

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第4期

Vol.37 No.4

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响	
..... 周敏, 乔利平, 朱书慧, 李莉, 楼晟荣, 王红丽, 陶士康, 黄成, 陈长虹 (1179)	
利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态	黄子龙, 曾立民, 董华斌, 李梅, 朱彤 (1188)
南京大气气溶胶混合态与云凝结核活化特征研究	朱麟, 马嫣, 郑军, 李时政, 王利朋 (1199)
北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究	苏捷, 赵普生, 陈一娜 (1208)
重庆市主城区 PM _{2.5} 时空分布特征	刘永林, 孙启民, 钟明洋, 钟部卿, 雒昆利 (1219)
大气细颗粒物中有机碳和元素碳监测方法对比	庞博, 吉东生, 刘子锐, 朱彬, 王跃思 (1230)
深圳市大气中全氟化合物的残留特征	何鹏飞, 张鸿, 李静, 何龙, 罗骥, 刘国卿, 沈金灿, 杨波, 崔晓宇 (1240)
北京上甸子站大气 CO ₂ 及 δ ¹³ C(CO ₂) 本底变化	夏玲君, 周凌晔, 刘立新, 张根 (1248)
梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布	刘婷, 李露, 张家泉, 占长林, 刘红霞, 郑敬茹, 姚瑞珍, 曹军骥 (1256)
城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险	刘建福, 陈敬雄, 辜时有 (1264)
北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估	
..... 曹治国, 余刚, 吕香英, 王梦蕾, 李琦路, 冯精兰, 闫广轩, 余浩, 孙剑辉 (1272)	
西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析	王丽, 王利军, 史兴民, 卢新卫 (1279)
PDMS 基涂层活性炭对甲苯、苯和丙酮吸附研究	刘寒冰, 姜鑫, 王新, 杨兵, 薛南冬, 张石磊 (1287)
海南东北部滨海湿地沉积物微量元素分布特征、来源及污染评价	张卫坤, 甘华阳, 闭向阳, 王家生 (1295)
曹妃甸围填海土壤重金属积累的磁化率指示研究	薛勇, 周倩, 李远, 章海波, 胡雪峰, 骆永明 (1306)
滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源	李广, 章新平, 许有鹏, 宋松, 王跃峰, 季晓敏, 项捷, 杨洁 (1313)
江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价	李莹杰, 张列宇, 吴易雯, 李曹乐, 杨天学, 唐军 (1321)
城市景观水体甲基汞的形成机制及微宇宙模拟研究	刘小红, 司友斌, 郭子薇, 杜成竹, 朱聪聪 (1330)
我国北方温排水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性	
..... 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 王亚平, 史建超, 周石磊, 刘飞 (1337)	
额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征	韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 张伟, 刘世伟, 周嘉欣 (1345)
太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析	冯佳, 郭宇宁, 王飞, 吕俊平, 刘琪, 谢树莲, 程革, 张建民 (1353)
铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征	程建华, 窦智勇, 孙庆业 (1362)
基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究	马秋梅, 李玮, 王毅, 刘新亮, 李勇, 吴金水 (1371)
重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算	张远瞩, 贺秋芳, 蒋勇军, 李勇 (1379)
山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 张文慧, 许秋瑾, 黄天寅 (1389)
伊乐藻-固定化脱氮微生物技术对入贡河道脱氮机制的影响	韩华杨, 李正魁, 王浩, 朱倩 (1397)
环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征	高永霞, 宋玉芝, 于江华, 朱广伟 (1404)
藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律	陈俊, 李勇, 李大鹏, 黄勇, 朱培颖 (1413)
扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响	郭俊锐, 李大鹏, 刘焱见 (1422)
铅改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响	章喆, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (1427)
电化学还原-氧化工艺降解 4-氯酚的毒性研究	王岩, 施钦, 王辉, 卞兆勇 (1437)
水合氧化铝负载的磁性核/壳结构 Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ 纳米颗粒对水中磷的去除及再利用	
..... 赖立, 谢强, 方文侃, 邢明超, 吴德意 (1444)	
多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除	乔梦, 齐维晓, 赵旭, 刘会娟, 曲久辉 (1451)
污水处理厂污泥水溶性有机物的光谱特性分析	牛天浩, 周振, 胡大龙, 魏海娟, 李晶, 窦微笑, 葛红花 (1460)
高含氟的光伏废水反硝化可行性及经济性分析	李祥, 朱亮, 黄勇, 杨朋兵, 崔剑虹, 马航 (1467)
连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制	吴鹏, 张诗颖, 宋吟玲, 徐乐中, 沈耀良 (1472)
反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复	王翻翻, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳, 张月茹, 刘郭洵 (1478)
低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响	
..... 何势, 顾超超, 魏欣, 黄圣琳, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1485)	
低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究	
..... 杨伟强, 王冬波, 李小明, 杨麒, 徐秋翔, 张志贝, 李志军, 向海弘, 王亚利, 孙剑 (1492)	
短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响	谢燕, 陈曦, 胡正华, 陈书涛, 张寒, 凌慧, 申双和 (1499)
不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子	崔海, 张亚红 (1507)
塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性	贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 张雪妮, 解丽娜 (1516)
小分子有机酸对紫色土及其溶液中 Pb 的赋存影响	刘江, 江韬, 黄容, 张进忠, 陈宏 (1523)
鸢尾对石油烃污染土壤的修复以及根系代谢分析	王亚男, 程立娟, 周启星 (1531)
水锰矿氧化水溶性硫化物过程及其影响因素	罗瑶, 李珊, 谭文峰, 刘凡, 蔡崇法, 邱国红 (1539)
高温纤维素降解菌筛选及产酶特性	冯红梅, 秦永胜, 李筱帆, 周金星, 彭霞薇 (1546)
基于固相萃取及高效液相色谱-荧光检测分析的污泥中氟喹诺酮类抗生素研究方法的开发	
..... 戴晓虎, 薛勇刚, 刘华杰, 戴翎翎, 严寒, 李宁 (1553)	
养殖场周边土壤-蔬菜系统磺胺类药物残留及风险评价	金彩霞, 司晓薇, 王子英, 张琴文 (1562)
4 种典型 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响	王兰君, 王金花, 朱鲁生, 王军, 赵祥 (1568)
新型污染物卤代吡啉的环境行为及生态毒理效应	林坤德, 陈艳秋, 袁东星 (1576)
水源地土壤环境保护优先区划分方法与实例研究	李蕾, 王铁宇, 王晓军, 肖荣波, 李奇峰, 彭驰, 韩存亮 (1584)
《环境科学》征订启事 (1218) 《环境科学》征稿简则 (1370) 信息 (1352, 1412, 1498)	

4 种典型 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响

王兰君, 王金花*, 朱鲁生, 王军, 赵祥

(山东农业大学资源与环境学院, 山东省高校农业环境重点实验室, 泰安 271000)

