

# 杭嘉湖地区水稻土中氟的分布特征\*

吴卫红<sup>1</sup> 谢正苗<sup>1,2</sup> 徐建明<sup>2</sup> 李静<sup>2</sup> 陈建军<sup>1</sup>

(1 杭州电子科技大学环境科学与工程系, 杭州 310018)

(2 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310029)

**摘要** 测定分析了杭嘉湖地区 400 余份水稻土土样中氟(全氟、交换态氟和水溶态氟)的含量, 对该地区水稻土中氟的土壤环境质量评价基准值进行了初步研究。结果表明, 水稻土中的全氟与可交换态氟含量均呈正态分布, 水溶态氟的含量符合对数正态分布。在 5 种不同母质发育的水稻土中, 河相沉积物发育的水稻土全氟含量最高, 算术平均值为  $333.1 \text{ mg kg}^{-1}$ ; 海相沉积物发育的水稻土次之, 为  $324.3 \text{ mg kg}^{-1}$ ; 黄壤和红壤性坡残积物最低, 为  $245.4 \text{ mg kg}^{-1}$ 。海相沉积物发育的水稻土水溶态氟和可交换态氟含量最高, 分别为  $1.55 \text{ mg kg}^{-1}$  和  $4.03 \text{ mg kg}^{-1}$ 。不同类型的水稻土(渗育性水稻土、潴育性水稻土、潜育性水稻土和淹育性水稻土)剖面中耕作层的全氟含量均高于亚耕层, 而剖面中水溶性氟的分布规律则相反。初步确定杭嘉湖地区水稻土中氟的环境质量评价基准建议值全氟为  $413.9 \text{ mg kg}^{-1}$ , 水溶态氟为  $2.54 \text{ mg kg}^{-1}$ 。

**关键词** 水稻土; 氟; 分布

中图分类号 S152

文献标识码 A

氟是地理环境中广泛分布的元素, 也是动物和人体的必需微量元素。同其它微量元素一样, 土壤中的氟主要通过饮水和食物链而进入人体。耕作土作为氟食物链的一个重要环节, 受人类活动影响较大, 如肥料、土壤改良剂、含氟农药的施用会促进土壤表面氟的积累<sup>[1, 2]</sup>。我国是世界上主要的产稻国家之一, 水稻土占我国总耕地面积的四分之一, 分布几乎遍及全国。而到目前为止, 有关水稻土中氟研究的文献较少, 只有零星的报道<sup>[3, 4]</sup>, 缺乏系统性研究。浙江省杭嘉湖地区地处北亚热带, 是水稻土集中分布的地区, 水稻土的分布以“成片连续”为主。其特有的地质地貌为研究耕作土中氟的分布特征提供了独特的场地, 有助于揭示人为活动和自然因素的双重作用下土壤中氟的化学行为。为此, 本工作测定了来自杭嘉湖地区的 400 余份水稻土土样中的全氟、水溶态氟和交换态氟含量, 对该地区水稻土中氟的土壤环境质量评价基准值进行了初步研究, 以期水稻土氟的化学行为的研究和杭嘉湖地区土壤环境质量评价体系的完善提供新的资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 杭嘉湖地区自然条件特点

杭嘉湖平原是浙江省最大的平原, 处于太湖和钱塘江之间, 杭嘉湖平原主要由长江和钱塘江泥沙冲击和海侵堆积而成, 地势平坦, 内部低洼, 海拔高度 3~10 m, 相对高差不大。平原上湖泊众多, 河流纵横, 水网密布, 土地肥沃, 是浙江省主要的水稻种植区。杭嘉湖地区属亚热带季风气候, 季风交替规律显著, 四季分明; 雨量充沛, 空气湿润。年平均气温在 15.5~16.5℃, 全年降水量 1100~1400 mm, 降水以春雨、梅雨和台风雨为主。

### 1.2 供试土样

采样点遍布杭嘉湖地区 13 个县市, 布点采样按土壤调查的有关布点原则和土壤采样的规范要求进行<sup>[5, 7]</sup>, 并且远离砖瓦厂等氟污染源。一共采集了 28 个主剖面, 400 多个土壤样品。土样采集后, 在室内自然风干。仔细除去植物根系、石块、瓦砾等杂物后, 研磨过 60 目筛, 以供土壤基本性质

