

# 土壤中三卤甲烷 (THMs) 前驱物质流出的规律

杨秀虹<sup>1</sup>, 李适宇<sup>1</sup>, 仇荣亮<sup>2</sup>, 王鹏<sup>1</sup>, 杨广杏<sup>1</sup> (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:** 通过室内模拟淋溶实验, 初步探讨了以三卤甲烷生成潜能 (THMFP) 为指标的土壤三卤甲烷前驱物质的流出规律。结果显示: 土壤淋出液中 THMFP 的浓度与土壤性质特别是土壤中腐殖质含量、组成与卤代活性, 模拟雨水的酸度及累积淋溶量等有关。土壤中所含腐殖质的量越大, 腐殖质的卤代活性越高且溶解迁移能力越强, 则淋出液中 THMFP 的浓度越大; 酸度最低 (pH 3.0) 的模拟雨水淋洗下, 淋出液中 THMFP 的浓度最低; 模拟雨水的 pH 值愈低, 土壤 THMFP 愈易流出; 本实验条件下, 淋出液中 THMFP 的浓度随累积淋溶量的增大呈下降趋势。

**关键词:** 土壤; 三卤甲烷前驱物质; 三卤甲烷生成潜能; 流出

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2002)01-06-0108

## Outflows of Trihalomethane Precursors from Soils

Yang Xiuhong<sup>1</sup>, Li Shiyu<sup>1</sup>, Qiu Rongliang<sup>2</sup>, Wang Peng<sup>1</sup>, Yang Guangxing<sup>1</sup> (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:** Outflows of trihalomethane formation potential (THMFPs) which was chosen as an index of the amount and reactivity with chlorine of THMs precursors from soils were studied with soil column experiment. The results indicated that factors influencing THMFP concentrations of leachates were the physicochemical properties of soils, especially contents, composition and reactivities with chlorine of humic substances, the pH value of feed solution and cumulative leaching volume. The THMFP concentrations of leachates rose with increases in amounts of humic substances with high solubility as well as reactivity with chlorine. The effluents of soil samples contained the lowest THMFP concentrations under the feed solution of the lowest pH value (pH 3.0). THMFPs appeared to more easily flow out from soils with the feed solution of lower pH value, which was properly due to the increases in solubility of humic substances under the lower pH value conditions. In most cases, THMFP concentrations of leachates showed decline with the increase of cumulative leaching volumes of feed solution.

**Key words:** soil; trihalomethane precursor; trihalomethane formation potential; outflow

长期以来, 氯是一种有效、廉价的饮用水消毒剂。自从 1974 年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  $\text{CHCl}_3$ 、 $\text{CHBrCl}_2$ 、 $\text{CHBr}_2\text{Cl}$  和  $\text{CHBr}_3$ )<sup>[1,2]</sup> 以来, 饮用水氯化消毒副产物的问题已引起各国广泛关注。目前, 对这方面的研究主要在于 THMs 的形成机理<sup>[3-6]</sup>、去除技术<sup>[7-10]</sup>、改进消毒工艺及采用其它消毒剂<sup>[11,12]</sup> 的探讨上。有关 THMs 前驱物质的来源、分布、迁移转化方面的调查研究则很少。80 年代在日本大阪地区所作的调查<sup>[13,14]</sup> 结果表明, 土壤腐殖质是水源 THMs 前驱物质的重要来源。

降雨作用下, 土壤腐殖质可能由地表径流冲刷携带、侧向壤中流淋溶或纵向流下渗等方式进入水体。其中, 侧向壤中流的淋溶作用虽然往往并不连续, 但由于其作用范围大, 在某些条件下, 可以成为表土有机物淋

溶作用的最主要途径<sup>[15]</sup>。所以很有必要对土壤中的 THMs 前驱物质的流出进行研究。本文拟就广东省几种较典型的土壤进行淋溶实验, 研究以三卤甲烷生成潜能 (Trihalomethane Formation Potential, THMFP) 为指标的 THMs 前驱物质的流出与土壤性质、降雨状况等的关系, 为进一步阐明 THMs 前驱物质由土壤进入水源的迁移转化机理以及定量评价土壤对水源 THMs 前驱物质的贡献提供依据。

