

6 000 年以来水稻土剖面中多环芳烃的分布特征及来源初探*

李久海 董元华[†] 曹志洪 王辉 安琼
胡正义 杨林章 林先贵 尹睿

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)
(2 南京土壤研究所-香港浸会大学土壤与环境联合开放实验室, 南京 210008)

摘要 研究了多环芳烃(PAHs)在含6 000 a(马家浜文化时期)古水稻土的土壤剖面中的分布特征,并对其可能来源进行了分析。结果显示,各层土壤中PAHs的总量在25.9~202.9 $\mu\text{g kg}^{-1}$ 之间,并主要富集在表层土壤,其中含量较高的化合物及其大小顺序为Nap > Phe > Fla > Pyr,4环以上的PAHs占总量的51.8%。表层以下各层土壤中PAHs含量大幅降低,检出种类也有所减少,并主要以2、3环化合物为主,古水稻土中4环以上的芳烃也占有一定的比例,达37%。聚类分析和主成分分析表明,Chr、BkF、BaA、IcP、BbF、Pyr、BaP、DaA和Fla等化合物主要是人为产生,Flu和Phe由生物合成,而Nap、BgP和Ant则可能来源于人为产生和生物合成的共同作用。

关键词 多环芳烃;古水稻土;剖面;分布;来源
中图分类号 X523 **文献标识码** A

多环芳烃(PAHs)是目前较受关注的一类持久性有机污染物,它们既可产生于某些自然过程,也可来自人类的各种活动,在环境中广泛存在^[1,2]。土壤作为一种重要的环境介质,承担着90%以上的PAHs环境负荷^[3]。国内外对土壤中的PAHs进行了大量的研究^[4~7],但多数工作集中于表层土壤,深层分布研究较少^[8],而有关PAHs在含有古水稻土的土壤剖面中的纵向分布情况更未见报道。

苏州是长江三角洲地区近年来发展较快的城市之一,土壤中的有机污染物已引起关注^[9],同时苏州也是一座历史文化名城,境内分布着较多的马家浜文化(距今约6 000 a)遗迹。2003年12月,在绰墩山马家浜文化遗址第6次发掘现场,采集了部分含古水稻土的剖面土样。本研究主要是了解古水稻土剖面中多环芳烃的含量及分布特征,并对其可能的来源进行探讨。

1 材料与方法

1.1 样品采集与制备

2003年12月在江苏省昆山市绰墩山马家浜文

化遗址发掘现场(31°24'07"N,120°50'41"E)选取一个含有古水稻土的剖面,由底向上分层采取土壤样品,表层水稻土为黄泥土(筒育水耕人为土,Hapli-Stagnic Anthrosols)。有关考古分析显示,100~116 cm土壤层中水稻植硅体含量高达105 159个 g^{-1} 土,远远高于水稻土的判定标准(水稻植硅体大于5 000个 g^{-1} 土),另对其中的碳化稻粒进行¹⁴C测定,年龄为5 903 a,确认此层土壤为6 000年前马家浜文化时期的农业遗迹^[10]。该地区地下水位在1 m左右。为避免人为污染,采样时剥去每层的外表面土壤,采取里面部分装于具有磨口塞的玻璃瓶中带回实验室。样品覆以硫酸纸在黑暗中风干后,磨碎过1 mm筛,冰柜中-18℃保存备用。土壤有机碳、pH值及CEC分析测定参照文献^[11]。采样点位置如图1所示,供试土壤的有关特性见表1。

1.2 PAHs的提取及测定

准确称取10.0 g土壤,以60 ml二氯甲烷索氏提取18 h(回流速率为6~8次 h^{-1});提取液旋转蒸发浓缩,并将溶剂逐渐替换为环己烷1~2 ml,过硅胶柱纯化:用正己烷-二氯甲烷(1:1)混合液淋洗,弃去部分滤液后,

