

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.7
第41卷 第7期

目次

中国钢铁行业大气环境影响	汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆 (2981)
华北地区大气细颗粒物 (PM _{2.5}) 年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应	杨伟, 姜晓丽 (2995)
郑州市民运会期间大气 PM _{2.5} 改善效果评估	王申博, 姜亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹 (3004)
成都夏冬季 PM _{2.5} 中水溶性无机离子污染特征	冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强 (3012)
川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析	雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈 (3021)
四川省典型行业挥发性有机物源成分谱	徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波 (3031)
成都市工业挥发性有机物排源成分谱	周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文斌 (3042)
郑州市典型工业企业 VOCs 排放特征及风险评估	齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟 (3056)
阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响	牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林 (3066)
典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性	景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽 (3076)
华北地区典型重工业城市夏季近地面 O ₃ 污染特征及敏感性	欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音 (3085)
稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性	顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运霞 (3095)
苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析	卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳 (3102)
轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征	谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日超, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜 (3112)
非超低与超低排放煤电机组启动过程 NO _x 排放特征对比分析	李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博 (3121)
邢台市区道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别	宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫 (3130)
叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响	魏文俊, 王兵, 牛香 (3136)
关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源	赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成 (3148)
岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析	田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰 (3157)
木沥河流域氮素污染及其污染源解析	齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙 (3165)
辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析	齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾 (3175)
鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应	王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾珺杰, 李兆喜, 马明真, 温学发 (3186)
象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析	王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳 (3194)
乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献	张慧, 王世亮, 余杨 (3204)
连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征	李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 靳迪迪 (3212)
茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险	吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英 (3222)
金盆水库沉积物铁锰释放规律	路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡 (3231)
城市湖泊沉积物微塑料污染特征	王璇, 牛司平, 宋小龙, 饶竹, 战楠 (3240)
西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析	刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华 (3249)
海水中的红毒素与营养盐对微藻的复合影响	王娜, 赵卫红, 苗辉 (3257)
梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律	温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟 (3266)
宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析	徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃 (3275)
分层型水库藻类垂直演替的水质与细菌种群调控	闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾克宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容 (3285)
长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响	毕薇薇, 叶胜, 于建全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁 (3297)
供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型	刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁 (3307)
碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制	崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜 (3315)
弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁 (GO-nFe ⁰ /WMF) 对水中Cr(VI) 的去除特性及机制	计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉 (3326)
一硫代肟在针铁矿上的吸附及影响因素	廖丹雪, 单慧娟, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽 (3337)
生物滤池快速启动 ANAMMOX 运行策略及菌群特征	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (3345)
低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响	张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3356)
羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响	邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏楠, 方芳, 陈猷鹏 (3365)
低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性	高春娣, 张娜, 韩微, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻 (3373)
我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化	董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎 (3384)
城镇河流 CO ₂ 及 CH ₄ 排放与市政排水管网污水输入的关联影响	李磊, 陈浩, 朱奔, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建峰 (3392)
控释尿素对黄河故道沙性潮土 N ₂ O 排放的影响	姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林 (3402)
我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放	张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠 (3410)
不同母质发育土壤 Cd 环境行为对水分管理模式的响应差异	黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波 (3418)
锰基改性生物炭对弱碱性 Cd 污染土壤团聚体结构以及 Cd 含量特征的影响	孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵 (3426)
钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响	曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋 (3434)
叶面喷施 2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响	杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波 (3441)
《环境科学》征订启事 (3011) 《环境科学》征稿简则 (3084) 信息 (3174, 3185, 3391)	

宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析

徐宇婕¹, 龚玥敏², 毕军鹏¹, 王洋¹, 程军蕊^{1*}, 王侃¹

(1. 宁波大学土木与环境工程学院, 宁波 315211; 2. 浙江工业大学材料科学与工程学院, 杭州 310014)

摘要: 雨水径流污染影响受纳水体水质, 为掌握宁波市雨水径流污染特征, 于 2009 ~ 2019 年开展了 8 场降雨调查, 采用频率统计分析和相关性分析方法研究了中心城区的屋面、广场、绿地、小区道路、商业街道和城市主干道等不同下垫面的雨水径流污染水平, 径流污染源, 以及中小雨型径流水质的冲刷规律。结果表明, 宁波市各下垫面雨水径流的化学需氧量(COD)、氨氮、总氮、总磷和总悬浮固体(TSS)等污染指标的次降雨径流平均浓度(EMC)均值分别介于 23.88 ~ 102.31、0.40 ~ 1.69、3.41 ~ 8.71、0.09 ~ 0.50 及 37.6 ~ 323.4 mg·L⁻¹ 之间。除广场外, 其它各下垫面雨水径流的 COD 和总氮污染严重, 屋面、商业街和小区雨水径流氨氮显著高于广场、绿地和主干道 ($P < 0.05$), 商业街、主干道和绿地雨水径流总磷浓度显著高于 ($P < 0.05$) 其它下垫面; 屋面、广场、主干道及商业街雨水径流中的 TSS 与 COD、氨氮、总磷具有同源性质, 绿地和小区雨水径流的氨氮和总氮具有同源性质; 在中小雨情景下屋面和绿地等下垫面的氨氮较易形成初始冲刷效应, 而广场、小区和城市主干道等下垫面的总氮和总磷初始冲刷效应并不明显。

关键词: 雨水径流; 城市下垫面; 次降雨径流平均浓度(EMC); 污染特征; 冲刷效应

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)07-3275-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201911060

Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo

XU Yu-jie¹, GONG Yue-min², BI Jun-peng¹, WANG Yang¹, CHENG Jun-rui^{1*}, WANG Kan¹

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The pollution of rainwater runoff in urban areas can cause nutrient enrichment and eutrophication in receiving waters. To explore the pollution characteristics of rainwater runoff in Ningbo, eight sampling campaigns were carried out during rainfall events from 2009 to 2019. Samples of rainwater runoff were collected from underlying surfaces of roofs, squares, grassland, main roads, and the roads in commercial streets and residential districts. The concentrations of runoff pollutants, their sources and correlations, and first flush effects were studied using frequency statistical analysis and correlation analysis. The average event mean concentrations of the chemical oxygen demand (COD), ammonia nitrogen, total nitrogen, total phosphorus, and total suspended solids (TSS) in the rainwater runoff in Ningbo were in the ranges of 23.88-102.31, 0.40-1.69, 3.41-8.71, 0.09-0.50, and 37.6-323.4 mg·L⁻¹, respectively. Apart from the square surfaces, the COD and total nitrogen pollution of the underlying surfaces was severe. The ammonia nitrogen concentrations from the roof, commercial street, and residential district surfaces were significantly higher ($P < 0.05$) than those from the square, grassland, and main road surfaces. The concentrations of total phosphorus from the commercial street, main road, and grassland surfaces were significantly higher ($P < 0.05$) than those of the other underlying surfaces. The correlations of TSS with COD, ammonia nitrogen, and total phosphorus showed that the pollutants and TSS have the same original sources in roof, square, main road, and commercial street runoff, while ammonia nitrogen and total nitrogen have the same original sources in runoff from grassland and residential areas. Under the meteorological conditions of light and moderate rain, the first flush effects of ammonia nitrogen in the runoff of roofs and grassland were observed clearly, whereas this was not the same for the pollutants of total nitrogen and total phosphorus in the residential area, main road, and square runoff.