### 1 实验部分

#### 1.1 实验设计

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); 高等学校骨干教师资助计划项目

作者简介: 杨秀虹 (1975 ~), 女, 在读博士生, 主要研究方向为水环境模拟与水环境管理。

收稿日期: 2000-11-21; 修订日期: 2001-03-05

(1) 土壤类型 选取广东省 5 种主要土类,即红壤 性紫色土(21 号)进行淋溶实验.各土样部分理化性质(1 号)赤红壤(8 号)砖红壤(12 号)黄壤(15 号)和碱 见表 1,表 2<sup>[16]</sup>.

表 1 各土样的基本情况

Table 1 Physico-chemical properties of soil samples

编号	土壤类型	pH	O. M. /g·kg <sup>-1</sup>	CEC /cmol· kg <sup>-1</sup>	Exch-Ca /mmol· kg <sup>-1</sup> (<0.002mm)	Clay content /g·kg <sup>-1</sup>	游离态 Fe/g· kg <sup>-1</sup>	游离态 Al/g· kg <sup>-1</sup>	植被 类型	采样 层次
1	红壤	3.94	31.25	14.38	14.72	469	17.63	3.03	桉林	表层土
8	赤红壤	4.67	5.03	5.33	11.38	317	7.53	2.04	蔬菜	表层土
12	砖红壤	4.91	9.96	14.42	17.85	300	6.30	2.25	甘蔗林	表层土
15	黄壤								甜槠 枫树	腐殖质层
21	紫色土	8.45	2.77	40.73	273.9	227	1.41	0.35	芒箕	表层土

表 2 土样中各结合态腐殖酸有机碳量/g·kg<sup>-1</sup>及各结合态腐殖酸的 THMFP<sup>1)</sup>/μg·L<sup>-1</sup>

Table 2 Contents of organic C(g/kg) and THMFP(μg/L) of various combined humus of the soil samples

编号	HA1		HA2		HA3		THA <sup>2)</sup>	FA1		FA2		FA3		TFA <sup>3)</sup>	HA/FA
	OC	THMFP	OC	THMFP	OC	THMFP	OC	OC	THMFP	OC	THMFP	OC	THMFP	OC	OC
1	4.94	37.0	0.14	210.1	2.04	40.8	7.12	10.27	114.1	0.62	14.9	1.97	128.1	12.85	0.55
8	0.34	94.6	0.11	139.2	0.16	59.4	0.61	1.79	78.5	0.56	125.3	1.98		4.34	0.14
12	0.86	34.8	0.24	86.3	1.01	23.4	2.10	5.01	58.5	0.65	125.2	2.83	39.3	8.48	0.25
15	20.28		2.36	101.0	11.20	58.0	33.84	20.42	235.2	2.19	182.6	8.41	238.1	31.02	1.09
21	0.12	18.2	0.10	150.2	0.32	44.4	0.55	0.12	131.5	0.17	370.4	1.33	7.1	1.62	0.34

1) FA1 和 HA1 分别指铁铝键合为主的松结态富里酸和胡敏酸;FA2 和 HA2 分别指钙键合为主的稳结态富里酸和胡敏酸;FA3 和 HA3 分别指粘粒键合为主的紧结态富里酸和胡敏酸;2)指 HA1、HA2 和 HA3 三者有机碳量之和;3)指 FA1、FA2 和 FA3 三者有机碳量之和.

(2) 降雨量 根据广东省年均降雨量 1700 mm 设计淋溶量,对上述土壤进行淋溶的最大累积淋溶量约为 8500 mm(约 6400 ml),相当于 5 年降雨量.

(3) 降雨酸度 根据 1996~1997 年广东省降水 pH 情况[《广东省环境质量报告书》],选取如下几种酸度进行实验:3.00、4.50、5.60、7.00 和 8.00.