* 国家自然科学基金重点项目(DO115-40335047)资助

[†] 通讯作者, E-mail: yhdong@issas.ac.cn

作者简介:李久海(1971~),男,博士后,主要研究方向为土壤环境化学

收稿日期:2005-09-28;收到修改稿日期:2005-12-27

收集剩余部分,旋转蒸发浓缩后,缓和 N₂ 气流吹至近

干,用乙腈定容 1 ml, HPLC 测定。每样 2 次重复。

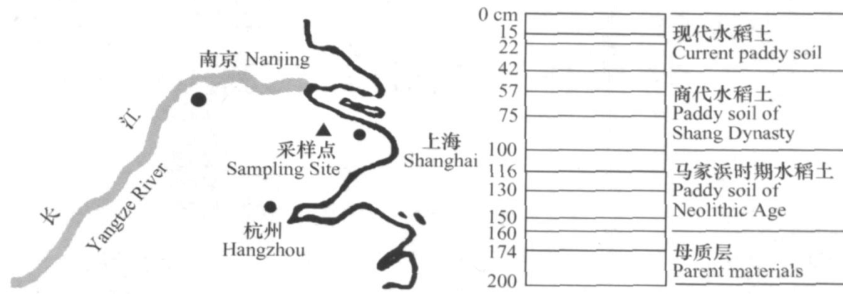


图 1 采样点位置及采样剖面示意图

Fig. 1 Location of the sampling site and profile of the ancient paddy soil

表 1 供试土壤的理化性质

Table 1 Selected properties of the soil samples

深度 Depth (cm)	有机碳 Organic carbon (g kg ⁻¹)	pH	CEC (cmol kg ⁻¹)	植硅体 Rice opal (个 g ⁻¹ 土)
0~15	20.52	5.24	19.13	19 476
15~22	10.12	5.80	18.92	17 093
22~42	9.89	5.82	17.73	14 147
42~57	9.75	5.37	17.51	25 271
57~75	7.72	5.30	19.78	11 477
75~100	13.40	5.57	23.24	3 542
100~116	22.31	5.85	28.21	105 159
116~130	18.26	5.90	24.00	64 007
130~150	19.68	5.86	18.92	17 327
150~160	17.20	5.75	20.86	19 678
160~174	10.70	5.71	16.11	0
174~200	4.00	5.35	24.11	0

本试验主要检测了 16 种美国环保总署 (US EPA) 优控 PAHs, 即萘 (Nap)、蒽 (Acl)、芘 (Ace)、芴 (Flu)、菲 (Phe)、蒹 (Ant)、荧蒹 (Fla)、芘 (Pyr)、苯并 (a) 蒹 (BaA)、苯并 (k) 荧蒹 (BbF)、苯并 (k) 荧蒹 (BkF)、苯并 (a) 芘 (BaP)、二苯并 (a, h) 蒹 (DaA)、苯并 (g, h, i) 芘 (BgP)、茚并 (1, 2, 3-c, d) 芘 (IcP)。HPLC 分析条件: Waters 2 695 配备荧光检测器, 激发和发射波程序变化, 以获得待测组分的最小响应值; 分析柱为 Waters PAH 分析专用柱 (Waters PAH C₁₈, 5 μm, 4.6 × 250 mm); 流动相为乙腈和水, 梯度洗脱; 外标法定量。各化合物的最低检测限在 0.04 μg kg⁻¹ (BaA 和 BaP) 到 1.15 μg kg⁻¹ (Nap) 之间 (表 2)。由于 Acl 无荧光特性, 故只获得 15 种 PAHs 测定值, 结果以土壤干重计算。另对部分样品进行了 GC-MS-MS (Varian, USA) 检测, 验证了检出组分的可靠性。

1.3 数据分析

实验数据用 SPSS 统计软件进行分析。

2 结果与讨论

2.1 PAHs 在剖面中的含量及分布

剖面不同层次土壤中的 15 种多环芳烃的总量及单体化合物的含量见表 3。

各层土壤中 PAHs 总量在 25.9 ~ 202.9 μg kg⁻¹ 之间, 表层土壤的含量最高, 其下各层土壤中的含量均大幅下降, 这表明 PAHs 主要富集在土壤的表层。表层土壤与下面各层土壤不仅 PAHs 总量存在差异, 而且检出的 PAHs 的组成也有所不同。除 Ace 各层均未检出外, 其余 14 种多环芳烃在表层土壤中均有不同程度的检出, 含量较高的几种化合物及其大小顺序为 Nap > Phe > Fla > Pyr > BgP > Chr > BaP = IcP > BaA >