Key words: rainwater runoff; underlying surface; event mean concentration (EMC); pollution characteristics; flush effect

城镇化建设和经济的迅速发展使区域土地利用类型发生了显著改变, 非透水下垫面的增加导致雨水径流量增大的同时, 由于冲刷作用, 雨水径流携带大量泥沙、有机质、氮和磷等污染物进入城市受纳水体, 易引发水体的富营养化和水生生态破坏^[1,2]. 许多研究已证实, 初期雨水径流中的有机质和重金属含量接近^[3,4]甚至超过^[5]城市污水处理厂的进水浓度, 有学者认为大约 46% 的地表水污染可归因于城市雨水径流^[6]. 近年来, 欧美国家对城市的住宅区^[7]、商业区、高速公路^[8]、停车场^[9]、桥梁^[10]和屋

面^[11]等不同类型的下垫面的雨水径流污染开展了大量调查研究, 我国也对杭州^[12]、上海^[13]和西安^[14]等城市雨水径流污染开展了相关研究. 前人研究表明, 因为受交通状况、大气沉降等多重因素的综合影响, 不同城市不同类型的下垫面的雨水径流水质差异极大, 具有很强的随机性和波动性. 为维护受纳水体生

收稿日期: 2019-11-07; 修订日期: 2020-01-16

基金项目: 国家住房和城乡建设部科技计划项目(2016K4017)

作者简介: 徐宇婕(1995 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为城市雨水径流, E-mail: 690307575@qq.com

* 通信作者, E-mail: chengjunrui@nbu.edu.cn

态系统的良性发展,保障城市建设中各项径流污染控制措施切实有效,首先需明确城市不同区域的雨水径流污染特征。

宁波市城区水网密布,但水体富营养化严重。为解决城市雨水径流面源污染问题,自2016年宁波市开始实施海绵城市建设试点工作。但是,由于当地雨水径流监测数据非常缺乏,城市雨水径流面源污染负荷量难以估算,导致海绵设施的设计、施工可利用的基础数据非常有限,致使试点工程设计的针对性不足,设施运行效果不理想。本研究选择了宁波市6个代表性监测点,通过实地监测数据解析了2009~2019年宁波市不同类型下垫面雨水径流中化学需氧量(COD)、氨氮、总氮、总磷和总悬浮固体(TSS)的污染特征和各项污染物之间的同源性质,探讨了中小雨情景下雨水径流的水质冲刷规律,以期为城市雨水径流

污染削减与控制提供数据基础和决策依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

宁波市属亚热带季风气候,年降水日数(日降水量 ≥ 0.1 mm)在120~200 d之间,年平均降水量1480 mm左右,5~9月降水量占全年的60%,年平均径流系数为0.54,径流模数为86.99万 $\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$ 。宁波市中心城区面积2560 km^2 ,包括江北区、海曙区、鄞州区、镇海区和北仑区。区内降雨量面上分布不均,由东北、东南滨海向西部、西南部递增。本研究选择了中心城区的屋面、城市广场、草地及道路等典型城市下垫面开展研究,共设置了6个雨水径流采样点及1个雨量观测点,其位置分布见图1。

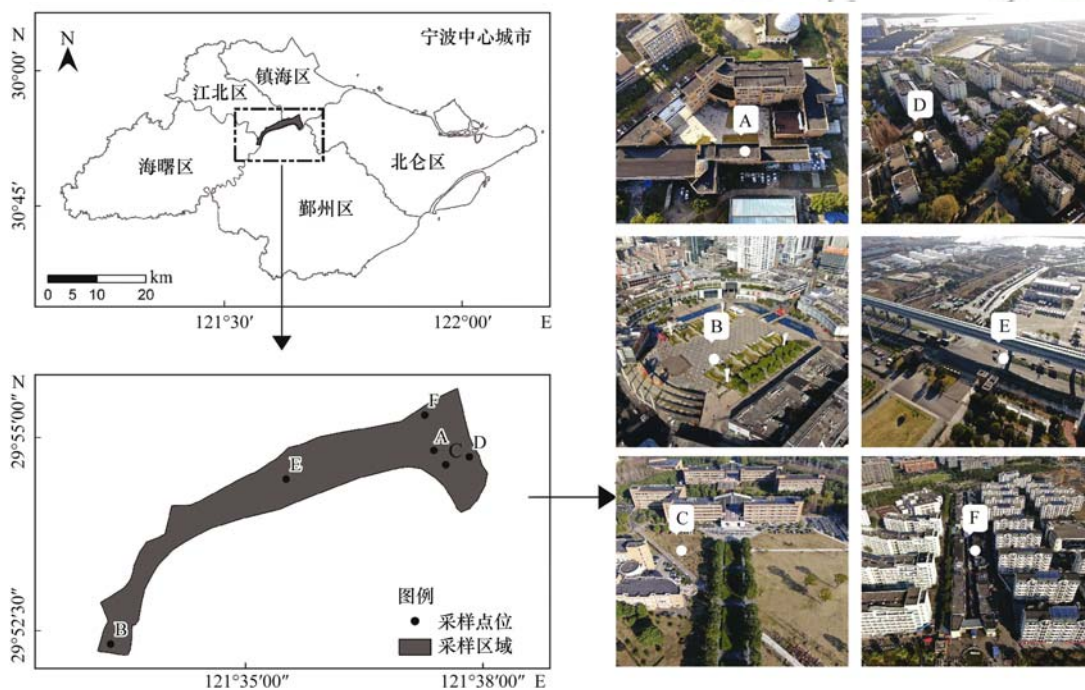


图1 采样点分布示意

Fig. 1 Locations of sampling sites

图1中,采样点A位于宁波大学思禹工程楼屋顶,为沥青屋面,也是雨量观测点;B位于天一广场,是宁波中心城区集休闲、商贸、旅游、餐饮、购物于一体的大型城市中心商业广场,下垫面为非透水性石板铺装;C位于宁波大学校园内绿地,草坪面积约24000 m^2 ,地势平坦。D为居住小区道路,位于江北区文萃新村,为旧居民区,常住人口约1200人,道路为透水性弱的水泥路面,路面地势平坦,雨水径流经排水管网收集后就近排入小区西侧河道,道路清扫为人工清扫,清扫频率每天1次。E位于环城北路,为城市主干道,双向6车道,道路宽阔平坦,车流量大,两侧分布有高校、研究院、物流公司等。F为江北区商业街道

路,道路两侧餐饮店铺分布密集,人类活动频繁,道路清扫为人工清扫,清扫频率每天1次。

1.2 样品采集方法

降水开始前,在屋顶的雨落管口处,城市广场、商业街道、居住区内部道路、城市主干道等的雨水集水口,以及草坪地势较低处容积约2 L的集水坑内,放置好采样容器,待降水形成径流后即开始采样,将采集的样品移入洁净干燥的聚乙烯塑料瓶中,及时运回,并密封保存于4℃冰箱中。

2009年11月至2019年5月,共采集8个降雨场次的径流水样。对于屋面、城市广场、草坪、道路等下垫面,所采集的径流水样均为次降雨过程的连续

水样,即从降雨形成径流开始采集第一个瞬时水样,在前 30 min 内每间隔 10 min 依次采集下一个水样,之后每间隔 30 min 采集一个水样,直至降雨结束为止,全过程至少采集 6 个连续水样。

