

广东省主要土类的三卤甲烷生成潜能(THMFP)

李适宇¹, 仇荣亮², 杨秀虹¹, 王鹏¹, 李耀初¹ (1. 中山大学环境科学研究所, 广州 510275, E-mail: eeslsy@zsu.edu.cn; 2. 中山大学环境科学系, 广州 510275)

摘要:通过振荡浸出实验,测定了广东省几种主要土类的三卤甲烷生成潜能(THMFP),比较了土壤浸提液中溶解态(可过滤态)有机物与悬浮态(不可过滤态)有机物在形成三卤甲烷(THMs)中的作用,并对影响土壤THMFP的各种因素进行讨论.结果表明:①各主要土类表层土中,未过滤浸提液的整体THMFP(Σ THMFP)含量范围为:0.7~36.8 $\mu\text{g/g}$ 土,中值为10.6 $\mu\text{g/g}$ 土;过滤浸提液的THMFP(指可溶性有机物的THMFP,即 Δ THMFP)含量范围为:0.5~21.2 $\mu\text{g/g}$ 土,中值为3.9 $\mu\text{g/g}$ 土;其中,19号石灰土的 Σ THMFP和 Δ THMFP最高,20号紫色土的 Σ THMFP最低,5号赤红壤的 Δ THMFP最低.②总体上,悬浮态有机物对THMs生成量有较大的正贡献.③影响土壤THMFP的因素主要是有机质含量、各种氧化物含量、土壤发生层次、植被等.

关键词:土壤;三卤甲烷前驱物质;三卤甲烷生成潜能

中图分类号:X131.3 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2001)04-07-0060

Trihalomethane Formation Potential (THMFP) of Soils in Guangdong Province

Li Shiyu¹, Qiu Rongliang², Yang Xiuhong¹, Wang Peng¹, Li Yaochu¹ (1. Institute of Environmental Science, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China E-mail: eeslsy@zsu.edu.cn; 2. Department of Environmental Science, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Trihalomethane formation potentials were analyzed with the lixivia of typical soil samples in Guangdong Province. The results showed that the bulk THMFP contents of soil lixivia (Σ THMFP) range from 0.7 to 36.8 $\mu\text{g/g}$ with a median value of 10.6 $\mu\text{g/g}$, and the THMFP contents of 0.45 μm filtered soil lixivia, representing the THMFP contents of dissolved organic matter (Δ THMFP), from 0.5 to 21.2 $\mu\text{g/g}$ with a median value of 3.9 $\mu\text{g/g}$. Sample 19 (Calcareous soil) had the highest Σ THMFP and Δ THMFP while sample 20 (Purple soil) had the lowest Σ THMFP and sample 5 (Latored soil) had the lowest Δ THMFP. In general, suspended organic matter had great contribution to the THMFP. The physico-chemical properties, such as organic matter contents and contents of various oxides, as well as soil genetic horizon and vegetation are main factors dominating the THMFP levels in the soil.

Key words: soil; trihalomethane precursor; trihalomethane formation potential (THMFP)

1974年Rook和Bellar等^[1,2]分别发现天然水经氯化消毒会形成致癌性的三卤甲烷(Trihalomethanes, THMs),包括 CHCl_3 、 CHBrCl_2 、 CHBr_2Cl 和 CHBr_3 .据研究^[1,3],腐殖酸的三卤甲烷生成潜能(Trihalomethane Formation Potential, THMFP,指在一定加氯反应条件下形成THMs的量)较大,是氯化副产物三卤甲烷的主要前驱物质.由于氯是近百年来世界上应用最广泛的饮水消毒剂,而THMs的前驱物质有机物是普遍存在于各种天然的和受污染的水体中,因此该问题

立即引起了各国的关注.

目前,有关饮用水THMs问题的调查研究主要集中在THMs的形成机理、防治对策等方面^[4~9],而对THMs前驱物质的来源、分布等方面所作的调查研究则很少.原水中THMs前驱物质的来源包括来自生活污水、工业废水等

基金项目:国家自然科学基金资助项目(49771071);广东省自然科学基金资助项目(970124)

作者简介:李适宇,(1956~),男,工学博士,教授,主要研究方向为水及土壤环境.