\* 国家重点基础研究发展规划(973)项目(G1999011809)和杭州电子科技大学科研项目(kys011504005, kys041505045)资助

作者简介: 吴卫红, 女, 博士, 主要从事土壤环境化学与污染控制的研究。E-mail: jchwwh@163.com

收稿日期: 2005-07-11; 收到修改稿日期: 2005-11-08

及各形态氟含量的测定。各类土壤主要发源于各相沉积物。其中土壤颗粒组成, 采用国际制, 吸管法测定; 土壤 pH 值用 pHS-10C 数字酸度/离子计测定; 土壤有机质、交换性钙及  $\text{CaCO}_3$  含量均按照常规方法测定<sup>[5]</sup>。

### 1.3 氟的测定方法

土壤全氟(T-F)含量测定采用 NaOH 碱熔法对土壤样品进行全分解<sup>[6]</sup>; 水溶态氟以 1:5 土水比进行提取, 可交换态氟( $E_x\text{-F}$ )用  $1 \text{ mol kg}^{-1} \text{ MgCl}_2$  (pH7.0) 进行浸提, 在室温下分别振荡 30 min 和 1 h 后离心取上清液进行分析。具体操作方法如下: 准确吸取待测液 10 ml 置于 50 ml 小烧杯中, 再加入 50 ml  $0.1 \text{ mol kg}^{-1} \text{ HClO}_4$  溶液, 使 pH=1, 应用 pF-1 型氟离子选择性电极和 232 型参比电极测定其电位  $E_1$ , 然后加入  $100 \mu\text{l} 2000 \text{ mg kg}^{-1}$  的氟标准溶液, 再测定其电位  $E_2$ 。最后根据下式计算样品中总氟量和各形态氟的含量:

$$C_F = \frac{M}{m(10^{\frac{\Delta E}{S}} - 1)}$$

式中,  $C_F$  为样品含氟量( $\text{mg kg}^{-1}$ );  $M$  为加入的标准氟的量, 本测定中为  $200(\mu\text{g})$ ;  $m$  为样品量(g);  $\Delta E$  为测量的电位差,  $\Delta E = E_1 - E_2$ ;  $S$  为电极的斜率, 本测定中为  $0.1983 \times (\text{测定时气温} + 273)$ 。

