

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

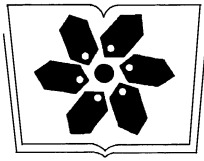
Acta Ecologica Sinica



第31卷 第6期 Vol.31 No.6 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 6 期 2011 年 3 月 (半月刊)

目 次

臭氧胁迫对水稻生长以及 C、N、S 元素分配的影响	郑飞翔,王效科,侯培强,等 (1479)
高含氮稻田深层土壤的氨氧化古菌和厌氧氨氧化菌共存及对氮循环的影响	王 雨,祝贵兵,王朝旭,等 (1487)
气候年际变率对全球植被平均分布的影响	邵 璞,曾晓东 (1494)
模拟升温 and 放牧对高寒草甸土壤有机碳氮组分和微生物生物量的影响	王 蓓,孙 庚,罗 鹏,等 (1506)
广州城区生态安全岛典型植物群落结构及物种多样性	莫 丹,管东生,黄康有,等 (1515)
中亚热带湿地松人工林生长过程	马泽清,刘琪璟,王辉民,等 (1525)
潜流人工湿地中植物对氮磷净化的影响	刘树元,阎百兴,王莉霞 (1538)
模拟氮沉降对两种竹林不同凋落物组分分解过程养分释放的影响	涂利华,胡庭兴,张 健,等 (1547)
苔藓植物对贵州丹寨汞矿区汞污染的生态监测	刘荣相,王智慧,张朝晖 (1558)
三峡库区泥、沙沉降对低位狗牙根种群的影响	李 强,丁武泉,朱启红,等 (1567)
上海崇明东滩互花米草种子产量及其萌发对温度的响应	祝振昌,张利权,肖德荣 (1574)
栲-木荷林凋落叶混合分解对土壤有机碳的影响	张晓鹏,潘开文,王进闯,等 (1582)
荒漠化对毛乌素沙地土壤呼吸及生态系统碳固持的影响	丁金枝,来利明,赵学春,等 (1594)
黄土丘陵沟壑区小流域土壤有机碳空间分布及其影响因素	孙文义,郭胜利 (1604)
种间互作和施氮对蚕豆/玉米间作生态系统地上部和地下部生长的影响	李玉英,胡汉升,程 序,等 (1617)
测墒补灌对冬小麦氮素积累与转运及籽粒产量的影响	韩占江,于振文,王 东,等 (1631)
植被生化组分光谱模型抗土壤背景的能力	孙 林,程丽娟 (1641)
北方两省农牧交错带沙棘根围 AM 真菌与球囊霉素空间分布	贺学礼,陈 程,何 博 (1653)
基于水源涵养的流域适宜森林覆盖率研究——以平通河流域(平武段)为例	朱志芳,龚固堂,陈俊华,等 (1662)
黑龙江大兴安岭呼中林区火烧点格局分析及影响因素	刘志华,杨 健,贺红士,等 (1669)
大兴安岭小尺度草甸火燃烧效率	王明玉,舒立福,宋光辉,等 (1678)
长江口中华鲟自然保护区底层鱼类的群落结构特征	张 涛,庄 平,章龙珍,等 (1687)
骨顶鸡等游禽对不同的人为干扰的行为响应	张微微,马建章,李金波 (1695)
光周期对白头鹇体重、器官重量和能量代谢的影响	倪小英,林 琳,周菲菲,等 (1703)
应用稳定同位素技术分析华北部分地区第三代棉铃虫虫源性质	叶乐夫,付 雪,谢宝瑜,等 (1714)
西花蓟马对蔬菜寄主的选择性	袁成明,郅军锐,曹 宇,等 (1720)
基于 Cyt b 基因序列分析的松毛虫种群遗传结构研究	高宝嘉,张学卫,周国娜,等 (1727)
沼液的定价方法及其应用效果	张昌爱,刘 英,曹 曼,等 (1735)
垃圾堆肥基质对不同草坪植物生态及质量特征的影响	赵树兰,廉 菲,多立安 (1742)
五氯酚在稻田中的降解动态及生物有效性	王诗生,李德鹏 (1749)
专论与综述	
景观遗传学:概念与方法	薛亚东,李 丽,吴巩胜,等 (1756)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 284 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 31 * 2011-03	



封面图说:美丽优雅的新疆夏尔西里森林草地原始景观。夏尔西里国家级自然保护区建立在新疆博乐北部山区无人干扰的中哈边境上,图中雪地云杉为当地的优势树种。

彩图提供:国家林业局陈建伟教授 E-mail: cites.chenjw@163.com

五氯酚在稻田中的降解动态及生物有效性

王诗生*, 李德鹏

(安徽工业大学建筑工程学院, 马鞍山 243002)