摘要: 药物及个人护理品 (PPCPs) 对生态环境的潜在风险受到世界各国科学家的广泛关注. 为评价典型 PPCPs 对植物细胞遗传物质的损伤程度, 该试验以青皮蚕豆和大蒜为试验生物材料, 分析强力霉素 (DOX)、环丙沙星 (CIP)、三氯卡班 (TCC) 和卡马西平 (CBZ) 在 $12.5 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的浓度范围内对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率及微核指数的影响. 结果表明: ① DOX、CIP、TCC 和 CBZ 分别作用于蚕豆根尖细胞时, 细胞微核率均明显高于对照组 (CK_1) 1.67% , 差异显著 ($P < 0.05$); 微核指数均大于 3.5, 属于重度损伤; 随染毒浓度的增大微核率均呈先增后减的趋势. ② DOX、CIP、TCC 和 CBZ 分别作用于大蒜根尖细胞时, 产生微核数量较少, 微核率均大于对照组 (CK_2) 0.67% , 部分浓度组与 CK_2 相比差异显著 ($P < 0.05$), 仅当 CIP 浓度为 25 、 50 、 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TCC 和 CBZ 浓度为 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时微核指数大于 3.5; 随染毒浓度的增大微核率均呈先增后减的趋势. ③ 供试化合物引起大蒜根尖细胞的微核率均明显低于蚕豆, 两组之间差异显著 ($P < 0.05$). ④ 4 种化合物处理蚕豆和大蒜根尖细胞产生的微核指数整体对比大小均为 $\text{CIP} > \text{CBZ} > \text{TCC} > \text{DOX}$. 研究显示, 4 种化合物达到一定浓度时均对蚕豆和大蒜根尖细胞造成了遗传损伤, 对大蒜造成的损伤程度明显低于蚕豆, 4 种化合物性质不同对两种植物产生的损伤程度也不同.

关键词: PPCPs; 蚕豆根尖; 大蒜根尖; 微核率; 微核指数

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)04-1568-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.04.049

Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of *Vicia-faba* and Garlic

WANG Lan-jun, WANG Jin-hua*, ZHU Lu-sheng, WANG Jun, ZHAO Xiang

(Key Laboratory of Agricultural Environment in Universities of Shandong, College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271000, China)

Abstract: In order to determine the degree of biological genetic injury induced by PPCPs, the genotoxic effects of the doxycycline (DOX), ciprofloxacin (CIP), triclocarban (TCC) and carbamazepine (CBZ) in the concentration range of $12.5 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ were studied using micronucleus rate and micronucleus index of *Vicia-faba* and garlic. The results showed that: ① When the *Vicia-faba* root-tip cells were exposed to DOX, CIP, TCC and CBZ, micronucleus rates were higher than 1.67% (CK_1), it was significantly different from that of the control group ($P < 0.05$), and the micronucleus index was even greater than 3.5; With the increasing concentrations of the PPCPs, the micronucleus rates first increased and then decreased. ② When the garlic root tip cells were exposed to DOX, CIP, TCC and CBZ respectively, the micronucleus rates were less than those of the *Vicia-faba*, while in most treatments significantly higher than that of the control group (0.67%). The micronucleus index was higher than 3.5 in the groups exposed to CIP with concentrations of 25 , 50 , $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and TCC and CBZ with concentrations of $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; With the increase of exposure concentrations, the micronucleus rate showed a trend of first increasing and then decreasing as well. ③ Under the same experimental conditions, the cells micronucleus rates of the garlic cells caused by the four tested compounds were significantly lower than those of *Vicia-faba*. ④ The micronucleus index of the root tip cells of *Vicia-faba* and garlic treated with the four kinds of compounds followed the order of $\text{CIP} > \text{CBZ} > \text{TCC} > \text{DOX}$. These results demonstrated that the four compounds caused biological genetic injury to root-tip cells of *Vicia-faba* and garlic, and the genetic damage caused to garlic was significantly lower than that to *Vicia-faba*. The damages caused by the four kinds of different compounds were also different.

Key words: PPCPs; root-tip cells of *Vicia-faba*; root-tip cells of garlic; micronucleus rate; micronucleus index

随着医药及洗化行业的大规模发展, 药品及个人护理用品 (pharmaceuticals and personal care products, PPCPs) 的生产和使用量迅速增长. PPCPs 包括抗生素、抗菌剂、消炎药、癫痫抗药、消毒剂、化妆品等各种各样的化学物质^[1,2]. 由于我国 PPCPs 生产消费量巨大, 导致环境中 PPCPs 残留现象日趋严重, 人们已在多种环境样品中检测出了痕量 PPCPs^[3]. PPCPs 作为一种新型污染物在环境中

表现出了一定的环境激素毒性、微生物毒性效应、可生物累积性, 因此环境中 PPCPs 及其代谢产物存在的潜在生态风险、污染现状、迁移转化规律、生

收稿日期: 2015-10-27; 修订日期: 2015-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40801203, 41001152, 41071164, 21377075); 山东省自然科学基金项目 (ZR2013DQ007)

作者简介: 王兰君 (1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污染治理与修复, E-mail: wljsdau@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wjh@sdau.edu.cn

态毒性等也引起了社会的广泛关注^[4,5]。

在常见的 PPCPs 中,抗菌剂、消毒剂、化妆品等使用量大,抗生素和消炎止痛药在环境中检测出频率最高^[6]。其中抗生素不仅用于人类及动物的疾病预防,而且被大量用作养殖业的饲料添加剂中^[7],抗生素在动物体内消化吸收困难,约 50% ~ 80% 以动物尿液或者粪便的形式排出进入土壤、水体中并残留。李彦文等^[8]分析测定了广州、深圳菜地土壤中四环素类总含量为 ND ~ 242.6 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,磺胺类总含量为 33.3 ~ 321.4 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,说明 PPCPs 中抗生素残留情况严重。强力霉素(doxitard, DOX)为四环素类抗生素,使用量大,徐冬梅等^[9]研究发现 DOX 会对淡水绿藻产生毒性作用,明显抑制了淡水绿藻的生长。环丙沙星(ciprofloxacin, CIP)是喹诺酮类抗生素中使用量最大的一种抗生素, CIP 对植物产生的生态安全问题已有报道^[10,11],环丙沙星对土壤微生物量碳和微生物群落碳代谢多样性也有明显的抑制作用^[12],有研究发现 CIP 在畜禽粪便中的残留最高可达到 84.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[13],成为环境中抗生素污染的重要来源。三氯卡班(triclocarban, TCC)作为优良的抗菌和消毒剂被广泛应用^[14,15],环境中 TCC 的排放量日益增多,导致环境中出现了越来越

多的负面效应,研究表明 TCC 对水生生物具有慢性毒害作用,会影响水体生态系统中海藻类生物的结构与功能^[16]。卡马西平(carbamazepine, CBZ)是 PPCPs 中具有典型代表性的一种, CBZ 作为一种抗癫痫药被广泛使用,全球每年 CBZ 使用量约 1 014 t^[17,18];作为环境中较为常见的残留药物之一, CBZ 在环境中迁移性强,残留时间长,已对许多水生生物产生毒性影响^[19]。