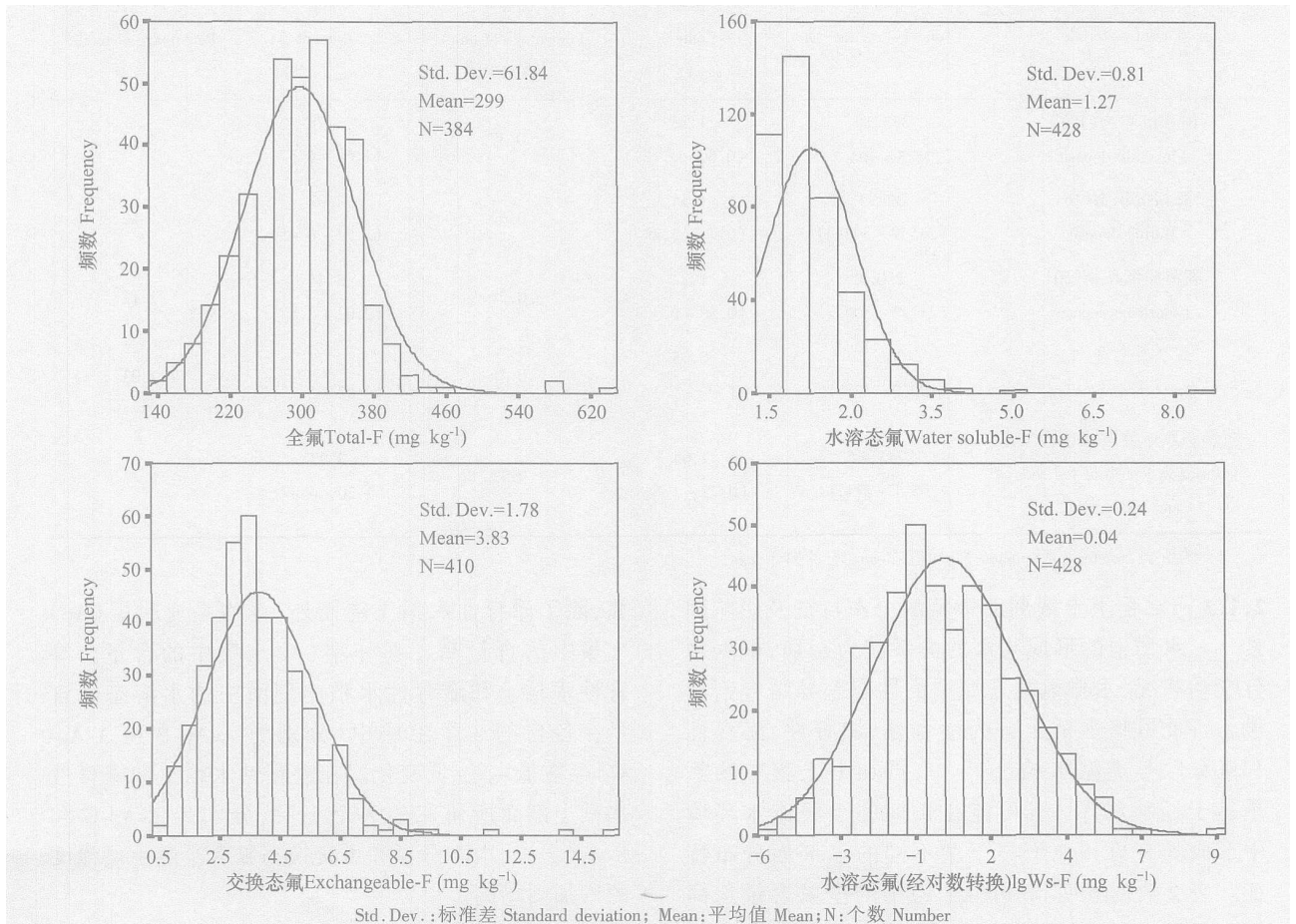
### 1.4 数据处理

数据统计处理用 SPSS 统计软件包相应程序 (Statistical Package for the Social Science) 和 DPS 数据处理系统 (Data Processing System) 在微机上完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 杭嘉湖地区水稻土中氟的分布特征

**2.1.1 水稻土中氟的含量** 本研究水稻土主要发源于各相沉积物, 根据土壤颗粒组成分析结果, 土壤质地均为粉壤土。对所采土样测定结果表明, 水稻土中的全氟与可交换态氟含量均呈正态分布(图 1), 水稻土的全氟含量范围在  $137.7 \sim 465.3 \text{ mg kg}^{-1}$  之间, 分布峰值为  $285 \sim 315 \text{ mg kg}^{-1}$ , 算术平均值为  $299.0 \text{ mg kg}^{-1}$ 。耕作层土壤全氟含量为算术平均值



Std. Dev.: 标准差 Standard deviation; Mean: 平均值 Mean; N: 个数 Number

图 1 水稻土中全氟、可交换态氟、水溶态氟含量频数分布直方图

Fig 1 Histogram of frequency distribution of total-F, exchangeable-F, water soluble F contents in paddy soils

为  $320.0 \text{ mg kg}^{-1}$ , 标准差为  $58.9 \text{ mg kg}^{-1}$ 。可交换态氟含量算术平均值为  $3.68 \text{ mg kg}^{-1}$ , 其平均含量占全氟含量的 1.25% 左右。水溶态氟的频数直方图中, 趋势线的偏斜度大于 1, 表明水溶态氟的含量呈非正态分布, 但符合对数正态分布(图 1), 含量范围在  $0.23\sim 4.23 \text{ mg kg}^{-1}$  之间, 算术平均值为  $1.24 \text{ mg kg}^{-1}$ , 与我国安徽省长江以北地区土壤水溶态氟的含量(平均为  $2.38 \text{ mg kg}^{-1}$ )<sup>[8]</sup> 相比, 明显偏低。

**2.1.2 不同类型母质水稻土中氟的分布** 土壤母质是土壤氟的基本来源, 是影响土壤全氟含量的主要因素<sup>[1,3]</sup>。从对海相沉积物、湖沼相沉积物、河相沉积物、黄壤和红壤性坡残积物、第四纪红土发育的水稻土中全氟含量进行的研究可知(表 1), 河相沉积物发育的水稻土最高, 达  $333.1 \text{ mg kg}^{-1}$ ; 海相沉积物发育的水稻土次之, 为  $324.3 \text{ mg kg}^{-1}$ ; 黄壤

和红壤性坡残积物最低, 只有  $245.4 \text{ mg kg}^{-1}$ 。与全氟含量高低顺序不同的是, 海相沉积物发育的水稻土水溶态氟含量最高, 为  $1.55 \text{ mg kg}^{-1}$ , 河相沉积物次之, 黄壤和红壤性坡残积物最低。水溶态氟含量占全氟含量的百分比的大小排列顺序则是: 海相沉积物 > 黄壤和红壤性坡残积物 > 湖沼相沉积物 > 河相沉积物 > 第四纪红土, 表明海相沉积物发育的水稻土提供水溶态氟的能力高于其它母质发育的水稻土。潘宏等认为, 海相沉积物上形成的滨海盐渍土中水溶性氟主要来源于海水(海水水溶性氟为  $1.3 \text{ mg kg}^{-1}$ )<sup>[9]</sup>。不同母质发育的水稻土中可交换态氟的含量高低分布与水溶态氟的分布类似。显然, 不同母质发育的水稻土中水溶态氟与可交换态氟有同步增减的关系, 这与吴卫红等<sup>[10]</sup> 所报道的水溶态氟与可交换态氟之间呈显著的正相关关系是一致的。

