

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.10
第41卷 第10期

目次

青岛春节期间大气污染特征及烟花燃放一、二次贡献分析 方天歌, 姚小红, 孟赫, 陈春强 (4345)

基于在线观测的天津市 PM_{2.5} 污染特征及来源解析 肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 元洁, 唐邈, 杨宁, 郑乃源, 陈魁 (4355)

2017~2018年北京大气 PM_{2.5} 中水溶性无机离子特征 李欢, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4364)

北京南部城区 PM_{2.5} 中碳质组分特征 董贵明, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4374)

成都市冬季3次灰霾污染过程特征及成因分析 冯小琼, 陈军辉, 尹寒梅, 徐雪梅, 熊文朋, 梅林德, 钱骏, 刘政 (4382)

南京北郊黑碳气溶胶分布特征及来源 谢锋, 林煜棋, 宋文怀, 鲍孟盈, 章炎麟 (4392)

2019年10~12月京津冀及周边“2+26”城市重污染减排效果评估 朱媛媛, 高愈霄, 汪巍, 鲁宁, 许荣, 刘冰, 李健军 (4402)

保定市大气污染变化趋势及特征 苟银寅, 张凯, 李金娟, 吕文丽, 竹双, 黎洁, 何珊珊, 郑悦, 支敏康 (4413)

郑州市 VOCs 组分排放清单及其臭氧生成潜势 卢轩, 张瑞芹, 韩跃钢 (4426)

郑州市少数民族运动会期间 O₃ 及 VOCs 污染特征的演变和评估 赵金帅, 于世杰, 王楠, 马双良, 王维思, 尹沙沙, 李一丹, 张栋, 张瑞芹 (4436)

我国木器涂料及汽车涂料中挥发性有机物特征 柯云婷, 孙宇航, 成海荣, 刘锐源, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (4446)

典型脱硫工艺对燃煤锅炉烟气颗粒物的影响 张进生, 吴建会, 吕瑞鹤, 宋丹林, 黄凤霞, 张裕芬, 冯银厂 (4455)

不同居民燃煤炉具大气污染物排放差异性及其减排分析 张熠晨, 薛陈利, 刘杰, 钟连红, 薛亦峰 (4462)

天津市2017年移动源高分辨率排放清单 刘庚, 孙世达, 孙露娜, 金嘉欣, 房键旭, 宋鹏飞, 王婷, 吴琳, 毛洪钧 (4470)

四川省基于第二次污染源普查数据的人为源大气污染源排放清单及特征 徐晨曦, 陈军辉, 李媛, 何敏, 冯小琼, 韩丽, 刘政, 钱骏 (4482)

抗大气复合污染的城市森林植物初步筛选 李品, 卫妍妍, 冯兆忠 (4495)

宝鸡市绿植叶片重金属空间分布及污染特征 张军, 梁青芳, 高煜 (4504)

潮汕地区入海河流及水生生物中 PPCPs 分布特征及风险评估 秀措, 王尘辰, 吕永龙, 陆轶峰, 王聪, 张梦, 曹祥会 (4514)

泉州山美水库及入库河流沉积物中多溴二苯醚的时空分异和降解分析 韩文亮, 刘豫, 冯凯文 (4525)

长江上游典型山地农业小流域浅层地下水硝态氮时空变异特征及影响因素 江南, 周明华, 李红, 李子阳, 章熙峰, 朱波 (4539)

沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征 王宏, 徐娅玲, 张奇, 林超文, 翟丽梅, 刘海涛, 蒲波 (4547)

基于 DPeRS 模型的海河流域面源污染潜在风险评估 冯爱萍, 王雪蕾, 徐逸, 黄莉, 吴传庆, 王昌佐, 王洪亮 (4555)

降水空间异质性和非点源关键源区识别面积变化的影响 高晓曦, 左德鹏, 马广文, 徐宗学, 胡小红, 李佩君 (4564)

硅藻群落指示的近50年来大理西湖湖泊生态系统演变规律 张晨雪, 徐敏, 董一凡, 王荣, 方凤满 (4572)

海陆交互带土壤及河流沉积物中镉含量及形态分布特征 王芳婷, 陈植华, 包科, 赵信文, 孟宪萌, 黄长生 (4581)

内蒙古河套灌区排水干沟微塑料赋存特征及质量估算 王志超, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 杨建林, 秦一鸣, 李河 (4590)

透水/不透水格局特征对汇水单元径流污染的影响 姜智绘, 廖云杰, 谢文霞, 李佳, 房志达, 赵洪涛, 李叙勇 (4599)

铁铜双金属有机骨架 MIL-101(Fe, Cu) 活化双氧水降解染料性能 梁贺, 刘锐平, 安晓强, 刘会娟 (4607)

纳米 Cu⁰@Fe₃O₄ 活化 PMS 降解对-硝基苯酚的协同反应机制 石清清, 蒲生彦, 杨犀 (4615)

紫外活化过硫酸盐降解水中三氯蔗糖动力学和机制 余韵, 陆金鑫, 吕贞, 彭明国, 徐彬煜, 杜尔登, 郑璐 (4626)

污水生物处理工艺低温下微生物种群结构 尚越飞, 王申, 宗倪, 杜海洲, 张鑫, 齐嵘, 杨敏 (4636)

不同 DN 与 PN-ANAMMOX 耦合工艺处理中晚期垃圾渗滤液的微生物群落分析 陆明羽, 李祥, 黄勇, 殷记强, 方文焯 (4644)

全程自养颗粒污泥快速启动及混合营养型脱氮性能分析 齐泽坤, 王建芳, 钱飞跃, 刘雨馨, 乔伟, 李小蝶 (4653)

不同低碳氮比废水中好氧颗粒污泥的长期运行稳定性 袁强军, 张宏星, 陈芳媛 (4661)

潮土细菌及真菌群落对化肥减量配施有机肥和秸秆的响应 吴宪, 王蕊, 胡荷, 修伟明, 李刚, 赵建宁, 杨殿林, 王丽丽, 王欣奕 (4669)

不同轮作模式下作物根际土壤养分及真菌群落组成特征 孙倩, 吴宏亮, 陈阜, 康建宏 (4682)

酒糟生物炭短期施用对贵州黄壤氮素有效性及细菌群落结构多样性的影响 张萌, 刘彦伶, 魏全全, 苟久兰 (4690)

稻油不同轮作模式对农田甲烷和氧化亚氮排放的影响 陈友德, 赵杨, 高杜娟, 罗先富, 崔婷, 童中权, 吴家梅 (4701)

解淀粉芽孢杆菌生物有机肥防控土壤氮挥发 杨亚红, 薛莉霞, 孙波, 张宝, 庄绪亮, 庄国强, 白志辉 (4711)

外源磷对镉胁迫下水稻生长及镉累积转运的影响 霍洋, 仇银燕, 周航, 胡雨丹, 邓鹏辉, 魏宾纭, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (4719)