收稿日期:2001-01-01

点源的排放以及土壤和大气等面源的输入.其中,土壤腐殖质是水源 THMs 前驱物质的重要天然来源.*

广东省土壤类型众多,其腐殖质含量.组成不同,THMs 前驱物质的分布和含量也有较大差异.而且,广东省雨量丰沛,雨季长,水流的侵蚀作用强,地表物质随水流迁移量大,增加了水体 THMs 前驱物质的外源输入.本文拟通过室内模拟实验,摸清以 THMFP 为指标的 THMs 前驱物质在本省主要类型土壤中的含量.

1 材料和方法

1.1 供试土样

采样点的布设主要考虑广东省主要土壤类型、气候带、母岩类型、植被类型以及主要水系沿岸土壤的组成等因素.在广东省各地用混合采样法采样,主要采集表层土(0~20cm),为比较表、底层土 THMFP 的差异,部分采样点还采集了底层土(20~40cm).共采集 34 个土样,分属 8 种主要土类.各土样的部分理化性质及样点情况列于表 1.

1.2 实验方法

本实验采用振荡浸出方法研究各类型土样的 THMFP.具体实验过程为:准确称取过 60 目筛的待测土样 1.00g 于 500 ml 具塞玻璃瓶中,按水土比(ml:g) 500:1 加入石英亚沸水.将水土混和样连续振荡 4h,并静置 1h 后,取一部分上层液用 0.45 μ m 的滤膜抽滤.分别取 100.0 ml 过滤上层液和未过滤上层液于 100 ml 比色管中.加入新配制并已标定的 NaClO 溶液 0.10 ml,使加氯量为 8 mg/L.立即用 HCl 或 NaOH 的稀溶液快速调节水样的 pH 为 7.0.将反应样品置于生化培养箱中(20 $^{\circ}$ C)恒温密闭避光反应 24h 后,往水样中加入抗坏血酸,强烈振荡 1 min,以停止氯化反应.反应生成的 THMs 含量采用液-液萃取气相色谱法测定.

使用带电子捕获器的 HP6890 气相色谱仪(GC-ECD),色谱条件为:

色谱柱:HP-5(长度 30.0 m,内径 320 μ m,膜厚 0.25 μ m);柱温:采用程序升温,即 $\frac{35^{\circ}\text{C}}{5\text{ min}}$ 10 $^{\circ}\text{C/min}$ →80 $^{\circ}\text{C}$;注射口温度:180 $^{\circ}\text{C}$;检测器(ECD)温度:270 $^{\circ}\text{C}$;分流比:60:1;进样量:1 μ l.

2 结果与讨论

饮用水中溴代甲烷(CHBrCl_2 、 CHBr_2Cl 和 CHBr_3)的产生主要是因为原水中存在溴离子之故.本实验使用石英亚沸水为浸提剂,反应产物以氯仿为主,下文仅对氯仿生成量进行讨论.

实验分别测定了土壤浸提液的过滤样和不过滤样的 THMFP.前者代表土样中可溶性有机物的 THMFP(即 α -THMFP),后者则表示可溶态与悬浮态有机物共存时浸提液的整体 THMFP(即 β -THMFP).将各土样浸出液中氯仿浓度换算成每 g 土的氯仿生成量,即土样的 THMFP.各土样的氯仿生成量见图 1~3.

2.1 广东省主要土类的 THMFP

采回的 34 个土样中,包括一个腐殖质层土(15 号)和 4 个底层土(25 号、27 号、29 号和 31 号).这 5 个土样仅作为对照用.对 29 个表层土的 THMFP 含量进行分析,可知表层土壤的 β -THMFP 含量范围为:0.7~36.8 $\mu\text{g/g}$ 土,中值为 10.6 $\mu\text{g/g}$ 土; α -THMFP 含量范围为:0.5~21.2 $\mu\text{g/g}$ 土,中值为 3.9 $\mu\text{g/g}$ 土.其中,19 号石灰土的 β -THMFP 和 α -THMFP 均最高,20 号紫色土的 β -THMFP 最低,5 号赤红壤的 α -THMFP 最低. β -THMFP 含量分布在 20 $\mu\text{g/g}$ 土以内的土壤占 86.21%, α -THMFP 含量分布在 10 $\mu\text{g/g}$ 土以内的土壤占 79.31%.