表 1 不同母质类型水稻土氟的含量

Table 1 Fluorite contents in paddy soils developed from different parent materials

母质类型 Parent materials	全氟 Total-F ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	水溶态氟 Water soluble-F		可交换态氟 Exchangeable-F	
		含量 Content ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	百分比 Percentage of total-F (%)	含量 Content ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	百分比 Percentage of total-F (%)
河相沉积物(78) <sup>1)</sup> Fluviatile deposit	333.1 <sup>2)</sup> (271.5~404.7) <sup>3)</sup>	1.23 (0.60~3.13)	0.37	3.78 (1.68~6.57)	1.13
海相沉积物(16) Marine deposit	324.3 (245.9~394.4)	1.55 (0.76~3.29)	0.62	4.03 (2.53~6.45)	1.80
湖沼相沉积物(50) Lacustrine deposit	250.2 (217.2~304.7)	1.22 (0.50~2.90)	0.38	3.44 (2.03~5.87)	1.15
第四纪红土(7) Quaternary red clay	262.2 (199.9~326.1)	0.95 (0.25~2.96)	0.36	2.70 (0.82~2.73)	1.03
黄壤和红壤性坡残积物(4) Residual deposit of red soil and yellow soil	245.4 (205.1~271.1)	1.04 (0.32~1.58)	0.42	3.23 (1.20~4.87)	1.32

1) 样品数 Numbers of samples; 2) 均值 Mean; 3) 范围 Range

**2.1.3 水稻土土壤剖面中氟的分布特征及影响因素** 水稻土的形成与水的关系甚为密切, 根据水分变动状况、水耕氧化还原层的性态差异结合剖面形态特征可将水稻土分为渗育性、潜育性、潜育性和淹育性等类型水稻土<sup>[11, 12]</sup>, 再加上土壤中的氟是易于迁移的<sup>[13]</sup>, 有可能在长期的土壤淹水环境中形成具有与其他干旱土壤不同的氟剖面分布特征。表 2 数据表明, 耕作层(A) 中的全氟含量均高于亚耕层, 而亚耕层( $A_p$ ) 土壤的水溶态氟含量则基本高于耕作层(A) 土壤中的含量。至于可交换态

氟, 除了渗育性水稻土剖面外, 也均是亚耕层( $A_p$ ) 土壤中的含量高于耕作层(A) 土壤中的含量。渗育性水稻土和潜育性水稻土剖面中的水溶态氟含量在各自的 3 个土层中(分别为  $A-A_p-P$  和  $A-A_p-W$ ) 存在低-高-低变化。在潜育性水稻土和淹育性水稻土剖面所研究的 3 个土层(分别为  $A-A_p-G$  和  $A-A_p-C$ ) 中, 水溶态氟和可交换态氟含量随土层深度的增加而增高。

Omueti 和 Robert 对 Illinois 土壤中氟含量调查后认为, 土壤剖面中的氟含量随土层深度的增加而增

高<sup>[14]</sup>, 而上述水稻土剖面中氟的变化规律与此有异。这固然有母质因素, 但也不排除与水稻土特有的耕作制度有关。人为加氟如施肥作用导致土壤表层全氟的积累, 而水稻田土壤由于水的各向径流强烈, 可导致迁移态氟如水溶态氟从耕作层(A)淋溶至亚耕层(A<sub>p</sub>)。另外, 在种稻淹水条件下, 水稻土经人为为活动和自然因素的双重作用, 产生了水耕熟化和氧化还原交替过程, 并形成特有的土层, 各层土壤之间存在 pH 值、粘粒、有机质含量、氧化还原电位等的差异, 使得水稻土剖面中氟的含量分布并不是简单地受水分淋溶作用的影响。

