

长期不同施肥处理下有机质含量变化对土壤中多环芳烃降解的影响——以太湖地区黄泥土长期试验为例

韩晓君, 潘根兴, 李恋卿

(南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 江苏 南京 210095)

摘 要:采集太湖地区一个水稻土长期肥料试验定位监测田[化肥与秸秆配施(CFS)、化肥与猪粪配施(CFM)、单施化肥(CF)和不施肥(NF)]表层(0~15 cm)土壤样品,用高效液相色谱测定了原土中 16 种多环芳烃(PAHs)含量和培养下外加芘的含量变化。结果显示,无论是 PAHs 的土壤本底含量还是培养下外加芘残留量,在不同施肥处理间均呈现显著差异;相对于单施化肥(CF),化肥与有机肥配施下 PAHs 土壤降解能力显著提高。统计分析表明,增强的有机污染物降解能力与土壤有机质含量变化及其带来的微生物活性的变化有关。因此,长期实行有机无机配施有利于增强土壤的环境功能,促进生态系统健康。

关键词:长期试验;施肥处理;多环芳烃;污染物降解;有机质

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)12-2533-07

Effects of the Content of Organic Matter on the Degradation of PAHs: A Case of a Paddy Soil Under a Long-term Fertilization Trial from the Tai Lake Region, China

HAN Xiao-jun, PAN Gen-xing, LI Lian-qing

(Institute of Resources, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210095, China)

Abstract: In this paper we studied the four long-term fertilizer treatments of paddy soil, Taihu Lake region. The treatments include chemical fertilizer with straw return (CFS), chemical fertilizer plus pig manure (CFM), chemical fertilizers only (CF) and no fertilizer application (NF). The soil was sampled from 0~15 cm. This study measured the content of the original 16 kinds of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and residues of spiked pyrene in soil, using high-performance liquid chromatography. The results showed that the content of both the PAHs and residues of spiked pyrene in the soil had obvious differences among different treatments. Compared to CF, long-term fertilization regimes improved the degradation of PAHs significantly. Statistical analysis showed that the enhanced ability of organic pollutants degradation related to changes of organic matter and microbial activity. Therefore, long-term fertilization regimes may strengthen the environmental functions of soil, and promote ecosystem health.

Keywords: long-term test; fertilization treatment; polycyclic aromatic hydrocarbons; pollutant degradation; organic matter

施肥作为一项基本的农田生产管理措施,对土壤质量和生产力具有关键影响。长期不同施肥下土壤生产力变化及其与土壤养分和植物生长条件变化的关系已经有很多研究报道。水稻土是我国粮食生产的主要土壤^[1]。水稻生产中化肥施用量急剧上升,最近农业部门正在大力推广秸秆还田为主的有机质提升计划和配方施肥计划。我们已有的研究表明,长期化肥配

施秸秆和猪粪在提高土壤有机碳含量^[2]的同时,可显著提高水稻产量及其多年稳定性^[3]。潘根兴等最近研究表明,这种有机无机配合施肥下的生产力提高作用与其土壤有机质积累下微生物区系和活性的改善、氮素利用率提高的 C-N 耦合效应有关^[4]。尽管迄今为止对于稻田不同施肥下产量、有机质、团聚体组成和性质以及土壤微生物性质的变化有了较多研究^[5-8],并认识到良好的有机无机配合施肥下土壤微生物区系结构改善、多样性提高,土壤微生物功能活性得到促进^[2,9],但长期不同施肥处理下这种微生物活性和功能的变化是否影响土壤的有机污染物降解能力,这种

收稿日期:2009-09-22

基金项目:韩晓君(1982—),女,硕士,研究方向为土壤环境。

E-mail: hxj100@163.com

通讯作者:潘根兴 E-mail: pangenxing@yahoo.com.cn

影响是否依存于其有机质含量的变化?这是发展环境友好的固碳减排技术、促进农业生产可持续发展的基础科学问题。

本文在过去对太湖地区某水稻土不同施肥长期定位试验田对土壤养分和土壤生产力、土壤有机质和土壤微生物生物量及土壤生物多样性的研究^[2,3,9-20]基础上,采集不同施肥处理下土壤表土样品,进行原土多环芳烃本底残留量测定和室内培养下外加多环芳烃的降解残留测定,分析长期不同施肥对水稻土土壤有机污染物降解能力的影响及其与有机质含量和微生物活性变化的关系,为探索促进生产力和环境友好的固碳减排施肥管理技术提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与施肥处理