不同类型土壤,其成土过程、成土母质、植被等均有差别,这将影响到土壤有机质的量和质,从而使得土壤的 THMFP 也不同.

同属铁铝土纲的红壤、赤红壤和砖红壤三者中,无论是 α -THMFP 还是 β -THMFP,其平均值的变化均为:红壤>砖红壤>赤红壤,这与

* 大阪水道部.微量有机物发生源调查报告书.1989.4~19.

其有机质含量均值的变化一致.三者中,以砖红壤的风化淋溶程度最彻底,生物循环最迅速;赤红壤次之;红壤的风化强度相对最弱,生物累积相对最强.故广东省自然土壤有机质平均含量以红壤>赤红壤>砖红壤顺序降低.本实验结果与此有所不同.这反映了在研究区域范围内,土壤有机质的量和质因受诸多因素(除成土过程外,还有人为影响程度等因素)的影响而导致

表 1 各土样的基本情况/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Natural environment and some physico-chemical properties of soil samples

编号	土壤类型	pH	O. M.	CEC $/\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	络合态 Fe	络合态 Al	络合态 Mn	络合态 Si	植被类型	采样地点	采样层次
1	红壤	3.94	31.25	14.38	—	—	—	—	桉林	韶关市	表层土
2	红壤	4.12	17.91	8.67	5.82	8.00	0.13	0.12	杉木林	乳源石坑崆	表层土
3	红壤	4.21	9.15	7.42	—	—	—	—	杉木林	韶关市	表层土
4	红壤	4.42	31.61	11.01	—	—	—	—	马尾松	韶关市	表层土
5	赤红壤	3.86	27.48	6.17	7.20	12.29	2.30	0.87	杉树、马尾松	清远源潭	表层土
6	赤红壤	4.33	2.33	4.85	0.73	1.70	0.01	0.12	稀疏针叶林	肇庆水保站	表层土
7	赤红壤	4.02	24.48	7.82	15.76	14.37	NO	NO	马尾松、岗松	清远源潭	表层土
8	赤红壤	4.67	5.03	5.33	0.25	0.87	0.02	NO	蔬菜	广州市	表层土
9	赤红壤	4.3	1.85	4.01	0.69	0.69	0.10	0.04		汕头河浦	表层土
10	赤红壤	4.75	6.32	7.27	3.09	1.96	0.01	0.10	马尾松林	河源源城区	表层土
11	砖红壤	4.56	28.89	6.95	—	—	—	—	湿地松	电白	表层土
12	砖红壤	4.91	9.96	14.42	1.80	1.63	0.16	0.17	甘蔗林	湛江湖光岩区	表层土
13	砖红壤	4.87	13.35	16.78	—	—	—	—	相思林	湛江湖光岩区	表层土
14	黄壤	4.2	2.4	6.23	0.68	1.88	NO	0.12	针阔混交林	乳源石坑崆	表层土
15	黄壤	—	—	—	—	—	—	—	甜槠、枫树	乳源石坑崆	腐殖质层土
16	水稻土	5.64	8.91	8.55	8.08	1.26	0.35	0.23	水稻	揭阳市	表层土
17	水稻土	5.87	18.01	12.74	8.84	2.50	0.25	0.29	水稻	雷州市	表层土
18	石灰土	6.79	21.97	27.42	8.87	9.92	4.73	1.62	马尾松、大芒	阳山县杜步镇	表层土
19	石灰土	6.97	82.62	31.08	35.46	10.74	4.20	2.28	布荆	阳山县高峰镇	表层土
20	紫色土	3.93	13.94	29.24	1.63	2.52	1.49	0.23	青香茅、纤毛鸭嘴草	河源源城区	表层土
21	紫色土	8.45	2.77	40.73	0.08	0.41	0.18	0.28	芒箕	南雄市湖口镇	表层土
22	潮土	4.93	1.55	4.64	3.62	1.23	1.00	0.26	猴芒、茅草	潮州市	表层土
23	潮土	4.33	9.78	13.39	11.39	1.64	0.46	0.68	蔬菜	广州市	表层土
24	赤红壤	4.33	28.88	6.44	—	—	—	—	相思林	中科院鹤山站	表层土
25	赤红壤	4.21	16.45	5.33	8.82	5.15	NO	0.21	相思林	中科院鹤山站	底层土
26	赤红壤	4.28	28.03	8.01	—	—	—	—	桉树林	中科院鹤山站	表层土
27	赤红壤	4.15	10.32	5.72	7.24	4.07	0.04	0.34	桉树林	中科院鹤山站	底层土
28	赤红壤	4.04	16.29	7.99	9.08	5.32	0.02	0.02	林果苗	中科院鹤山站	表层土
29	赤红壤	4.25	8.2	6.21	3.34	1.99	NO	0.07	林果苗	中科院鹤山站	底层土
30	赤红壤	4.56	29.57	7.14	—	—	—	—	针叶林	中科院鹤山站	表层土
31	赤红壤	4.17	7.28	4.15	2.49	2.55	0.03	0.17	针叶林	中科院鹤山站	底层土
32	赤红壤	4.42	3.92	2.68	0.47	1.72	0.22	0.28	光山地	五华水保站	表层土
33	赤红壤	5.36	17.13	4.24	1.51	5.59	0.15	0.60	半林地	五华水保站	表层土
34	赤红壤	4.43	22.36	8.16	6.12	9.35	0.06	0.34	针阔混林地	五华水保站	表层土