BbF > BkF, 4 环以上的多环芳烃占总量的 51.8%, 这一结果与其他报道相似^[12,13]。其中 Fla、Pyr、Chr、BaP 等被认为是典型的燃烧产物^[14], 因此表层土壤中的多环芳烃可能主要来源于燃烧排放, Nap 和 Phe 也可能部分来源于生物合成^[15]。第二层中多环芳烃的组分与表层相似, 但含量较低, 化合物种类只检出 12 种, 4 环以上的 PAHs 比例也只有 27.1%; 其余各层检出的化合物种类都有不同程度的减少 (12 种), 高环 (4 环) 芳烃的比例仅占 10% 左右; 但马家浜文化时期的古水稻土 (100 ~ 116 cm) 中检出 12 种多环芳烃,

相对较多, 高环芳烃也占有一定的比例, 达到 37%, 含量较高的 4 种化合物为 Nap、Phe、BgP 和 Pyr, 特征化合物分子比例及土壤有机质¹³C-NMR 分析显示, 该层土壤中 PAHs 可能主要来源于古代稻草的焚烧及厌氧条件下的生物合成^[16]。在所检测的 15 种 PAHs 中, Nap 水溶性相对最大, 随水分或水溶性有机质向下迁移的可能性也最大, 但在第三层和第六层中 Nap 没有检出, 可排除表层淋溶迁移对多环芳烃在剖面第三层以下土壤中的分布的影响。各层土壤中多环芳烃组成上的差异表明其有不同的来源。

表 2 15 种 PAHs 缩写、回收率及最低检出限

Table 2 Abbreviations, recoveries and lowest detectable limits of 15 PAHs

化合物 Compound	缩写 Abbreviation	回收率 Recovery (%)	最低检出限 Lowest detectable limit ($\mu\text{g kg}^{-1}$)
萘 Naphthalene	Nap	35.5	1.15
蒽 Acenaphthene	Ace	87.6	0.47
芴 Fluorene	Fle	87.7	0.09
菲 Phenanthrene	Phe	90.5	0.05
蒎 Anthracene	Ant	73.2	0.06
荧蒽 Fluoranthene	Fla	99.7	0.08
芘 Pyrene	Pyr	54.8	0.08
苯并(a)蒽 Benzo(a)anthracene	BaA	106.0	0.04
䝑 Chrysene	Chr	87.6	0.05
苯并(b)荧蒽 Benzo(b)fluoranthene	BbF	92.3	0.09
苯并(k)荧蒽 Benzo(k)fluoranthene	BkF	85.6	0.05
苯并(a)芘 Benzo(a)pyrene	BaP	100.2	0.04
二苯并(ah)蒽 Dibenzo(ah)anthracene	DaA	91.7	0.09
苯并(ghi)䝑 Benzo(ghi)perylene	BgP	75.4	0.11
茚并(1,2,3-cd)芘 Indeno(1,2,3-cd)pyrene	IcP	85.6	0.05

表 3 古水稻土剖面各层土壤中多环芳烃的含量

Table 3 PAHs concentrations in the ancient paddy soil profile ($\mu\text{g kg}^{-1}$)