供试土壤采于太湖地区的一个水稻土长期肥料试验定位监测田,位于苏州市吴江市金家坝镇前厅村(N31°05'900",E120°46'924"),试验始于1987年。该地区年降雨量约1100 mm,土壤为潴育性水稻土(黄泥土),试验开始时耕层土壤(0~15 cm)pH(H₂O)为5.6,土壤粘粒(<2 μm)含量为302.9 g·kg⁻¹,阳离子交换量20.5 cmol(+)·kg⁻¹,有机碳含量为14.3 g·kg⁻¹。共设置4个不同施肥处理,分别是不施肥(NF)、单施化肥(CF)、化肥配施秸秆(CSF)和化肥配施猪粪(CMF)。

各个施肥处理情况及土壤基本性状如表1、2所示。

表1 长期试验的施肥处理

Table 1 Fertilization treatment a long-term trial

处理	施肥量/kgFW·hm ⁻² ·a ⁻¹				
	秸秆	猪灰	N	P ₂ O ₅	KCl
无肥(NF)	0	0	0	0	0
化肥(CF)	0	0	427.5	45.0	84.0
常规(CMF)	0	16 800	427.5	45.0	84.0
秸秆(CSF)	4 500	0	427.5	45.0	84.0

注:张平究等,2004。

表2 供试土壤的基本性状

Table 2 Basic properties of the studied soils

处理	pH(H ₂ O)	有机碳/ g·kg ⁻¹	微生物量碳/ mg·kg ⁻¹	香浓指数 Shannon's H
无肥(NF)	6.02	23.78	114.99	0.6
化肥(CF)	5.74	26.79	129.02	0.7
常规(CMF)	5.29	28.62	145.33	0.9
秸秆(CSF)	5.50	29.06	149.45	1.0

1.2 土壤样品的采集

供试土样于2008年5月23日油菜收割时采集。在田间按蛇形采样法每小区随机采集3点,采样深度为0~15 cm。土样盛于塑料自封袋,拣去作物残根和石砾等,自然风干,磨碎过2 mm筛储放于4℃冰箱中保存待用。四分法取少量过2 mm筛的风干土,进一步拣去可见作物残体和碎屑等,磨碎过0.15 mm筛备用。

1.3 培养试验

称取5.00 g风干土样于30 mL玻璃试管中,各试管中分别加入茈的甲醇贮备液,充分混匀,使茈的最终浓度为0.7 μg·g⁻¹土。将试管敞口2 h,使甲醇挥发,然后加入无菌水,保持水分为田间持水量的60%,用保鲜膜封口。将试管放入恒温恒湿培养箱,25℃±1℃黑暗培养,分别于第5 d、14 d、35 d、63 d取样进行提取测定。每处理均3次重复。

1.4 总多环芳烃及茈的提取、纯化和测定

总多环芳烃(PAHs)的提取、纯化参照宋玉芳^[21]报道的方法进行。称取5.000 0 g土样置于50 mL玻璃离心管中,加入10 mL二氯甲烷,超声提取30 min,3 000 r·min⁻¹离心10 min,收集上清液,再加入10 mL二氯甲烷继续超声提取30 min,3 000 r·min⁻¹离心10 min,上清液与上次合并,共提取3次,旋转蒸发至近干,用1 mL环己烷定容,取1/4过60~100目正己烷活化的硅胶柱,然后用5 mL二氯甲烷与正己烷(1:1)混合液洗脱,氮气吹干,色谱级乙腈1 mL定容。进一步进行高效液相色谱分析。

PAHs的测定:流动相为乙腈和水,初始V(乙腈):V(水)为60:40,然后有机相比比例线性上升,15 min后为100:0,11 min后回到初始状态。检测波长:2487UVDλ=254 nm;474SFD采用时间编程,0~6 min取λ_{ex}=270 nm,λ_{em}=330 nm;6~14 min取λ_{ex}=245 nm,λ_{em}=390 nm;14~26 min取λ_{ex}=290 nm,λ_{em}=430 nm。定性分析用PAHs标准化合物的保留时间进行比较,定量分析则用PAHs外标法测定。进行方法空白、基质加标、样品平行样和重复的测定,基质加标回收率茈为46.9%,其余为65.7%~105.16%,标准偏差为5.6%~10.0%。

茈的测定:流动相为80:20(体积分数)的乙腈:水,流速为1.0 mL·min⁻¹。检测波长:474SFDλ_{ex}=245 nm,λ_{em}=390 nm;2487UVDλ=254 nm^[22]。