水稻不同生育期 As 胁迫下 As 累积关键生育期 邓鹏辉, 蔡雅琴, 周航, 刘雅, 杨文俊, 辜娇峰, 廖柏寒 (4726)

铅锌矿区玉米中重金属污染特征及健康风险评价 周艳, 王金忠, 李群, 黄剑波, 张胜田, 龙涛, 邓绍坡 (4733)

浙江省台州市电子垃圾拆解地多溴联苯醚浓度水平分布特征和迁移趋势 魏抱楷, 柳晨, 王英, 金军 (4740)

重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析 王锐, 邓海, 严明书, 何忠库, 周皎, 梁绍标, 曾琴琴 (4749)

重庆市畜禽粪便及菜田土壤中四环素类抗生素生态风险评价 彭秋, 王卫中, 徐卫红 (4757)

《环境科学》征订启事 (4435) 《环境科学》征稿简则 (4445) 信息 (4606, 4625, 4732)

透水/不透水格局特征对汇水单元径流污染的影响

姜智绘^{1,2}, 廖云杰², 谢文霞¹, 李佳^{1,2}, 房志达², 赵洪涛^{2*}, 李叙勇²

(1. 青岛大学环境科学与工程学院, 青岛 266071; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 深入揭示透水/不透水下垫面格局特征(组成、位置和比例等)对城市地块汇水单元地表径流及污染产生能力的影响,对减轻城市内涝及控制面源污染具有重要意义. 利用景观格局指数分析透水/不透水下垫面格局特征与地表径流总量(Q)、溶解态污染物累积负荷(L_d)和颗粒态污染物累积负荷(L_p)之间的关系. 结果表明:①表征破碎度的斑块密度(PD)与最大斑块指数(LPI)分别与 Q 和 L_d 呈正、负相关,PD与 L_d 呈显著正相关($r=0.59, P<0.05$,以COD计),LPI与 L_d 呈显著负相关($r=-0.60, P<0.05$,以COD计);②表征复杂度的景观形状指数(LSI)和平均斑块形状(MSI)分别与 Q 和 L_p 呈正、负相关性,LSI与 L_p 呈显著正相关($r=0.61, P<0.05$,以TP计),MSI与 L_p 呈极显著负相关($r=-0.62, P<0.01$,以TP计);③表征聚散度的内聚力指数(COHESION)和分散指数(SPLIT)分别与 Q 和 L_d 呈负、正相关性,COHESION与 L_d 呈显著负相关($r=-0.59, P<0.05$,以COD计),SPLIT与 L_d 呈显著正相关($r=0.6, P<0.05$,以COD计);④在城市小尺度透水面格局规划上,适量减少细小规则斑块的散乱分布,增加较大的不规则斑块或斑块群,对有效调控地表径流及污染有积极影响. 通过透水/不透水面的破碎度、复杂度和聚散度与汇水区单元径流产生和污染输出的相关性分析,以期从格局特征(面积、距离和形状等)考虑合理配置LID设施调控径流污染提供新思路.

关键词: 城市面源污染; 景观格局; 地表径流; 透水/不透水面; 地块汇水区

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)10-4599-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202003221

Influence of Pervious/Impervious Pattern on Runoff and Pollution in Parcel-based Catchment

JIANG Zhi-hui^{1,2}, LIAO Yun-jie², XIE Wen-xia¹, LI Jia^{1,2}, FANG Zhi-da², ZHAO Hong-tao^{2*}, LI Xu-yong²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Determining the influence of pervious/impervious underlying surface pattern (composition, position, proportion, etc.) on the generation capacity of surface runoff and pollution in the urban parcel-based catchment could aid in alleviating the urban waterlogging and control non-point source pollution significantly. Landscape metrics were used to analyze the relationship between the characteristics of pervious/impervious underlying surface pattern and total runoff (Q) and the cumulative load of dissolved pollutants (L_d) and particulate pollutants (L_p). The results showed that: ① For the metrics of fragmentation, the patch density (PD) was positively correlated with Q and L_d , and largest patch index (LPI) was negatively correlated with them. Especially, the PD exhibited a significantly positive correlation with L_d ($r=0.59, P<0.05$, calculated in COD). However, the LPI exhibited a significantly negative correlation with L_d ($r=-0.60, P<0.05$, calculated in COD). ② For the metrics of complexity, landscape shape index (LSI) was positively correlated with Q and L_p , and mean shape index (MSI) was negatively correlated with them. Especially, the LSI exhibited a significantly positive correlation with L_p ($r=0.61, P<0.05$, calculated in TP) significantly. However, the MSI exhibited a significantly negative correlation with L_p ($r=-0.62, P<0.01$, calculated in TP) significantly. ③ For the metrics of vergence, the split index (SPLIT) was positively correlated with Q and L_d , and the cohesion index (COHESION) was negatively correlated with them. The COHESION exhibited a significantly negative correlation with L_d ($r=-0.59, P<0.05$, calculated in COD), whereas the SPLIT exhibited a significantly positive correlation with L_d ($r=0.6, P<0.05$, calculated in COD). ④ In the planning on the distribution and pattern of pervious surface under small-scale catchment, it is suggested that the scattered small-regular patches should be transformed to large-irregular patches or patch group. The relationship of the fragmentation, complexity, and vergence of pervious/impervious surface, with the runoff generation, and pollution output in parcel-based catchment was analyzed, which provided a new method for rainfall runoff and pollution control by considering rational allocation of LID facilities in terms of its pattern characteristics (area, distance, shape, etc.).

Key words: non-point source pollution; landscape pattern; surface runoff; pervious/impervious surface; parcel-based catchment

在城市化快速发展的进程中,土地利用类型及其下垫面的显著变化是引发城市内涝及面源污染的主要原因^[1-3]. 大量研究表明,汇水单元内不透水面比例是影响城市地表径流量水质的主要因素^[4-6],且近年来许多学者力图探索不

收稿日期: 2020-03-22; 修订日期: 2020-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771529, 41471417); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07206-006-02)

作者简介: 姜智绘(1994~),女,硕士,主要研究方向为城市面源污染, E-mail: jiangzhihualice@163.com

* 通信作者, E-mail: htzhao@rcees.ac.cn

透水面积比例阈值对流域或汇水区水文响应的影响^[7]. 然而, 国内外关于透水/不透水面空间格局特征会如何影响城市面源污染过程(汇流及污染物迁移)的研究还比较缺乏. 当前我国正全力推进海绵城市建设来控制城市内涝和面源污染问题, 其中低影响开发(low impact development, LID)措施作为最重要的技术手段可有效解决大概率小降雨事件带来的面源污染问题^[8]. LID 中很多类型措施可视为一种特殊透水地表, 但如何在汇水单元内合理空间布局(位置、组成和规模等)这种特殊透水地表实现最佳调控地表径流污染的研究还鲜有报道.