(4) 淋溶液(模拟雨水)的成分 根据 1996~1997 年广东省平均降雨化学成分[《广东省环境质量报告书》]配制模拟雨水.先配制模拟雨水母液(浓缩 200 倍),然后由该母液稀释成所需浓度的淋溶液(如表 3 所示),并用浓度比为 4:1 的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 酸液及稀碱液调节至所需的酸度.

表 3 模拟雨水成分

Table 3 Composition of simulated rain water

离子	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
浓度/mg·L <sup>-1</sup>	6.20	1.55	1.40	1.35	0.99	0.33	0.45	0.11

## 1.2 实验装置和操作

淋溶柱采用内径 31 mm、高 250 mm 的透明有机玻璃管,管底铺 3 层快速定量滤纸和一层玻璃纤维(起缓冲作用).称取 10 目土样 135.8 g,装入管内.装入管中土样的容重分别为:红壤(1 号)是 1.14 g/cm<sup>3</sup>,赤红壤(8 号)是 1.23 g/cm<sup>3</sup>,砖红壤(12 号)是 1.20 g/cm<sup>3</sup>,黄壤(15 号)是 0.86 g/cm<sup>3</sup>,紫色土(21 号)是 1.44 g/cm<sup>3</sup>.土样上铺一薄层玻璃纤维,以防止土粒溅出.将土柱先用

少量去离子水浸润、沥干.

各土样的粘性不同,其淋出的快慢也不同.实验中保持土柱上 3 cm 高的液层,使其自然淋溶.取样时间间隔视不同土柱而异.收集够约 200 ml 淋出液后混匀,测定其 pH 值、COD 和 THMFP(文中未给出 pH 值和 COD 的值).

## 1.3 测定方法

测定淋出液 THMFP 的氯化条件为:加氯量 8 mg/

L,水样 pH 值 7.0,反应温度 20℃,反应时间 24h.采用液-液萃取气相色谱法测定氯化反应生成的 THMs 含量.淋出液的 COD 采用高锰酸钾法测定.

## 2 结果与讨论

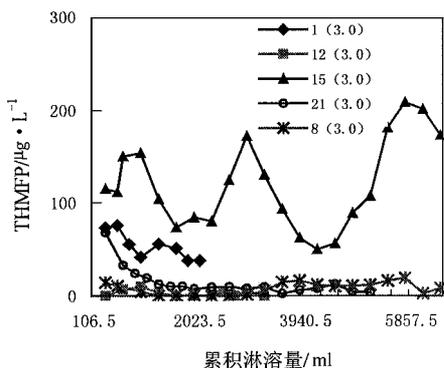
### 2.1 不同类型土壤中 THMFp 的流出

土壤 THMFp 的流出与土壤性质特别是腐殖质的含量与组成密切相关.如图 1(其它酸度的淋溶曲线图略)所示,淋溶初期,5 种土壤淋出液中 THMFp 浓度的大小顺序为:黄壤(15 号) > 红壤(1 号) > 碱性紫色土(21 号) > 赤红壤(8 号) > 砖红壤(12 号).随着淋溶的不断进行,各土壤中 THMFp 的流出规律有所改变.如砖红壤(12 号)淋出液中 THMFp 呈现出超过赤红壤(8 号)的趋势.在淋出液 THMFp 的浓度方面(各种酸度模拟雨水淋洗下),赤红壤(8 号)和砖红壤(12 号)两者基本上不超过 50 $\mu\text{g}/\text{L}$ .但红壤(1 号)、黄壤(15 号)和紫色土(21 号)均有淋出液的 THMFp 浓度超过 100 $\mu\text{g}/\text{L}$  或 50 $\mu\text{g}/\text{L}$ ,只是紫色土(21 号)在淋溶了约 500 ml 之后,淋出液中 THMFp 的浓度已降至 50 $\mu\text{g}/\text{L}$  以下.这说明由土壤侧向淋溶产生的这部分 THMFp 对水体的贡献是不可忽视的.