1.5 土样基本性质测定

有机碳的测定采用重铬酸钾外加热法^[23],土壤pH值的测定采用电位法^[23]。土壤微生物量碳氮采用

CHCl₃ 熏蒸-K₂SO₄ 浸提法^[24],即称取预处理的湿润土壤每份 12.5 g(烘干基重)放入铝盒中,将其置于底部有少量水和去乙醇氯仿的真空干燥器中,抽真空后保持氯仿沸腾 3~5 min;然后,将干燥器移置在黑暗条件下 25 ℃熏蒸土壤 24 h,再次抽真空完全去除土壤中的氯仿。将熏蒸好的土壤转移到 200 mL 提取瓶中,加入约 50 mL 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 提取液(土水比为 1:4),振荡 30 min 后过滤。同时做未熏蒸空白和试剂空白,每份土样重复 3 次。浸提液中的微生物量 C 采用 TOC 测定,微生物量 N 采用开氏定 N 法。

1.6 数据处理和统计

数据处理采用 Microsoft Excel 2000,显著性检验在 SPSS 13.0 软件上进行,显著性差异假设 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 土壤中(PAHs)背景残留量变化

不同施肥处理下土壤本底多环芳烃单总量及其 16 种组分含量结果列于表 3。可以看出,不同施肥条件下土壤本底 PAHs 总量及单一组分含量都因施肥处理不同而变化。其中,土壤本底 PAHs 总量的变化范围介于 202~423 μg·kg⁻¹,处理间变异系数达 82%~110%,差异最大幅度达到 100%,猪粪区显著低于其

他处理;而 5 环以上组分总量介于 28~181 μg·kg⁻¹,处理间变异系数达 9~558%,差异最大幅度达~500%。5 环以上 PAHs 组分具有更大的环境风险,其总量变异幅度巨大,提示不同施肥不仅影响了 PAHs 的总残留水平,而且可能影响有毒芳烃的降解能力。荧蒽(FluA)在 PAHs 总量中所占比例较高,但在单施化肥小区中没有检测到。芘(PyR)也是 PAHs 的主要成分,其含量在不同施肥小区也有明显变化,特别是在无肥小区没有检测到。这些都提示土壤微生物的降解功能在不同施肥下出现了明显变化,而且降解不同组分 PAHs 的功能群的存在也出现了变化。

2.2 土壤培养中外加芘降解的变化

室内培养下外加芘在供试不同施肥处理土壤中的降解特点见表 4 及图 1。可以看出,前 5 d 降解较慢,5~14 d 降解明显加快,14~35 d 降解又趋于减慢,35 d 后降解更慢。在前 14 d 中,外加芘的降解 CF 下最弱,而培养 9 周后 NF 下表现最弱。降解动态的非线性拟合表明,芘在土壤中降解动态符合一级动力学方程($P<0.05$): $C=C_0e^{-kt}$ 。LSD 显著性检验发现,在培养期间 14 d 后,不同施肥处理间外加芘土壤残留量存在显著差异,外加芘降解半衰期依次为:CFS(25.20 d)<CFM(30.81 d)<CF(32.09 d)<NF(47.48 d)。有机无机

表 3 不同施肥条件下土壤中 16 个优先检测 PAHs 含量(μg·kg⁻¹)
Table 3 The content of the original 16 kinds of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs)
in soil under a long-term different fertilization trial(μg·kg⁻¹)

多环芳烃种类	NF	CF	CFM	CFS
萘(Nap)	ND	37.28±3.35	22.49±5.27	ND
亚二氢芘(AcP)	ND	ND	ND	ND
二氢芘(AcPy)	ND	ND	ND	ND
芴(Flu)	2.15±0.75	ND	ND	ND
菲(PhA)	1.51±0.44	1.41±0.54	0.89±0.61	1.00±0.56
蒽(AnT)	43.14±13.27	50.39±8.36	26.85±6.29	39.40±1.19
荧蒽(FluA)	210.51±19.32	ND	35.45±6.02	141.01±23.90
芘(PyR)	ND	43.38±6.13	59.9±11.06	117.49±21.04
苯并(a)蒽(BaA)	74.17±10.00	41.39±7.88	ND	50.17±6.90
屈(Chr)	6.22±0.35	24.8±2.15	25.48±2.95	29.81±1.84
苯并(b)荧蒽(BbF)	3.03±0.87	108.46±2.61	28.91±4.06	ND
苯并(k)荧蒽(BkF)	14.07±3.66	11.53±1.18	ND	12.54±1.80
苯并(a)芘(BaP)	ND	10.33±0.67	0.11±0.03	11.39±0.41
二苯并(a,h)蒽(DbA)	ND	39.43±4.03	1.06±0.10	9.92±1.62
苯并(g,h,j)芘(BghiP)	10.49±1.41	2.27±0.26	ND	2.07±0.22
茚并(1,2,3-cd)芘(In[1,2,3-cd]P)	ND	9.46±1.28	ND	8.42±1.95
ΣPAHs	365.29±30.12b	380.13±9.67ba	201.14±12.69c	423.21±20.46a
≥5rΣPAHs	27.59±3.54c	181.48±9.48a	30.07±4.08cb	44.34±1.80b