深度 Depth (cm)	Nap (2) ¹⁾	Ace (3)	Flu (3)	Phe (3)	Ant (3)	Fla (4)	Pyr (4)	BaA (4)	Chr (4)	BbF (5)	BkF (5)	BaP (5)	DaA (5)	BgP (6)	IcP (6)
0 ~ 15	61.0	nd ²⁾	4.6	30.8	1.5	20.4	17.1	8.1	12.3	7.1	6.0	9.3	2.1	13.3	9.3
15 ~ 22	21.7	nd	5.7	28.4	0.9	6.4	6.42	1.3	2.1	1.6	1.2	0.5	nd	nd	1.6
22 ~ 42	nd	nd	7.5	31.1	0.4	nd	nd	0.2	0.8	0.9	0.4	0.3	nd	nd	0.5
42 ~ 57	34.2	nd	9.3	23.9	0.6	nd	nd	0.2	1.0	1.4	0.5	nd	nd	3.2	0.6
57 ~ 75	18.7	nd	7.5	26.9	nd	nd	nd	0.1	0.5	0.5	0.3	nd	nd	3.0	nd
75 ~ 100	nd	nd	4.9	18.0	nd	nd	nd	0.1	0.4	0.4	0.3	0.1	nd	1.7	nd
100 ~ 116	22.7	nd	0.2	10.6	1.8	nd	5.6	1.5	1.5	1.8	1.3	1.0	nd	6.1	1.9
116 ~ 130	20.2	nd	4.0	10.3	nd	nd	nd	0.1	0.3	0.8	0.4	nd	nd	2.5	nd
130 ~ 150	28.5	nd	7.7	13.7	0.7	nd	nd	0.6	0.6	0.8	0.4	0.3	nd	3.3	nd
150 ~ 160	34.1	nd	8.2	17.6	0.4	nd	nd	0.1	0.5	0.7	0.3	nd	nd	2.4	nd
160 ~ 174	23.8	nd	8.0	12.1	1.4	nd	nd	0.2	0.8	0.6	0.4	nd	nd	3.2	nd
174 ~ 200	10.8	nd	7.4	16.7	nd	nd	nd	0.3	0.3	nd	nd	nd	nd	nd	nd

1) 括号内的数字为该化合物所含的苯环数 Rings of PAHs; 2) 未检测出 Not detectable

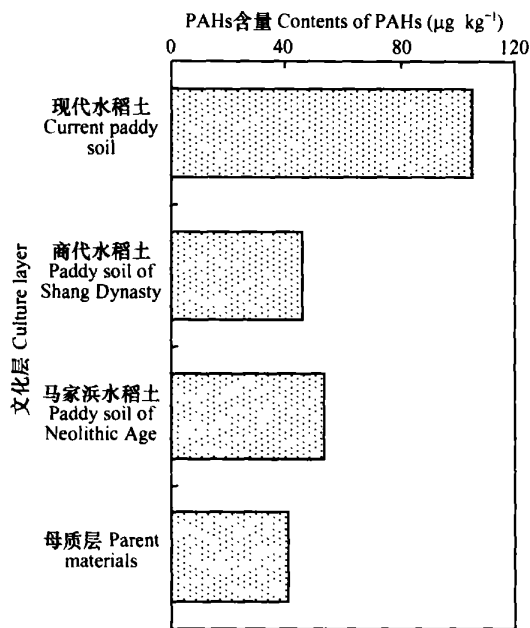


图2 古水稻土剖面中不同文化层中多环芳烃的平均含量

Fig. 2 Average PAHs contents in different culture layers in the ancient paddy soil profile

考古工作者从历史文化的角度将剖面划分为4个层次,即现代水稻土层(0~42 cm)、商代水稻土层(42~100 cm)、马家浜文化时期水稻土层(100~160 cm)和母质层(160~200 cm)。根据这种分层方法,对相应土壤层中的PAHs含量进行了加权平均计算,各文化层中的PAHs的含量如图2所示。现代水稻土层中的PAHs含量明显高于其下的3个层次,马家浜文化时期水稻土层中的PAHs略高于商代水稻土层及母质层中的含量,这可能是由于古代“刀耕火种”耕作方式如焚烧秸秆的影响^[16],但其含量仍接近于工业化前土壤中PAHs的水平^[17]。这说明古代的人类活动虽使土壤中的PAHs含量有所增加,但贡献很小,而现代人类活动,特别是化石燃料的燃烧加剧了环境中多环芳烃的输入和累积。