鉴于此, 本研究借鉴景观生态学中解决空间格局与生态过程的思路^[9-11], 通过选取合适的景观格局指数来分析汇水单元内透水斑块的空间分布和构型对水文过程与污染输出的影响, 揭示透水/不透水斑块静态空间格局与汇水区单元内径流污染输出动态过程的关系, 从而识别和评估透水/不透水表面空

间构型(斑块面积、距离和形状等)对径流水量和水质的影响, 反推出汇水区海绵工程设施(主要是 LID 措施)的合理空间布局、组成和比例, 以期为我国海绵城市建设提供科学指导.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

深圳市龙岗区地处亚热带海洋性气候区, 多年平均降雨量为 1 933.3 mm, 每年 4~9 月为雨季, 降雨量占全年的 80%. 为了研究典型透水/不透水格局特点变化给汇水单元内径流及污染带来的影响, 本研究选择了透水/不透水斑块比例和组成变化明显的大华工业区、社区工作站以及国际低碳城作为研究点(图 1), 各汇水区中不透水面占比分别为 70%、60% 和 13%(表 1), 三者皆为 LID 改造后的分流制闭合汇水单元. 其中大华工业区内硬质地表多为工业厂房与卡车通行道路, 低碳城内透水性地表多为绿地和花圃.

表 1 各汇水区透水与不透水面所占面积及比例

Table 1 Respective area and proportion of pervious/impervious surface in catchments

景观类型	大华工业区		社区工作站		国际低碳城	
	面积/hm ²	所占比例/%	面积/hm ²	所占比例/%	面积/hm ²	所占比例/%
透水	0.32	30	0.27	40	6.30	87
不透水	0.66	70	0.39	60	0.97	13



图 1 研究区位置示意

Fig. 1 Locations of the studied areas

1.2 样品采集与处理

本研究基于深圳市龙岗河流域 2019 年 3~7 月共计 16 场自然降雨事件的降雨特征、径流水质水量特征的观测和分析. 在大华工业区、社区工作站和国际低碳城各安装 RG3-M 型翻斗式雨量计进行降雨特征监测, 雨水总排口安装流量计自动监测水位和流量变化过程(图 2). 同时, 在总排口按照 5 min 间隔采样 4 次、10 min 间隔采样 3 次、20 min 间隔采样 3 次及 30 min 间隔采样 3 次, 此后每 1 h 采样一次直至径流终止的步骤进行人工时间间隔采取水

样. 样品收集后立即转入室内进行分析, 未进行分析的样品进行预处理后放入冰箱中 1~5℃ 暗处冷藏. 径流水质的测定指标包括悬浮物(SS)、总磷(TP)、总氮(TN)、化学需氧量(COD)、氨氮(NH₄⁺-N)、溶解态磷、溶解态氮和溶解态化学需氧量. 溶解态指标需经 0.45 μm 滤膜抽滤后测定, 测定方法均采用国家标准方法进行分析(表 2). 颗粒态指标为全态与溶解态的差值.

表 2 化学分析方法

Table 2 Methods for chemical analysis

指标	方法	标准
SS	重量法	GB/T1 1901-1989
TP	钼酸铵分光光度法	GB/T1 1893-1989
TN	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法	HJ 636-2012
COD	重铬酸钾法	HJ 828-2017
NH ₄ ⁺ -N	纳氏试剂比色法	HJ 535-2009

1.3 污染物累积负荷计算

汇水区场内降雨径流过程某种污染物累积负荷(L , g)可用 t 时刻地表径流量与该污染物浓度的乘积的累积量来表示^[12,13]:

$$L = \int_0^t c_t q_t dt$$

式中, c_t 为 t 时刻污染物的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); q_t 为 t

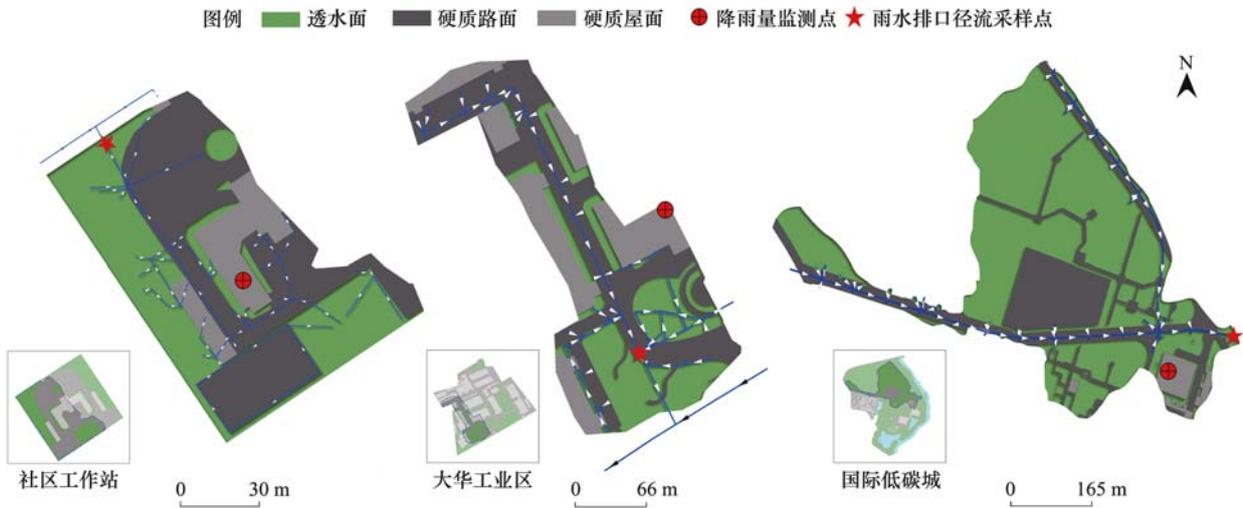


图2 各汇水区降雨径流监测样点示意

Fig. 2 Rainfall-runoff monitoring sites in respective catchment of study area

时刻径流流量 ($m^3 \cdot min^{-1}$); t 为降雨径流持续时间 (min).

1.4 景观组成及景观指数

景观格局指数常用来量化表征景观空间结构特征^[14], 本研究中采用景观格局指数来定量分析汇水单元内透水与不透水面的景观格局特征. 计算步骤如下: ①将汇水区下垫面类型分为透水面与不透水面(表3), 两者用地类型呈互补关系, 本文主要单从透水面类型切入; ②基于雨水篦子的点位布设及微地形, 利用 ArcMap 和 ArcSWAT 软件结合泰森多边形法^[15] 得出区域汇水面; ③结合实地建筑物及道路等, 对各汇水面进行手动细化调整, 并对其分成两种下垫面类型放在同一矢量数据库中, 将类型矢量数据转化为 $1 m \times 1 m$ 的 geo. tif 格式的栅格图像; ④将各图像导入 Fragstats 4.2 软件中, 设置相关权重文件并选择参数^[16]; ⑤计算指数: 本研究以斑块类型指数(class 类)为主(表4), 对城市地块汇水单元上透水/不透水面格局进行分析.