1.3 样品分析方法

采样完成后,即转入实验室分析,样品分析指标包括:COD、氨氮、总氮、总磷和 TSS。检测方法参见文献[15]。即 COD 采用重铬酸盐法测定(HJ 828-2017),氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定(HJ 535-2009),总氮采用过硫酸钾氧化紫外分光光度法测定(HJ 636-2012),总磷采用钼酸铵分光光度法测定(HJ 670-2013)。TSS 采用在 105℃的条件下,蒸发至恒重称量所余固体物的测定方法。

1.4 次降雨径流平均浓度(EMC)计算方法

由于次降雨过程污染物浓度差异较大,可以用次降雨径流平均浓度(event mean concentration,

EMC)来评估污染物的污染程度^[16]。EMC(mg·L⁻¹)的计算公式为:

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^t c_t Q_t dt}{\int_0^t Q_t dt} \cong \frac{\sum c_t Q_t \Delta t}{\sum Q_t \Delta t}$$

式中,M为汇水小流域次降雨污染物排放总量,mg;V为次降雨总径流量,L;t为径流时刻,min;c_t为t时刻污染物浓度,mg·L⁻¹;Q_t为t时刻径流量,L·min⁻¹;Δt为时间间隔,min。

1.5 降雨监测情况

在采集径流水样的同时,用L3型翻斗式雨量计及PC-4A型环境监测系统(锦州阳光气象科技有限公司)同步记录降雨特征,8场降雨事件的特征参数见表1。

表1 监测降雨事件的降雨特征¹⁾

Table 1 Characteristics of the monitored rainfall events

序号	日期 (年-月-日)	降雨量 /mm	降雨时间	降雨历时 /min	平均雨强 /mm·min ⁻¹	前期晴天 /d
1	2009-11-09	22.3	16:50~19:30	160	0.149	0
2	2010-03-14	24.1	12:50~15:30	160	0.151	4
3	2015-09-23	10.0	09:35~12:05	165	0.078	8
4	2015-10-29	3.1	13:20~15:20	120	0.027	18
5	2015-12-05	3.8	11:15~13:00	105	0.217	2
6	2019-03-05	14.1	12:15~14:15	120	0.117	2
7	2019-03-28	12.5	14:20~16:35	135	0.093	0
8	2019-05-15	12.8	09:45~12:05	140	0.103	0

1)降雨间隔是指与上次日降雨量超过10 mm降雨事件的间隔时间

2 结果与分析

2.1 雨水径流污染物浓度分布频率

2009年11月至2019年5月期间,宁波市屋面、广场、绿地和道路(小区道路、城市主干道、商业街道路)等典型城市下垫面8次降雨事件的雨水径流主要污染物的质量浓度分布频率如图2所示。

结果表明,宁波市屋面、广场、绿地和道路等下垫面雨水径流COD的质量浓度分布范围较广,其中,COD劣于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)V类水标准限值(40 mg·L⁻¹)的浓度分布频率分别为65.52%、22.03%、87.04%和74.40%。宁波市屋面和道路雨水径流的氨氮质量浓度较高,劣于V类水标准限值(2.0 mg·L⁻¹)的分布频率分别为34.48%和21.47%;广场和绿地径流未检测到氨氮为劣V类的样本,且优于Ⅲ类水的质量浓度分布频率分别为89.83%和52.79%。宁波市屋面径流总氮质量浓度分布范围主要集中在3~10.5 mg·L⁻¹,分布频率为72.41%;广场径流总氮主要分布于1.5

~3 mg·L⁻¹,质量浓度分布频率为52.54%;绿地和道路径流的总氮质量浓度分布范围较宽,其中劣于V类水的质量浓度分布频率分别为89.66%和92.09%。宁波市广场、绿地和道路雨水径流总磷劣于V类水(>0.4 mg·L⁻¹)的质量浓度分布频率分别为5.09%、24.44%和60.00%,优于Ⅳ类水标准限值(<0.3 mg·L⁻¹)的质量浓度分布频率分别为84.75%、73.33%和32.00%;道路径流总磷劣V类水分布频率最高,绿地和广场径流总磷优于Ⅳ类水标准限值的检出频率最高;屋面径流总磷所有样本质量浓度值均在V类水标准限值以内,主要分布于0~0.1 mg·L⁻¹(即优于Ⅱ类水标准限值),分布频率为56.90%。广场、屋面、绿地和道路等4类下垫面的雨水径流TSS质量浓度分布范围分别为2~94、6~633、13~452和16~680 mg·L⁻¹之间,且TSS质量浓度大于200 mg·L⁻¹的分布频率为0%、32.76%、24.10%和50.85%。