2.2 PAHs来源

为了更好地了解多环芳烃的来源,本研究对土壤剖面中多环芳烃的分布特征进行了主成分分析及聚类分析。

图3表示了各化合物在二个主因子中的载荷系数分布。以特征值大于1作为产生主因子的标准,这二个主因子解释了总方差的88.1%。图中I区的化合物在第一主因子中的载荷系数都较大,这些

化合物主要包括Nap、Fla、Pyr、BaA、Chr、BbF、BkF、BaP、DaA和IcP等,其中BaP是化石燃料和其他有机物料燃烧的主要产物之一,其余几种化合物也多由燃烧产生^[14],因此第一主因子可概括为“人为产生”。区中主要有Flu和Phe两种多环芳烃,在第二主因子中载荷系数分别为0.76和0.77。据Thiele和Brummer^[18]报道,土壤中加入可分解的植株物料后,在厌氧条件下能产生3~6环的多环芳烃,较早的研究也表明,厌氧条件下较有利于土壤中Nap、Phe等化合物的生物合成^[19,20]。本研究的剖面地下水位在1m左右,长期处于还原状态,即使是表层水稻土,一年之中也有较长的淹水期,从而为某些多环芳烃的生物合成提供了较为合适条件,因此可认为Flu和Phe可能来源于“生物合成”。区中仅Ant一种化合物,在二个主因子中的载荷系数比较接近,受它们的共同影响,Ant既可能是“人为产生”也可能由“生物合成”。

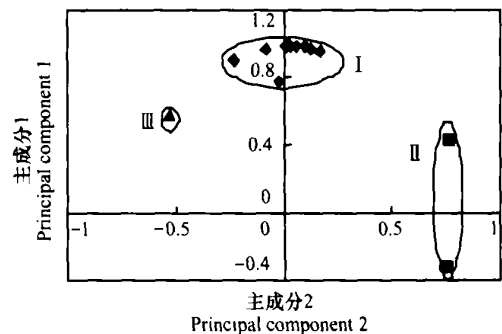
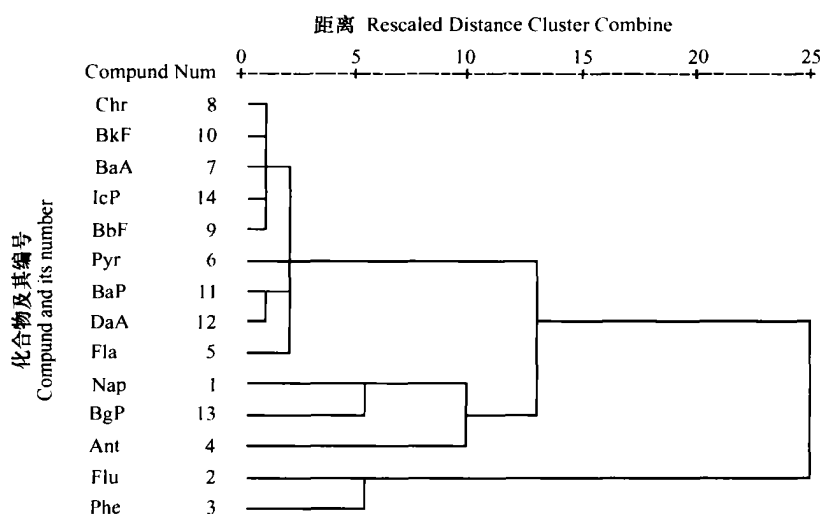


图3 剖面中多环芳烃来源主成分分析结果

Fig. 3 Identification of PAHs sources in the soil profile using the principal component analysis method

对剖面中PAHs进行的聚类分析也得到了相似的结果。由图4可以看出,PAHs可分为两大类:第一大类又可分为二类,其中第一类包含Chr、BkF、BaA、IcP、BbF、Pyr、BaP、DaA和Fla等,这一类主要是“人为产生”的化合物;第二类主要有Nap、BgP和Ant,它们既可能是“人为产生”也可能由“生物合成”。第二大类包括Flu和Phe,主要来自“生物合成”。