摘要: 利用江西鹰潭红壤生态实验站的长期施肥定位试验, 采用田间微域研究了五氯酚 (pentachlorophenol, PCP) 在红壤性水稻田生态系统中的降解动态和稻谷的富集特征。四种长期施肥处理包括: 未施肥 (对照, CK)、施尿素 (N)、施有机肥 (OM) 以及施有机肥+尿素 (N+OM)。结果表明, 长期施用 OM 或 N+OM 能显著增加土壤微生物活性。PCP 在土壤-水稻生态系统中的降解遵循一级动力学方程, 在 CK、N、OM 和 N+OM 4 种处理土壤中降解半衰期分别为 27.7、35.2、24.8、22.4 d。表明长期施用 OM 或 N+OM 能加速 PCP 降解, 而长期施用 N 抑制 PCP 降解。土壤中 PCP (初始浓度 85 mg/kg) 显著减少水稻茎和稻谷生物量, 但是对水稻根生物量并没有显著影响。在 4 种处理中水稻稻谷中 PCP 含量并没有显著差异, 且稻谷的生物富集系数均小于 0.01。PCP 虽然在土壤-水稻生态系统中的降解半衰期较短, 但是仍可以在水稻稻谷中有一定的生物富集, 潜在的食品安全风险依然存在。

关键词: 五氯酚; 降解; 长期施肥; 土壤-水稻生态系统; 生物有效性

Degradation kinetics and bioavailability of pentachlorophenol in paddy soil-rice plant ecosystem

WANG Shisheng*, LI Depeng

School of Construction Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China

Abstract: The in situ microcosm experiment was set up in the four long-term fertilization field experiments, the degradation kinetics and bioaccumulation characteristics of pentachlorophenol (PCP) with initial concentration of 85 mg/kg in paddy soil-rice plant ecosystem were investigated. The long-term fertilization field experiment employed was in the Experimental Station of Red Soil, the Chinese Academy of Sciences, located in Yingtan, Jiangxi Province, China. The four long-term fertilization treatments included (1) no fertilizer (the control, CK), (2) application of urea (N), (3) application of organic fertilizer (OM), and (4) mixed organic fertilizer and urea (N+OM), and no addition of PCP as control was also set up for any treatment. The results showed that carbon dioxide release in OM and N+OM was both higher than that in CK, but no significant difference was observed between CK and N, indicating that long-term fertilization of organic fertilizer or mixed organic fertilizer and urea increased microbial activities in paddy soil, but no effect on microbial activity was showed under long-term fertilization of urea. PCP residue in paddy soil gradually decreased with time increasing in four treatments. After the rice plant was harvested, the final PCP residue in N+OM was the least, was 8.7 mg/kg, and the highest PCP residue was in N, was 30.9 mg/kg. It could be found that PCP degradation followed one-order kinetics equation in four treatments, and the fitting degrees were 97.7%, 78.8%, 89.5%, 91.7% for CK, N, OM and N+OM, respectively. According to one-order kinetics equation, the half-lives calculated of PCP degradation were 27.7, 35.2, 24.8 and 22.4 days for CK, N, OM and N+OM, respectively. The results observed indicated that long-term fertilization of organic fertilizer or mixed organic fertilizer and urea accelerated PCP degradation, but long-term fertilization of urea inhibited PCP degradation. As for no addition of PCP in four treatments, the air-dried shoot and grain biomass of rice plant in N+OM and OM was significantly higher than those in CK, and no significant difference was displayed between N and CK, suggesting

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40621001); 安徽省高校自然科学研究重点项目 (KJ2010A049)

收稿日期: 2010-11-26; **修订日期:** 2011-01-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ahutsswang@gmail.com

that long-term fertilization of organic fertilizer or mixed organic fertilizer and urea increased soil fertility, but the soil fertility did not increase under long-term fertilization of urea. In the presence of PCP, the average shoot and grain biomass was remarkably smaller when compared with no addition of PCP. The average shoot biomass decreased by 40.7%, 43.9%, 58.1%, 50.6% for CK, N, OM, N+OM, respectively, and 80.2%, 88.2%, 86.5%, 72.9% of grain biomass decreased was observed for CK, N, OM, N+OM, respectively. It suggested that higher PCP concentration had a severe damage to rice plant aboveground part growth. Beyond understanding, the root biomass did not decrease in four treatments. No significant difference in PCP concentration in grain was observed among four treatments, the average concentration in grain was 0.51 mg/kg, and bioconcentration factors of PCP in grain were all less than 0.01. Although the half-life of PCP degradation was relatively shorter in paddy soil-rice plant ecosystem, it could be still accumulated in grain, thus posing potential food safety risk.

Key Words: PCP; degradation; long-term fertilization; paddy soil-rice ecosystem; bioavailability

五氯酚(pentachlorophenol, PCP)作为有机氯农药广泛地用作杀菌剂、杀螺剂、杀藻剂、杀虫剂和除草剂,以及木材防腐剂^[1]。因其生物毒性,被各国确定为优先监测污染物之一^[2]。目前虽已禁用,但在一些地区仍存在较严重的 PCP 土壤污染^[3]。值得关注的是,其生物毒性通过食物链进入人体,有进一步富集放大的危险^[4-6]。PCP 在我国主要用于农作物防病治病以及木材防腐和血吸虫的防治,目前在农业上已禁用,只在化工行业少量使用。但作为 PCP 污染源之一的 PCP-Na, 仍在使用中。近年南方一些省市血吸虫病疫情有所发展,又继续使用 PCP-Na 灭螺。食物是人类暴露持久性有机污染物的主要来源和途径^[7],而稻米是我国主要粮食之一。因此稻谷对 PCP 的累积作用值得我们探索。