供试土壤中,胡敏酸总含量,富里酸总含量以及腐殖质总含量的变化规律均为黄壤(15 号) > 红壤(1 号) > 砖红壤(12 号) > 赤红壤(8 号) > 碱性紫色土(21 号).这与 THMFp 的溶出规律有出入.因为 THMFp 的流出很大程度上是取决于土壤中腐殖质各组分的可溶性及卤代活性.黄壤(15 号)的腐殖质组成中虽然以较难溶解迁移的胡敏酸为主( $\text{HA}/\text{FA} > 1$ ),但黄壤(15 号)无论是腐殖质含量还是其 THMFp 均较高,特别是活性较高的 FA 的含量和 THMFp 基本上最高,所以淋出液的 THMFp 的浓度最大.红壤(1 号)则次之.值得注意的是,紫色土(21 号)虽然各类腐殖酸含量均最低,但其卤代活性并不低,其中较易溶出的 FA 的 THMFp 较高.此外,其初始 pH 值高、CEC 含量大,具有较高的酸缓冲能力,故各种酸度模拟雨水淋洗下,淋出液 pH 值始终保持在 7.5 以上,而碱性条件下有利于更多腐殖酸溶出.这可能是造成紫色土(21 号)淋出液中 THMFp 的浓度超过赤红壤(8 号)及砖红壤(12 号)的主要原因.

土壤淋出液中 THMFp 的浓度与淋出的快慢有关.淋出越慢,即水分在土壤中停留时间越长,固液两相的相互作用就越充分,从而有利于土壤中腐殖酸的解吸释放.考虑到这一点,本实验不对淋出速度作统一控制,以期反映不同土壤中 THMFp 的实际流出情况.淋出的快慢与土壤的质地有关.根据土壤质地分类标准,红壤(1 号)为粉砂质粘土,赤红壤(8 号)为粘壤土,砖红

壤(12 号)为砂质粘壤土,紫色土(21 号)为粉砂壤土.在饱和和流条件下,质地较粘的土壤中水分较难下渗,淋出较慢.红壤(1 号)淋出最慢,紫色土(21 号)次之.赤红壤(8 号)的淋出速度中等且比较稳定.砖红壤(12 号)开始淋出很快,淋洗一段时间后,变得比赤红壤(8 号)还慢.砖红壤(12 号)在淋溶后期淋出的 THMFp 超过赤红壤(8 号)可能与此有关.黄壤(15 号)在实验初期淋出较快,但很快就变慢.这与其腐殖质含量大,遇水易膨胀,从而阻碍和减少了水流通道有关.



1(3.0)中的“1”表示土样编号,“3.0”表示淋溶液的 pH 值.

图 2~6 中的含义同图 1.

图 1 pH3.0 淋溶液作用下各土样的 THMFp 淋溶曲线

Fig.1 THMFp leaching curves of soil samples with feed solution of pH3.0

### 2.2 土壤 THMFp 的流出与模拟雨水酸度的关系

各土样淋出液中 THMFp 的浓度随淋溶液酸度的变化呈现出相似的趋势(见图 2~6).总的来说,5 种酸度中以 pH 值 3.0 淋溶液作用下,淋出液中 THMFp 的浓度最低.但对于黄壤(15 号),除 pH 值 3.0 外其它酸

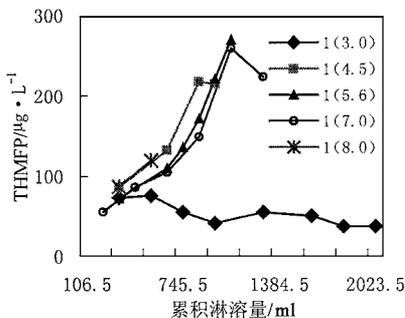


图 2 不同酸度淋溶液作用下红壤(1号) THMFp 淋溶曲线

Fig.2 THMFp leaching curves of sample 1 with feed solutions of different pH values