2.2 雨水径流的EMC值

近年来,较多研究采用EMC值来表征雨水径流

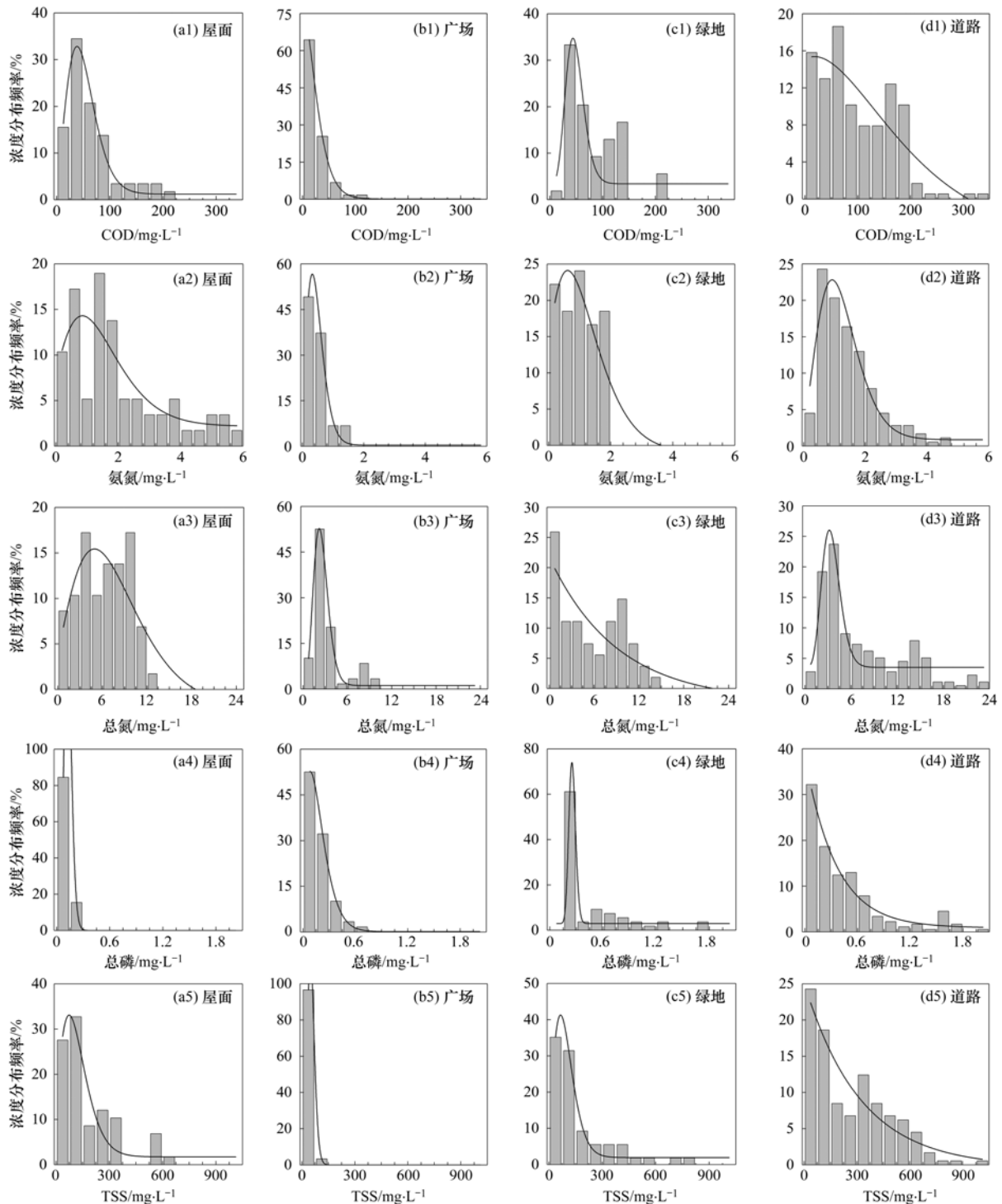


图2 屋面($n=58$)、广场($n=59$)、绿地($n=54$)及道路($n=177$)雨水径流污染物质量浓度频率分布

Fig. 2 Frequency of pollutant concentration in the runoff of roofs ($n=58$), squares ($n=59$), grassland ($n=54$), and roads ($n=177$)

污染特征^[17~19],将 EMC 应用于雨水径流污染负荷的计算模型中^[16].为便于比较,本研究对宁波市各下垫面 8 次降雨事件的 EMC 值进行统计分析,结果见表 2.

宁波市不同类型下垫面雨水径流 COD 的 EMC 均值介于 23.88 ~ 102.31 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,小区道路、商业街道、城市主干道和绿地等下垫面雨水径流

的 EMC 均值相对较高,而屋面和广场相对较低.宁波市屋面雨水径流 COD 的 EMC 大于温州^[20],但小于北京^[21]及深圳^[22]等城市;商业街 COD 的 EMC 约为合肥^[23]的 1/10,而小区 COD 低于西安^[24]、上海^[5]及福州^[25]等城市;主干道雨水径流 COD 的 EMC 值远小于温州、重庆^[26]及上海^[5]等城市;绿地雨水径流 COD 的 EMC 均大于温州^[20]、常州^[27]及东

表 2 不同下垫面雨水径流的 EMC 值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 EMC values of stormwater runoff from different underlying surfaces/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

下垫面类型	EMC 值	COD	氨氮	总氮	总磷	TSS
屋面 ($n=8$)	最大值	97.86	2.95	10.61	0.14	366.72
	最小值	13.89	0.35	1.32	0.04	25.42
	平均值	51.62	1.69	6.08	0.09	131.21
广场 ($n=8$)	最大值	42.51	0.81	9.81	0.36	94.00
	最小值	3.42	0.09	1.56	0.04	6.28
	平均值	23.88	0.40	3.41	0.14	37.63
绿地 ($n=8$)	最大值	124.64	1.08	10.47	1.21	765.80
	最小值	28.23	0.01	0.54	0.18	55.12
	平均值	73.10	0.49	4.83	0.43	232.99
小区道路 ($n=8$)	最大值	146.09	2.55	14.24	0.71	475.29
	最小值	51.66	0.76	1.49	0.08	44.60
	平均值	102.31	1.50	4.67	0.30	226.66
城市主干道 ($n=8$)	最大值	162.39	1.45	15.30	1.02	622.03
	最小值	12.34	0.53	1.90	0.03	33.43
	平均值	74.42	0.88	8.04	0.50	323.40
商业街道路 ($n=8$)	最大值	165.44	3.51	21.05	1.23	362.05
	最小值	14.72	0.60	2.12	0.15	37.17
	平均值	99.64	1.54	8.71	0.48	180.63

莞^[28]等城市。

宁波市不同类型下垫面中,屋面径流氨氮的 EMC 均值为 $1.69\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,略高于深圳^[22];广场氨氮 EMC 均值为 $0.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;绿地径流氨氮的 EMC 较低,低于西安^[24]及常州^[27];商业街氨氮的 EMC 不足合肥^[23]的 $1/2$;主干道氨氮的 EMC 低于重庆^[26]及上海^[5]。宁波城市主干道、商业街道路和屋面径流总氮有高的 EMC 均值。屋面总氮的 EMC 值与其他城市相差不大;主干道总氮浓度略高于北京^[29],商业街总氮是上海^[5]的 2.8 倍;广场、绿地和小区总氮的 EMC 相对较低,绿地径流总氮大于常州^[27]及东莞^[28]等城市,小区径流总氮低于西安^[24]。

宁波城市主干道、商业街道路和绿地总磷的 EMC 均值较高,屋面最低。城市主干道总磷的 EMC 略高于北京^[29],商业街总磷是合肥^[23]的 $1/2$;屋面总磷的 EMC 均小于扬州^[30]、西安^[24]、北京^[29]等城市;小区总磷低于西安^[24]。宁波各下垫面 TSS 的 EMC 均值最高值 $232.99\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最小值 $37.63\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,分别出现于绿地和广场。宁波绿地 TSS 的 EMC 值大于其他城市,约为常州^[27]的 5.99 倍,屋面 TSS 浓度高于北京^[29]、西安^[24]、扬州^[30]等城市,主干道 TSS 是北京^[29]的 3.94 倍,商业街 TSS 是合肥^[23]的 $1/3$ 。