施肥影响土壤中有机污染物的降解已有报道,但是影响机理值得深究。张超兰^[8]研究发现施用无机氮肥和磷肥可以促进土壤中阿特拉津的降解。Houot 等人^[9]报道加入有机肥后土壤中阿特拉津降解反而受到抑制,并且阿特拉津的降解途径会因加入有机肥的种类不同而不同。土壤中影响污染物降解的因素很多,如土壤的有机质、营养元素含量、微生物生物量及其微生物活性等。施肥影响有机污染物降解主要在于其改变了土壤这些方面的性质,从而影响有机污染物的降解。目前国内外关于施肥处理对有机污染物降解影响的研究均采用室内培养试验。在这些试验中,脱离原位的土壤其理化性质没有较大的变化,但是土壤微生物学特征可能变化较大,对理解施肥处理和有机污染物降解之间的关系可能产生较大的偏差。

鉴于此,本研究选取中国科学院江西鹰潭红壤生态实验站的长期施肥定位试验平台,在长期施肥的水稻田中设置田间微域,以土壤-水稻生态系统为研究对象,考察 PCP 在长期不同施肥处理土壤中的降解动态和稻谷的富集特征,以期了解 PCP 在稻田中的残留动态和水稻可食部分受污染程度,为制定污染防治措施提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 长期施肥定位试验

长期施肥定位红壤性水稻田位于中国科学院红壤生态试验站。红壤站建于 1985 年 12 月,位于江西省鹰潭市余江县(东经 116°55'30", 北纬 28°15'20")。该地年降雨量 1785 mm,年均温 17.8 °C, >10 °C 积温 5528 °C。长期施肥定位试验小区始建于 1990 年,试验每个小区面积为 30 m²,且每个小区为一种施肥方式。采用双季稻轮作制,冬季休耕。本研究选用 4 个试验小区,4 种长期施肥处理为:CK 区(不施任何肥料,且收获的秸秆、籽粒全部移出试验小区);OM 区(不施化学肥料,但秸秆全部回田循环再利用,且施 2.5 kg 干猪粪以代替籽粒移出所带走的养分);N 区(基肥施尿素 0.4 kg,追肥施尿素 0.35 kg);N+OM 区(基肥施尿素 0.4 kg,追肥施尿素 0.35 kg;秸秆全部还田,每小区再施干猪粪 2.5 kg),各处理重复 3 次。2006 年 11 月,取各个小区内表层土壤(0—15 cm),过 2 mm 筛,测定 4 个小区土壤的基本理化性质,具体测定方法参见文献^[10],结果见表 1。

表 1 供试土壤理化性质
Table 1 Physico-chemical properties of tested soils

处理	pH	有机质 OM /(g/kg)	粘粒/% Clay% ($<2\ \mu\text{m}$)	粉粒/% Silt% ($2\text{--}50\ \mu\text{m}$)	砂粒/% Sand% ($>50\ \mu\text{m}$)	全 N Total N /(g/kg)
CK	5.8	14.6	35.7	39.9	24.4	0.8
N	5.7	16.1	37.0	41.0	22.0	0.9
OM	5.7	18.4	38.0	43.0	19.0	1.0
N+OM	5.6	19.1	38.5	39.9	21.6	1.1

处理	全 P Total P /(g/kg)	全 K Total K /(g/kg)	碱解 N Alkaline hydrolysis N /(mg/kg)	速效 P Available P /(mg/kg)	速效 K Available K /(mg/kg)
CK	0.3	10.2	75.3	0.6	114.8
N	0.3	10.0	85.2	0.4	83.8
OM	0.4	10.1	99.2	1.1	70.7
N+OM	0.4	10.0	105.0	1.0	57.6

1.2 试验设计

1.2.1 PCP 污染土壤的制备

人工制备 PCP 污染土壤的具体方法如下:首先将固体 PCP(分析纯,纯度 $>98\%$)溶于 2000 mL 的丙酮中,待溶解后添加到 1.8 kg 的石英砂(100 目)粉末中,在通风橱充分搅拌混匀直至溶剂完全挥发。每 130 g 污染石英砂与新鲜土(相当于风干土 7.5 kg)混合制备成田间微域试验所用的污染土,PCP 浓度为 85 mg/kg。经上述方法处理后各土壤中 PCP 回收率均值达到 98.4%,表明添加的 PCP 与土样混合均匀。

1.2.2 田间微域试验设置

首先在各个试验小区中挖出 6 个圆柱形土柱(深度 20 cm,直径 34 cm;取出的土柱和污染石英砂完全混合制备 PCP 污染土,具体制备方法见 1.2.1),再放入 6 个无底的圆柱桶(高度 30 cm,直径 34 cm)。然后任选 3 个圆柱桶,在上部分别加入 7.5 kg PCP 污染土,在另外 3 个圆柱桶上部分别加入 7.5 kg 未受 PCP 污染的原土。再把 6 个圆柱桶(即田间微域)淹水 10 d 后,分别作为加 PCP 和未加 PCP 的 2 个处理。即田间微域的水稻土分为 4 种长期施肥处理方式,每种长期施肥的土壤中设置加 PCP 与未加 PCP 的 2 个处理,共 8 个处理,且每个处理设置 3 个重复。田间微域的施肥方式和相对应的小区是一致的,施肥的量经过计算所得。