Atanassova和Brummer^[14]运用主成分分析和聚类分析对西欧的一个由崩积作用形成的土壤剖面中的多环芳烃的来源进行了分析,得出与本研究类似的结论。可见,主成分分析结合聚类分析对解析土壤环境中有机污染物的来源有一定的帮助。



注:萘 Nap, 芴 Flu, 菲 Phe, 蒽 Ant, 荧蒽 Fla, 芘 Pyr, 苯并 a 蒽 BaA, 蒾 Chr, 苯并(b)荧蒽 BbF, 苯并(k)荧蒽 BkF, 苯并(a)芘 BaP, 二苯并(a,h)蒽 DaA, 苯并(g,h,i)芘 BgP, 茚并(1,2,3-c,d)芘 IcP

图 4 古水稻土剖面中 PAHs 聚类分析树形图

Fig. 4 Dendrogram for PAHs in the ancient paddy soil profile

3 结 论

在含古水稻土剖面中,PAHs 主要富集在表层土壤,含量较高的几种化合物及大小顺序为 Nap > Phe > Fla > Pyr > BgP > Chr > BaP = IcP > BaA > BbF > BkF,主要是人为产生。其下各层土壤中 PAHs 的含量大幅降低,检出的化合物种类也有所减少,各层土壤中以 2 环和 3 环化合物为主,但古水稻土中高环芳烃也占有一定的比例。主成分分析及聚类分析显示,Chr、BkF、BaA、IcP、BbF、Pyr、BaP、DaA 和 Fla 等主要是人为产生,Flu 和 Phe 来自生物合成,而二种来源对 Nap、BgP 和 Ant 的含量均有一定的贡献。主成分分析和聚类分析为环境中有机污染物的源解析提供了可能。

致 谢 感谢浙江省文物考古研究所郑云飞博士对土壤中水稻植硅体的测定。

参 考 文 献

- [1] Wilcke W. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil—A review. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 2000, 163: 229 ~ 248
- [2] Edwards E T. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the terrestrial environment—A review. *J. Environ. Qual.*, 1983, 12(4): 427 ~ 441
- [3] Wild S R, Jones K C. polynuclear aromatic hydrocarbons in the United Kingdom environment: A preliminary inventory and budget. *Environ. Pollut.*, 1995, 88: 91 ~ 108
- [4] Lichtfouse E, Budzinski H, Garrigues P, *et al.* Ancient polycyclic aromatic hydrocarbons in modern soils: ^{13}C , ^{14}C and biomarker evidence. *Org. Geochem.*, 1997, 26(5/6): 353 ~ 359
- [5] 刘凌,崔广柏. 土地生物处理过程中多环芳烃降解模型及应用. *土壤学报*, 2001, 38(4): 558 ~ 568. Liu L, Cui GB. Biodegradation of PAHs in Soil-Water-Microbes system (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(4): 558 ~ 568
- [6] 蔡全英,莫测辉,吴启堂,等. 水稻土施用城市污泥盆栽作物后土壤中多环芳烃(PAHs)的残留. *土壤学报*, 2002, 39(6): 887 ~ 891. Cai Q Y, Mo C H, Wu Q T, *et al.* Effect of municipal sludges and chemical fertilizers on the content of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in paddy soil grown *in pomoea aquatica fossk* (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(6): 887 ~ 891
- [7] 张天彬,杨国义,万洪富,等. 东莞市土壤中多环芳烃的含量、代表物及其来源. *土壤*, 2005, 37(3): 265 ~ 271. Zhang T B, Yang G Y, Wan H F, *et al.* Concentration, indicators, and origin of polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface soil in Dongguan (In Chinese). *Soils*, 2005, 37(3): 265 ~ 271
- [8] 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. *环境科学学报*, 2004, 24(2): 286 ~ 290. Chen J, Wang X J, Tao S, *et al.* Vertical distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils in Tianjin area (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(2): 286 ~ 290
- [9] 安琼,骆永明,倪俊,等. 水田土壤中除草剂丁草胺残留的测试方法及其应用. *土壤*, 2000, 32(2): 107 ~ 111. An Q, Luo Y M, Ni J, *et al.* Analytical method for butachlor residues in paddy soils (In Chinese). *Soils*, 2000, 32(2): 107 ~ 111
- [10] 丁金龙. 长江下游新石器时代水稻田与稻作农业的起源. *东南文化*, 2004, (2): 19 ~ 23. Ding J L. The Neolithic rice fields in the