微核是常用的遗传毒理学指标之一,常被用来评价环境诱变因子对生物遗传物质的损伤程度。该研究利用植物微核技术^[20],选用微核试验常用植物蚕豆和大蒜研究 DOX、CIP、TCC、CBZ 在一定浓度范围内对蚕豆和大蒜根尖细胞的遗传毒性,探讨 4 种化合物是否对植物造成遗传损伤,以期为农业等方面安全合理使用这些化合物提供参考依据。

1 材料与方法

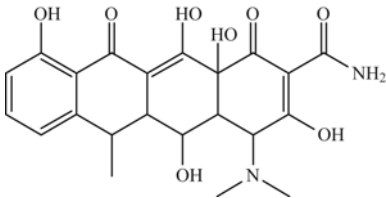
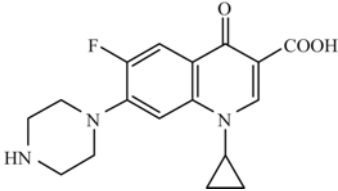
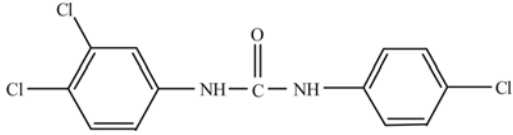
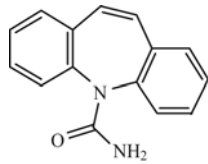
1.1 材料

试验选用的蚕豆为青皮蚕豆,产自江苏南通;大蒜产自山东金乡。

试验所选用的 4 种化合物的结构式、分子式、正辛醇-水分配系数($\lg K_{ow}$)见表 1。

表 1 4 种化合物的结构式、分子式、正辛醇-水分配系数

Table 1 Structural formula, molecular formula and octanol-water partition coefficient of the four compounds

化合物	CAS 编码	分子式	结构式	$\lg K_{ow}$
DOX	564-25-0	$\text{C}_{22}\text{H}_{24}\text{N}_2\text{O}_8$		-0.26
CIP	85721-33-1	$\text{C}_{17}\text{H}_{18}\text{FN}_3\text{O}_3$		0.40
TCC	101-20-2	$\text{C}_{13}\text{H}_9\text{Cl}_3\text{N}_2\text{O}$		4.90
CBZ	298-46-4	$\text{C}_{15}\text{H}_{12}\text{N}_2\text{O}$		2.45

1.2 试剂配制

卡诺氏液:无水乙醇与冰乙酸按照体积比 3:1 配制,随用随配。

SO₂ 洗涤液:移取 5 mL 10% 偏重亚硫酸钠溶液,加入 5 mL 1 mol·L⁻¹ 盐酸,再加入 100 mL 蒸馏水配成,随用随配。

席夫氏试剂:称取 0.05 g 碱性品红研细,溶于含 0.5 mL 浓盐酸的 50 mL 水中,再加入 0.5 g 偏重亚硫酸钠,充分振荡后,塞紧瓶塞,在暗处静置至少 24 h,当颜色退至淡黄色时,加入 0.5 g 活性炭,充分振荡后过滤,滤液置于棕色瓶中,外包避光纸,置于冰箱中 4℃ 环境下储存备用。

1.3 染毒液配制

根据预试验的结果和文献[21,22]配制染毒试剂,4 种化合物设置相同浓度为 12.5、25、50、100 mg·L⁻¹,去离子水作为空白对照 CK,蚕豆组设为 CK₁,大蒜组设为 CK₂;选取丙酮为助溶剂,由于丙酮选用浓度极低,易挥发,且由预试验结果表明丙酮在该试验中对植物影响并不明显,因此未设溶剂对照。

1.4 方法

1.4.1 染毒处理

选择饱满均匀的蚕豆种子,洗净后放入盛有蒸馏水的烧杯中,置于 25℃ 的培养箱内(内有光照)浸泡 24~36 h。种子充分吸胀后,用湿润的纱布松松包裹置解剖盘中,催芽 12~24 h。待种子初生根露出 2~3 mm 时,选取发芽良好的种子,放入解剖盘内继续催芽并保持湿度。再经 36~48 h,种子大部分的初生根长至 1.5~2.0 cm,根毛发育良好时,每一处理选取 6~8 粒初始根生长良好、根长较一致的种子。选择大小均匀无损伤的大蒜蒜瓣置于培养皿中,置于 25℃ 的温箱内用蒸馏水培养,将大蒜基部浸入水中即可。待根尖长至 1.5~2.0 cm 时,根毛发育良好时,每一处理选取 2~3 粒初始根生长良好、根长较一致的大蒜种子。将选好的蚕豆和大蒜种子放入盛有染毒液的培养皿中,让液体浸泡根尖于 25℃ 进行染毒处理 5 h,然后恢复培养 22~24 h。切取根尖约 1 cm 放入空青霉素瓶中,用卡诺氏固定液固定 24~48 h。

1.4.2 染色制片、镜检

固定好的幼根,在用蒸馏水浸洗 2 次,每次 5 min。吸净蒸馏水,加入 1 mol·L⁻¹ 盐酸将幼根浸泡住,连瓶放入 60℃ 水浴锅中水解幼根 7 min 左右,幼根被软化即可。吸去盐酸,用蒸馏水浸洗幼根 2 次,

每次 1~2 min。在遮光的条件下加席夫试剂染色 15 min。除去染液,用 SO₂ 洗涤液浸洗幼根 2 次。将幼根放在载玻片上,用解剖针截下 1 mm 的幼根,滴上少许的蒸馏水,用解剖针将根尖捣碎。加盖玻片,并避免气泡产生。在光学显微镜 100 倍的油镜下观察,记录微核的数量。微核大小为主核的 1/3 以下,形状为圆形或椭圆形,可以是整条染色体,也可以是染色体断片,染色与主核相当或稍浅^[22]。

1.5 数据处理

每个制片观察 1 000 个细胞,统计出含微核细胞数,每处理组至少观察 5 个制片,选取其中 3 个按下式计算平均微核率(micronucleus rate, MCN‰)及微核指数(micronucleus index),分析不同浓度染毒溶液对蚕豆及大蒜根尖的微核率的影响及差异显著性。微核指数即污染指数,平均值在 0~1.5 为基本没有污染,1.5~2.5 为轻污染,2.0~3.5 为中污染,3.5 以上为重污染^[23]。

$$\text{MCN}\% = (\text{观察到的 MCN 数} / \text{观察的总细胞数}) \times 1000$$

微核指数 = 试验样本的微核率 / 对照组的微核率

测试样本所致的微核率与阴性对照比较,微核指数 ≥ 1.5 则判断样本对植物造成遗传损伤。试验结果运用 Excel 2007 计算数据平均值及标准偏差,绘制柱状图;采用 SPSS 17.0 软件对数据进行单因素方差分析,差异显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 4 种 PPCPs 处理蚕豆和大蒜根尖细胞后的微核现象