供试稻种为中选 181。2007 年 3 月底育苗,2007 年 5 月 5 日移栽,2008 年 7 月 18 日收获。在水稻生长周期内,采集的土壤样品放在零下 18 ℃中保存待测。收割水稻后采集稻谷,用去离子水反复冲洗、风干后研磨测定 PCP 含量。

1.3 分析测定方法

土壤 CO₂释放量的测定步骤参见文献^[10]。PCP 标样为美国的 Supelco 公司产品。土壤样品中可提取 PCP 残留量采用超声提取、K₂CO₃溶液纯化,乙酸酐酯化,浓缩定容至 1 mL 后用 GC/ μ ECD 测定^[11]。稻谷样品风干粉碎后,测定其中 PCP 含量同土壤。土壤和稻谷样品中 PCP 含量采用 Agilent 6890 GC 分析。提取剂石油醚和丙酮均为分析纯试剂,石油醚在使用之前经过重蒸馏,取 68 ℃馏分;无水乙酸酐为分析纯试剂。

1.4 质量控制和数据分析

在与样品分析流程相同的条件下作空白分析,没有出现 PCP 的峰值,表明分析过程未受到人为污染。同时将 50,100,200 $\mu\text{g/kg}$ 梯度 PCP 标液加入到空白土壤和稻谷样品中,设置 3 个重复,测定其添加回收率。经测定计算出在 3 个添加浓度下土壤和稻谷样品的 PCP 回收率介于 80%—105% 之间,测定的变异系数 $<5\%$ 。

采用非线性一级动力学方程 $C=C_0e^{-kt}$ 拟合 PCP 在土壤中的降解动力学。式中 C 为 t 时间时 PCP 在土壤中的残留浓度(mg/kg); C_0 为 PCP 在土壤中的初始浓度(mg/kg); k 为速率常数。计算各拟合方程的相关系数及拟合度,并据此分析 PCP 在各土壤中的半衰期 $T_{1/2}$ 。

采用一元方差分析(one-way ANOVA)和 Tukey 多重比较不同处理之间差异显著性(显著性水平 0.05),所有数学统计均采用 SPSS12.0 进行。

2 结果与讨论

2.1 土壤 CO₂ 释放量

土壤 CO₂ 释放量是衡量土壤微生物活性的总指标。由图 1 可以看出,在 OM 和 N+OM 处理土壤中 CO₂ 释放量均显著高于 CK,而 N 和 CK 之间并没有显著的差异。结果表明,长期单施有机肥或无机有机肥配施均能显著提高土壤微生物的活性。这是由于有机肥直接给微生物提供了丰富、易利用的养分元素,导致微生物活性高^[12]。

2.2 PCP 在土壤-水稻生态系统中的降解动态

在田间微域土壤中可提取 PCP 残留量的动态变化见图 2。由图 2 可知,随着时间的延长,土壤中可提取 PCP 残留量逐渐降低。水稻生长第 30 天,在 CK、N、OM 和 N+OM 处理土壤中可提取 PCP 残留量分别 36.7、34.1、42.6、49.3 mg/kg;水稻生长到第 40 天,土壤中可提取 PCP 残留量分别 29.4、37.4、23.1、27.4 mg/kg;在收割水稻时,在 N+OM 处理中可提取 PCP 残留量最低,为 8.7 mg/kg,在 N 处理中最高,为 30.9 mg/kg。

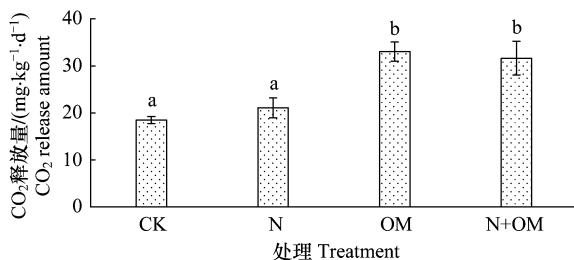


图 1 土壤微生物活性

Fig. 1 Microbial activity in soil

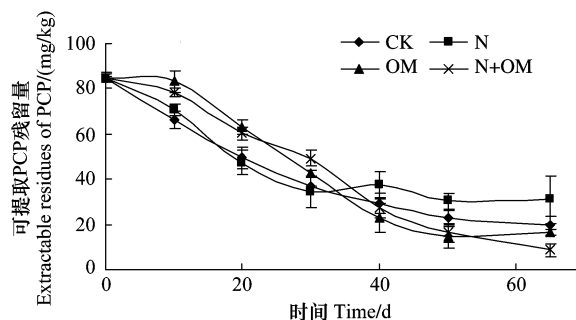


图 2 PCP 在土壤-水稻系统中的降解动态

Fig. 2 Degradation dynamics of PCP in paddy soil-rice ecosystem

对土壤中可提取 PCP 残留量与时间之间进行回归分析发现,PCP 残留量随时间的变化符合一级动力学方程,这与前人的实验结果一致^[6,13]。由表 2 可知,拟合方程的相关系数在 0.8877—0.9883 之间,且拟合度最高达 97.7%。根据一级动力学方程计算得到的 PCP 在土壤半衰期($T_{1/2}$)大小依次为 $N > CK > OM > N+OM$ 。