3 讨论

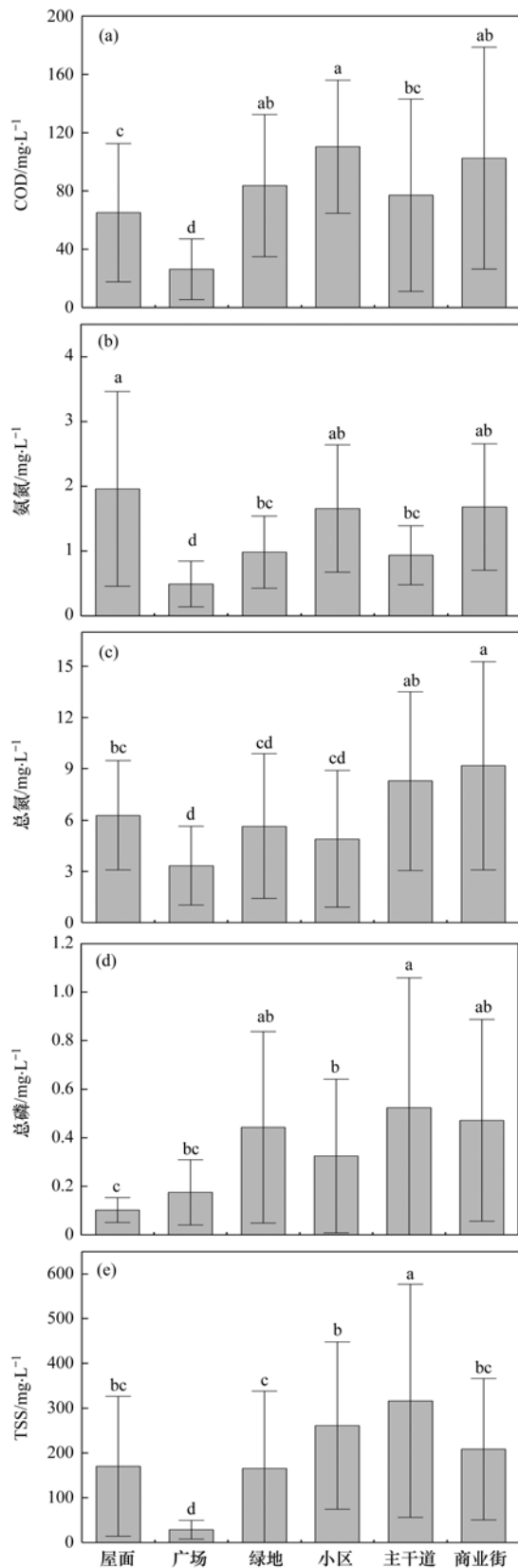
3.1 城市不同类型下垫面雨水径流污染差异比较

对宁波市不同类型下垫面的雨水径流水质进行

差异显著性分析,结果见图 3。

宁波城区各下垫面中,广场雨水径流 COD 质量浓度均值为 $26.23\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,显著低于 ($P<0.05$) 商业街 ($102.49\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、小区 ($110.33\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、主干道 ($77.04\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和绿地 ($83.67\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),而且小区与主干道之间也存在显著差异 ($P<0.05$);屋面雨水径流 COD 均值为 $65.07\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,与广场、小区及商业街等下垫面均存在显著性差异 ($P<0.05$),与绿地及主干道差异不显著 ($P>0.05$)。对比可知,道路和绿地径流 COD 污染程度最重,屋面次之,广场污染程度最轻。这可能由于商业区与小区道路人类活动频繁,绿地枯叶腐败导致溶解性有机质含量较高,而广场和屋面受人类活动影响较小。除了广场之外的其它各下垫面雨水径流均可对河道 COD 浓度产生不良影响。

广场、屋面、绿地、商业街、小区和城市主干道等下垫面雨水径流氨氮的平均质量浓度分别为 0.49 、 1.96 、 0.98 、 1.68 、 1.65 及 $0.94\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其中广场雨水径流氨氮显著低于 ($P<0.05$) 其它各下垫面;屋面雨水径流氨氮质量浓度与商业街和小区接近,且无显著差异 ($P>0.05$),但是显著高于广场、绿地和主干道 ($P<0.05$);绿地雨水径流氨氮质量浓度与主干道相近且不存在显著差异 ($P>0.05$)。各下垫面雨水径流中总氮平均质量浓度以商业街最高,为 $9.18\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其次为主干道 $8.28\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,再依次分别为屋面 $6.29\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,绿地 $5.65\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,小区 $4.90\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和广场 $3.34\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。广场雨水径流



用 Duncan 法进行多重比较; 不同字母者表示组间差异显著 ($P < 0.05$), 相同小写字母者表示组间差异不显著 ($P > 0.05$)

图3 不同下垫面雨水径流 COD、氨氮、总氮、总磷和 TSS 质量浓度差异比较

Fig. 3 Comparison of concentrations of COD, ammonia nitrogen, total nitrogen, total phosphorus, and TSS in the runoff of different underlying surfaces

的总氮质量浓度显著低于 ($P < 0.05$) 其它各下垫面, 屋面、绿地和小区的雨水径流总氮质量浓度相近, 主干道和商业街雨水径流的总氮质量浓度相近, 且差异均不显著 ($P > 0.05$). 本区域大气降水氨氮质量浓度约 $0.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 硝态氮约 $0.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 屋面径流高氨氮说明除大气降水背景来源外, 还受屋面沥青老化脱落物及晴天大气氮的干沉降积累作用影响. 小区和商业街因餐饮、娱乐及休闲等活动较集中, 污染因素众多, 导致地面氨氮及总氮累积量较大. 广场地面因经常进行人为清扫, 且无车辆行驶, 氨氮及总氮污染程度均较轻, 主要由于降雨背景所贡献. 绿地和主干道氨氮主要来源于大气降水, 其它形态的氮来源于降雨对土壤化肥的淋滤作用. 宁波城区河道污染大多以氨氮超标为主要特征, 在城市低影响开发设计中应以削减各种形态的氮为目标. 由于屋面、小区和商业街的氨氮质量浓度相近且处于较高水平, 而主干道和商业街总氮质量浓度相近且较高, 这些区域的雨水径流可作为改善河道水质的重点控制对象, 采用相同的除氮效率高的生态处理单元进行分散或合并处理.

商业街、主干道和绿地雨水径流总磷质量浓度较高, 3 类下垫面总磷质量浓度相互无显著差异 ($P > 0.05$). 屋面与广场总磷质量浓度较低, 且两类下垫面的总磷质量浓度无显著差异. 小区与绿地、商业街总磷质量浓度无显著差异 ($P > 0.05$), 但与主干道差异显著 ($P < 0.05$). 此外, 宁波各下垫面 TSS 质量浓度差异较大, 但屋面与绿地相近且无显著差异 ($P > 0.05$), 小区与商业街、主干道无显著差异 ($P > 0.05$), 主干道与商业街有显著差异 ($P < 0.05$), 广场径流 TSS 污染程度最低, 屋面和绿地的 TSS 污染程度居中, 道路污染程度最重. 若局部区域以削减总磷的入河量为目的, 对于绿地、商业街和主干道雨水可采用相同功能的生态处理单元, 而广场和屋面的总磷浓度显著低于其它类型的下垫面, 可直接排放或资源化利用.

3.2 雨水径流污染物的来源及相关性分析

为了研究不同下垫面雨水径流中各污染物的同源性质, 对 6 个采样点的 COD、氨氮、总氮、总磷及 TSS 等指标的相关性进行了分析, 各指标间的线性相关系数见表 3.

屋面径流的 COD 与总磷、TSS, 以及氨氮与 TSS 之间均具有较好的相关性, 相关系数 R^2 分别为 0.81、0.60 和 0.70, 说明屋面径流中的 COD、氨氮和总磷与 TSS 具有较好的同源性, 而这些污染物的形成主要受大气颗粒物沉降作用的影响. 广场径流的 COD 与氨氮、TSS, 以及氨氮与 TSS 的 R^2 分别为

表 3 雨水径流各污染指标间的线性相关系数
Table 3 Linear correlation coefficients between the concentrations of the five main pollutants

		相关系数 R^2				
		COD	氨氮	总氮	总磷	TSS
屋面	COD	1				
	氨氮	0.40	1			
	总氮	0.002	0.27	1		
	总磷	0.81	0.25	0.01	1	
	TSS	0.60	0.70	0.14	0.46	1
广场	COD	1				
	氨氮	0.69	1			
	总氮	0.01	0.02	1		
	总磷	0.38	0.18	0.02	1	
	TSS	0.61	0.50	0.01	0.07	1
绿地	COD	1				
	氨氮	0.11	1			
	总氮	0.01	0.49	1		
	总磷	0.06	0.11	0.40	1	
	TSS	0.03	0.32	0.34	0.32	1
小区	COD	1				
	氨氮	0.11	1			
	总氮	0.14	0.44	1		
	总磷	0.22	0.05	0.02	1	
	TSS	0.03	0.24	0.08	0.01	1
主干道	COD	1				
	氨氮	0.52	1			
	总氮	0.29	0.14	1		
	总磷	0.60	0.43	0.21	1	
	TSS	0.51	0.27	0.02	0.56	1
商业街	COD	1				
	氨氮	0.42	1			
	总氮	0.33	0.33	1		
	总磷	0.33	0.33	0.02	1	
	TSS	0.69	0.39	0.55	0.16	1

0.69、0.61 及 0.50,对于商业街,其 R^2 分别为 0.42、0.69 和 0.39,广场与商业街的各污染物质量浓度水平差异显著,但两类下垫面均表现出类似的相关性规律,说明广场与商业街雨水径流中的 COD、氨氮和 TSS 也具有同源性,污染物均来源于餐饮经营活动,广场和商业街地面积累的 COD 和氨氮以颗粒态赋存并积累于地面.绿地和小区径流中的氨氮与总氮之间的 R^2 分别为 0.49 和 0.44,其它各指标间的相关性均较低,由于小区道路两侧分布有绿化带,绿化带雨水漫流至小区道路集雨口,因此导致小区径流中各指标之间的相关性规律与绿地较一致,这也说明绿地和小区道路中的氨氮和总氮具有同源性,推测主要受植被及土壤淋溶作用的影响较大.城市主干道径流的 COD 与氨氮、总磷及 TSS,以及 TSS 与总磷之间均具有较好的相关性, R^2 分别为 0.52、0.60、0.51 和 0.56,城市主干道雨水径流污染物之间的相关性与屋面的规律相似,这是因为这

两类下垫面污染物的积累主要受大气干湿沉降作用影响.