1)“—”表示未测,“NO”表示未检出.

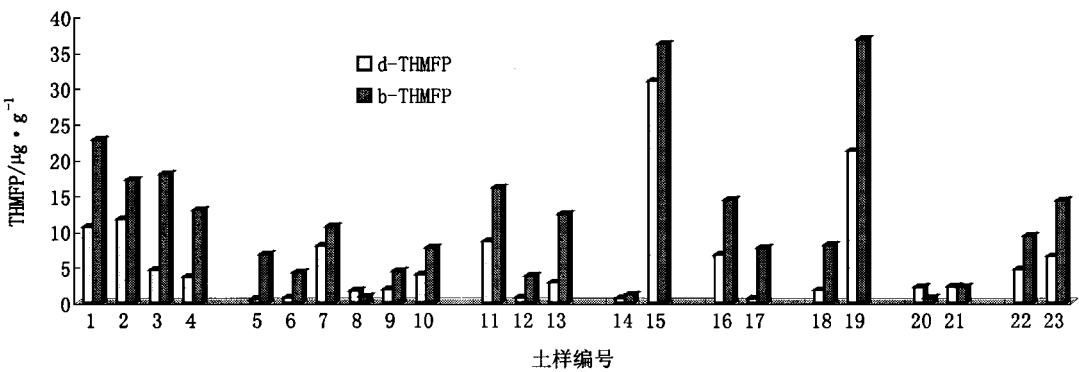


图 1 不同类型土壤的 α THMFP 与 β THMFP

Fig.1 α THMFP and β THMFP of different soils samples

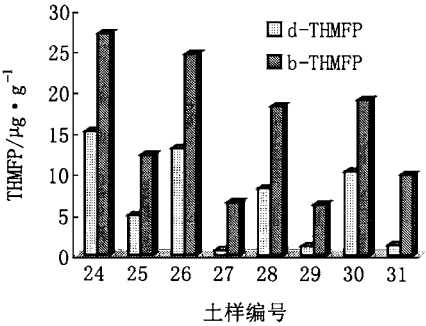


图 2 具不同植被类型土壤的 THMFP 比较

Fig.2 Comparison of THMFPs contents of soils with different type vegetations

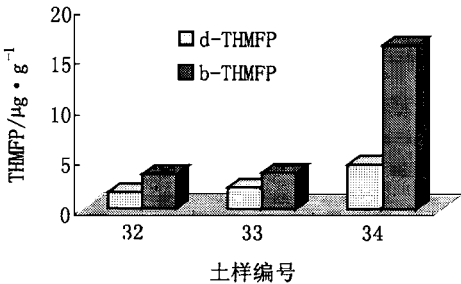


图 3 具不同植被覆盖度土壤的 THMFP 比较

Fig.3 Comparison of THMFPs contents of soils with different percentage covers of vegetations