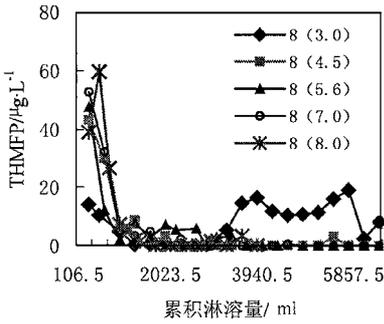


图 3 不同酸度淋溶液作用下赤红壤(8号)的 THMFP 淋溶曲线

Fig. 3 THMFP leaching curves of sample 8 with feed solutions of different pH values

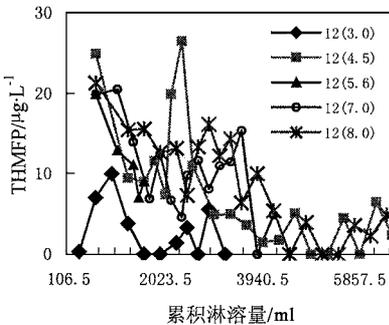


图 4 不同酸度淋溶液作用下砖红壤(12号)的 THMFP 淋溶曲线

Fig. 4 THMFP leaching curves of sample 12 with feed solutions of different pH values

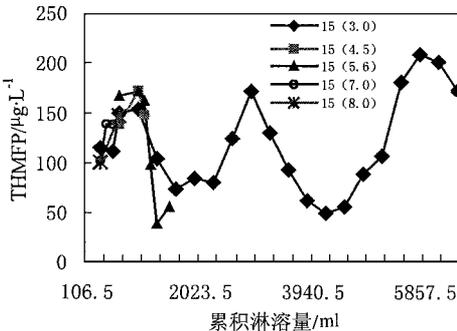


图 5 不同酸度淋溶液作用下黄壤(15号)的 THMFP 淋溶曲线

Fig. 5 THMFP leaching curves of sample 15 with feed solutions of different pH values

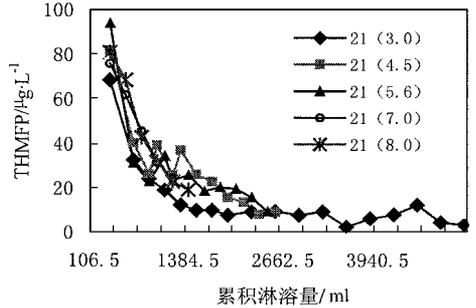


图 6 不同酸度淋溶液作用下紫色土(21号)的 THMFP 淋溶曲线

Fig. 6 THMFP leaching curves of sample 21 with feed solutions of different pH values

和 8.0 的 4 种模拟雨水淋洗下,各淋出液中 THMFP 的浓度变化不大,没有较明显的规律。

淋出液中 THMFP 的浓度决定于淋出有机物的含量和种类。降雨特别是酸雨会改变土壤的性质,从而影响了土壤中可淋出有机物的含量与种类。本实验中,处于酸雨定义(pH < 5.6)范围的主要是 pH 为 4.5 和 3.0 两种模拟雨水,而只有 pH 3.0 作用下输入的质子累积总量才有可能超过土壤阳离子交换量,并造成盐基离子快速淋失,同时对土壤产生较强的酸化作用。如只有在该酸度作用下,赤红壤(8号)淋出液的 pH 值才出现较明显的下降。酸化条件下,不利于溶出更多的腐殖酸(特别是不溶于酸的 HA),这由淋出液中反映有机物含量的 COD 的变化也说明了这一点,即 pH 3.0 淋溶液作用下,淋出的 COD 最低。此时淋出液中的腐殖酸可能是以能溶于酸的 FA 为主。当土壤中盐基离子大量淋失之后,土壤将转入以矿物风化为主的缓冲过程<sup>[17]</sup>。矿物特别是粘土矿物风化,可能会破坏有机无机复合体,使复合的腐殖质释放出来。赤红壤(8号) pH 值 3.0 的 THMFP 淋溶曲线在淋溶后期(累积淋溶量大于 3000 ml)呈现上升趋势并超过其它酸度淋溶曲线。这可能与淋溶后期粘土矿物风化导致部分可淋出腐殖质的释放有关。此外,酸雨还可能影响土壤微生物的活动及有机质的转化<sup>[18]</sup>,但该过程对本实验中 THMFP 的流出的影响有待另行研究。