4 种化合物处理蚕豆和大蒜根尖细胞均可诱导产生微核,细胞内出现的微核可为 1 或 2 个,包括染色体畸变、单微核、双微核等,且在有丝分裂的不同时期中均有可能观察到微核;在观察过程中,明显发现大蒜微核出现频率低且一个细胞中多为单个微核,未发现多个微核聚集出现现象(见图 1)。

2.2 4 种 PPCPs 对蚕豆根尖细胞微核率的影响

由表 2 可见,DOX、CIP、TCC 和 CBZ 处理组与 CK₁ 相比,微核率均明显存在不同程度上升,差异显著($P < 0.05$),微核指数均大于 3.5,即 4 种化合物对蚕豆根尖细胞均具有致突变性。随化合物浓度的增大,细胞微核数量先增加后减少,DOX、CIP、TCC 浓度达到 50 mg·L⁻¹ 和 CBZ 浓度为 25 mg·L⁻¹ 时微核率分别达到最大值:16.33‰、25.67‰、18.33‰、20.67‰,明显高于 1.67‰(CK₁)。同一污

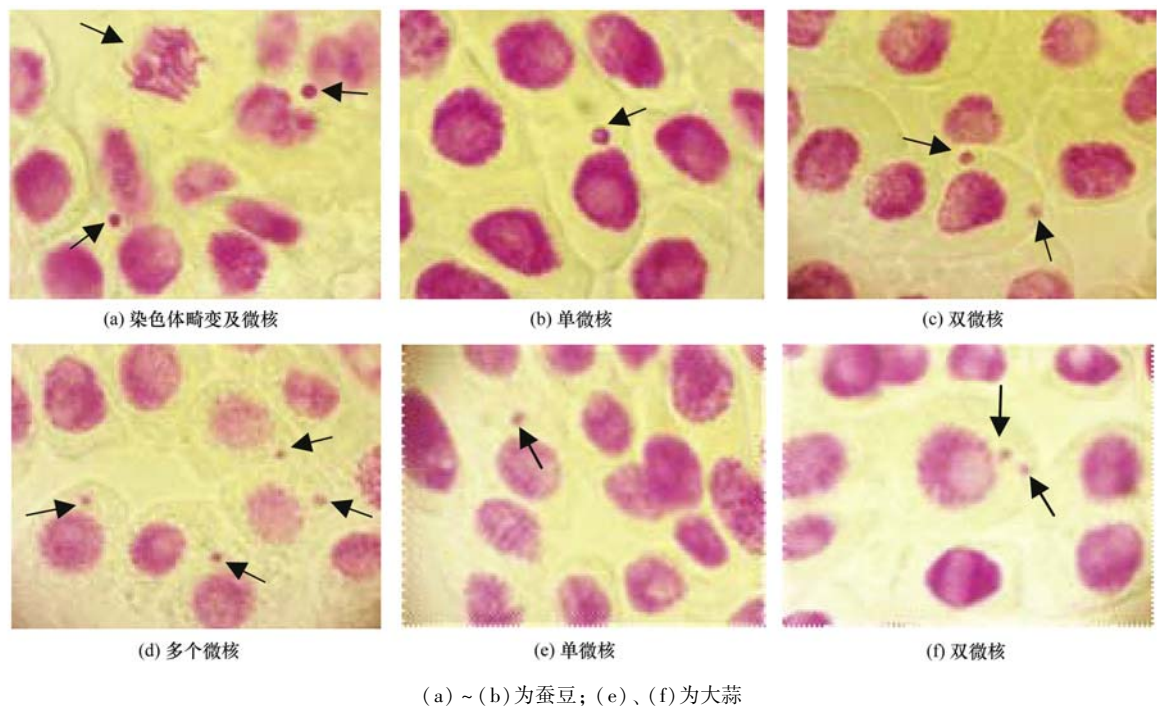


图1 DOX、CIP、TCC、CBZ 处理蚕豆和大蒜根尖细胞后的微核现象

Fig. 1 The *Vicia-faba* and garlic micronucleus after the treatment with DOX, CIP, TCC, CBZ

染物不同浓度之间比较,均存在明显差异($P < 0.05$). 由于化合物的性质不同产生的毒性效应也不同,作用于蚕豆产生的微核率也存在明显差异($P < 0.05$). 表明在该试验条件下,4 种化合物达到一定的浓度均会对蚕豆根尖细胞造成遗传损伤,且损伤程度与 CK_1 比较差异显著.

表2 DOX、CIP、TCC 和 CBZ 污染对蚕豆根尖细胞微核率的影响¹⁾

Table 2 Influence of the DOX, CIP, TCC and CBZ individual pollution on <i>vicia-faba</i> micronucleus rate							
处理组	浓度 /mg·L ⁻¹	观察细胞数 /根尖	微核细胞数/根尖			微核率($\bar{x} \pm SD$)/‰	微核指数
			制片 1	制片 2	制片 3		
CK ₁	0	1 000	1	1	3	1.67 ± 0.94	1.00
	12.5	1 000	5	7	7	6.33 ± 1.15 * a	3.79
	25	1 000	10	10	11	10.33 ± 0.583 * b	6.18
	50	1 000	15	16	18	16.33 ± 1.53 * c	9.77
	100	1 000	8	9	12	9.67 ± 2.08 * bd	5.8
CIP	12.5	1 000	11	13	14	12.67 ± 1.53 * a	7.59
	25	1 000	18	19	20	19.00 ± 1.00 * b	11.38
	50	1 000	25	26	26	25.67 ± 0.58 * c	15.37
	100	1 000	16	16	18	16.67 ± 1.15 * d	9.98
TCC	12.5	1 000	6	7	9	7.33 ± 1.53 * a	4.39
	25	1 000	12	14	14	13.33 ± 1.15 * b	7.98
	50	1 000	17	18	20	18.33 ± 1.52 * c	10.97
	100	1 000	9	10	11	10 ± 1.00 * da	5.99
CBZ	12.5	1 000	9	9	10	9.33 ± 0.58 * a	5.59
	25	1 000	20	20	22	20.67 ± 1.15 * b	12.38
	50	1 000	13	15	16	14.67 ± 1.53 * c	8.78
	100	1 000	12	12	14	12.67 ± 1.15 * cd	7.59

1) 均值差的显著性水平为 0.05, * 表示与对照组比较差异显著; a、b、c、d 表示同一化合物不同浓度之间比较,不同字母表示差异显著,相同字母表示差异不显著,下同

2.3 4 种 PPCPs 对大蒜根尖细胞微核率的影响

由表 3 可见,DOX、CIP、TCC 和 CBZ 处理组与 CK_2 (0.67‰) 相比,微核率有不同程度上升,但各组

观察到的微核数量较少,仅有部分浓度组与 CK_2 差异显著($P < 0.05$). DOX 的 12.5 mg·L⁻¹ 浓度组微核指数小于 1.5,表明对大蒜根尖细胞没有造成遗

传损伤,仅 CIP 的 25、50、100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 及 TCC、CBZ 的 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度组微核指数大于 3.5,4 种化合物对大蒜根尖细胞的毒性作用较小. 大蒜根尖细胞微核率均随染毒浓度的升高先增加后减少,DOX、CIP、TCC 在 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 CBZ 浓度为 25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时

根尖微核率达到最高分别为 2.33‰、4.67‰、3.33‰、3.67‰. 微核率在同一污染物不同浓度之间比较差异性较小. 表明在该试验条件下,4 种化合物达到一定剂量后会导致大蒜根尖细胞造成遗传损伤,但损伤程度较小.