结合景观指数阐述生态意义, 将其进行分类: ① PD 和 LPI, 该类指数可较好表征类型用地破碎化程度; ② LSI 和 MSI, 该类指数可较好表征类型用地形状复杂化程度; ③ COHESION 和 SPLIT, 该类指数可较好表征类型用地聚散化程度.

表3 样点汇水区下垫面类型综合分类

Table 3 Classification of underlying surface types in study areas

类型编号	下垫面类型	下垫面类型描述
1	透水面	草地、灌木丛等
2	不透水面	硬质路面、硬质屋面、木板铺装

1.5 相关性分析

利用 Rstudio 3.5.1 软件筛选出能够关联透水格局特征和汇水区单元内综合产流产污能力的景观

格局指数. 基于 16 场自然降雨事件的监测数据, 对汇水区径流总量 (Q) 和污染物累积负荷 (L) 与景观格局指数进行 Pearson 相关分析.

2 结果与分析

2.1 汇水区单元内下垫面格局特征分析

选取透水面类型指数包括: 斑块数量 (NP)、斑块密度 (PD)、平均斑块面积 (MPS)、景观形状指数 (LSI) 和平均斑块形状 (MSI), 用来分析各汇水区透水面空间格局特征.

对各汇水区内透水面破碎化程度分析, 发现大华工业区 PD 值最大达到 $18 \text{ 个} \cdot \text{hm}^{-2}$ [图 3(a)], MPS 值较小 [图 3(b)], 说明该汇水区透水斑块间

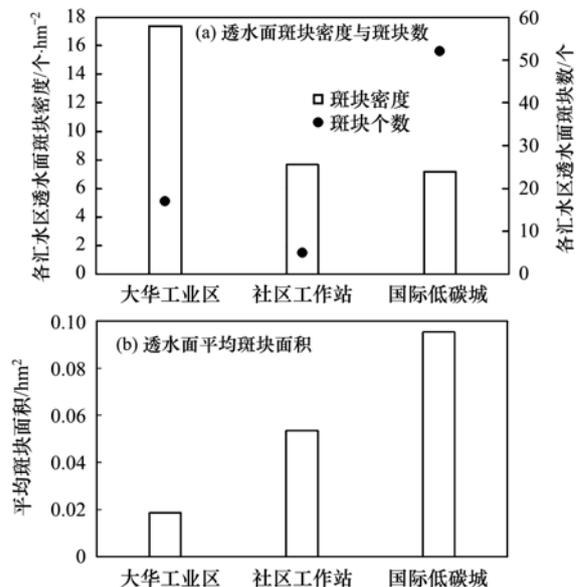


图3 各汇水区透水面破碎度相关景观指数值

Fig. 3 Results of landscape metrics related to fragmentation of pervious surface in the catchments

表 4 斑块类型尺度上景观指数描述^[10,17,18]

Table 4 Landscape metric and its formula and concept on class level

斑块类型尺度景观指数	公式 ¹⁾	意义	本研究表征分类
平均斑块面积(MPS)/hm ²	$MPS = \frac{CA}{\sum N_i}$	某一种斑块类型的平均面积	破碎度
斑块密度(PD)/个·hm ⁻²	$PD = \frac{\sum N_i}{A}$	单位面积上某一类型斑块的个数,能够反映斑块分布的密集程度和景观的破碎化程度	破碎度
最大斑块指数(LPI)/%	$LPI = \frac{\max_{j=1}^n(a_{ij})}{A} \times 100\%$	某一类型的最大斑块在景观中所占比例	破碎度
平均斑块形状(MSI)	$MSI = \frac{\sum_{j=1}^n \left(\frac{0.25P_{ij} \times 100}{\sqrt{a_{ij}}} \right)}{\sum N_i}$	描述某种土地利用类型或单一斑块边界复杂性 ^[19]	复杂度
景观形状指数(LSI)	$LSI = \frac{e_i}{\min(e_i)}$	描述某种土地利用类型或景观整体复杂化程度 ^[20]	复杂度
内聚力指数(COHESION)	$COHESION = \left[1 - \frac{\sum_{j=1}^n P_{ij} \times 100}{\sum_{j=1}^n P_{ij} \times 100 \times \sqrt{a_{ij}}} \right] \cdot \left[1 - \frac{1}{\sqrt{A_n}} \right]^{-1} \times 100$	衡量某种土地利用类型或景观斑块的物理连接度 ^[21]	聚散度
分散指数(SPLIT)	$SPLIT = \frac{A^2}{\sum_{j=1}^n a_{ij}^2}$	反映同一景观类型的不同斑块个体的分布情况	聚散度

1) 式中,CA为用地类型*i*的总面积(hm²), $\sum N_i$ 为景观中类型*i*所包含的斑块数量(个),*ij*为第*i*种用地类型的第*j*个斑块,*a_{ij}*为斑块*ij*的面积(hm²),*P_{ij}*为斑块*ij*的周长(m),*e_i*为类型*i*的边界总长度或周长(m),*A_n*为景观中栅格总数,*A*为景观总面积(hm²)

连通性低,破碎程度较高;社区工作站PD值与NP均值较小,表明透水面破碎度较低.国际低碳城透水面破碎度较小,透水斑块呈现较为集中的团状式,这是由于低碳城内多为大片绿化景观,其透水斑块面积基数大,最大斑块面积值大,导致MPS值最大.

对各汇水区的透水面轮廓及斑块形状分析,发现大华工业区、社区工作站和国际低碳城的LSI值分别为5.90、3.64和7.67,MSI值分别为1.67、1.87和1.46(见图4).相较于工作站,大华工业区LSI值较大,说明其透水景观轮廓较为复杂;MSI值较小,说明其内部透水斑块分散但形状规则.工作站LSI值较低、MSI值较高,是由于汇水区内部分透水斑块为偏离标准化的弯曲长条状灌木丛,导致斑块形状复杂性梯度较大,但因透水斑块布设较为聚集,