与全省的平均状况有所不同。

对同属石灰土的 18 号土(红色石灰土)和

19 号土(黑色石灰土),二者有机质含量分别为 21.97g/kg 和 82.62g/kg, β THMFP 分别为 8.1μg/g 土和 36.8μg/g 土, α THMFP 分别为 1.8μg/g 土和 21.2μg/g 土.可见,后者的有机质含量和 THMFP 明显高于前者.红色石灰土的富铝化程度较黑色石灰土高,而腐殖质化特征不如后者明显.而黑色石灰土土体中富含碳酸钙,有利于与腐殖质结合、凝聚,大量累积在表层,其有机质含量远高于其它土壤。

紫色土由于风化剥落强,长期处于幼年,且植被差,生物积累作用弱,有机质含量不高,故相对于其它土类而言,20 号土和 21 号土的 THMFP 很低。

值得一提的是 16 号土和 23 号土,虽然一种是水稻土,一种是湿潮土,但二者的 α THMFP 与 β THMFP 均基本相同,这主要是二者的有机质含量相近且各结合态腐殖酸的 THMFP 变化规律基本一致之故^[10]。

总之,有机质含量较高的红壤、黑色石灰土等的 THMFP 也较高,但大部分土壤的整体 THMFP 含量并不高,可溶出的 THMFP 更低。

2.2 土壤 β THMFP 与 α THMFP 的比较

分子量较小的富里酸易溶于水,是溶解态腐殖质的主要成分.分子量较大的胡敏酸微溶于水,而胡敏素则不溶于水.故后二者可能是悬浮态腐殖质的主要成分.需要指出的是,悬浮态有机物除了指固态不溶有机物外,还包括吸附

于细颗粒上的可溶态有机物.在一定条件下该部分有机物能解吸而重新进入水体,成为水中可溶态有机物的重要潜在来源.

据报道^[11,12],悬浮态有机物是氯化过程中生成氯仿的主要前驱物质.本实验结果也证明了这一点.由图 4 可见,总体而言,土壤浸提液一经过滤, CHCl_3 生成量就明显下降.而且大部分样品中 $\delta\text{-THMFP}$ 与 $\gamma\text{-THMFP}$ 之比不超过 0.5,这说明悬浮态有机物对 THMs 生成量的贡献率很大,在某些土样中甚至占主导地位,如 5 号土、6 号土、12 号土、17 号土、27 号土、29 号土和 31 号土中 $\delta\text{-THMFP}$ 与 $\gamma\text{-THMFP}$ 的比值小于 0.2.

此外,图 4 中 8 号土、20 号土和 21 号土的 $\delta\text{-THMFP}/\gamma\text{-THMFP}$ 的值超过 1.这说明悬浮物对 THMs 生成量的贡献既可能是正的也可能是负的.悬浮物是指土壤浸提液中所含的粘

土矿物、粉砂、腐殖质和铁铝水合氧化物等.有机物、无机物在悬浮物-水相界面进行着一系列的迁移转化过程,如吸附-解吸作用、沉淀-溶解作用等.在整个氯化反应阶段,有机物在固水两相间的迁移转化过程仍动态进行着.处于溶解态的有机物可能直接被吸附到悬浮物上,或转化为不溶物后再吸附于悬浮物上,从而减少了有机物与氯的接触面积;或反应的中间产物因被悬浮物吸附而使得其进一步转化为终产物 THMs 的反应受到抑制.这些均可能导致浸提液的 $\gamma\text{-THMFP}$ 反而比 $\delta\text{-THMFP}$ 低.从这一角度看,悬浮物对 THMs 生成量的贡献是负的.所以,不能简单地认为水体的整体 THMFP ($\gamma\text{-THMFP}$) 等于溶解态有机物的 THMFP ($\delta\text{-THMFP}$) 与悬浮态有机物的 THMFP ($s\text{-THMFP}$) 之和.悬浮物对水体 THMFP 的贡献有待更深入的研究.