注:ND 为未检出,荧蒽最低检测限为 10 μg·kg⁻¹,芘最低检测限为 5 μg·kg⁻¹。

表 4 外加芘在黄泥土中的残留浓度和降解情况
Table 4 The condition of residues and degradation of spiked pyrene in the soil

处理	土壤中外加芘残留浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$				速率常数/ d^{-1}	半衰期/d	降解率/%
	5 d	14 d	35 d	63 d			
NF	$564.7\pm26.7\text{a}$	$302.3\pm21.6\text{b}$	$266.3\pm9.2\text{a}$	$256.1\pm17.8\text{a}$	0.0146	47.48	$63.41\pm2.28\text{c}$
CF	$626.0\pm20.7\text{a}$	$399.3\pm28.8\text{a}$	$202.3\pm2.6\text{b}$	$194.0\pm8.9\text{b}$	0.0216	32.09	$72.28\pm1.91\text{b}$
CFM	$627.8\pm33.2\text{a}$	$307.2\pm29.1\text{b}$	$197.5\pm2.0\text{b}$	$173.4\pm6.4\text{b}$	0.0225	30.81	$75.22\pm2.43\text{b}$
CFS	$613.7\pm27.1\text{a}$	$305.5\pm22.6\text{b}$	$140.0\pm3.8\text{c}$	$135.4\pm4.6\text{c}$	0.0275	25.20	$80.65\pm1.65\text{a}$

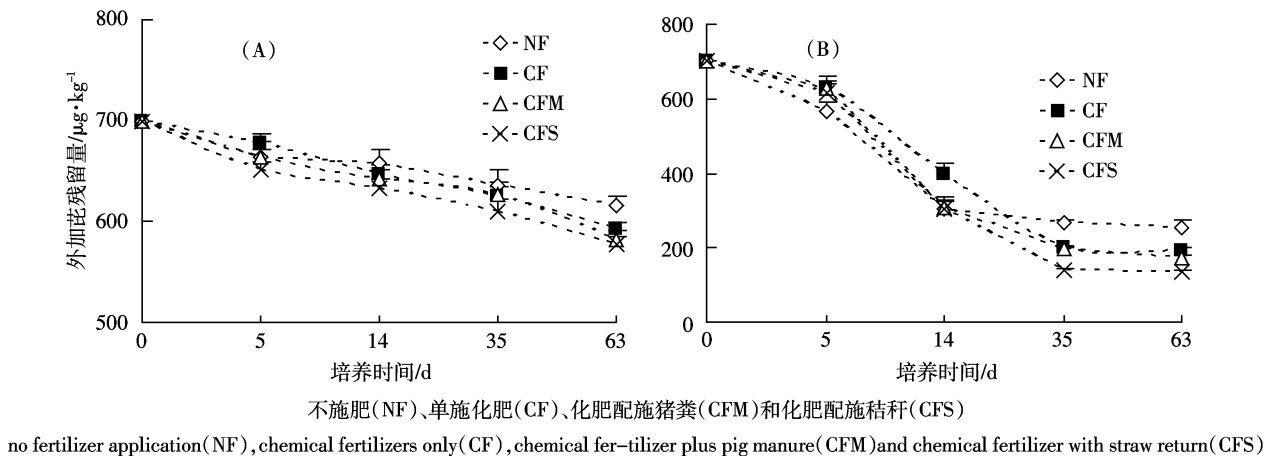


图 1 外加芘灭菌(A)和不灭菌(B)下降解动态
Figure 1 The degradation dynamics of applied Pyrene in sterilization(A) and no sterilization(B)

配施下半衰期比单施化肥下缩短 2~7 d, 降解率提高了 3%~24%。体现了长期不同施肥有机污染物生物降解出现显著差异。灭菌试验表明, 培养 9 周时 4 个处理降解率为 12.01%~17.51%, 非生物降解在整个培养期间仅占降解总量的 15.0%~26.0%。LSD 显著性检验发现, 培养 35 d、63 d 时均是无肥区降解率显著低于施肥区。