表 3 DOX、CIP、TCC 和 CBZ 污染对大蒜根尖细胞微核率的影响

Table 3 Influence of the DOX, CIP, TCC and CBZ individual pollution on garlic micronucleus rate

处理组	浓度 $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	观察细胞数 /根尖	微核细胞数/根尖			微核率($\bar{X} \pm \text{SD}$)/‰	微核指数
			制片 1	制片 2	制片 3		
CK ₂	0	1 000	0	1	1	0.67 $\pm$ 0.47	1.00
DOX	12.5	1 000	1	1	1	1.00 $\pm$ 0.00a	1.49
	25	1 000	1	2	3	2.00 $\pm$ 1.00 * ac	2.99
	50	1 000	2	2	3	2.33 $\pm$ 0.58 * bc	3.48
	100	1 000	1	1	2	1.33 $\pm$ 0.58a	1.99
CIP	12.5	1 000	1	2	2	1.67 $\pm$ 0.58a	2.49
	25	1 000	2	3	3	2.67 $\pm$ 0.58 * a	3.99
	50	1 000	4	5	5	4.67 $\pm$ 0.58 * b	6.97
	100	1 000	2	3	3	2.67 $\pm$ 0.58 * a	3.99
TCC	12.5	1 000	1	1	2	1.33 $\pm$ 0.58a	1.99
	25	1 000	1	2	2	1.67 $\pm$ 0.58a	2.49
	50	1 000	3	3	4	3.33 $\pm$ 0.58 * b	4.97
	100	1 000	1	2	2	1.67 $\pm$ 0.58a	2.49
CBZ	12.5	1 000	1	1	3	1.67 $\pm$ 1.15a	2.49
	25	1 000	3	4	4	3.67 $\pm$ 0.57 * b	5.48
	50	1 000	2	2	3	2.33 $\pm$ 0.58 * ab	3.48
	100	1 000	1	2	3	2.00 $\pm$ 1.00 * a	2.99

2.4 蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的对比

由图 2 可见,DOX、CIP、TCC 和 CBZ 处理组中,随化合物浓度变化蚕豆和大蒜的根尖细胞微核率升降趋势保持一致,大蒜和蚕豆对照组微核率之间并无显著性差异,即排除试验方法等因素造成两种植物微核率的差异,大蒜根尖细胞微核率远小于对应浓度的蚕豆根尖细胞微核率,差异显著 ($P < 0.05$),4 种化合物对蚕豆根尖细胞产生的毒性效应高于大蒜.

2.5 4 种 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞损伤程度对比

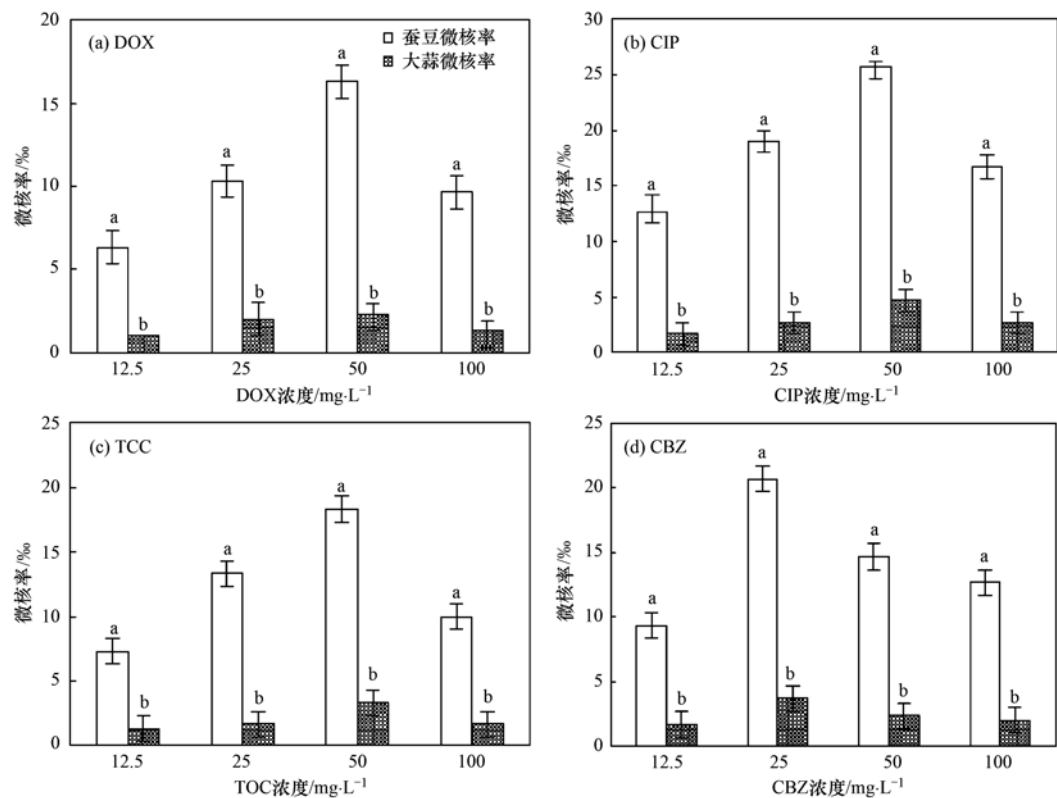
由图 3 可见,4 种化合物对两种植物均产生了一定程度的遗传损伤,CIP、TCC 和 DOX 作用于蚕豆和大蒜时,微核指数随浓度变化具有一致规律性,3 种化合物对两种植物毒性大小依次为 CIP、TCC、DOX. CBZ 除 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度组外,其它 3 个对应浓度的微核指数均大于 TCC 和 DOX,且 CBZ 最小微核指数均大于 TCC 和 DOX 最小微核指数,最大微核指数小于 CIP 最大微核指数,综合对比 4 种化合物的最大微核指数及其变化趋势,4 种化合物对两

种植物的损伤程度依次为 CIP、CBZ、TCC、DOX.

