationships among multiple provisioning and regulating services of Tibet grassland ecosystem PAN Ying, XU Zengrang, YU Chengqun, et al (5794)
- Spatial distribution of dissolved amino acids in Lake Taihu, China YAO Xin, ZHU Guangwei, GAO Guang, et al (5802)
- RS- and GIS-based study on ecological function regionalization in the Chaohu Lake Basin, Anhui Province, China WANG Chuanhui, WU Li, WANG Xinyuan, et al (5808)
- Trends of spring maize phenophases and spatio-temporal responses to temperature in three provinces of Northeast China during the past 20 years LI Zhengguo, YANG Peng, TANG Huajun, et al (5818)
- Species selection for landscape rehabilitation and their response to environmental factors in Poyang Lake wetlands XIE Dongming, JIN Guohua, ZHOU Yangming, et al (5828)
- Temporal and spatial pattern of the phytoplankton biomass in the Pearl River Delta WANG Chao, LI Xinhui, LAI Zini, et al (5835)
- Spatio-temporal dynamics of land use/land cover and its driving forces in Nanjing from 1995 to 2008 JIA Baoquan, WANG Cheng, QIU Erfa (5848)
- Changes of organic carbon and its labile fractions in topsoil with altitude in subalpine-alpine area of southwestern China QIN Jihong, WANG Qin, SUN Hui (5858)
- The carbon sink of urban forests and efficacy on offsetting energy carbon emissions from city in Guangzhou ZHOU Jian, XIAO Rongbo, ZHUANG Changwei, et al (5865)
- Groundwater salt content change and its simulation based on machine learning model in hinterlands of Taklimakan Desert FAN Jinglong, LIU Hailong, LEI Jiaqiang, et al (5874)
- Analysis of coordination degree between urban development and water resources potentials in arid oasis city XIA Fuqiang, TANG Hong, YANG Degang, et al (5883)
- Constructing an assessment indices system to analyze integrated regional carrying capacity in the coastal zones: a case in Nantong WEI Chao, YE Shufeng, GUO Zhongyang, et al (5893)
- Fish species diversity in Zhongjieshan Islands Marine Protected Area (MPA) LIANG Jun, XU Hanxiang, WANG Weiding (5905)
- Distribution and long-term changes of net-phytoplankton in the tidal freshwater estuary of Changjiang during wet season JIANG Zhibing, LIU Jingjing, LI Hongliang, et al (5917)
- Study of urban metabolic structure based on ecological network: a case study of Dalian LIU Gengyuan, YANG Zhifeng, CHEN Bin, et al (5926)
- Factors influencing of residents' tolerance towards wild boar in and near nature reserve: Taking the Heilongjiang Fenghuangshan Nature Reserve as the example XU Fei, CAI Tiju, JU Cunyong, et al (5935)
- Herdsmen's willingness to participate in ecological protection in Sanjiangyuan Region, China LI Huimei, ZHANG Anlu, WANG Shan, et al (5943)
- Analysis of first flush in rainfall runoff in Shenyang urban city LI Chunlin, LIU Miao, HU Yuanman, et al (5952)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 陈利顶 编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 18 期 (2013 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 18 (September, 2013)

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 王如松

主 管 中国科学技术协会

主 办 中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂

发 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel: (010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief WANG Rusong

Supervised by China Association for Science and Technology

Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元