3 讨论

3.1 原土残留量与施肥处理

国内有不少学者研究报道了不同区域土壤中 PAHs 的含量情况。据陈来国等^[25]测定, 广州城郊菜地土壤中 PAHs 总量为 $68\sim3\,077\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 葛成军等^[26]报道, 南京市郊某钢铁企业附近农田土壤中 PAHs 总量为 $312.2\sim27\,580.9\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而远离污染源的天津蓟县山地表层土壤为 $961\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[27]。本研究所取的土壤中 PAHs 含量处于中低水平, 而就 4 个小区间 PAHs 的含量情况, 又有显著差异。

表 3 中 PAHs 总量上化肥配施猪粪区显著低于化肥区, 可见猪粪的施入更利于土壤降解多环芳烃, 这与谢文军等的研究结果相一致^[28]。就 $\geq 5\text{r}\Sigma\text{P}$ (表 3

最底行)而言, 化肥配施猪粪区、化肥配施秸秆区均显著低于化肥区, 也可说明有机无机肥配施有利于土壤微生物降解多环芳烃。因有机无机配施为微生物提供了充足的物质和能量。然而秸秆区 PAHs 总量却最高, 可能是一方面秸秆含有多环芳烃^[29], 另一方面秸秆腐解时产生多环芳烃^[30-31], 其中以三环、四环为主。化肥区 $\geq 5\text{r}\Sigma\text{PAHs}$ 最高, 可能是由于该区长期单独施用化肥, 造成土壤微生物多样性下降, 生物性状和生化功能衰减, 导致土壤生物质量退化, 降解多环芳烃的能力下降所致。在无肥区芘没有检测到, 可能由于在没有施肥基础上, 外界的物质带进去的很少, 以致低于检测限。芘在化肥区没有检测到, 其原因有待进一步研究。不过 ΣPAHs 及 $\geq 5\text{r}\Sigma\text{PAHs}$ 与有机质含量、微生物量碳间无显著相关性。单一 PAH 与 PAH 总量规律不完全一致。是由于土壤中有有机质对 PAH 行为的影响是多方面的, 非极性 PAH 极易与其结合, 使得土壤中生物有效态的量降低, 降解变慢, PAH 在土壤中的残留期延长; 另一方面有机质的增加又可为微生物提供更多的物质和能量, 增强了微生物降解 PAH 的能力。这两个过程同时存在, 而不同的 PAH 在这两个过程中, 哪个占主导表现各异^[32]。

3.2 外加芘降解与土壤性质及施肥处理

有机污染物在土壤中的残留水平取决于土壤降解能力,尤其是生物降解。多环芳烃的生物降解由第1个环发生二羟基化和开环开始,进一步降解为丙酮酸和 CO_2 之后第2个环以同样方式分解,小分子多环芳烃是一类相对较容易被微生物降解的有机污染物,其降解效率随苯环数目的增加而减低,环数越多则越难降解,菲>芘>蒽、蒽>荧蒽>苯并蒽;双环和三环PAHs最容易被降解,而五环、六环PAHs却很难被生物降解^[33-34]。这种能力主要受土壤微生物群落大小与活性的控制^[28]。我们已有的研究说明长期施肥使土壤微生物种群结构与活性产生了明显变化。相关分析表明,63 d时降解率与有机质间显著性检验 $R^2=0.7914$ ($P<0.05$)。生物降解芘量与有机质、微生物量碳和香浓指数呈正相关(图2)。结果揭示,不同施肥处理影响了微生物活性及可能的降解菌活性和区系的差异,进而导致芘残留量的差异,这与张慧等研究结果相符^[35]。

这里的结果表明,化肥配施有机肥因提高了土壤有机质含量而改善了土壤微生物活性和提高了微生物多样性,促进了土壤微生物降解功能的提高。有关研究显示,土壤中有些菌产生一些酶,如白腐菌产生的 *Pleurotus ostreatus*, 这些酶可促进有机污染物降解,而有机无机配施可使这些酶的活性增强5~20倍^[36]。另外,有机质组分中的胡敏酸、富啡酸等大分子上的羧基和酚羟基等能与芘形成氢键或改变分子空间结构,因而增加有机质含量下微生物降解过程可能进一步加快^[37]。

4 结论

不同施肥处理对土壤中的PAHs含量有明显影响,相对于单施化肥,化肥与有机肥配施有利于提高

土壤降解PAHs的能力,尤其是秸秆还田。而其实质是土壤经长期不同施肥处理后,微生物数量及种群结构都存在差异,以致微生物降解PAHs的能力出现差异。长期有机无机配施相对于单施化肥在改善土壤化学性状的同时,土壤微生物代谢功能多样性指数及利用碳源的能力也有一定程度的提高,这样有利于微生物降解PAHs。