3 讨论

3.1 4 种 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响

该试验研究发现,当 4 种化合物作用于蚕豆和大蒜根尖细胞时,微核率均高于 CK;大蒜根尖细胞产生的微核率较低,微核指数多数小于 3.5,遗传损伤程度为中度及轻微损伤,有研究表明大蒜本身含有许多保护细胞免受诱变损伤的有效成分^[24]. 随浓度的增加,4 种化合物对蚕豆和大蒜根尖细胞微核的产生均表现出先促进后抑制的现象;低浓度范围内随化合物浓度的增加,对根尖细胞染色体 DNA 毒性也随之增强,微核率呈增加趋势;随浓度的进一步增大微核率反而呈下降趋势,有可能是高浓度的化合物毒性增强使细胞的正常分裂活动受到减缓、抑制、甚至终止,导致高浓度胁迫下微核出现的频率降低. 刘瑞祥等^[25]在联苯胺对大蒜根尖细胞的遗传损伤中显示,低浓度范围内即引起了根尖细胞微核率大幅度升高,随着浓度的进一步增大,抑



a、b、c、d 表示同一化合物对蚕豆和大蒜微核率影响之间比较,不同字母表示差异显著,相同字母表示差异不显著

图2 DOX、CIP、TCC、CBZ 对蚕豆根尖细胞和大蒜根尖细胞微核率对比

Fig. 2 Comparison of micronucleus rate of *Vicia-faba* and garlic by DOX,CIP,TCC,CBZ pollution

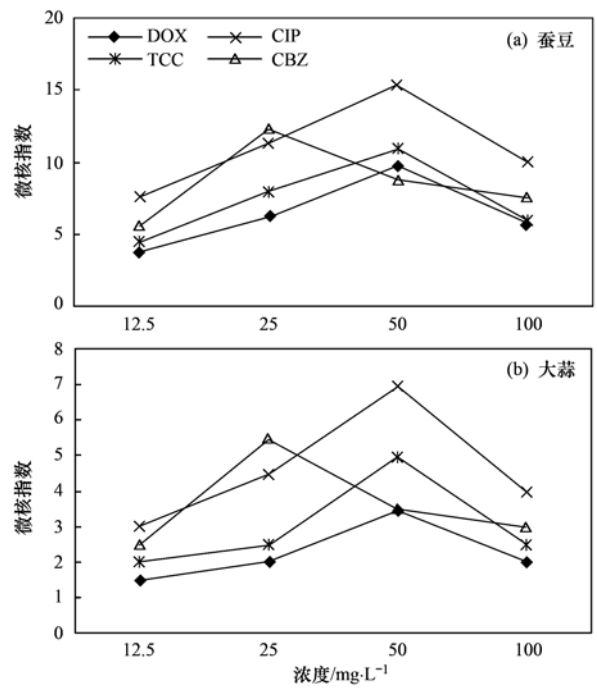


图3 DOX、CIP、TCC 和 CBZ 污染对蚕豆和大蒜根尖细胞微核指数影响对比

Fig. 3 Comparison on influence of the DOX,CIP,TCC and CBZ individual pollution on *Vicia-faba* and garlic micronucleus index

制了细胞的其他活动,延缓细胞周期,阻滞细胞进入

下一个间期,细胞的微核数也随之减少. 于淑池等^[26]研究了孔雀石绿对蚕豆根尖细胞的诱变作用,该试验显示微核率和染色体畸变率均随着孔雀石绿浓度的增加而升高,但高于一定浓度后下降. 以上研究均说明了高浓度污染物毒性增强抑制了微核产生. 总体来说,不同性质及不同浓度的污染物会对植物的遗传物质产生不同程度的损伤,应引起重视.

3.2 不同植物试材对污染物的敏感性差异.

在本研究中,同种试验条件下4种化合物诱发蚕豆根尖细胞微核率明显高于大蒜,两组之间有显著差异($P < 0.05$). 蚕豆是一种理想的细胞遗传学研究材料,蚕豆根尖细胞周期中的大部分时间对诱变剂敏感,便于进行遗传毒性的检测. 大蒜作为一种分布较广的植物,试验取材极为容易,由于其遗传稳定性,也经常被作为微核试验材料. 但有研究表明大蒜植物体及其提取物大蒜素等具有良好的抗诱变能力,本试验大蒜组微核率较低,同样表现出了大蒜的抗诱变作用. 钟晓芝等^[27]研究表明明矾诱发蚕豆根尖细胞微核率和染色体畸变率远高于诱发大蒜根尖细胞微核率和染色体畸变率,两组之间有显著差异($P < 0.05$),说明了大蒜具有抗明矾诱发突变的作用. 因此蚕豆用于微核试验对污染物监测灵

敏度明显高于大蒜。

3.3 4 种 PPCPs 对蚕豆和大蒜的毒性差异分析。

微核是监测遗传损害的良好生物标志物,试验浓度范围内引起根尖细胞微核率大幅度升高,说明 4 种药品对植物细胞具有较强的遗传毒性。从微核指数来看,两种植物的微核指数整体对比均为 $CIP > CBZ > TCC > DOX$ 处理组。有机污染物在环境中毒性及水溶性等与 K_{ow} 有很大的关系, K_{ow} 数值越大,有机物在有机相中溶解度也越大,即在水中的溶解度越小^[28]。 K_{ow} 还决定了化合物在生物组织中的活性和毒性,是影响其通过扩散被吸收的重要因素,有研究数据显示化合物的 $\lg K_{ow}$ 在 1~3.5 之间脂水溶解度达到平衡,有被植物吸收的最大潜能^[29]。本研究结果表明 TCC 和 DOX 对供试植物蚕豆和大蒜的毒性影响较小(图 3),TCC 的 $\lg K_{ow}$ 值为 4.90,DOX 的 $\lg K_{ow}$ 值为 -0.26(表 1),推测两种化合物均不易被植物吸收。此外,研究表明 3 位侧链和 7 位侧链取代基是化合物主要的毒性功能基团,通过影响化合物极性大小而影响其毒性^[30,31];本研究中,CIP 化学结构中含有 7 位侧链,可能是其对两种供试植物的毒性较高于其它 3 种化合物的原因。

4 结 论

(1) DOX、CIP、TCC、CBZ 分别单独作用于蚕豆根尖细胞时,在该试验浓度设置范围内,微核率与对照组对比差异显著($P < 0.05$),均引起蚕豆根尖细胞遗传物质损伤;微核指数均大于 1.5,对蚕豆根尖细胞产生较严重的毒性作用;同一种污染物不同浓度对蚕豆根尖产生的微核率,存在明显的差异性($P < 0.05$),不同污染物在同种试验条件下对蚕豆根尖细胞产生的微核数也存在差异性;DOX、CIP、TCC 浓度升至 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,CBZ 浓度升至 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,化合物毒性增加对细胞损伤加重,微核数量达到最大值,随浓度进一步增加,细胞微核数量呈减少趋势。

(2) DOX、CIP、TCC、CBZ 分别单独作用于大蒜根尖细胞时,产生的微核数量较少,微核率与对照组比较均有不同程度的上升,部分差异显著($P < 0.05$);微核指数多数在 3.5 以下,4 种化合物对大蒜根尖细胞造成的损伤程度较轻;大蒜根尖细胞微核率随 4 种化合物浓度变化趋势与蚕豆组保持一致;DOX、CIP、TCC 在 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时根尖微核细胞率最高,CBZ 在 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时微核率达到最大值,随后呈现下降趋势。