表 2 PCP 在土壤-水稻系统中的降解动力学参数

Table 2 Degradation kinetics parameters of PCP in paddy soil-rice ecosystem

处理 Treatment	降解动力学方程 Degradation kinetics equation	相关系数 Correlation coefficient	拟合度 Degree of fitting /%	$T_{1/2}$ Half life/d
CK	$C=85 \exp(-0.025t)$	0.9883 **	97.7	27.7
N	$C=85 \exp(-0.0197t)$	0.8877 **	78.8	35.2
OM	$C=85 \exp(-0.028t)$	0.9463 **	89.5	24.8
N+OM	$C=85 \exp(-0.0309t)$	0.9576 **	91.7	22.4

** 表示 $P < 0.01$

农药在土壤中的降解不仅取决于该农药本身的性质,而且还与土壤的理化性质有关。He 等人^[13]研究发现,PCP 在土壤中降解主要取决于土壤 pH、有机质以及土壤颗粒组成等土壤理化性质。由图 2 可知,在水稻生长 0—30 d 内,OM 和 N+OM 处理中可提取 PCP 残留量显著高于 CK 和 N。可能原因是:一方面本研究中 PCP 初始浓度较高,微生物降解 PCP 可能存在较长滞后期^[6]。另一方面在淹水条件下,OM 和 N+OM 处理中的土壤对 PCP 吸附能力强于 CK 和 N 处理,这是由于 OM 和 N+OM 处理中土壤有机质含量较高(表 1)。此

外,4 种土壤的机械组成差异也是导致不同吸附能力的重要因素。Doickd 等人^[14]研究发现,土壤不同粒径组分对 PCBs 和 PAHs 的结合力大小依次顺序为(2—20 μm)>(<2 μm)>(>20 μm)。在本研究中土壤也被分为 3 个粒径组分:砂粒(>50 μm)、粉粒(2—50 μm)和粘粒(<2 μm),由表 1 可知 OM 和 N+OM 处理中的土壤的粘粒和粉粒含量较高。40 d 后 OM 和 N+OM 处理中可提取 PCP 残留量反而小于 N 和 CK。这是由于 OM 和 N+OM 处理中土壤微生物活性高于 N 和 CK。D'Angelo 等人^[6]研究发现,在厌氧条件下,PCP 降解速率和土壤总 C、N、P、有效态 N、微生物生物量 C 等显著相关,且微生物生物量 C 和降解速率相关性最好,其方程拟合度高达 94%。

4 种处理中土壤有机质含量和微生物活性大小依次 N+OM $\approx$ OM>N $\approx$ CK,可以假设收割水稻时土壤 PCP 残留量顺序 N $\approx$ CK>OM $\approx$ N+OM。实际上收割水稻时土壤 PCP 残留量顺序为 N>CK $\approx$ OM>N+OM。据文献报道,长期施尿素会降低土壤微生物群落多样性指数^[15]。较高 PCP 浓度联合 N 处理可能对其中的微生物活性抑制作用可能高于其它 3 种长期施肥处理,从而导致 N 处理中 PCP 残留量最高。由图 2 可知,0—30 d 内 N 处理中 PCP 残留量显著下降,而 30 d 后 N 处理中 PCP 残留量并没有显著差异。可能的原因是:0—30 d 内 N 处理中 PCP 残留量的下降并不主要是由于降解和植物吸收造成的,而是 PCP 的老化效应引起的。

除 N 处理外,另外 3 种处理中 PCP 残留量和假设并不一致。在土壤-水稻生态系统中 PCP 的降解还可能和水稻生长有关。伴随植物根系生长过程中主动释放的根系分泌物,包括有机酸、氨基酸等小分子的有机酸,作为满足土壤微生物生长所需碳源、氮源,增加微生物生物量和激发微生物的活性,从而加速污染物的降解。由于根生物量以及生物活性的不同可能引起根系分泌物的量不同,导致微生物的活性不同^[16]。由表 3 可知,N+OM 处理中水稻根、颈和稻谷重均显著高于另外 3 种处理,可能导致 N+OM 处理中 PCP 残留量最小。至于水稻根系生理过程对 PCP 在土壤中的过程的影响程度还需要进一步研究。

2.3 PCP 的植物毒性

由表 3 可知,对于未加 PCP 处理,在 N+OM 和 OM 处理中水稻茎和稻谷生物量(风干重,下同)显著高于 CK,而 N 和 CK 处理之间并没有显著差异。当加入 PCP 后,水稻茎和稻谷干重表现出同样的规律。这是由于长期单施有机肥或无机有机肥配施显著提高了土壤的肥力,而长期单施尿素对土壤肥力基本上没有影响^[17]。由表 1 可见,在 OM 和 N+OM 处理中土壤有机质和全磷、全氮以及速效磷、碱解氮含量均显著高于 CK 处理,而 CK 和 N 处理中土壤有机质以及养分含量并没有显著差异。将同种长期施肥处理土壤中加入 PCP 和未加入 PCP 时水稻茎和稻谷干重进行比较时可以发现:在 CK、N、OM 和 N+OM 处理中,水稻茎干重分别降低 40.7%、43.9%、58.1% 和 50.6%;稻谷干重分别降低 80.2%、88.2%、86.5% 和 72.9%。结果表明,PCP(初始浓度为 85 mg/kg)对水稻茎、稻谷干重均有极显著的影响($P<0.01$)。这是由于 PCP 破坏了与其接触的细胞膜,并对植物的呼吸作用产生显著影响,干扰植物体正常的氧化磷酸化或光合磷酸化作用,使能量代谢紊乱,阻碍植物生长^[18]。但是,PCP 对水稻根干重并没有显著影响。结果表明 PCP 的生物毒性可能表现在水稻的地上部分。