水稻土中的生物有效性氟(水溶态氟和可交换

态氟)与部分土壤理化性质之间的相关性研究结果表明(表 3), 水溶态氟与粘粒含量成极显著负相关( $r = -0.2825$ ), 与 pH 值、粉砂含量成极显著正相关( $r = 0.3888$ )。可交换态氟与 pH 值、有机质和粉砂含量都呈极显著的正相关关系。可交换态氟与粉砂含量成正相关( $r = 0.2095, n = 233$ ), 但与粘粒含量无相关关系。已有研究结果表明<sup>[10]</sup>, 水溶态氟与粘粒含量虽然不存在显著的相关关系, 但水溶态氟与土壤性质的逐步回归方程中, 粘粒含量也是被选入的参数之一, 说明粘粒也是水溶态氟的影响因子。因此粘粒含量高的土壤对氟的吸附能力较强, 是毋庸置疑的。杭嘉湖水稻土主要由伊利石、高岭石和

表 2 不同类型水稻土剖面中氟的含量

Table 2 Distribution of fluoride contents in profile of paddy soils developed from different parent materials(mg kg<sup>-1</sup>)

水稻土类型 Paddy soil type	取样层次 Sampling horizon	全氟 Total F $\bar{x} \pm S^D$	水溶态氟 Water soluble-F $\bar{x} \pm S$	可交换态氟 Exchangeable-F $\bar{x} \pm S$
渗育性(5) <sup>1)</sup> Percogenic paddy soil	A	321.7 ± 67.6	1.47 ± 0.68	3.76 ± 1.09
	Ap	291.2 ± 59.1	1.58 ± 0.56	3.26 ± 0.75
	P	304.6 ± 70.8	1.21 ± 0.54	2.49 ± 0.51
潴育性(17) Hydrogic paddy soil	A	291.3 ± 53.3	1.08 ± 0.33	3.56 ± 0.98
	Ap	270.2 ± 49.1	1.19 ± 0.37	3.59 ± 0.63
	W	275.7 ± 50.9	1.01 ± 0.20	2.75 ± 0.81
潜育性(3) Gleyed paddy soil	A	365.5 ± 26.6	0.58 ± 0.20	2.24 ± 0.75
	Ap	326.4 ± 52.9	0.61 ± 0.61	2.66 ± 0.91
	G	377.1 ± 35.2	0.69 ± 0.41	2.88 ± 0.61
淹育性(3) Submergic paddy soil	A	153.1 ± 18.3	0.44 ± 0.23	1.62 ± 0.34
	Ap	137.7 ± 16.5	0.52 ± 0.18	2.38 ± 0.65
	C	231.8 ± 20.2	0.95 ± 0.30	3.04 ± 0.68

1) 剖面样数 Numbers of profiles; 2) 平均值 ± 标准差 Mean ± SD

表 3 氟含量(水溶态氟和可交换态氟)与水稻土性质之间的相关性

Table 3 Correlation between fluoride content and properties of paddy soils

土壤性质 Soil properties	水溶态氟 Water soluble F		可交换态氟 Exchangeable F	
	回归方程	相关系数	回归方程	相关系数
	Regression equation	Correlation coefficient	Regression equation	Correlation coefficient
pH(H <sub>2</sub> O)	$y = 2.4072x - 8.2327, n = 428$	0.4999*	$y = 3.9276x - 5.2698, n = 410$	0.4365*
pH(CaCl <sub>2</sub> )	$y = 2.7107x - 8.4739, n = 428$	0.5538*	$y = 4.7823x - 7.6474, n = 410$	0.5219*
有机质 Organic matter	$y = 0.0655x + 6.1486, n = 428$	0.0194	$y = 1.1797x + 14.853, n = 410$	0.1603*
阳离子交换量 CEC	$y = -0.0096x + 7.5244, n = 257$	-0.1095	$y = 0.0131x + 15.782, n = 233$	0.0762
粉砂 Silt (0.05~0.002 mm) %	$y = 0.1561x - 4.436, n = 257$	0.3888*	$y = 0.1669x + 6.1766, n = 233$	0.2095*
粘粒 Clay (<0.002 mm) %	$y = -0.1008x + 9.0118, n = 257$	-0.2825*	$y = -0.0418x + 18.7, n = 199$	-0.0866

\* 表示显著水平  $p < 0.01$  Represents significance level( $p < 0.01$ )

蛭石等粘粒矿物组成, 它们对阴离子均有很强的吸附能力, 这使得水稻土中粘粒含量越高, 对氟的吸附能力越强, 水溶态氟含量越低。另外, 铁、锰的淋溶淀积是水稻土形成的一个重要过程, 也是影响氟分布的重要影响因素。在淹水条件下, 游离的氧化铁、锰被还原为低价铁、锰化合物, 这些低价铁、锰化合物淋溶下移, 使耕作层的铁锰含量不断减少, 并氧化淀积于土壤下层, 使水稻土剖面中铁锰结合态氟含量分布发生变化。在此过程中, 尤其在酸性土壤条件下, 钙、镁、铁等离子处于活动状态, 氟会与其中一些离子形成可溶性的稳定态的络合物并随水移动, 进而影响氟在水稻土剖面中的分布。