模拟雨水的酸度也对淋出速度产生影响。实验中发现,随模拟雨水 pH 值的降低,THMFP 淋出变快,土壤 THMFP 显示出愈易流出的趋势。而模拟雨水 pH 值增大则导致淋出变慢。原因可能是碱性较高的淋溶液对土壤胶体有分散作用,易引起土粒堵塞土壤孔隙,造成淋出变慢,但这同时也有利于有机物充分溶出,使得

度淋溶液的总淋溶量很低,所以无法比较各种酸度对 THMFP 流出的影响。另一方面,在 pH 值 4.5、5.6、7.0

淋出的 THMFPP 增加。

### 2.3 土壤 THMFPP 的流出随累积淋溶量的变化

累积淋溶量在一定程度上反映了时间因素、降雨强度对土壤 THMFPP 流出的影响。由图 2~6 可见,淋出液中 THMFPP 的浓度随累积淋溶量增大而呈下降趋势,但各土样的变化情况有所不同。

红壤(1号)各酸度淋溶液的累积淋溶量均较少,而其腐殖酸含量仅次于黄壤(15号),可溶出有机物的总量远多于已淋出的量。所以,红壤(1号)除 pH3.0 的 THMFPP 淋溶曲线呈下降趋势外,其它酸度淋溶曲线则呈上升趋势。本实验结果仅能说明该土样 THMFPP 的短期流出趋势。

赤红壤(8号)的腐殖质含量较低,其中易溶解迁移的 FA 的 THMFPP 则最低。在淋洗了一定量的淋溶液后,土壤中可溶出有机物大部分已迁出土体,其它来源如非可溶性有机物的降解释放,因时间尺度较长而来不及补充。因此,出现了淋溶后期淋出液中 THMFPP 的浓度趋于 0 $\mu\text{g/L}$  的现象。至于 pH3.0 的 THMFPP 淋溶曲线的变化,如上文所述可能与矿物风化有关。

砖红壤(12号)各酸度 THMFPP 淋溶曲线的起伏较大,但总的趋势是随累积淋溶量的增大而下降。淋溶曲线的起伏可能与其淋出速度的变化有关。

黄壤(15号)中,除 pH3.0 外其它酸度淋溶液的累积淋溶量太低,难以反映变化趋势。pH3.0 的 THMFPP 淋溶曲线在总淋溶量范围内并没显示出与其它土样相似的下降趋势。这与该土样中含有大量腐殖酸有关,即使淋洗了约 6400 ml 的淋溶液,土壤中可淋出有机物的量仍很丰富。

紫色土(21号)各酸度的 THMFPP 淋溶曲线均呈下降趋势。淋溶初期,淋出液中 THMFPP 的浓度随累积淋溶量增大而下降较快,在累积淋溶量超过约 2000 ml 后,流出的 THMFPP 的量渐趋平稳。

### 2.4 土壤中 THMs 前驱物质流出机理的探讨

土壤中流出的 THMs 前驱物质主要指土壤中可淋出的有机物质。在土壤中,矿质胶体(粘土矿物、水化铁、铝氧化物等)与有机胶体往往通过各种键力相互结合,形成有机-无机复合物。水溶性有机物或者被吸着在复合物表面,或者溶于其中的土壤重力水或毛管水中。淋溶过程中,存在于土壤毛管水中的可溶性有机物首先进入重力水中(分子扩散及相迁移)并随之迁出土体。由于土壤中的吸附解吸平衡受到破坏,吸着态水溶性有机物继而解吸进入土壤溶液中(解吸过程),并被淋溶液携带迁移(对流扩散)。在淋溶初期固液两相之间尚未达到平衡时,土壤中可溶出有机物的释放以解