- low region of Changjiang River and the origin of the cultured rice agriculture (In Chinese). *Southeast Culture*, 2004, (2): 19~23
- [11] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. Lu R K. ed. *Analytical Methods for Soil and Agricultural Chemistry* (In Chinese). Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1999
- [12] Nam J J, Song B H, Eom K C, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in South Korea. *Chemosphere*, 2003, 50: 1 281~1 289
- [13] Tao S, Cui Y H, Xu B G, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in agricultural soil and vegetables from Tianjin. *Sci. Total Environ.*, 2004, 320: 11~24
- [14] Atanassova I, Brümmer G W. Polycyclic aromatic hydrocarbons of anthropogenic and biopedogenic origin in a colluviated hydromorphic soil of Western Europe. *Geoderma*, 2004, 210:27~34
- [15] Wilcke W, Amelung W, Martius C, *et al.* Biological sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the Amazonian rain forest. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 2000, 163: 27~30
- [16] 李久海,董元华,曹志洪,等. 古水稻土中多环芳烃的分布特征及其来源判定. *环境科学*, 2006, 27(6): 1 235~1 239. Li J H, Dong Y H, Cao Z H, *et al.* Distribution characteristics and sources identification of PAHs in ancient paddy soil (In Chinese). *Environmental Science*, 2006, 27(6): 1 235~1 239
- [17] Edwards E T. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the terrestrial environment-A review. *J. Environ. Qual.*, 1983, 12(4): 427~441
- [18] Thiele S, Brümmer G W. Bioformation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil under oxygen deficient conditions. *Soil Biol. Biochem.*, 2002, 34: 733~735
- [19] Wilcke W, Müller S, Kanchanakool N, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in hydromorphic soils of the tropical metropolis Bangkok. *Geoderma*, 1999, 91: 297~309
- [20] Guggenberger G, Pichler M, Hartmann R, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in different forest soils: Mineral horizons. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 1996, 159: 565~573

DISTRIBUTION AND ORIGINS OF POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS IN A SOIL PROFILE CONTAINING 6 000-YEAR OLD PADDY SOIL

Li Jiuhai Dong Yuanhua[†] Cao Zhihong Wang Hui An Qiong Hu Zhengyi Yang Linzhang Lin Xiangui Yin Rui

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 ISSAS-HKBU Joint Laboratory on Soil and Environment, Nanjing 210008, China)

Abstract Soil samples collected from an ancient paddy soil profile (BP 6 000 a) were analyzed with HPLC for 15 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in order to determine their contents and distribution patterns. The total PAHs in various soil layers varied between 25.9 and 202.9 $\mu\text{g kg}^{-1}$, with the highest observed in the surface horizon. Nap, Phe, Fla and Pyr were the four major compounds in a decreasing order of Nap > Phe > Fla > Pyr in terms of abundance. PAHs of 4 or more rings accounted for 51.8 % of the total. In deeper layers, total PAHs decreased sharply, and the number of detectable compounds also decreased. Moreover, 2- and 3-ring PAHs became the dominant compounds in these layers, but 4- or more-ring PAHs still formed a large portion of the PAHs in the ancient paddy soil. The results of the principal component analysis and cluster analysis indicated that Chr, BkF, BaA, IcP, BbF, Pyr, BaP, DaA and Fla were products of human activities, Flu and Phe were formed in biological process under reducing conditions, while Nap, BgP and Ant might result from the joint effect of human activities and biological process.

Key words PAHs; Ancient paddy soil; Soil profile; Distribution; Sources

更正

由于作者疏忽,将发表在本刊第 43 卷第 5 期论文《绰墩山遗址古水稻土的一些微生物学特性》资助基金编号误写为 40171056,现更正为 40335047。

作者