## 2.2 杭嘉湖水稻土中氟的土壤环境质量评价基准建议值

土壤中水溶态氟与总氟的比值可以表征土壤可给态氟的输出能力<sup>[11]</sup>。杭嘉湖水稻土中水溶态氟平均值为  $1.24 \text{ mg kg}^{-1}$ , 与总氟的比值仅为  $0.42\%$ 。因此, 在一般情况下不会造成该地区地下水中氟的含量过高。而对于水稻, 氟也只是“中度摄取的元素”<sup>[3]</sup>, 不至于在籽粒中积累到对人体有害程度。但是杭嘉湖地区存在重要的氟污染源——密布的砖瓦窑<sup>[15]</sup>, 另外, 杭嘉湖地区也存在高氟矿点导致的地方性高氟病点<sup>[16]</sup>。因此有必要对该地区水稻土中氟的土壤环境质量进行评价。

杭嘉湖地区水稻田的自然条件、耕作栽培措施大致相同, 可采用区域性土壤自然含量为评价标准:  $X = \bar{X} + 2S$ , 式中,  $\bar{X}$  为土壤平均背景值,  $S$  为标准差。在此基础上选择单因子评价法(全氟指数法和水溶态氟指数法)对水稻土中的氟进行评价<sup>[17]</sup>。若将本研究所测水稻土耕作层氟(全氟、水溶态氟)的平均背景值和标准差代入上述公式, 就可以得到杭嘉湖地区水稻土中氟的环境质量评价基准建议值, 即全氟为  $413.9 \text{ mg kg}^{-1}$ , 水溶态氟为  $2.54 \text{ mg kg}^{-1}$ 。

“七五”期间我国土壤环境背景值调查研究结果表明<sup>[7]</sup>: 浙江省 A 层土壤中全氟算术平均值  $426 \text{ mg kg}^{-1}$ , 标准差  $164.5 \text{ mg kg}^{-1}$ ; 湖相沉积母质发育的土壤中全氟算术平均值  $554 \text{ mg kg}^{-1}$ , 标准差  $176.9 \text{ mg kg}^{-1}$ ; 水稻土类 A 层土壤中全氟算术平均值  $533 \text{ mg kg}^{-1}$ , 标准差  $157.8 \text{ mg kg}^{-1}$ 。而本研究所测杭嘉湖 A 层土壤全氟含量算术平均值为  $320.0 \text{ mg kg}^{-1}$ , 标准差为  $58.9 \text{ mg kg}^{-1}$ , 湖相沉积物发育的土壤中全氟算术平均值为  $324.3 \text{ mg kg}^{-1}$ , 与上述结果相比偏低。经过分析认为可能有三方面的原因产生此差别: (1) 从研究范围看, 本研究对象为杭嘉湖地区水

稻土, 而上述土壤环境背景值是对全省土壤中的氟进行调查所得结果; (2) 从水稻土年限来看, 我国土壤环境背景值的调查是在 20 世纪 80 年代中期, 距今已将近 20 a, 水稻土中的氟有可能受长期处于淋溶状态或其他人为影响而呈下降趋势; (3) 从土壤全氟分析方法来看, 虽然本研究与文献<sup>[7]</sup>都采用了碱熔-电极法, 但氟的测定过程中使用了不同的方法, 本文采用高氯酸标准加入法<sup>[18]</sup>, 虽然与标准曲线法有显著相关关系, 同时也有较高的回收率<sup>[19]</sup>, 仍有可能导致监测结果有所差异。

因此在使用该氟的土壤环境质量评价基准建议值时, 还需注意以下三点: (1) 该基准值局限于杭嘉湖地区水稻土; (2) 该水稻土中氟的环境质量评价基准值有一定的参考年限; (3) 在分析方法上统一使用碱熔-电极法(高氯酸法)测定土壤中氟的含量。

## 3 结 论

1) 杭嘉湖地区水稻土中的全氟与可交换态氟含量均呈正态分布, 水溶态氟的含量符合对数正态分布。土壤母质是影响土壤全氟含量的决定性因素, 其中河相沉积物发育的水稻土全氟含量最高, 达  $333.1 \text{ mg kg}^{-1}$ 。海相沉积物发育的水稻土提供有效氟的能力高于其它母质发育的水稻土。不同母质发育的水稻土中水溶态氟与可交换态氟有同步增减的关系。