吸作用为主。随着淋溶不断进行,土壤复合体中大分子非可溶性有机物在微生物作用下产生的降解产物将不断释放迁移到水相。但是淋溶、解吸、降解三者时间尺度有所不同。淋溶过程达到平衡的时间最短,其次是解吸过程,而降解过程最长<sup>[15,19]</sup>。所以,在淋溶初始阶段,THMs 前驱物质的流出主要以淋溶、解吸为主。本实验中,与实际情况相比,整个淋溶期(约 1~3 个月,视各土柱的淋出快慢而异)不长,淋溶强度大且处于渍水条件,微生物的降解活动在该条件下对 THMs 前驱物质流出的作用有待研究。

本实验中还考察了酸雨对 THMs 前驱物质流出的影响。酸雨能引起土壤盐基离子淋溶,矿物风化并造成土壤酸化,这会抑制腐殖酸含氧功能团中 H<sup>+</sup> 的解离,同时也影响到土壤中的吸附解吸平衡。当酸雨引起土壤矿物特别是次生粘土矿物风化时,可能会破坏有机无机复合物,使得复合的腐殖质释放出来,成为土壤可淋出 THMs 前驱物质的另一来源。此外,Greszta 的研究<sup>[20]</sup>表明,酸雨会引起细菌(尤其是磷细菌和硫细菌)活性降低,数量减少,而真菌数量增加,但种类变化较大。同时酸雨引起土壤富里酸、胡敏酸减少,而吉马多美朗酸(指腐殖质中溶于碱和酒精但不溶于酸的部分)增加。本实验条件下,是否会出现该结果以及其对淋出 THMFPP 的影响如何需进一步研究。降雨作用下,土壤中有机物最终转化成为径流中 THMs 前驱物质的整个可能过程如图 7 所示。

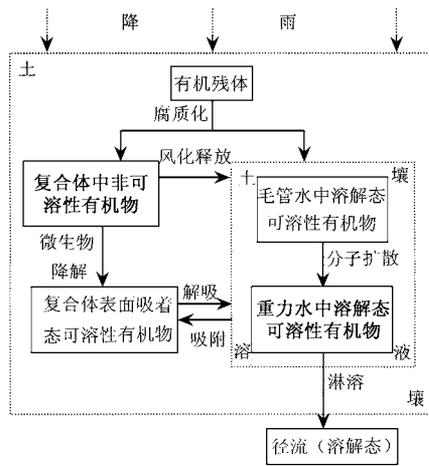


图 7 土壤中有有机物(THMs 前驱物质)转化迁移过程示意图

Fig.7 Schematic diagram of the processes of transformation and transportation of organic matter as THMs precursors in soil

有关土壤中 THMs 前驱物质流出机理的探讨仅停留在理论上的解释、推测,为定量摸清由土壤溶出的

THMs 前驱物质的量,需要开展各种有机物释放过程的动力学研究,寻求各动力学过程的表达式.另一方面,自然界中土壤和生长在其中的生物之间是相互作用、相互制约,不断演变,并逐步趋向动态平衡和相对稳定的统一整体.将生物如微生物、植物仅视为影响因素之一是不够的,应该将两者视作有机整体中的不同组成部分,研究它们之间的相互作用与制约,使研究结果更好地反映实际土壤生态系统中 THMs 前驱物质的流出情况.

### 3 小结

通过室内土壤柱淋溶实验,初步研究了广东省 5 种典型土类中 THMs 前驱物质的流出规律,结果显示:土壤中所含腐殖质的量越大,腐殖质的卤代活性越高且溶解迁移能力越强,则淋出液中 THMF 的浓度越大;总的来说,酸度最低( $pH3.0$ )的模拟雨水淋洗下,淋出液中 THMF 的浓度最低;随模拟雨水 pH 值的降低,土壤 THMF 显示出愈易流出的趋势;本实验条件下,淋出液中 THMF 的浓度随累积淋溶量的增大呈下降趋势.此外,红壤(1 号)、黄壤(15 号)和紫色土(21 号)均有淋出液的 THMF 浓度超过  $100\mu\text{g/L}$  或  $50\mu\text{g/L}$ ,该结果说明了由土壤侧向淋溶产生的这部分 THMF 对水体的贡献是不可忽视的.