3.3 次降雨过程的径流水质冲刷规律

尽管宁波年内降雨天数较多,但气象站多年日降雨量观测数据表明区内的降雨以中、小雨型为主,日降雨量大于 25 mm 的概率仅有 10% 左右,其中日降雨量小于 10 mm 的小雨概率占到 67.1%.已有诸多研究报道了大雨事件下城市下垫面径流水质有明显的初期冲刷效应^[31,32],本研究针对宁波市地表水体重度富营养化这一亟待解决的环境问题,选取 2015 年 10 月 29 日和 2019 年 5 月 15 日两场代表性中小降雨事件,分析不同下垫面雨水径流形成过程中氨氮、总氮和总磷等营养盐类污染指标的变化特征,结果见图 4.

两场降雨事件径流水质的变化特征表明,中小雨情景下,不同下垫面氨氮、总氮和总磷等污染物随降雨历时的变化规律基本相似,各下垫面的雨水径流水质在前 40 min 存在初始冲刷效应,但并不是所有下垫面都能呈现出明显的浓度下降趋势.受人类活动影响较小的区域,如屋面和绿地等下垫面的氨氮较容易形成初始冲刷效应,随降雨历时的延长会有明显的浓度下降趋势.而受人类生活和交通运输影响明显的区域,如小区、城市主干道和广场等下垫面因污染物随时都有输入,降雨强度较低时总氮和总磷的初期冲刷效应并不明显,这说明中小雨不易形成明显的雨水径流污染物的初始冲刷现象,这与董欣等^[29]的研究结论一致.采用雨水截留措施控制前 30 min 的初期雨水径流污染对于大、暴雨等雨型是一项有效措施,但对于宁波市而言,大、暴雨降雨天数非常有限,因此该措施并不能达到理想的雨水径流污染控制效果,还应尽可能在餐饮和服务业较密集的商业街和小区等营养盐类污染较重的区域设置生态树池和雨水花园等海绵设施,以达到持续净化雨水径流污染的目的.

3.4 城市建设对雨水径流水质的影响

取各场降雨事件中屋面、广场、绿地、小区道路、商业街和主干道等各下垫面径流污染物 EMC 值的算术平均值,得到相应降雨场次的城市雨水径流 EMC 值,其年际变化特征见图 5.

不同年份城市雨水径流 EMC 的变化差别较大,纵观宁波市近 10 年雨水径流污染的变化规律可以发现,COD、氨氮、总磷和 TSS 的 EMC 值总体上呈现出明显的下降趋势,自 2016 年 4 月宁波开始实施海绵城市建设以来,由于城市道路清扫频次增加,小区海绵化改造工程的实施,以及城市道路铺装和排水的系统化改造,使城市雨水径流水质有所改善.但

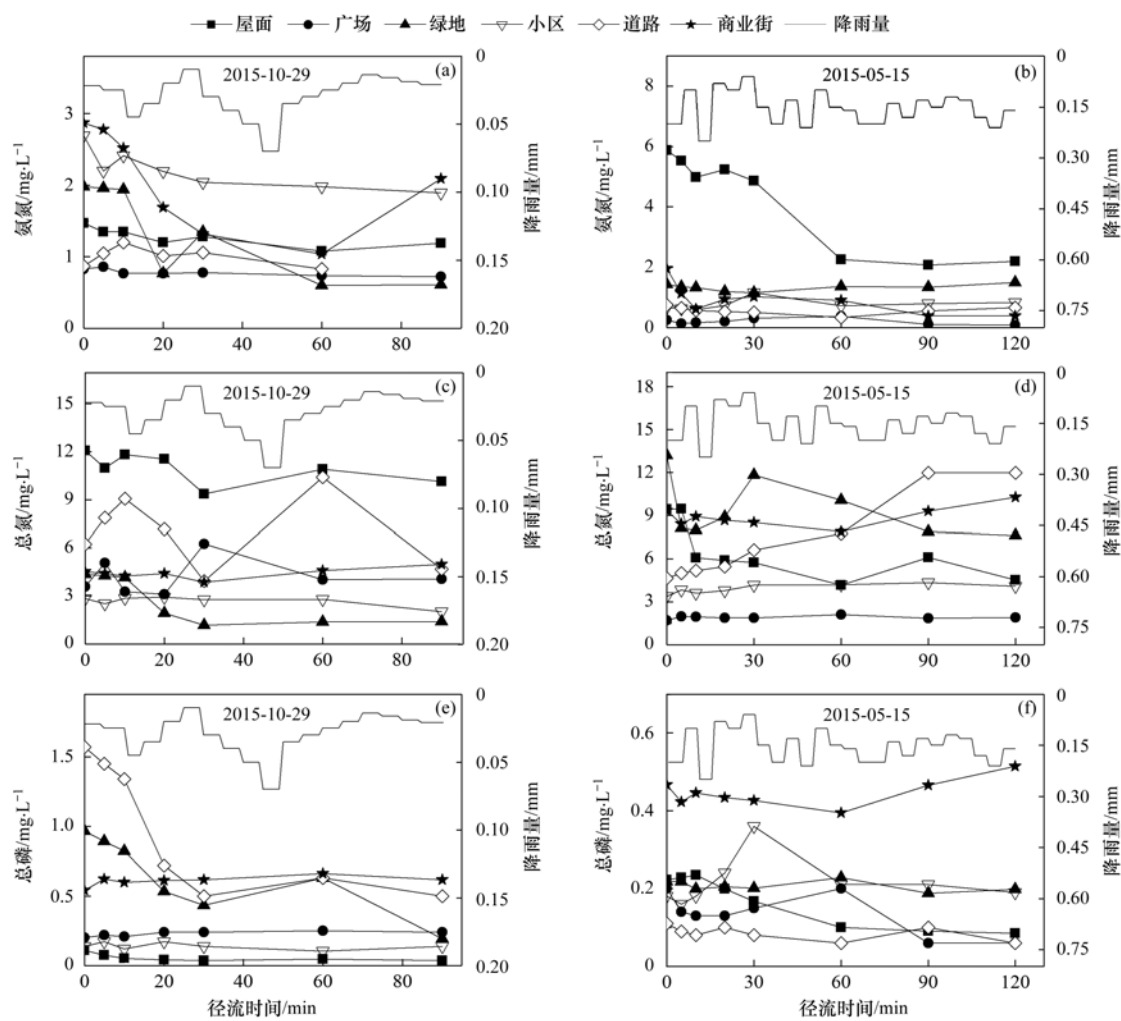


图4 雨水径流污染物随降雨历时的变化过程

Fig. 4 Variation of concentrations of ammonia nitrogen, total nitrogen, and total phosphorus in the runoff of different underlying surfaces