2) 在所研究的水稻土剖面中, 耕作层 A 的全氟含量均高于亚耕层(Ap), 而亚耕层(Ap)的水溶态氟含量均高于耕作层(A)中的含量。潜育性水稻土和淹育性水稻土剖面中, 水溶态氟的含量在 A-Ap-G 和 A-Ap-C 的 3 个土层中都存在低-高-高变化的趋势。在潜育性水稻土和淹育性水稻土剖面所研究的 3 个土层(分别为 A-Ap-G 和 A-Ap-C)中, 水溶态氟和可交换态氟含量随土层深度的增加而增高。

3) 杭嘉湖地区水稻土中氟的环境质量评价基准建议值: 全氟为  $413.9 \text{ mg kg}^{-1}$ , 水溶态氟为  $2.54 \text{ mg kg}^{-1}$ 。

## 参 考 文 献

- [1] 张乃明. 山西土壤氟含量分布及影响因素研究. 土壤学报, 2001, 38(2): 284~287. Zhang N M. Distribution of fluorine and its affecting factors in soil in Shanxi (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2001, 38 (2): 284~287
- [2] Gilpin L, Johnson A H. Fluorine in agricultural soils of southeast Pennsylvania. Soil Sci. Soc. Am. J., 1980, 44: 255~258

- [ 3 ] 李日邦, 谭见安, 王丽珍, 等. 我国不同地理条件下耕作土中的氟及其与地方性氟中毒的关系. 地理研究, 1985, 4 ( 1 ): 30~ 41. Li R B, Tan J A, Wang L Z, *et al.* The fluoride content in the cultivated soil under different geographical condition in China and its relation to endemic fluorosis ( In Chinese ). *Geographical Research*, 1985, 4 ( 1 ): 30~ 41
- [ 4 ] 魏宗仁, 沈朝坤, 李宏杰, 等. 土壤粮食氟含量与地方性氟中毒的相关研究. 中国地方病学杂志, 1995, 14 ( 5 ): 293~ 295. Wei Z R, Shen C K, Li H J, *et al.* Research on the relationship between the contents of fluoride in soils and grain and fluorosis ( In Chinese ). *Chinese Journal of Endemiology*, 1995, 14 ( 5 ): 293~ 295
- [ 5 ] 南京农业大学主编. 土壤农化分析. 第 2 版. 北京: 中国农业出版社, 1998. Nanjing Agricultural University. ed. *Agricultural Chemical Analysis of Soil*. 2nd Ed ( In Chinese ). Beijing: China Agriculture Press, 1998
- [ 6 ] 城乡建设环境保护部环境保护局. 环境监测分析方法. 北京: 中国环境科学出版社, 1983. 316~ 318. China Agency of Environmental Protection on Town and Country Construction. *Methods for Environmental Monitoring* ( In Chinese ). Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1983. 316~ 318
- [ 7 ] 中国环境监测总站主编. 中国土壤元素背景值. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. China National Environmental Monitoring Centre. ed. *Element Background Values in China Soils* ( In Chinese ). Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1990
- [ 8 ] 郑路. 安徽省长江以北地区土壤水溶性氟含量及分布特征. 农村生态环境, 1997, 13 ( 3 ): 25~ 27, 32. Zheng L. Content and distribution of soluble fluorine in soils of the middle and northern parts of Anhui Province ( In Chinese ). *Rural Eco-Environment*, 1997, 13 ( 3 ): 25~ 27, 32
- [ 9 ] 潘宏, 陈邦本, 方明. 江苏省滨海盐土向潮土演化过程中水溶性氟含量变化原因的探讨. 土壤学报, 1993, 30 ( 4 ): 416~ 422. Pan H, Chen B B, Fang M. Discussion on mechanism of variations in content of water-soluble fluorine during desalinization of coastal saline soils of Jiangsu Province ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 1993, 30 ( 4 ): 416~ 422
- [ 10 ] 吴卫红, 谢正苗, 徐建明, 等. 不同土壤中氟的赋存形态特征及其影响因素. 环境科学, 2002, 23 ( 2 ): 104~ 108. Wu W H, Xie Z M, Xu J M, *et al.* Characteristics of forms of fluorine in soils and influential factors ( In Chinese ). *Environmental Science*, 2002, 23 ( 2 ): 104~ 108
- [ 11 ] 朱鹤健. 水稻土. 北京: 农业出版社, 1985. 150~ 151. Zhu H J. *Paddy Soils* ( In Chinese ). Beijing: Agriculture Press, 1985. 150~ 151
- [ 12 ] 李庆逵. 中国水稻土. 北京: 科学出版社, 1992. 85~ 90. Li Q K. *Paddy Soils of China* ( In Chinese ). Beijing: Science Press, 1992. 85~ 90
- [ 13 ] 陈国阶, 余大富. 环境中的氟. 北京: 科学出版社, 1990. 64~ 73. Chen G J, Yu D F. *Fluorine in Environment* ( In Chinese ). Beijing: Science Press, 1990. 64~ 73
- [ 14 ] Omueti J A I, Jones R L. Fluoride distribution with depth in relation to profile development in Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1980, 44: 247~ 249
- [ 15 ] 傅柳松, 刘超, 吴方正. 杭嘉湖蚕桑区主要大气氟污染源及治理现状. 农村生态环境, 1993, 9 ( 4 ): 26~ 28. Fu L S, Liu C, Wu F Z. The resource of atmospheric fluoride pollution and status of the treatment ( In Chinese ). *Rural Eco-Environment*, 1993, 9 ( 4 ): 26~ 28
- [ 16 ] 王介庆, 卢旭初. 姚斗村家禽地方性氟病的调查. 畜牧与兽医, 2001, 33 ( 4 ): 15. Wang J Q, Lu X C. A survey on fluorosis of domestic fowl in Yaodou ( In Chinese ). *Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2001, 33 ( 4 ): 15
- [ 17 ] 李静, 谢正苗, 徐建明, 等. 我国氟的土壤健康质量指标及评价方法的初步探讨. 浙江大学学报( 农业与生命科学版 ), 2005, 31 ( 5 ): 593~ 597. Li J, Xie Z M, Xu J M, *et al.* Preliminary study on guideline on soil health quality index of fluorine and method of its evaluation in China ( In Chinese ). *Journal of Zhejiang University ( Agric. & Life Sci. Ed )*, 2005, 31 ( 5 ): 593~ 597
- [ 18 ] Alberto E V. Rapid method for determining fluoride in vegetation using an ion selective electrode. *Analyst*, 1979, 104: 545~ 551
- [ 19 ] 吴卫红, 谢正苗, 徐建明, 等. 土壤全氟含量测定方法的比较. 浙江大学学报( 农业与生命科学版 ), 2003, 29 ( 1 ): 103~ 107. Wu W H, Xie Z M, Xu J M, *et al.* Comparison of different methods of determination of fluoride content in soil ( In Chinese ). *Journal of Zhejiang University ( Agric. & Life Sci. Ed )*, 2003, 29 ( 1 ): 103~ 107