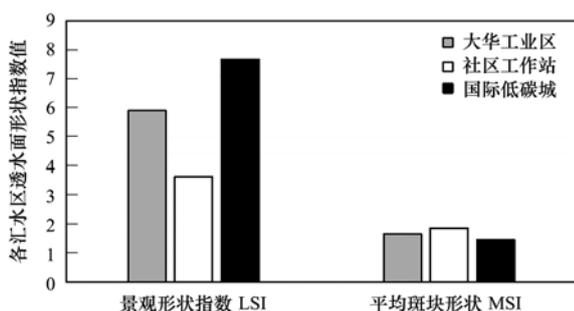


图 4 各汇水区透水面形状指数值

Fig. 4 Results of landscape metrics on pervious surface shape of the study areas

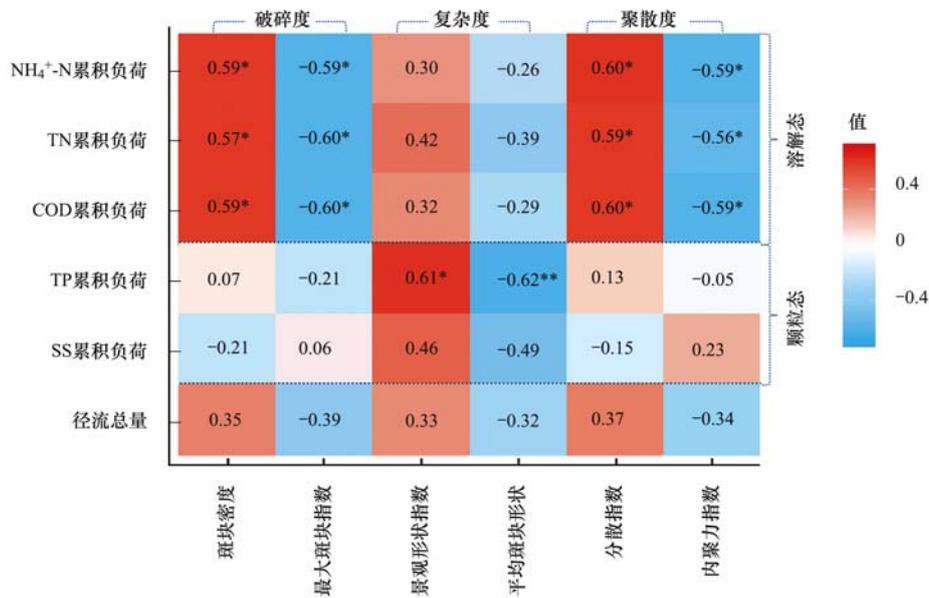
导致整体轮廓较为规则.

2.2 径流量和污染负荷总量与下垫面格局特征的相关性分析

将表征透水面破碎度、聚散度和复杂度的3类景观指数分别和汇水区单元的径流总量(*Q*)、污染物累积负荷(*L*)进行Pearson相关分析,结果见图5.其中,污染物累积负荷(*L*)按污染物主要赋存状态分为溶解态污染物累积负荷(*L_d*)和颗粒态污染物累积负荷(*L_p*),颗粒态污染物包括SS和TP,溶解态污染物包括COD、TN和NH₄⁺-N.

2.2.1 透水面破碎度对径流及其污染的影响

透水面斑块密度(PD)和最大斑块指数(LPI)分别与汇水区排口径流总量(*Q*)及溶解态污染物累积负荷(*L_d*)呈正、负相关性,与颗粒态无关(图5).其中,PD值与*L_d*呈显著正相关($r=0.59, P<0.05$,以COD计),LPI值与*L_d*呈显著负相关($r=-0.60, P<0.05$,以COD计),这表明以较大面积斑块为主的透水面破碎度越低,汇水区单元产生的*Q*与*L_d*都有减少的趋势.这主要因为以细小状散乱分布的透水斑块相较于团聚状大斑块滞蓄效果差,更易汇集径流向外溢出,进而造成地表蓄渗和控污能力降低.*L_d*较*L_p*与表征破碎度的指数相关性更显著,由于下垫面类型与特征(包括渗透率、微地形及粗糙度等)决定着地表污染物的累积程度及速率^[22],而各汇水区下垫面特征相似且管网排水体制一致,透水斑块面



** 表示 $P < 0.01$ 为极显著性水平, * 表示 $P < 0.05$ 为显著性水平; 相关系数 $0.8 \sim 1.0$ 为极强相关, $0.5 \sim 0.8$ 为中度相关, $0.3 \sim 0.5$ 为低度相关, $0.0 \sim 0.3$ 为极弱相关; 样本量 $N = 16$ 个

图5 径流总量和污染物累积负荷与景观指数的 Pearson 相关性热图

Fig. 5 Pearson correlation heatmap between total runoff, cumulative pollution load, and landscape metrics

积小且破碎度较高时,只要有径流,氨氮等溶解态污染物就可以传输,此时随流迁移过程中在地表停留时间较少,导致径流中污染物总量增加^[23,24]。透水面积大且破碎程度较低时,情况反之。颗粒态污染物传输需要一定的水动力条件^[25],当雨强和径流流速超过地表物质的启动流速时,颗粒态污染物容易从地表剥离^[26];而未达到启动流速时,颗粒态污染物容易积存于地表,所以颗粒态污染物此时可能受降雨强度的制约影响较大,在破碎化程度上的相关性体现相对于溶解态较弱。

因此,为提高汇水单元生态截流能力,强化下垫面调蓄径流和控污作用,建议适当降低透水面破碎度,保留或增加大面积透水斑块。

2.2.2 透水面复杂度对径流及其污染的影响

透水面景观形状指数 (LSI) 和平均斑块形状 (MSI) 分别与 Q 及 L_p 呈现较为显著正、负相关性,与溶解态的相关性均未达到统计显著性 (图 5)。其中,TP 累积负荷与 LSI 呈显著正相关 ($r = 0.61, P < 0.05$); 与 MSI 呈极显著负相关 ($r = -0.62, P < 0.01$)。这表明,透水斑块形状越复杂,透水面整体轮廓越规则,汇水区单元产生的 Q 与 L_p 就会呈减少趋势。这主要是因为 MSI 值越大,斑块沿边越曲折呈现不规则化,降雨径流流经路程更长,沿程损失增大,透水单元对于径流及颗粒态污染物的运移能力减小; LSI 值越小,透水面整体轮廓愈趋于规则状 (正方形),且斑块趋于聚集分布^[17],从而增加径流在斑块上的停留时间即增加滞蓄时间,减少出口径

流总量。未达到水动力条件的颗粒态污染物如 SS 与 TP,其颗粒态在长型复杂的传输路径上逐渐沉积下来,最终进入管网的负荷大幅下降。

因此,为使汇水单元内降雨径流量及污染量得到有效削减,建议适当布设长条弯曲的不规则透水斑块,以此延长径流及污染物的迁移路径。

2.2.3 透水面聚散度对径流及其污染的影响

透水面分散指数 (SPLIT) 和内聚力指数 (COHESION) 分别与 Q 及 L_d 呈正、负相关性 (图 5)。其中,两指数分别与 L_d 呈显著相关性 ($r = 0.6, r = -0.59$,以 COD 计)。这表明,透水斑块越聚集,汇水单元产生的 Q 与 L_d 呈现减少趋势。这主要因为 COHESION 值越小或 SPLIT 值越大,透水斑块间物理连接性降低,松散分布的单个透水斑块对径流及污染物的容纳体积不够,得不到周边近距离类型斑块的协同支持而对雨水及污染物削减过程不充分,导致径流量及污染量呈升高趋势。相反,当 COHESION 值越大或 SPLIT 值越小,透水面主要以团聚状斑块群呈现,斑块间连接度较高,分布相对聚集,近距离斑块对承纳力不足的斑块起到补充作用,使得径流量及污染量得到有效削减。 L_d 较 L_p 与表征聚散化的指数相关性更显著,这是由于氨氮等溶解成分迁移性较强,氮素由“源”向“汇”的传输效率通常比较高^[27],在下垫面坡度、渗透性及排水体制等条件差异性不明显时,其削减所需的下渗条件与容纳体积紧密相关,所以溶解态污染物累积量的多少也由此决定,其对透水景观格局的调控响应敏感

度更高.