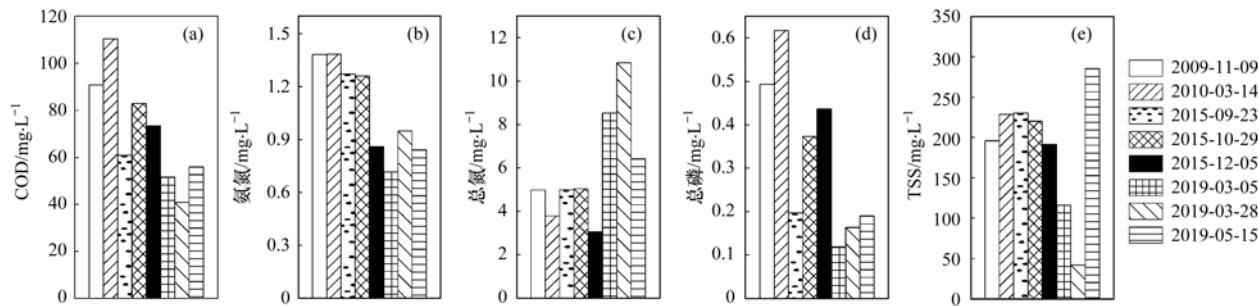


图5 宁波市雨水径流主要污染物 EMC 的变化趋势

Fig. 5 Variation of EMC of the five main pollutants in stormwater runoff in Ningbo

是,总氮的 EMC 并未下降,这说明城市建设和管理能够妥善解决城市雨水径流生活污染源的主要问题(以有机质和氨氮为主要排污特征),但是对总氮的控制效果并不理想,氮营养盐对受纳水体的富营养化威胁依然存在,还需要采取有效措施控制城市雨水径流中其它形态的氮营养盐进入水体.

4 结论

(1)宁波市各下垫面(广场除外)雨水径流 COD

和总氮质量浓度均处于较高水平,污染较为严重. 氨氮和总磷污染程度相对较轻,但屋面、小区道路和商业街雨水径流氨氮污染较重,商业街、主干道和绿地雨水径流具有相对较高的总磷质量浓度,对受纳水体的影响较大,是城市雨水径流污染的重点控制对象.

(2)屋面、广场、主干道及商业街雨水径流中的 COD、氨氮、总磷与 TSS 具有同源性,可加强地面清扫以减轻这些下垫面的雨水径流污染. 绿地和小区

雨水径流的氨氮和总氮也具有同源性,可通过加强绿化施肥管理以减少土壤氮流失。

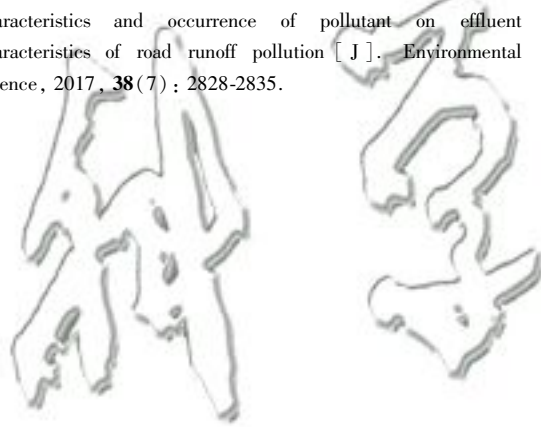
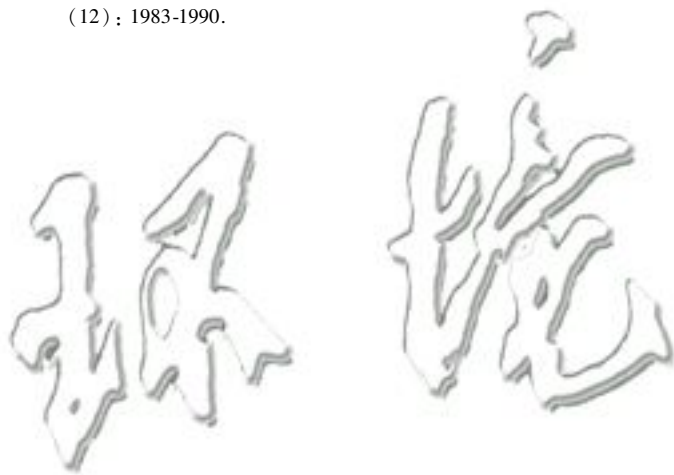
(3)在中小雨情景下受人为活动影响较小的城市下垫面较易形成明显的氨氮初期冲刷效应,而人为活动影响较重的区域在降雨强度较小时不能明显观察到雨水径流总氮和总磷的初期冲刷效应。

(4)2009~2019年宁波市雨水径流COD、氨氮、总磷和TSS等污染物的浓度总体上呈现出明显的下降趋势,近年来的城市建设使各下垫面雨水径流水质有所改善,但是对总氮的控制效果并不理想。

参考文献:

- [1] Lucke T, Drapper D, Hornbuckle A. Urban stormwater characterisation and nitrogen composition from lot-scale catchments—New management implications[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **619-620**: 65-71.
- [2] Vu C T, Wu T T. Engineered multifunctional sand for enhanced removal of stormwater runoff contaminants in fixed-bed column systems[J]. *Chemosphere*, 2019, **224**: 852-861.
- [3] Gnecco I, Berretta C, Lanza L G, *et al.* Storm water pollution in the urban environment of Genoa, Italy [J]. *Atmospheric Research*, 2005, **77**(1-4): 60-73.
- [4] Perdikaki K, Mason C F. Impact of road run-off on receiving streams in eastern England[J]. *Water Research*, 1999, **33**(7): 1627-1633.
- [5] 林莉峰, 李田, 李贺. 上海市城区非渗透性地面径流的污染特性研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(7): 1430-1434.
Lin L F, Li T, Li H. Characteristics of surface runoff pollution of Shanghai urban area[J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(7): 1430-1434.
- [6] Chai L, Kayhanian M, Givens B, *et al.* Hydraulic performance of fully permeable highway shoulder for storm water runoff management[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2012, **138**(7): 711-722.
- [7] Yang Y Y, Toor G S. Sources and mechanisms of nitrate and orthophosphate transport in urban stormwater runoff from residential catchments[J]. *Water Research*, 2017, **112**: 176-184.
- [8] Liu F, Olesen K B, Borregaard A R, *et al.* Microplastics in urban and highway stormwater retention ponds[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **671**: 992-1000.
- [9] Selbig W R, Buer N, Danz M E. Stormwater-quality performance of lined permeable pavement systems [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **251**: 109510.
- [10] Kim L H, Ko S O, Jeong S, *et al.* Characteristics of washed-off pollutants and dynamic EMCs in parking lots and bridges during a storm[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **376**(1-3): 178-184.
- [11] Liu W, Wei W, Chen W P, *et al.* The impacts of substrate and vegetation on stormwater runoff quality from extensive green roofs [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, **576**: 575-582.
- [12] 段圣辉, 赵钰, 单保庆, 等. 杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(10): 3697-3705.
Duan S H, Zhao Y, Shan B Q, *et al.* Research of the stormwater runoff and pollution characteristics in rural area of Yuhang District, Hangzhou[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(10): 3697-3705.
- [13] 吴杰, 熊丽君, 吴健, 等. 上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2240-2248.
- [14] Wu J, Xiong L J, Wu J, *et al.* Comparison and source apportionment of PAHs pollution of runoff from roads in suburb and urban areas of Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2240-2248.
- [15] 袁宏林, 李星宇, 王晓昌. 西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4143-4147.
Yuan H L, Li X Y, Wang X C. Heavy metals pollution and analysis of seasonal variation runoff in Xi'an[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4143-4147.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社. 2002.
- [17] Qin H P, Khu S T, Yu X Y. Spatial variations of storm runoff pollution and their correlation with land-use in a rapidly urbanizing catchment in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(20): 4613-4623.
- [18] Baral D, Fisher J R, Florek III M J, *et al.* Atmospheric contributions of nitrate to stormwater runoff from two urban watersheds[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2018, **144**(2): 05017009.
- [19] Shen Z Y, Liu J, Aini G, *et al.* A comparative study of the grain-size distribution of surface dust and stormwater runoff quality on typical urban roads and roofs in Beijing, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(3): 2693-2704.
- [20] 刘雨童, 李田, 彭航宇. 城市典型不透水下垫面径流中邻苯二甲酸酯的污染特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(11): 5007-5014.
Liu Y T, Li T, Peng H Y. Characteristics of phthalic acid esters pollution in urban surface runoff in Shanghai, China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(11): 5007-5014.
- [21] 王骏, 毕春娟, 陈振楼, 等. 温州城市降雨径流中BOD₅和COD污染特征及其初始冲刷效应[J]. *环境科学*, 2013, **34**(5): 1735-1744.
Wang J, Bi C J, Chen Z L, *et al.* Pollution load and the first flush effect of BOD₅ and COD in urban runoff of Wenzhou City [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(5): 1735-1744.
- [22] 任玉芬, 王效科, 欧阳志云, 等. 北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 373-378.
Ren Y F, Wang X K, Ouyang Z Y, *et al.* Analysis of first flush effect of typical underlying surface runoff in Beijing urban city [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(1): 373-378.
- [23] Chai H X, Tang Y, Su X J, *et al.* Annual variation patterns of the effluent water quality from a green roof and the overall impacts of its structure [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(30): 30170-30179.
- [24] 徐微, 郗红建, 李田. 合肥市典型城区非渗透性铺面地表径流污染特征[J]. *环境科学与技术*, 2013, **36**(4): 84-88, 113.
Xu W, Gao H J, Li T. Pollution characterization of impermeability surface runoff in typical urban of Hefei [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **36**(4): 84-88, 113.
- [25] 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[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(8): 3104-3112.
Wu Y G, Chen Y, Chen W, *et al.* Characteristics of runoff pollution of different underlying surfaces in typical cultural and educational area of Xi'an [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(8): 3104-3112.

- [25] Peng H Q, Liu Y, Wang H W, *et al.* Event mean concentration and first flush effect from different drainage systems and functional areas during storms [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(6): 5390-5398.
- [26] 张千千, 王效科, 郝丽岭, 等. 重庆市路面降雨径流特征及污染源解析[J]. *环境科学*, 2012, **33**(1): 76-82.
Zhang Q Q, Wang X K, Hao L L, *et al.* Characterization and source apportionment of pollutants in urban roadway runoff in Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(1): 76-82.
- [27] 戈鑫, 杨云安, 管运涛, 等. 植草沟对苏南地区面源污染控制的案例研究[J]. *中国给水排水*, 2018, **34**(19): 134-138.
Ge X, Yang Y A, Guan Y T, *et al.* A Case study on control of non-point source pollution by grassed swales in South Jiangsu [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, **34**(19): 134-138.
- [28] 马英, 马邕文, 万金泉, 等. 东莞不同下垫面降雨径流污染输移规律研究[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(12): 1983-1990.
Ma Y, Ma Y W, Wan J Q, *et al.* Characterization of rainfall runoff pollution transportation in different underlying surface of Dongguan City [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(12): 1983-1990.
- [29] 董欣, 杜鹏飞, 李志一, 等. 城市降雨屋面、路面径流水文水质特征研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(3): 607-612.
Dong X, Du P F, Li Z Y, *et al.* Hydrology and pollution characteristics of urban runoff: Beijing as a sample [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(3): 607-612.
- [30] 何湖滨, 陈诚, 林育青, 等. 城市不同材料屋面径流的污染负荷特性[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1287-1294.
He H B, Chen C, Lin Y Q, *et al.* Pollution load characteristics of runoff from urban roofs of different materials [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1287-1294.
- [31] 车蕊, 林澍, 范中亚, 等. 连续极端降雨对东江流域水质影响分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4440-4449.
Che R, Lin S, Fan Z Y, *et al.* Effects of continuous extreme rainfall on water quality of the Dongjiang River Basin [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4440-4449.
- [32] 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.



CONTENTS

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (2981)
Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change	YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)
Evaluation of the Reduction in PM _{2.5} Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou	WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (3004)
Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter	FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (3012)
Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province	LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, <i>et al.</i> (3021)
Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3031)
Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, <i>et al.</i> (3042)
Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou	QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, <i>et al.</i> (3056)
Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan	NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, <i>et al.</i> (3066)
Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode	JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, <i>et al.</i> (3076)
Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer	OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (3085)
Source Apportionment of Atmospheric Ammonia; Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language	GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, <i>et al.</i> (3095)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou	LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, <i>et al.</i> (3102)
Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode	XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, <i>et al.</i> (3112)
Comparative Analysis of NO _x Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process	LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, <i>et al.</i> (3121)
Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City	SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (3130)
Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter	WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)
Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain	ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, <i>et al.</i> (3148)
Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin	TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (3157)
Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin	QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, <i>et al.</i> (3165)
Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohe Estuary and the Related Influencing Factors	QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, <i>et al.</i> (3175)
Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake	WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, <i>et al.</i> (3186)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed	WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, <i>et al.</i> (3194)
Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China	ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)
Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang	LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, <i>et al.</i> (3212)
Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin	WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, <i>et al.</i> (3222)
Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir	LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (3231)
Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes	WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, <i>et al.</i> (3240)
Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet	LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, <i>et al.</i> (3249)
Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater	WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)
Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River	WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, <i>et al.</i> (3266)
Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo	XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, <i>et al.</i> (3275)
Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir	YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3285)
Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems	BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, <i>et al.</i> (3297)
Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water	LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, <i>et al.</i> (3307)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar	CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, <i>et al.</i> (3315)
Enhanced Chromate (VI) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe ⁰ /WMF)	JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, <i>et al.</i> (3326)
Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, <i>et al.</i> (3337)
Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (3345)
Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater	ZHANG Xin-ni, CHI Yu-lei, WANG Qian, <i>et al.</i> (3356)
Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge	XING Chong-yang, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, <i>et al.</i> (3365)
Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature	GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, <i>et al.</i> (3373)
Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China	DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, <i>et al.</i> (3384)
Relationship Between CO ₂ and CH ₄ Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network	LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, <i>et al.</i> (3392)
Effects of Controlled-Release Urea Application on N ₂ O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil	JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, <i>et al.</i> (3402)
Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China	ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, <i>et al.</i> (3410)
Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils	HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, <i>et al.</i> (3418)
Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil	SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, <i>et al.</i> (3426)
Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai	CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (3434)
Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings	YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (3441)