## DISTRIBUTION CHARACTERISTICS OF FLUORINE IN PADDY SOILS OF THE HANG-JIA-HU PLAIN

Wu Weihong<sup>1</sup> Xie Zhengmiao<sup>1, 2</sup> Xu Jianming<sup>2</sup> Li Jing<sup>2</sup> Chen Jianjun<sup>1</sup>

(1 Department of Environmental Science and Engineering, Hangzhou University of Electronics Science and Technology, Hangzhou 310018, China)

(2 College of Environmental Science and Natural Resources, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

**Abstract** Fluorite contents (including total fluorite, exchangeable fluorite, and water-soluble fluorite) in 400 paddy soil samples collected from the Hang-Jia-Hu Plain, Zhejiang Province, China, were determined and the guideline for evaluation of F-related environmental quality of the paddy soils in the region was studied. Results indicate that both the contents of total fluorite and exchangeable fluorite followed the normal distribution, and that of water-soluble fluorite fit the logarithm normal distribution. The average content of total fluorite in the paddy soils developed from fluvial deposit and marine deposit was  $333.1 \text{ mg kg}^{-1}$  and  $324.3 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectively. The content of water-soluble fluorite and exchangeable fluorite in the paddy soils developed from marine deposit was  $1.55 \text{ mg kg}^{-1}$  and  $4.03 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectively. The content of total fluorite in the cultivated layer was higher than that in sub-cultivated layer, regardless of soil types (Pergenic paddy soil, Hydrogic paddy soil, Gleyed paddy soil, and Submergic paddy soil), whereas it was the other way round with water-soluble fluorite. It is tentatively recommended that the guideline for evaluation of F-related environmental quality of the paddy soils in the Hang-Jia-Hu Plain is  $413.9 \text{ mg kg}^{-1}$  for total fluorite and  $2.54 \text{ mg kg}^{-1}$  for water-soluble fluorite.

**Key words** Fluorite; Paddy soil; Distribution