参考文献:

- [1] 潘根兴,赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家粮食安全[J]. 地球科学进展, 2005, 20(4): 582-592.
PAN Gen-xing, ZHAO Qi-guo. Study on evolution of organic carbon stock in agricultural soils of China: Facing the challenge of global change and food security[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2005, 20(4): 582-592.
- [2] 周萍,张旭辉,潘根兴. 长期不同施肥对太湖地区黄泥土总有机碳及颗粒态有机碳含量及深度分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6): 765-771.
ZHOU Ping, ZHANG Xu-hui, PAN Gen-xing. Effect of long-term fertilization on content of total and particulate organic carbon and their depth distribution of a paddy soil: An example of huangnitu from the Tai Lake region, China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(6): 765-771.
- [3] 张平究,李恋卿,潘根兴,等. 长期不同施肥下太湖地区黄泥土表土微生物碳氮量及基因多样性变化[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2818-2824.
ZHANG Ping-jiu, LI Lian-qing, PAN Gen-xing, et al. Influence of long-term fertilizer management on topsoil microbial biomass and genetic diversity of a paddy soil from the Tai Lake region, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2818-2824.
- [4] PAN Gen-xing, ZHOU Ping, LI Zhi-peng. Combined inorganic/organic fertilization enhances N efficiency and increases rice productivity through organic carbon accumulation in a rice paddy from the Tai Lake region, China[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2009, 131: 274-280.
- [5] PAN Gen-xing, Pete Smith, PAN Wei-nan. The role of soil organic

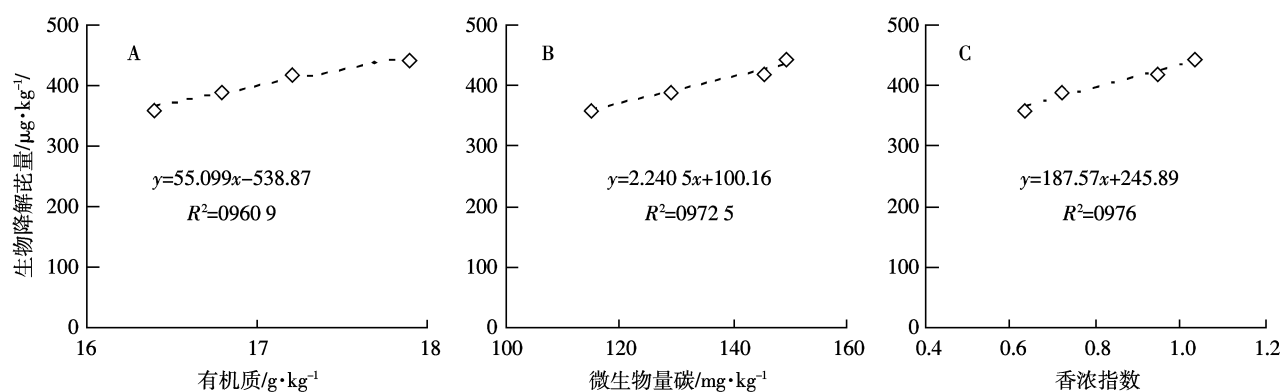


图2 不同施肥处理土壤中的生物降解芘量与其有机质(A)、微生物生物量碳(B)和香浓指数(C)的关系

Figure 2 The correlation between Pyrene biodegradation amount and TOC(A), SMBC(B), Shannon's H(C) under different fertilization treatment