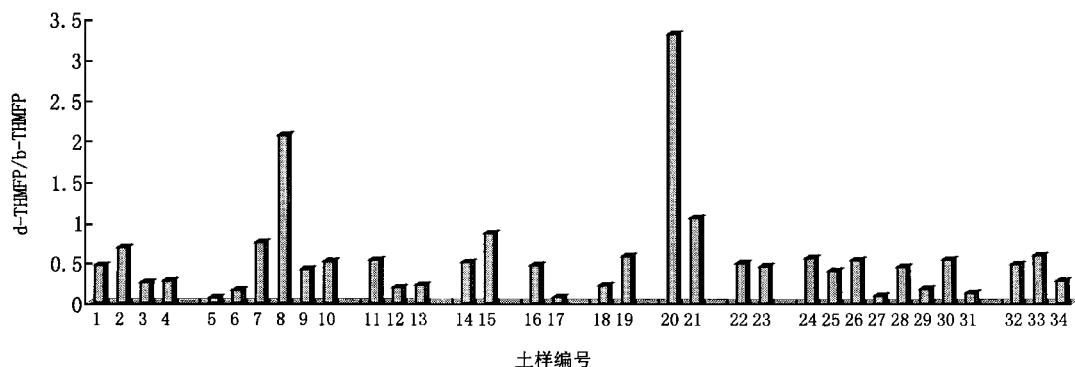


图 4 过滤样的 THMFP 与不过滤样的 THMFP 之比 ($\delta\text{-THMFP}/\gamma\text{-THMFP}$)

Fig. 4 The ratio of $\delta\text{-THMFP}$ to $\gamma\text{-THMFP}$ of soil samples

2.3 影响土壤 THMFP 的因素

土壤 THMs 生成量主要与土壤中的有机质含量及组成有关.影响土壤有机质含量及组成的因素主要有:土壤理化性质(如氧化物组成特性、质地、 pH 值等)、植被类型、耕作活动等.而这些因素也对土壤 THMFP 产生影响.

(1) 土壤理化性质与土壤 THMFP 的关系
不同的土壤环境,影响着有机质的积累与转化,从而形成卤代活性各异的各种有机质.对 29 个表层土的 $\delta\text{-THMFP}$ 和 $\gamma\text{-THMFP}$ 与各项

理化性质如 CEC 、 pH 、有机质含量(O. M.)等作相关分析,相关系数列于表 2.

从表 2 可知,土壤 $\delta\text{-THMFP}$ 和 $\gamma\text{-THMFP}$ 分别与交换性 Na 、有机质含量、游离态 Fe 含量、络合态 Fe 含量和络合态 Al 含量等呈极显著正相关或显著正相关,与活性态 Si 含量呈显著负相关.土壤中三卤甲烷的前驱物质主要是土壤的有机质,故土壤 THMFP 含量与土壤有机质含量之间的相关系数较高.络合态氧化物主要指与有机质结合的氧化物,故土壤

THMFP 与络合态 Fe、Al 和 Si 之间也存在正相关关系,其中土壤 THMFP 与络合态 Fe 含量的相关关系最为显著.这可能与 Fe 结合的这部分有机质的卤代活性较高有关.但作为腐殖质主要胶结物质的交换性 Ca 粘粒($<0.002\text{ mm}$)含量与土壤 THMFP 之间并不存在显著的相关关系.需要指出的是,除了有机质含量对土壤 THMFP 的影响是直接的外,其它各项理化性质主要通过影响有机质的量和质或卤化反应过程等而对土壤 THMFP 产生影响.所以,不能仅从它们之间的相关关系而得出任何直接的因果关系.