(3) 4 种化合物作用于蚕豆根尖细胞产生的微核率明显高于大蒜,对大蒜根尖细胞造成的遗传损伤明显低于蚕豆,蚕豆作为微核试验受试材料效果较理想。不同化合物分别作用两种植物产生的毒性大小也存在差异性,4 种化合物对蚕豆和大蒜产生的遗传损伤大小为 $CIP > CBZ > TCC > DOX$ 。

参考文献:

- [1] 柯润辉,蒋榆林,黄清辉,等. 上海某城市污水处理厂污水中药物类个人护理用品 (PPCPs) 的调查研究[J]. 生态毒理学报, 2014, 9(6): 1146-1155.
- [2] 胡伟. 天津城市水、土环境中典型药物与个人护理用品 (PPCPs) 分布及其复合雌激素效应研究[D]. 天津: 南开大学, 2011. 1-20.
- [3] Liu J L, Wong M H. Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs): A review on environmental contamination in China [J]. Environment International, 2013, 59: 208-224.
- [4] 刘奇,魏东斌,陈振斌,等. 医药品和个人护理用品 (PPCPs) 类污染物氯化转化行为研究进展[J]. 环境化学, 2012, 31(3): 278-286.
- [5] 温智皓,段艳平,孟祥周,等. 城市污水处理厂及其受纳水体中 5 种典型 PPCPs 的赋存特征和生态风险[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 927-932.
- [6] 郑少奎,李晓锋. 城市污水处理厂出水中的药品和个人护理用品[J]. 环境科学, 2013, 34(8): 3316-3326.
- [7] Li C, Chen J Y, Wang J H, et al. Occurrence of antibiotics in soils and manures from greenhouse vegetable production bases of Beijing, China and an associated risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2015, 521-522: 101-107.
- [8] 李彦文,莫测辉,赵娜,等. 菜地土壤中磺胺类和四环素类抗生素污染特征研究[J]. 环境科学, 2009, 30(6): 1762-1766.
- [9] 徐冬梅,王艳花,饶桂维. 四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用[J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3386-3390.
- [10] 邵义萍,莫测辉,吴小莲,等. 东莞市蔬菜基地土壤中喹诺酮类抗生素的污染特征研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(4): 839-845.
- [11] 金彩霞,陈秋颖,刘军军,等. 两种常用兽药对作物发芽的生态毒性效应[J]. 环境科学学报, 2009, 29(3): 619-625.
- [12] 马驿,彭金菊,王芸,等. 环丙沙星对土壤微生物量碳和土壤微生物群落碳代谢多样性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1506-1512.
- [13] 戚与珊,张薇,刘鸣达,等. 环丙沙星和铜复合污染对小麦早期生长的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(9): 2376-2381.
- [14] 冯振涛,刘海洋,汪应灵,等. 抗菌剂三氯卡班在水溶液中的光降解[J]. 环境工程学报, 2015, 9(9): 4333-4338.
- [15] 纪春,张丽珍,牛伟,等. 三氯卡班研究现状与展望[J]. 山西农业科学, 2010, 38(10): 82-87.
- [16] 缪宏豪. 三氯卡班在水生生物中的吸收与积累[D]. 济南: 济南大学, 2014. 14-16.
- [17] 高乃云,胡栩豪,邓靖,等. 紫外激活过硫酸盐降解水中卡

- 马西平研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, **41**(12): 117-122.
- [18] Zhang Y J, Geißen S U, Gal C. Carbamazepine and diclofenac: Removal in wastewater treatment plants and occurrence in water bodies[J]. *Chemosphere*, 2008, **73**(8): 1151-1161.
- [19] 李志华. 卡马西平对虹鳟的生态毒理学影响[D]. 重庆: 西南大学, 2013. 13-18.
- [20] 张平, 汪珍春, 姚焱, 等. 蚕豆根尖微核技术研究水体中铊的遗传毒性[J]. *生态环境*, 2008, **17**(1): 47-49.
- [21] 尹春艳, 骆永明, 滕应, 等. 典型设施菜地土壤抗生素污染特征与积累规律研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(8): 2810-2816.
- [22] 赵祥, 王金花, 朱鲁生, 等. 抗生素和铜联合作用对蚕豆根尖细胞微核率的影响[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(7): 1085-1090.
- [23] 赖金龙, 陶宗娅, 吴国, 等. 邻苯二甲酸二丁酯对蚕豆胚根细胞微核形成的影响及毒理机制[J]. *生态毒理学报*, 2014, **9**(1): 107-113.
- [24] 宋卫国. 大蒜提取液有效成分抑菌活性及其作用机理研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2004: 50-53.
- [25] 刘瑞祥, 常惠丽, 马峰, 等. 联苯胺对大蒜根尖细胞的遗传损伤[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(增刊): 494-497.
- [26] 于淑池, 沈燕霞, 吴霞, 等. 孔雀石绿诱发的蚕豆根尖细胞微核及染色体畸变[J]. *环境科学与技术*, 2012, **35**(6): 22-26.
- [27] 钟晓芝, 钱晓薇. 明矾对蚕豆和大蒜根尖毒性效应的细胞遗传学比较研究[J]. *江西科学*, 2003, **21**(2): 101-105.
- [28] 隆兴兴, 牛军峰, 史姝琼. 邻苯二甲酸酯类化合物正辛醇-水分配系数的 QSPR 研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(11): 2318-2322.
- [29] Dodgen L K, Li J, Parker D, *et al.* Uptake and accumulation of four PPCP/EDCs in two leafy vegetables [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **182**: 150-156.
- [30] 闻利平. 环丙沙星 7-位侧链的结构改造及抗菌活性研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2007. 16-35.
- [31] 钱建钦. β -内酰胺类抗生素及其杂质的质谱裂解规律研究和毒性预测与评价[D]. 北京: 北京协和医学院, 2014. 34-35.