因此,为提高汇水单元的蓄渗能力以及延缓径流洪峰时间,建议适当布设近距离的透水斑块群.

3 讨论

3.1 下垫面格局配置对径流调控的影响分析

城市地块汇水区单元的地表径流及污染产生能力可能受到透水性下垫面破碎度、复杂度以及聚散度的共同影响.在斑块数量、面积、周长和距离等多因素的共同制约下,径流总量与污染物累积负荷呈现不同趋势.透水面 PD、LSI 和 SPLIT 值降低,LPI、MSI 和 COHESION 值升高时,聚集且形状复杂的大斑块通过缩短透水斑块间距离和延长径流及污染物迁移路径,使得径流及污染量有减小趋势.相反,多以规则小状斑块散乱的透水格局在一定程度上支离透水面、多量化不透水面路径,进而影响汇水区及整个单元地块雨水系统的服务容纳力.

综上,小尺度地块下垫面格局规划中,适量减少细小规则状透水斑块的散乱分布,以不规则透水大斑块或斑块群为主,以此增强地表径流调蓄和污染物削减效果.

3.2 透水/不透水面格局特征对汇水单元内 LID 空间配置的启示

国内外大量研究表明 LID 设施可以有效控制城市雨水径流污染,对城市水环境治理及改善效果显著^[28~30].作为一种特殊的透水下垫面,其格局与空间配置在地块上的呈现对于地表产汇流过程尤为重要.通常情况下,LID 设施以绿色屋顶、透水铺装和雨水花园等布设最为常见^[31],该类斑块大多依据规划自由散布,基于 LID 斑块间破碎度、聚散度和形状复杂度考虑空间格局配置的情况少有研究.这种新型透水斑块作为地块尺度上解决面源污染问题的重要技术手段,将其融入景观生态学中格局-过程概念,并从空间配置、斑块属性及布设包括数量、面积、周长和不透水斑块共享边长等具体化参数考虑,不失为一种新思路.

本研究样本量数目较少,数据通过人工野外采集和实验室分析操作获取,野外采集中降雨径流监测实行非常困难,经过筛选,一年最多可观测到 7~8 场有效降雨事件,这导致研究成本极高,研究点数量选择有限.本研究中径流量与指数的相关性并不显著,主要是受到野外采集数据与样本量的影响.为提高准确性和可信度,后续研究会通过增加样本量等方法进行验证.下垫面渗透能力的差异性,会直接影响径流的形成过程^[32],因此后续研究可根据渗透性的影响来细化下垫面分类,丰富格局几何特征因

素类别.

4 结论

(1)表征破碎度的斑块密度(PD)和最大斑块指数(LPI)分别与 Q 及 L_d 呈正、负相关,PD与 L_d 呈显著正相关($r=0.59, P<0.05$,以COD计),LPI与 L_d 呈显著负相关($r=-0.60, P<0.05$,以COD计).为增强汇水单元生态截留能力,建议适当降低透水面破碎度,保留或增加大面积透水斑块.

(2)表征复杂度的景观形状指数(LSI)和平均斑块形状(MSI)分别与 Q 及 L_p 呈正、负相关性,其中LSI与 L_p 呈显著正相关($r=0.61, P<0.05$,以TP计),MSI与 L_p 呈极显著负相关($r=-0.62, P<0.01$,以TP计).为有效调蓄地表径流及削减降雨径流污染,建议在汇水单元内适当布设长条弯曲的不规则的透水斑块.

(3)表征聚散度的内聚力指数(COHESION)和分散指数(SPLIT)分别与 Q 及 L_d 呈负、正相关性,其分别与 L_d 呈显著相关性($r=-0.59, r=0.6, P<0.05$,以COD计).为增加汇水单元的蓄渗能力和延缓洪峰时间,建议适当布设近距离的透水斑块群.

(4)在城市小尺度透水面格局规划上,合理安排透水下垫面空间配置,适量减少细小规则斑块的散乱分布,增设较大的不规则斑块或斑块群,对有效调控地表径流及污染具有积极影响.

参考文献:

- [1] 朴希桐,向立云.下垫面变化对城市内涝的影响[J].中国防汛抗旱,2014,24(6):38-43.
Piao X T, Xiang L Y. The effects of land cover change to urban flood[J]. China Flood & Drought Management, 2014, 24(6): 38-43.
- [2] 龙剑波,何强,司马卫平,等.城市规划与城市面源污染调控协同研究[J].中国给水排水,2013,29(14):21-24.
Long J B, He Q, Sima W P, et al. Coordination between urban planning and urban non-point source pollution control[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(14): 21-24.
- [3] Shuster W, Bonta J, Thurston H, et al. Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review [J]. Urban Water Journal, 2005, 2(4): 263-275.
- [4] 罗英杰,张娜,李琪,等.基于SWMM的地表径流量与城市下垫面和降雨特征关系的空间分析——以中国科学院大学雁栖湖校区为例[J].中国科学院大学学报,2020,37(1):27-38.
Luo Y J, Zhang N, Li Q, et al. SWMM: a case study of Yanqi Lake campus of University of Chinese Academy of Sciences[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2020, 37(1): 27-38.
- [5] 邵斌,潘文斌.城市不透水面与降雨径流关系研究[J].亚热带资源与环境学报,2012,7(4):20-27.
Shao W, Pan W B. On the relationship between urban impervious surface and rainfall-runoff[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2012, 7(4): 20-27.