(2)表 底层土的 THMFP 比较 土壤的有机质主要聚积在表层,底层土的有机质含量相对较少.由图 2 可见,无论是 δ THMFP 还是 γ THMFP,底层土均低于表层土.采自乳源石坑崆 1500 m 处的黄壤腐殖质层(15 号),因大量枯枝落叶残积地表,形成富含腐殖质的 A0 层.而采自乳源石坑崆 880 m 处的黄壤表层(14 号),有机质含量相对低很多,故其 THMFP 比前者低得多.

(3)植被对土壤 THMFP 的影响 植被类型及覆盖度不同,土壤有机质含量也有差异.24 号土至 31 号土均采自中科院鹤山丘陵综合试验站,土壤类型、母岩、地形等均相同,但具有不同的植被类型(见表 1).仅就表层土而言,其有机质含量的大小顺序为:30 号 $>$ 24 号 $>$ 26 号 $>$ 28 号. δ THMFP 和 γ THMFP 二者的变化规律一致,为 24 号 $>$ 26 号 $>$ 30 号 $>$ 28 号.有机质含量与 THMFP 的大小顺序有所不同,因 THMFP 的大小除了与有机质含量有关外,还与其卤代活性有关.12 号土和 13 号土都是采自湛江湖光岩区发育于玄武岩的砖红壤,但 12 号土的植被是人工种植的甘蔗林,枯枝落叶的回归量不如 13 号土的相思林大,有机质含量相对较低,所以 THMFP 较 13 号土低.而同采自五华水保站的 32 号土、33 号土和 34 号土的变化更明显.32 号土是光山地,属水土流失区,33 号土为半林地,34 号土为针阔叶混林地.三者仅植被覆盖度不同,但在有机质含量及土壤的 δ THMFP 和 γ THMFP 方面有明显差异,其变化规律一致,均为:34 号 $>$ 33 号 $>$ 32 号.

表 2 土壤理化性质与土壤 THMFP 的相关关系/ $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 Relationship between physico-chemical properties of soils and THMFP contents of soil samples												
项 目	CEC	Ca	Mg	K	Na	pH	O. M.	颗粒组成/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$				
							/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	2 ~ 0.25	0.25 ~ 0.05	0.05 ~ 0.002	<0.002	
N(样品数)	29	28	28	28	28	29	29	29	29	29	29	
δ THMFP	0.108	0.189	0.133	0.02	0.493 ²⁾	0.02	0.747 ²⁾	- 0.358	0.236	0.127	0.062	
γ THMFP	0.057	0.127	0.035	0.033	0.552 ²⁾	0.014	0.764 ²⁾	- 0.431 ¹⁾	0.160	0.124	0.228	
项 目	游离态 Fe	活性态 Fe	络合态 Fe	游离态 Al	活性态 Al	络合态 Al	游离态 Mn	活性态 Mn	络合态 Mn	游离态 Si	活性态 Si	络合态 Si
N(样品数)	28	28	21	28	28	21	28	28	21	28	28	21
δ THMFP	0.491 ²⁾	- 0.054	0.845 ²⁾	0.310	- 0.288	0.435 ¹⁾	- 0.08	- 0.032	0.343	0.210	- 0.433 ¹⁾	0.514 ¹⁾
γ THMFP	0.601 ²⁾	- 0.044	0.881 ²⁾	0.260	- 0.290	0.490 ¹⁾	- 0.022	0.148	0.409	0.189	- 0.442 ¹⁾	0.604 ²⁾

1) 在 0.05 显著性水平相关 2) 在 0.01 显著性水平相关. $r_{0.05[27]} = 0.367$, $r_{0.01[27]} = 0.470$, $r_{0.05[26]} = 0.374$, $r_{0.01[26]} = 0.478$, $r_{0.05[19]} = 0.433$, $r_{0.01[19]} = 0.549$.