- treatment in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009(129):344–348.
- [6] WEI Chao-fu, GAO Ming, SHAO Jin-gan. Soil aggregate and its response to land management practices[J]. *China Particology*, 2006:211–219.
- [7] GAO Jian-feng, PAN Gen-xing, JIANG Xiao-san. Land-use induced changes in topsoil organic carbon stock of paddy fields using MODIS and TM/ETM analysis: A case study of Wujiang County, China [J]. *Environmental Sciences*, 2008(20):852–858.
- [8] PAN Gen-xing, WU Lao-sheng, LI Lian-qing. Organic carbon stratification and size distribution of three typical paddy soils from Taihu Lake region, China[J]. *Environmental Sciences*, 2008(20):456–463.
- [9] 郑聚锋, 张平究, 潘根兴, 等. 长期不同施肥下水稻土甲烷氧化能力及甲烷氧化菌多样性的变化[J]. *生态学报*, 2008, 28(10):4864–4872. ZHENG Ju-feng, ZHANG Ping-jiu, PAN Gen-xing, et al. Effect of long-term different fertilization on methane oxidation potential and diversity of methanotrophs of paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10):4864–4872.
- [10] 邱多生, 李恋卿, 潘根兴, 等. 长期不同施肥下太湖地区黄泥土肥力的变化[J]. *土壤肥料*, 2005(4):28–32. QIU Duo-sheng, LI Lian-qing, PAN Gen-Xing, et al. Change of soil fertility under long-term different fertilization practices in a paddy soil from the Tai Lake region[J]. *Soil and Fertilizer*, 2005(4):28–32.
- [11] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 长期施肥对水稻土颗粒有机碳和矿物结合态有机碳的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(1):353–360. YUAN Ying-hong, LI Hui-xin, HUANG Qian-ru, et al. Effects of long-term fertilization on particulate organic carbon and mineral organic carbon of the paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1):353–360.
- [12] 彭佩钦, 仇少君, 童成立, 等. 长期施肥对水稻土耕层微生物生物量氮和有机氮组分的影响[J]. *环境科学*, 2007, 28(8):1816–1821. PENG Pei-qin, QIU Shao-jun, TONG Cheng-li, et al. Effects of long-term application of fertilizers on soil microbial biomass nitrogen and organic nitrogen components in subtropical paddy soils[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(8):1816–1821.
- [13] 李儒海, 强 胜, 邱多生, 等. 长期不同施肥方式对稻油轮作制水稻田杂草群落的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(7):3236–3243. LI Ru-hai, QIANG Sheng, QIU Duo-sheng, et al. Effects of long-term fertilization regimes on weed communities in paddy fields under rice-oilseed rape cropping system[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(7):3236–3243.
- [14] 董长勋, 李恋卿, 王 芳, 等. 黄泥土对铜的吸附解吸及其 pH 变化[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(2):521–525. DONG Chang-xun, LI Lian-qing, WANG Fang, et al. Sorption-desorption of Cu^{2+} by paddy soil and the pH change of equilibrium solution[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2007, 26(2):521–525.
- [15] 李儒海, 强 胜, 邱多生, 等. 长期不同施肥方式对稻油两熟制油菜田杂草群落多样性的影响[J]. *生物多样性*, 2008, 16(2):118–125. LI Ru-hai, QIANG Sheng, QIU Duo-sheng, et al. Effects of long-term different fertilization regimes on the diversity of weed communities in oilseed rape fields under rice-oilseed rape cropping system [J]. *Biodiversity Science*, 2008, 16(2):118–125.
- [16] 周 萍, 潘根兴. 长期不同施肥对黄泥土水稳性团聚体颗粒态有机碳的影响[J]. *土壤通报*, 2007, 38(2):256–261. ZHOU Ping, PAN Gen-xing. Effect of different long-term fertilization treatments on particulate organic carbon in water-stable aggregates of a paddy soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(2):256–261.
- [17] 董长勋, 李恋卿, 王 芳, 等. 水稻土微团聚体吸附磷后对 Cu^{2+} 吸附与解吸的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2006, 29(4):75–79. DONG Chang-xun, LI Lian-qing, WANG Fang, et al. Effect of phosphate on the sorption and desorption of Cu^{2+} by size fractions of micro-aggregates in paddy soil[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2006, 29(4):75–79.
- [18] 冯 伟, 潘根兴, 强 胜, 等. 长期不同施肥方式对稻油轮作田土壤杂草种子库多样性的影响[J]. *生物多样性*, 2006, 14(6):461–469. FENG Wei, PAN Gen-xing, QIANG Sheng, et al. Influence of long-term fertilization on soil seed bank diversity of a paddy soil under rice/oilseed rape rotation[J]. *Biodiversity Science*, 2006, 14(6):461–469.
- [19] 向昌国, 张平究, 潘根兴, 等. 长期不同施肥下太湖地区黄泥土蚯蚓的多样性、蛋白质含量与氨基酸组成的变化[J]. *生态学报*, 2006, 26(6):4753–4761. XIANG Chang-Guo, ZHANG Ping-Jiu, PAN Gen-Xing, et al. Changes in diversity, protein content and amino acid composition of earthworms from a paddy soil under long-term different fertilizations in the Tai Lake Region, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6):4753–4761.
- [20] 丁爱芳, 潘根兴, 张旭辉. 吴江市水稻土中多环芳烃(PAHs)含量及来源的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(6):1166–1170. DING Ai-fang, PAN Gen-xing, ZHANG Xu-hui. Contents and origin analysis of pahs in paddy soils of wujiang county[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2005, 24(6):1166–1170.
- [21] 宋玉芳. 土壤、植物样品中多环芳烃分析方法研究[J]. *应用生态学报*, 1995, 6(2):56–59. SONG Yu-fang. Studies on the analysis method of polynuclear aromatic hydrocarbons in soils and plants[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6(2):56–59.
- [22] 李久海, 潘根兴. 外加茈在 2 种水稻土及其团聚体培养中的老化及其可浸提性和生物有效性的变化 [J]. *环境科学*, 2005, 26(6):131–136. LI Jiu-hai, PAN Gen-xing. Aging of spiked pyrene in two paddy soils and their particle-size fractions after soil incubation and changes in extractability and bio-availability to earthworm[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(6):131–136.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 1999. LU Ru-kun. Soil argrochemistry analysis protocols [M]. Beijing:China Agriculture Science Press, 1999.
- [24] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 703–707.
- [25] 陈来国, 冉 勇, 麦碧娴, 等. 广州周边菜地中多环芳烃的污染现状[J]. *环境化学*, 2004, 23(3):341–344.