- [6] 刘珍环, 曾祥坤. 深圳市不透水表面扩展对径流量的影响[J]. 水资源保护, 2013, **29**(3): 44-50.
Liu Z H, Zeng X K. Impact of impervious surface expansion on urban runoff in Shenzhen City[J]. Water Resources Protection, 2013, **29**(3): 44-50.
- [7] 王艳君, 吕宏伟, 施雅风, 等. 城市化流域的土地利用变化对水文过程的影响——以秦淮河流域为例[J]. 自然资源学报, 2009, **24**(1): 30-36.
Wang Y J, Lv H J, Shi Y F, *et al.* Impacts of land use changes on hydrological processes in an urbanized basin—a case study in Qinhuai River basin[J]. Journal of Natural Resources, 2009, **24**(1): 30-36.
- [8] 李沐寒, 尹海伟, 孔繁花, 等. 南京市鼓楼区 LID 空间配置与雨洪调控效益研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, **30**(3): 30-38.
Li M H, Yin H W, Kong F H, *et al.* Research on spatial distribution and stormwater regulation benefits of low impact development in Gulou District, Nanjing, China[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, **30**(3): 30-38.
- [9] 郭旭东, 谢俊奇, 何挺. 基于斑块层次的土地利用变化对土地质量影响的初步分析——以河北省张北县为例[J]. 地理科学进展, 2006, **25**(3): 116-127.
Guo X D, Xie J Q, He T. The effects of land use change on land quality at patch scale—A case study in Zhangbei County, Hebei Province[J]. Progress in Geography, 2006, **25**(3): 116-127.
- [10] 邬建国. 景观生态学-格局、过程、尺度与等级[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [11] 赵鹏, 夏北成, 秦建桥, 等. 流域景观格局与河流水质的多变量相关分析[J]. 生态学报, 2012, **32**(8): 2331-2341.
Zhao P, Xia B C, Qin J Q, *et al.* Multivariate correlation analysis between landscape pattern and water quality[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(8): 2331-2341.
- [12] Kayhanian M, Suverkrupp C, Ruby A, *et al.* Characterization and prediction of highway runoff constituent event mean concentration[J]. Journal of Environmental Management, 2007, **85**(2): 279-295.
- [13] 赵剑强. 城市地表径流污染与控制[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [14] 其格乐很, 何秉宇, 黄玲. 基于 GIS 和 Fragstats 的城市绿地景观格局动态变化研究——以新疆乌鲁木齐市为例[J]. 安徽农业科学, 2019, **47**(15): 72-77, 88.
Qigelhen, He B Y, Huang L. Dynamic change of urban greenbelt landscape pattern based on GIS and Fragstats—a case study of Urumqi, Xinjiang [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, **47**(15): 72-77, 88.
- [15] 李文科, 杨淑芳. 城市雨水排放系统的数值模拟技术及其应用[J]. 城市道桥与防洪, 2012, (7): 195-198.
Li W K, Yang S F. Numerical simulating technology of urban rainwater discharge system and its application[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2012, (7): 195-198.
- [16] 林慧. 城市三维景观指数体系构建及应用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
Lin H. Urban 3D landscape index system construction and its application [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- [17] 郑新奇, 付梅臣. 景观格局空间分析技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [18] 布仁仓, 胡远满, 常禹, 等. 景观指数之间的相关分析[J]. 生态学报, 2005, **25**(10): 2764-2775.
Bu R C, Hu Y M, Chang Y, *et al.* A correlation analysis on landscape metrics[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, **25**(10): 2764-2775.
- [19] 章戈. 基于土地利用格局优化的雨洪管理模式研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
Zhang G. Study on stormwater management mode based on land use pattern optimization [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [20] Herzog F, Lausch A, Müller E, *et al.* Landscape metrics for assessment of landscape destruction and rehabilitation [J]. Environmental Management, 2001, **27**(1): 91-107.
- [21] Weng Y C. Spatiotemporal changes of landscape pattern in response to urbanization [J]. Landscape and Urban Planning, 2007, **81**(4): 341-353.
- [22] 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, 59.
Li J Q, Qi H J, Gong Y W, *et al.* Effect of rainfall and underlying surface characteristics of runoff pollution [J]. Environmental Science & Technology, 2015, **38**(9): 47-52, 59.
- [23] 申红彬, 徐宗学, 张勤, 等. 植草沟径流颗粒污染物削减效应监测与相关性分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, **55**(5): 641-647.
Shen H B, Xu Z X, Zhang Q, *et al.* Reduction of runoff-sediment-pollutants and correlation analysis in grass swale [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, **55**(5): 641-647.
- [24] Egodawatta P, Thomas E, Goonetilleke A. Mathematical interpretation of pollutant wash-off from urban road surfaces using simulated rainfall[J]. Water Research, 2007, **41**(13): 3025-3031.
- [25] 肖洋, 王磊, 张涛涛, 等. 不透水表面坡度对溶解态污染物传输过程的影响研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, **16**(6): 74-79.
Xiao Y, Wang L, Zhang T T, *et al.* Influence of slope on the dissolved pollutant transport process over impervious surface [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, **16**(6): 74-79.
- [26] 陈莹, 王昭, 吴亚刚, 等. 降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 2828-2835.
Chen Y, Wang Z, Wu Y G, *et al.* Impacts of rainfall characteristics and occurrence of pollutant on effluent characteristics of road runoff pollution [J]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 2828-2835.
- [27] 杨逢乐, 赵磊. 合流制排水系统降雨径流污染物特征及初期冲刷效应[J]. 生态环境, 2007, **16**(6): 1627-1632.
Yang F L, Zhao L. Pollutant characteristics and first flush effect of runoff in combined sewer system [J]. Ecology and Environment, 2007, **16**(6): 1627-1632.
- [28] 李春林, 刘森, 胡远满, 等. 基于暴雨径流管理模型(SWMM)的海绵城市低影响开发措施控制效果模拟[J]. 应用生态学报, 2017, **28**(8): 2405-2412.
Li C L, Liu M, Hu Y M, *et al.* Simulation on the control effect of low impact development measures of sponge city based on storm water management model (SWMM) [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, **28**(8): 2405-2412.
- [29] Tredway J C, Havlick D G. Assessing the potential of low-impact development techniques on runoff and streamflow in the Templeton Gap Watershed, Colorado [J]. The Professional Geographer, 2017, **69**(3): 372-382.
- [30] Kim H, Seagren E A, Davis A P. Engineered bioretention for

- removal of nitrate from stormwater runoff[J]. Water Environment Research, 2003, 75(4): 355-367.
- [31] Burszta-Adamiak E, Mrowiec M. Modelling of green roofs' hydrologic performance using EPA's SWMM[J]. Water Science and Technology, 2013, 68(1): 36-42.
- [32] 苏激娜. 海河中游工业园区典型下垫面降雨径流污染分析[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- Su W N. The analysis of rainfall runoff pollution on typical underlying surfaces in the industrial park of Haihe River middle reaches area[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.

《环境科学》连续 8 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2019 年 10 月 28 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2019 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2019 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 8 次获此殊荣. 评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”。