### 参考文献:

- Rook J J. Formation of Haloforms during Chlorination of Natural Waters. *Water Trmt. Exam.*, 1974, **23**: 234.
- Bellar T, Lichenburg J, Kroner R. The Occurrence of Organohalides in Finished Drinking Waters. *Jour. AWWA*, 1974, **66**: 703.
- Scott D, Boyce, James F Hornlg. Reaction Pathways of Trihalomethane Formation from the Halogenation of Dihydroxyaromatic Model Compounds for Humic Acid. *Environ. Sci. Technol.*, 1983, **17**: 202 ~ 211.
- 黄君礼. 氯化黄腐酸形成氯仿的反应历程. *环境化学*, 1991, **10**(6): 1 ~ 11.
- Adin A, Katzhendler J, Alkaslassy D, Ch. Rav-Acha. Trihalomethane Formation in Chlorinated Drinking Water: A Kinetic Model. *Wat. Res.*, 1991, **25**(7): 797 ~ 805.
- 潘金芳,张大年,前田 泰昭等. 腐殖酸氯化过程中氯仿生成的基础研究. *环境科学*, 1996, **17**(6): 31 ~ 36.
- Siddiqui Mohamed S, Amy Gary L, Murphy Brian D. Ozone Enhanced Removal of Natural Organic Matter from Drinking Water Sources. *Wat. Res.*, 1997, **31**(12): 3098 ~ 3106.
- Visvanathan C, Marsono Bowo Djoko, Basu Biswadeep. Removal of THMP by Nanofiltration: Effects of Interference Parameters. *Wat. Res.*, 1998, **32**(12): 3527 ~ 3538.
- Lin Cheng-fang, Huang Yuh-jay, Hao Oliver J. Ultrafiltration Processes for Removing Humic Substances: Effect of Molecular Weight Fractions and PAC Treatment. *Wat. Res.*, 1999, **33**(5): 1252 ~ 1264.
- Lin Cheng-fang, Lin Tze-yao and Hao Oliver J. Effects of Humic Substance Characteristics on UF Performance. *Wat. Res.*, 2000, **34**(4): 1097 ~ 1106.
- Ivana Ivancev-tumbas, Bozo Dalmacija, Zagorka Tamas, Elvira Karlovic. The Effect of Different Drinking Water Treatment Processes on the Rate of Chloroform Formation in the Reactions of Natural Organic Matter with Hypochlorite. *Wat. Res.*, 1999, **33**(18): 3715 ~ 3722.
- Camel V, Bermond A. The Use of Ozone and Associated Oxidation Processes in Drinking Water Treatment. *Wat. Res.*, 1998, **32**(11): 3208 ~ 3222.
- Saito S, Hattori K, Okumura T. Outflows of Organic Halide Precursors from Forest Regions. *Wat. Sci. Technol.*, 1989, **21**: 1877 ~ 1880.
- 大阪水道部. 微量有机物发生源调查报告书. 1989. 4 ~ 19.
- 陶澍,曹军. 山地土壤表层水溶性有机物淋溶动力学模拟研究. *中国环境科学*, 1996, **16**(6): 410 ~ 414.
- 李适宇,仇荣亮,杨秀虹,林惠娜. 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.
- 廖柏寒,李长生. 土壤对酸沉降缓冲机制探讨. *环境科学*, 1989, **10**(1): 30 ~ 34.
- 仇荣亮,吴箫. 陆地生态环境酸沉降敏感性研究. *环境科学进展*, 1997, **5**(4): 8 ~ 22.
- 曹军,陶澍. 土壤与沉积物中天然有机物释放过程的动力学研究. *环境科学学报*, 1999, **19**(3): 297 ~ 302.
- Greszta J, Gruszka A, Wachalewski T. Humus Degradation under the Influence of Simulated Acid Rain. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1992, **63**: 51 ~ 66.