- CHEN Lai-guo, RAN Yong, MAI Bi-xian, et al. Pollution situation of polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetable soils around Guangzhou[J]. *Environmental Chemistry*, 2004, 23(3):341-344.
- [26] 葛成军, 安 琼, 董元华. 钢铁工业区周边农业土壤中多环芳烃(PAHs)残留及评价[J]. 农村生态环境, 2005, 21(2):66-69.
- GE Chen-gjun, AN Qiong, DONG Yuan-hua. Residue and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in soils around a steel mill[J]. *Rural Eco-environment*, 2005, 21(2):66-69.
- [27] 陈 静, 王学军, 陶 澍, 等. 天津地区土壤多环芳烃在剖面中的纵向分布特征[J]. 环境科学学报, 2004, 24(2):286-290.
- CHEN Jing, WANG Xue-jun, TAO Shu, et al. Vertical distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils in tianjin area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(2):286-290.
- [28] 谢文军, 周健民, 王火焰, 等. 不同施肥条件下氯氰菊酯对土壤酶活性的影响及其降解差异[J]. 水土保持学报, 2006, 20(4):127-131.
- XIE Wen-jun, ZHOU Jian-min, WANG Huo-yan, et al. Cypermethrin on soil enzymatic activity and its degradation in different fertilization soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(4):127-131.
- [29] Ivana Eichlerová, Ladislav Homolka, František Nerud. Screening of *Pleurotus ostreatus* isolates for their ligninolytic properties during cultivation on natural substrates[J]. *Biodegradation*, 2000, 11:279-287.
- [30] 吴景贵, 席时权, 曾广赋, 等. 玉米秸秆腐解过程的红外光谱研究[J]. 土壤学报, 1999, 36(1):91-100.
- WU Jing-gui, XI Shi-quan, ZENG Guang-fu. Study on decomposed corn straw residue by fourier transform infrared spectroscopy[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(1):91-100.
- [31] 王雅琴, 左 谦, 焦杏春, 等. 北京大学及周边地区非取暖期植物叶片中的多环芳烃[J]. 环境科学, 2004, 25(4):23-27.
- WANG Ya-qin, ZUO Qian, JIAO Xing-chun, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in plant leaves from peking university campus and nearby in summer season[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(4):23-27.
- [32] 沈德中. 污染环境的生物修复[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 18-124.
- SHEN De-zhong. Bioremediation of contaminated environment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002:18-124.
- [33] Barbara M K. The effect of temperature on the rate disappearance of PAHs from soil[J]. *Environmental Pollution*, 1993, 79(1):215-220.
- [34] Mahro B, Kastner M. Mechanisms of microbial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in soil 2 compost mixtures[C]// Arendt F, Annokke G J, Bosman R, et al(eds.), Contaminated Soil' 93, Vol. 2. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1993:1249-1256.
- [35] 张 慧, 党 志, 姚丽贤, 等. 镉砷单一污染和复合污染对土壤微生物生态效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6):2225-2230.
- ZHANG Hui, DANG Zhi, YAO Li-xian, et al. Eco-toxicological effect of cadmium and pyrene combined and simplex pollution on soil microbe[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(6):2225-2230.
- [36] Čeněk Novotný, Pavla Erbanová, Václav Šášek. Extracellular oxidative enzyme production and PAH removal in soil by exploratory mycelium of white rot fungi[J]. *Biodegradation*, 1999, 10:159-168.
- [37] Wang X, Bartha R. Effect bioremediation aromatic hydrocarbon residues in soil[J]. *Environ Sci Technol*, 1990, 24:1086-1089.