表 3 水稻生物量

Table 3 Rice plant biomass(g/盆)

处理 Treatments	根 Root		茎 Shoot		稻谷 Grain	
	-PCP	+PCP	-PCP	+PCP	-PCP	+PCP
CK	4.02 b	4.56 b	21.81 b	12.94 b	18.04 b	3.57 b
N	3.85 b	3.76 b	23.46 b	13.15 b	24.97 b	2.95 b
OM	6.01 a	5.67 ab	38.43 ab	16.14 b	57.33 a	7.75 ab
N+OM	9.77 a	7.75 a	49.15 a	24.29 a	65.05 a	17.65 a

+PCP: 加入 PCP; -PCP: 未加 PCP; 同一列中所标字母不同表示差异显著

2.4 PCP 的生物有效性

由图 3 可知,4 种处理中水稻稻谷中 PCP 含量均没有显著的差异。稻谷生物富集系数(Bioconcentration factor,BCF)是通过稻谷中 PCP 的浓度除以土壤中初始添加浓度计算得到的,用以比较生长在不同处理中的

水稻对 PCP 的吸收以及运输到稻谷的能力^[4-5]。由图 4 可知,4 种处理中 BCF 均小于 0.01,本试验结果和已有文献报道基本一致^[4]。

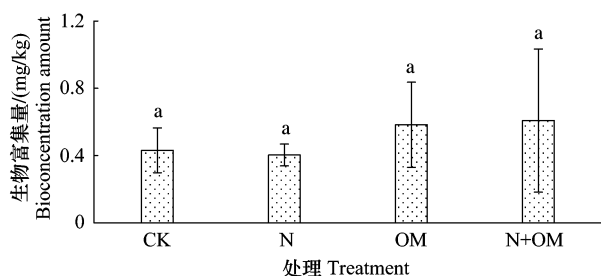


图 3 PCP 在稻谷中的富集特征

Fig. 3 Accumulation characteristics of PCP in grains

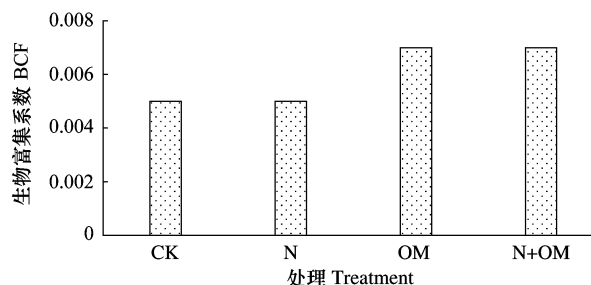


图 4 PCP 在稻谷中的富集能力

Fig. 4 Bioaccumulation capacity of PCP in grains

4 种处理中土壤有机质含量和微生物活性大小依次 $N+OM \approx OM > N \approx CK$ 。Bellin 等人^[4]研究表明,植物富集 PCP 的量随土壤有机质、微生物活性的升高而减少。根据此结论假设水稻稻谷 PCP 富集量顺序为 $N \approx CK > N+OM \approx OM$,但是本研究结果并非如此。可能原因是:一方面,由表 3 可知, $N+OM$ 中水稻地上部分生物量显著高于 CK 和 N,且 CK 和 N 之间并没有显著差异。因此, $N+OM$ 中 PCP 随蒸腾作用向地上部分迁移量显著高于 CK 和 N。另一方面,PCP 从水稻根部向地上部分迁移过程中, $N+OM$ 中水稻对 PCP 的代谢能力显著高于 N 和 CK^[5]。结果表现为 4 种处理中稻谷 PCP 含量并没有显著差异。

由表 1 可知,4 种处理中土壤 pH 值并没有显著差异,均值为 5.7, pK_a (PCP) 为 4.75,由此可知,土壤中 PCP 绝大多数(90%)以离子态形式存在,离子态化合物溶于水随蒸腾作用向地上部分迁移较易,但是与本试验结果并不一致。有学者^[19]提出“离子阱”效应来解释植物吸收富集离子型有机物的迁移机制,但是其理论还有许多需要完善的地方。另外,PCP 由水稻根部向稻谷迁移过程中被代谢从而减少 PCP 在稻谷中的富集量^[20]。结果表现为 4 种处理中 BCF 均小于 0.01。但是 PCP 仍可以在稻谷中有一定的生物富集,潜在的食品安全风险依然存在。

3 结论

PCP 在土壤-水稻生态系统中的降解遵循一级动力学方程,在 CK、N、OM 和 $N+OM$ 4 种处理土壤中降解半衰期分别为 27.7、35.2、24.8、22.4 d。表明长期单施有机肥或无机有机肥配施能加速 PCP 的降解,而长期施用 N 抑制 PCP 降解。4 种处理中水稻稻谷 PCP 富集量并没有显著差异,且 BCF 值均小于 0.01。

References:

- [1] Scelza R, Rao M A, Gianfreda L. Response of an agricultural soil to PCP contamination and the addition of compost or dissolved organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(9): 2162-2169.
- [2] Li F B, Wang X G, Liu C S, Li Y T, Liu L. Reductive transformation of pentachlorophenol on the interface of subtropical soil colloids water. *Geoderma*, 2008, 148(1): 70-78.
- [3] He Y, Xu J M, Tang C X, Wu Y P. Facilitation of pentachlorophenol degradation in the rhizosphere of ryegrass (*Lolium Perenne* L.). *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(11): 2017-2024.
- [4] Bellin C A, O'Connor G A. Plant uptake of pentachlorophenol from sludge-amended soils. *Journal of Environmental Quality*, 1990, 19(3): 598-602.
- [5] Ferro A M, Ronald C S, Bruce B. Hycrest crested wheatgrass accelerates the degradation of pentachlorophenol in soil. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23(2): 272-279.
- [6] D'Angelo E M, Reddy K R. Aerobic and anaerobic transformations of pentachlorophenol in wetland soils. *Soil Society Science of America Journal*, 2000, 64(3): 933-943.
- [7] Yao F X, Yu G F, Bian Y R, Yang X L, Wang F, Jiang X. Bioavailability to grains of rice of aged and fresh DDD and DDE in soils. *Chemosphere*, 2007, 68(1): 78-84.

- [8] Zhang C L, Xu J M. Effects of nitrogenous and phosphorous fertilizers on dissipation of atrazine in soil. *Journal of Agro-environment Science*, 2007, 26(5):1694-1697.
- [9] Houot S, Barriuso E, Bergheaud V. Modification to atrazine degradation pathways in a loamy soil after addition of organic amendments. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(14):2147-2157.
- [10] Lu R K. *Analytical Methods of Soil and Agricultural Chemistry*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [11] Sun L, Jiang X, Zhou J M, Wang D Z, Kong D Y, Tao R X. Method for determination of trace PCP in red earth by gas chromatography. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2003, 31(6):716-719.
- [12] Enwall K, Nyberga K, Bertilssonb S, Cederlund H, Stenström J, Hallin S. Long-term impact of fertilization on activity and composition of bacterial communities and metabolic guilds in agricultural soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(1):106-115.
- [13] He Y, Xu J M, Wang H Z, Wu Y P. Generalized models for prediction of pentachlorophenol dissipation dynamics in soil. *Environmental Pollution*, 2007, 147(2):343-349.
- [14] Doick K J, Buraue P, Jones K C, Semple K T. Distribution of aged ^{14}C -PCB and ^{14}C -PAH residues in particle-size and humic fractions of an agricultural soil. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39(17):6575-6583.
- [15] Zhang Y F, Zhong W H, Li Z P, Cai Z C. Effects of long-term different fertilization on soil enzyme activity and microbial community functional diversity in paddy soil derived from quaternary red clay. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(4):39-44.
- [16] Mills T, Arnold B, Sivakumaran S, Northcott G, Vogeler I, Robinson B, Norling C, Leonil D. Phytoremediation and long-term site management of soil contaminated with pentachlorophenol (PCP) and heavy metals. *Journal of Environmental Management*, 2006, 79(3):232-241.
- [17] Manna M C, Swarup A, Wanjari R H, Mishra B, Shahi D K. Long-term fertilization, manure and liming effects on soil organic matter and crop yields. *Soil and Tillage Research*, 2007, 94(2):397-409.
- [18] Dams R I, Paton G, Killham K. Bioaugmentation of pentachlorophenol in soil and hydroponic systems. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2007, 60(3):171-177.
- [19] Trapp S. Plant uptake and transport models for neutral and ionic chemicals. *Environmental Science and Pollution Research*, 2004, 11(1):33-39.
- [20] Weiss U M, Moza P, Scheunert I, Haque A, Korte F. Fate of pentachlorophenol- ^{14}C in rice plant under controlled conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1982, 30(6):1186-1190.

参考文献:

- [8] 张超兰, 徐建明. 氮磷无机营养物质对莠去津在土壤中消解的影响研究. *农业环境科学学报*, 2007, 26(5):1694-1697.
- [10] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [11] 孙磊, 蒋新, 周健民, 王代长, 孔德洋, 陶润先. 红壤中痕量五氯酚的气相色谱法测定. *分析化学*, 2003, 31(6):716-719.
- [15] 张逸飞, 钟文辉, 李忠佩, 蔡祖聪. 长期不同施肥处理对红壤性水稻土酶活性及微生物群落功能多样性的影响. *生态与农村环境学报*, 2006, 22(4):39-44.