3 小结

(1) 根据测定结果,各主要土类表层土中 γ THMFP 含量范围为:0.7 ~ 36.8 $\mu\text{g/g}$ 土,中

值为 10.6 $\mu\text{g/g}$ 土; δ THMFP 含量范围为:0.5 ~ 21.2 $\mu\text{g/g}$ 土,中值为 3.9 $\mu\text{g/g}$ 土.其中,19 号石灰土的 γ THMFP 和 δ THMFP 均最高,20 号紫色土的 γ THMFP 最低,5 号赤红壤

的 α -THMFP 最低. 不同类型土壤的 THMFP 含量有较大差别.

(2) 实验结果表明悬浮态有机物对 THMs 生成量有较大的正贡献, 但也出现了负贡献的情况. 有关悬浮物对生成 THMs 的作用需进一步研究.

(3) 影响土壤 THMFP 的因素主要有土壤理化性质(如有机质含量、各种氧化物含量等)、土壤发生层次、植被等.

土壤的 THMs 前驱物质主要是有机质, 土壤的 THMFP 与有机质含量密切相关. 由广东省土壤有机质分布情况(广东省土壤有机质含量图)可知^[13], 有机质含量较高(属一级和二级)的土壤主要分布在粤北地区; 相对于珠江、东江、西江等河流而言, 北江沿岸多分布有机质含量较高的土壤. 故这些地区的水体由土壤输入 THMs 前驱物质的量将会较大, 土壤腐殖质是其 THMFP 的重要潜在天然来源.

参考文献:

- 1 Rook J. Formation of haloforms during chlorination of natural water. *Water Treatment & Examination*, 1974, **23**(2): 234.
- 2 Bellar T, J Lichtenburg, R Kroner. The occurrence of organohalides in finished drinking waters. *Journal of American Water Works Association*, 1974, **66**(12): 703.
- 3 Adin A, Katzhendler J, Alkaslassy D et al. Trihalomethane formation in chlorinated drinking water: a kinetic model. *Water Research*, 1991, **25**(7): 797 ~ 805.
- 4 Keiko Ichihashi, Kiyoshi Teranishi, Akio Ichimura. Brominated trihalomethane formation in halogenation of humic acid in the coexistence of hypochlorite and hypobromite ions. *Water Research*, 1999, **33**(2): 477 ~ 483.
- 5 Ivana Ivancev-Tumbas, Bozo Dalmacija, Zagorka Tamas et al. The effect of different drinking water treatment processes on the rate of chloroform formation in the reactions of natural organic matter with hypochlorite. *Water Research*, 1999, **33**(18): 3715 ~ 3722.
- 6 Judd S J, Black S H. Disinfection by product formation in swimming pool waters: a simple mass balance. *Water Research*, 2000, **34**(5): 1611 ~ 1619.
- 7 Visvanathan C, Bowo Djoko Marsono, Biswadeep Basu. Removal of THMP by nanofiltration: effects of interference parameters. *Water Research*, 1998, **32**(12): 3527 ~ 3538.
- 8 Amy E Childress, Eric M Vrijenhoek, Menachem Elimelech et al. Particulate and THM precursor removal with ferric chloride. *Journal of Environmental Engineering*, 1999, **125**(11): 1054 ~ 1061.
- 9 Cheng Fang Lin, Yuh-Jay Huang, Oliver J Hao. Ultrafiltration processes for removing humic substances: effect of molecular weight fractions and PAC treatment. *Water Research*, 1999, **33**(5): 1252 ~ 1264.
- 10 李适宇, 仇荣亮, 杨秀虹等. 华南地区土壤中不同结合态腐殖质的三卤甲烷生成潜能. *环境科学*, 2000, **21**(4): 47 ~ 50.
- 11 陶澍, 王永华, 刘文新等. 引滦水中不同形态天然有机物的卤代活性. *环境科学学报*, 1994, **14**(1): 19 ~ 23.
- 12 刘文新, 陶澍, 王永华. 京密引水中不同形态天然有机物的卤代活性. *中国环境科学*, 1996, **16**(5): 369 ~ 372.
- 13 广东省土壤普查办公室编著. *广东土壤*. 北京: 科学出版社, 1993. 419 ~ 427.