CONTENTS

Chemical Characteristics of Particulate Matters and Trajectory Influence on Air Quality in Shanghai During the Heavy Haze Episode in December, 2013	ZHOU Min, QIAO Li-ping, ZHU Shu-hui, <i>et al.</i> (1179)
Analysis of Single Particle Aging and Mixing State at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer	HUANG Zi-long, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (1188)
Investigation of Aerosol Mixed State and CCN Activity in Nanjing	ZHU Lin, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1199)
Characteristics of Number Concentration Size Distributions of Aerosols Under Different Weather Processes in Beijing	SU Jie, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (1208)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} in Chongqing Urban Areas	LIU Yong-lin, SUN Qi-min, ZHONG Ming-yang, <i>et al.</i> (1219)
Comparison of Monitoring Methods of Organic Carbon and Element Carbon in Atmospheric Fine Particles	PANG Bo, JI Dong-sheng, LIU Zi-rui, <i>et al.</i> (1230)
Residue Characteristics of Perfluorinated Compounds in the Atmosphere of Shenzhen	HE Peng-fei, ZHANG Hong, LI Jing, <i>et al.</i> (1240)
Monitoring Atmospheric CO ₂ and δ ¹³ C(CO ₂) Background Levels at Shangdianzi Station in Beijing, China	XIA Ling-jun, ZHOU Ling-xi, LIU Li-xin, <i>et al.</i> (1248)
Concentration and Size Distribution of Bioaerosols in Indoor Environment of University Dormitory During the Plum Rain Period	LIU Ting, LI Lu, ZHANG Jia-quan, <i>et al.</i> (1256)
Air Microbial Pollution and Health Risk of Urban Black Odorous Water	LIU Jian-fu, CHEN Jing-xiong, GU Shi-you (1264)
Particle Size Distribution, Seasonal Variation Characteristics and Human Exposure Assessment of Heavy Metals in Typical Settled Dust from Beijing	CAO Zhi-guo, YU Gang, LÜ Xiang-ying, <i>et al.</i> (1272)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dust of Xi'an City, China	WANG Li, WANG Li-jun, SHI Xing-min, <i>et al.</i> (1279)
Toluene, Benzene and Acetone Adsorption by Activated Carbon Coated with PDMS	LIU Han-bing, JIANG Xin, WANG Xin, <i>et al.</i> (1287)
Distribution Characteristics, Sources and Pollution Assessment of Trace Elements in Surficial Sediments of the Coastal Wetlands, Northeastern Hainan Island	ZHANG Wei-kun, GAN Hua-yang, BI Xiang-yang, <i>et al.</i> (1295)
Heavy Metals Accumulation in the Caoheidian Reclamation Soils: Indicated by Soil Magnetic Susceptibility	XUE Yong, ZHOU Qian, LI Yuan, <i>et al.</i> (1306)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan	LI Guang, ZHANG Xin-ping, XU You-peng, <i>et al.</i> (1313)
GIS Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province	LI Ying-jie, ZHANG Lie-yu, WU Yi-wen, <i>et al.</i> (1321)
Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City	LIU Xiao-hong, SI You-bin, GUO Zi-wei, <i>et al.</i> (1330)
Seasonal Stratification and the Response of Water Quality of a Temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China	ZENG Ming-zheng, HUANG Ting-lin, QIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (1337)
Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River, Xinjiang	WEI Hong, WU Jin-kui, SHEN Yong-ping, <i>et al.</i> (1345)
Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan	FENG Jia, GUO Yu-ning, WANG Fei, <i>et al.</i> (1353)
Distribution Characteristics of Nitrifiers and Denitrifiers in the River Sediments of Tongling City	CHENG Jian-hua, DOU Zhi-yong, SUN Qing-ye (1362)
Contribution of Base Flow to Total Nitrogen Loading in Subtropical Agricultural Catchments	MA Qiu-mei, LI Wei, WANG Yi, <i>et al.</i> (1371)
Characteristics and Transport Patterns of Ammonia, Nitrites, Nitrates and Inorganic Nitrogen Flux at Epikarst Springs and a Subterranean Stream in Nanshan, Chongqing	ZHANG Yuan-zhu, HE Qiu-fang, JIANG Yong-jun, <i>et al.</i> (1379)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China	QIU Zu-kai, HU Xiao-zhen, YAO Cheng, <i>et al.</i> (1389)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay	HAN Hua-yang, LI Zheng-kui, WANG Hao, <i>et al.</i> (1397)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Different Forms of Phosphorus in Three Sorts of Rivers around Lake Taihu	GAO Yong-xia, SONG Yu-zhi, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (1404)
Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae	CHEN Jun, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1413)
Impacts of Sediment Disturbance on the Distribution of Suspended Particle Size and Phosphorus	GUO Jun-rui, LI Da-peng, LIU Yan-jian (1422)
Effect of Zirconium Modified Kaolin-Based Cap on Migration and Transformation of Phosphorus Between Sediment and Overlying Water	ZHANG Zhe, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1427)
Toxicity of 4-Chlorophenol Solution Under Electrochemical Reduction-oxidation Process	WANG Yan, SHI Qin, WANG Hui, <i>et al.</i> (1437)
Removal and Recycle of Phosphor from Water Using Magnetic Core/Shell Structured Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Nanoparticles Functionalized with Hydrous Aluminum Oxide	LAI Li, XIE Qiang, FANG Wen-kan, <i>et al.</i> (1444)
Occurrence and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Typical Wastewater Treatment Plants in Beijing	QIAO Meng, QI Wei-xiao, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (1451)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants	NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, <i>et al.</i> (1460)
Feasibility and Economic Analysis of Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	LI Xiang, ZHU Liang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (1467)
Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (1472)
Performance Recoverability of Denitrifying Granular Sludge Under the Stressing Effect of Nanoscale Zero-valent Iron	WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1478)
Effect of Low-concentration Ciprofloxacin on the Nitrification and Nitrifying Microorganisms of Biofilms in Biological Aerated Filter	HE Shi, GU Chao-chao, WEI Xin, <i>et al.</i> (1485)
Optimization Study on the Nitrogen and Phosphorus Removal of Modified Two-sludge System Under the Condition of Low Carbon Source	YANG Wei-qiang, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (1492)
Effects of Short-time Conservation Tillage Managements on Greenhouse Gases Emissions from Soybean-Winter Wheat Rotation System	XIE Yan, CHEN Xi, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1499)
Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppes	CUI Hai, ZHANG Ya-hong (1507)
Correlation Among Soil Organic Carbon, Soil Inorganic Carbon and the Environmental Factors in a Typical Oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin	GONG Lu, ZHU Mei-ling, LIU Zeng-yuan, <i>et al.</i> (1516)
Effects of Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Speciation of Pb in Purple Soil and Soil Solution	LIU Jiang, JIANG Tao, HUANG Rong, <i>et al.</i> (1523)
Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils with <i>Iris pseudacorus</i> L. and the Metabolic Analysis in Roots	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1531)
Oxidation Process of Dissolvable Sulfide by Manganite and Its Influencing Factors	LUO Yao, LI Shan, TAN Wen-feng, <i>et al.</i> (1539)
Screening and Enzyme Production Characteristics of Thermophilic Cellulase-producing Strains	FENG Hong-mei, QIN Yong-sheng, LI Xiao-fan, <i>et al.</i> (1546)
Development of Determination Method of Fluoroquinolone Antibiotics in Sludge Based on Solid Phase Extraction and HPLC-Fluorescence Detection Analysis	DAI Xiao-hu, XUE Yong-gang, LIU Hua-jie, <i>et al.</i> (1553)
Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Feedlot Livestock	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Zi-ying, <i>et al.</i> (1562)
Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of <i>Vicia-faba</i> and Garlic	WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, <i>et al.</i> (1568)
Environmental Behaviors and Ecotoxicology of the Emerging Contaminants Polyhalogenated Carbazoles	LIN Kun-de, CHEN Yan-qiu, YUAN Dong-xing (1576)
Classification of Priority Area for Soil Environmental Protection Around Water Sources: Method Proposed and Case Demonstration	LI Lei, WANG Tie-yu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (1584)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年4月15日 第37卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 4 Apr. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行