CONTENTS

Influences of elevated ozone on growth and C, N, S allocations of rice	ZHENG Feixiang, WANG Xiaoke, HOU Peiqiang, et al (1479)
Coexistence, biodiversity and roles of ammonia-oxidizing archaea and anaerobic ammonium-oxidizing bacteria in deep soil layer of high nitrogen loaded paddy field	WANG Yu, ZHU Guibing, WANG Chaoyu, et al (1487)
The impact of interannual climate variability on the mean global vegetation distribution	SHAO Pu, ZENG Xiaodong (1494)
Labile and recalcitrant carbon and nitrogen pools of an alpine meadow soil from the eastern Qinghai-Tibetan Plateau subjected to experimental warming and grazing	WANG Bei, SUN Geng, LUO Peng, et al (1506)
The structure and species diversity of plant communities in ecological safety islands of urban Guangzhou	MO Dan, GUAN Dongsheng, HUANG Kangyou, et al (1515)
The growth pattern of <i>Pinus elliottii</i> Plantation in central subtropical China	MA Zeqing, LIU Qijing, WANG Huimin, et al (1525)
The effect of two wetland plants on nitrogen and phosphorus removal from the simulated paddy field runoff in two small-scale Subsurface Flow Constructed Wetlands	LIU Shuyuan, YAN Baixing, WANG Lixia (1538)
Effect of simulated nitrogen deposition on nutrient release in decomposition of several litter fractions of two bamboo species	TU Lihua, HU Tingxing, ZHANG Jian, et al (1547)
Ecological monitoring of bryophytes for mercury pollution in Danzhai Mercury Mine Area, Guizhou Province, China	LIU Rongxiang, WANG Zhihui, ZHANG Zhaohui (1558)
Influence of silt deposition and sand deposition on <i>Cynodon dactylon</i> population in low-water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir	LI Qiang, DING Wuquan, ZHU Qihong, et al (1567)
Seed production of <i>Spartina alterniflora</i> and its response of germination to temperature at Chongming Dongtan, Shanghai	ZHU Zhenchang, ZHANG Liquan, XIAO Derong (1574)
Effects of decomposition of mixed leaf litters of the <i>Castanopsis platyacantha</i> - <i>Schima sinensis</i> forest on soil organic carbon	ZHANG Xiaopeng, PAN Kaiwen, WANG Jinchuang, et al (1582)
Effects of desertification on soil respiration and ecosystem carbon fixation in Mu Us sandy land	DING Jinzhi, LAI Liming, ZHAO Xuechun, et al (1594)
The spatial distribution of soil organic carbon and its influencing factors in hilly region of the Loess Plateau	SUN Wenyi, GUO Shengli (1604)
Effects of interspecific interactions and nitrogen fertilization rates on above- and below- growth in faba bean/mazie intercropping system	LI Yuying, HU Hansheng, CHENG Xu, et al (1617)
Effects of supplemental irrigation based on measured soil moisture on nitrogen accumulation, distribution and grain yield in winter wheat	HAN Zhanjiang, YU Zhenwen, WANG Dong, et al (1631)
Anti-soil background capacity with vegetation biochemical component spectral model	SUN Lin, CHENG Lijuan (1641)
Spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin of <i>Hippophae rhamnoides</i> L in farming-pastoral zone from the two northern provinces of China	HE Xueli, CHEN Cheng, HE Bo (1653)
Study on optimum forest coverage for water conservation: a case study in Pingtonghe watershed (Pingwu section)	ZHU Zhifang, GONG Gutang, CHEN Junhua, et al (1662)
Spatial point analysis of fire occurrence and its influence factor in Huzhong forest area of the Great Xing'an Mountains in Heilongjiang Province, China	LIU Zhihua, YANG Jian, HE Hongshi, et al (1669)
Combustion efficiency of small-scale meadow fire in Daxinganling Mountains	WANG Mingyu, SHU Lifu, SONG Guanghui, et al (1678)
Community structure of demersal fish in Nature Reserve of <i>Acipenser sinensis</i> in Yangtze River estuary	ZHANG Tao, ZHUANG Ping, ZHANG Longzhen, et al (1687)
Behavioral responses of the Common Coots (<i>Fulica atra</i>) and other swimming birds to human disturbances	ZHANG Weiwei, MA Jianzhang, LI Jinbo (1695)
Effects of photoperiod on body mass, organ masses and energy metabolism in Chinese bulbul (<i>Pycnonotus sinensis</i>)	NI Xiaoying, LIN Lin, ZHOU Feifei, et al (1703)
Larval host types for the 3 rd <i>Helicoverpa armigera</i> in Bt cotton field from North China determined by $\delta^{13}\text{C}$	YE Lefu, FU Xue, XIE Baoyu, et al (1714)
Selectivity of <i>Frankliniella occidentalis</i> to vegetable hosts	YUAN Chengming, ZHI Junrui, CAO Yu, et al (1720)
Genetic structure of <i>Pine caterpillars</i> (<i>Dendrolimus</i>) populations based on the analysis of Cyt b gene sequences	GAO Baojia, ZHANG Xuwei, ZHOU Guona, et al (1727)
Pricing method and application effects of biogas slurry	ZHANG Changai, LIU Ying, CAO Man, WANG Yanqin, et al (1735)
Effects of compost from municipal solid waste on ecological characteristics and the quality of different turfgrass cultivars	ZHAO Shulan, LIAN Fei, DUO Li'an (1742)
Degradation kinetics and bioavailability of pentachlorophenol in paddy soil-rice plant ecosystem	WANG Shisheng, LI Depeng (1749)
Review and Monograph	
Concepts and techniques of landscape genetics	XUE Yadong, LI Li, WU Gongsheng, ZHOU Yue (1756)

2009 年度生物学科总被引频次和影响力因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响力因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响力因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生态学报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 6 期 (2011 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 6 2011

编辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出版	科学出版社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发行	科学出版社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许可证	京海工商广字第 8013 号		