环 境 科 学

CONTENTS

Analysis of Pollution Characteristics and Primary, Secondary Contributions of Firework Burnings in Qingdao During the Spring Festival	FANG Tian-ge, YAO Xiao-hong, MENG He, <i>et al.</i> (4345)
Characterization and Source Apportionment of PM _{2.5} Based on the Online Observation in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Li-wei, <i>et al.</i> (4355)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} in Beijing During 2017-2018	LI Huan, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4364)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Southern Beijing	DONG Gui-ming, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4374)
Characteristics and Formation Mechanism of Three Haze Pollution Processes in Chengdu in Winter	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, YIN Han-mei, <i>et al.</i> (4382)
Distribution Characteristics and Source of Black Carbon Aerosols in the Northern Suburbs of Nanjing	XIE Feng, LIN Yu-chi, SONG Wen-huai, <i>et al.</i> (4392)
Assessment of Emergency Emission Reduction Effect During the Heavy Air Pollution Episodes in Beijing, Tianjin, Hebei, and Its Surrounding Area(“2+26” Cities) from October to December 2019	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, WANG Wei, <i>et al.</i> (4402)
Variational Trend and Characteristics of Air Pollution in Baoding City	GOU Yin-yin, ZHANG Kai, LI Jin-juan, <i>et al.</i> (4413)
Emission Inventory of VOCs Components in Zhengzhou and Their Ozone Formation Potential	LU Xuan, ZHANG Rui-qin, HAN Luo-kai (4426)
Evolution and Evaluation of O ₃ and VOCs in Zhengzhou During the National Traditional Games of Ethnic Minorities Period	ZHAO Jin-shuai, YU Shi-jie, WANG Nan, <i>et al.</i> (4436)
Characteristics of Volatile Organic Compounds in Wood Coatings and Automotive Coatings in China	KE Yun-ting, SUN Yu-hang, CHENG Hai-rong, <i>et al.</i> (4446)
Influence of Typical Desulfurization Process on Flue Gas Particulate Matter of Coal-fired Boilers	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, LÜ Rui-he, <i>et al.</i> (4455)
Investigation on the Emission Difference of Air Pollutants from Common Residential Coal Stoves and Suggestions for Emission Reduction	ZHANG Yi-chen, XUE Chen-li, LIU Jie, <i>et al.</i> (4462)
Mobile Source Emission Inventory with High Spatiotemporal Resolution in Tianjin in 2017	LIU Geng, SUN Shi-da, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (4470)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollution Sources Based on Second Pollution Source Census Data in Sichuan Province	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (4482)
Preliminary Screening for the Urban Forest Against Combined Air Pollution	LI Pin, WEI Yan-yan, FENG Zhao-zhong (4495)
Spatial Distribution and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Plant Leaves in Baoji City	ZHANG Jun, LIANG Qing-fang, GAO Yu (4504)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Aquatic Organisms in Chaoshan Coastal Area along the South China Sea	XIU Cuo, WANG Chen-chen, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (4514)
Spatiotemporal Differentiation and Degradation Analysis of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments of Shanmei Reservoir and Its Inflowing River, Quanzhou, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, FENG Kai-wen (4525)
Spatial-temporal Variations and the Regulators of Nitrate Status in Shallow Groundwater of the Typical Mountainous Agricultural Watershed in the Upper Reaches of the Yangtze River	JIANG Nan, ZHOU Ming-hua, LI Hong, <i>et al.</i> (4539)
Emission Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Typical Agricultural Small Watershed in Tuojiang River Basin	WANG Hong, XU Ya-ling, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4547)
Assessment of Potential Risk of Diffuse Pollution in Haihe River Basin Based Using DPERS Model	FENG Ai-ping, WANG Xue-lei, XU Yi, <i>et al.</i> (4555)
Impact of Spatial Heterogeneity of Precipitation on the Area Change in Critical Source Area of Non-point Sources Pollution	GAO Xiao-xi, ZUO De-peng, MA Guang-wen, <i>et al.</i> (4564)
Sedimentary Diatom Records Reveal the Succession of Ecosystem in Lake Xihu, Dali over the Past 50 Years	ZHANG Chen-xue, XU Min, DONG Yi-fan, <i>et al.</i> (4572)
Content and Distribution of Cadmium in Soil and Fluvial Sediments in the Sea-Land Interaction Zone	WANG Fang-ting, CHEN Zhi-hua, BAO Ke, <i>et al.</i> (4581)
Occurrence Characteristics and Quality Estimation of Microplastics in Drainage Ditches in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia	WANG Zhi-chao, YANG Fan, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (4590)
Influence of Pervious/Impervious Pattern on Runoff and Pollution in Parcel-based Catchment	JIANG Zhi-hui, LIAO Yun-jie, XIE Wen-xia, <i>et al.</i> (4599)
Activating Efficiency of Iron-copper Bimetallic Organic Framework MIL-101(Fe, Cu) Toward H ₂ O ₂ for Degradation of Dyes	LIANG He, LIU Rui-ping, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (4607)
Synergistic Reaction Mechanism of Cu ⁰ @Fe ₃ O ₄ Activated PMS for Degradation of <i>p</i> -nitrophenol	SHI Qing-qing, PU Sheng-yan, YANG Xi (4615)
Kinetics and Mechanism of Sucralose Degradation in Water Using UV-activated Persulfate Process	YU Yun, LU Jin-xin, LÜ Zhen, <i>et al.</i> (4626)
Microbial Community Structure for Sewage Wastewater Treatment Plants in Winter	SHANG Yue-fei, WANG Shen, ZONG Ni, <i>et al.</i> (4636)
Microbial Community Analysis of Different DN and PN-ANAMMOX Coupling Modes for Mature Landfill Leachate Treatment	LU Ming-yu, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4644)
Analysis of Rapid Start-up and Mixed Nutritional Nitrogen Removal Performance of Complete Autotrophic Granular Sludge	QI Ze-kun, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4653)
Long-term Stability of Aerobic Granular Sludge Under Low Carbon to Nitrogen Ratio	YUAN Qiang-jun, ZHANG Hong-xing, CHEN Fang-yuan (4661)
Response of Bacterial and Fungal Communities to Chemical Fertilizer Reduction Combined with Organic Fertilizer and Straw in Fluvo-aquic Soil	WU Xian, WANG Rui, HU He, <i>et al.</i> (4669)
Characteristics of Soil Nutrients and Fungal Community Composition in Crop Rhizosphere Under Different Rotation Patterns	SUN Qian, WU Hong-liang, CHEN Fu, <i>et al.</i> (4682)
Effects of Short-term Application of Moutai-flavor Vinasse Biochar on Nitrogen Availability and Bacterial Community Structure Diversity in Yellow Soil of Guizhou Province	ZHANG Meng, LIU Yan-ling, WEI Quan-quan, <i>et al.</i> (4690)
Effects of Different Rotation Patterns of Oil-Rice on Methane and Nitrous Oxide Emissions in Rice Fields	CHEN You-de, ZHAO Yang, GAO Du-juan, <i>et al.</i> (4701)
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> Biofertilizer Mitigating Soil Ammonia Volatilization	YANG Ya-hong, XUE Li-xia, SUN Bo, <i>et al.</i> (4711)
Effects of Exogenous Phosphorus on Rice Growth and Cadmium Accumulation and Transportation Under Cadmium Stress	HUO Yang, QIU Yin-yan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4719)
Key Stage of As Accumulation in Rice Under As Stress at Different Growth Stages	DENG Peng-hui, CAI Ya-qin, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4726)
Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment of Corn Grains from a Pb-Zn Mining Area	ZHOU Yan, WAN Jin-zhong, LI Qun, <i>et al.</i> (4733)
Polybrominated Diphenyl Ether in E-waste Dismantling Sites in Taizhou City, Zhejiang Province: Concentration, Distribution, and Migration Trend	WEI Bao-kai, LIU Chen, WANG Ying, <i>et al.</i> (4740)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils in Southern Youyang County, Chongqing	WANG Rui, DENG Hai, YAN Ming-shu, <i>et al.</i> (4749)
Ecological Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Livestock Manure and Vegetable Soil of Chongqing	PENG Qiu, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong (4757)