

聂灿军, 阎秀兰, 陈同斌, 等. 2007. 砷超富集植物的热解特征及其与砷含量的关系 [J]. 环境科学学报, 27 (5): 721 - 726

Nie C J, Yan X L, Chen T B, et al. 2007. Pyrolysis characteristic of arsenic hyperaccumulators and its relation to arsenic content [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 27 (5): 721 - 726

砷超富集植物的热解特征及其与砷含量的关系

聂灿军^{1, 3}, 阎秀兰¹, 陈同斌^{1, *}, 廖晓勇¹, 潘家荣², 周宝利¹, 吴礼树³

1 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心, 北京 100101

2 中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100094

3 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070

收稿日期: 2006-06-05 修回日期: 2007-01-08 录用日期: 2007-01-19

摘要:不同热解气氛和升温速率的比较研究表明, 在空气气氛条件和 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的升温速率下, 砷超富集植物的热解曲线特征明显且实验速度适中, 因此, 是适用于砷超富集植物的热解实验条件. 在该实验条件下, 不同含砷浓度的蜈蚣草 (*Pteris vittata* L.) 和大叶井口边草 (*P. cretica* L.) 的热解温度主要集中在 $200\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间. 与低砷蜈蚣草相比, 高砷蜈蚣草在 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近热解减弱, 而在 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近热解加剧, 蜈蚣草体内的砷有促使其热解过程向高温方向偏移的趋势; 而大叶井口边草体内的砷则促使其在 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近热分解程度加剧, 而对 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近的热解程度影响不明显.

关键词:砷; 超富集植物; 蜈蚣草; 大叶井口边草; 热差分析; 热解; 升温速率; 气氛

文章编号: 0253-2468 (2007) 05-0721-06

中图分类号: X705

文献标识码: A

Pyrolysis characteristic of arsenic hyperaccumulators and its relation to arsenic content

NIE Canjun^{1, 3}, YAN Xiulan¹, CHEN Tongbin^{1, *}, LIAO Xiaoyong¹, PAN Jiarong², ZHOU Baoli¹, WU Lishu³

1 Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

2 Institute of Agro-food Science and Technology, Chinese Academy Agricultural Sciences, Beijing 100094

3 College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070

Received 5 June 2006; received in revised form 8 January 2007; accepted 19 January 2007

Abstract: In order to get appropriate pyrolysis condition, different atmosphere and heating rates were compared during pyrolysis of two arsenic hyperaccumulators, *Pteris vittata* L. and *P. cretica* L. According to thermogravimetry (TG), derivative thermogravimetry (DTG) and differential thermal analysis (DTA) curves, the results show that the existence of O_2 in the atmosphere could make the characteristic curves of pyrolysis appear more obvious than N_2 atmosphere and made the samples release more quantity of heat, and be decomposed more completely. Under the heating rates of $25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, fine thermal analysis curves were obtained, pyrolysis course was relatively focused and completed time was feasible. Therefore, air atmosphere and a heating rate of $25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ were selected as appropriate conditions to study the pyrolysis of As-hyperaccumulators. Under above conditions, the two As-hyperaccumulators were decomposed rapidly between 200 and $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Compared with the *P. vittata* L. of low As concentration, the *P. vittata* L. with high As concentration decreased the thermal decomposition around $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, and increased decomposition around $450\text{ }^{\circ}\text{C}$. An increase in arsenic of *P. nervosa* L. might increase the thermal decomposition around $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ and did not influence obviously the decomposition around $450\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Keywords: arsenic; atmosphere; hyperaccumulator; heating rate; pyrolysis; *Pteris vittata* L.; *P. cretica* L.; thermogravimetric analysis

1 引言 (Introduction)

热分析是在程序控制温度下测量物质的物理化学性质与温度关系的一类技术. 在加热或冷却的

过程中, 随着环境温度的变化, 样品的结构、相态和化学性质都会发生相应的变化. 热分析结果与热解气氛、升温速率、样品质量、焚烧温度等热分析试验条件密切相关 (Kabustian et al, 2003; Franceschi

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目 (No. 40325003)

Supported by the National Foundation for Distinguished Youth of China (No. 40325003)

作者简介: 聂灿军 (1980—), 男, 硕士研究生; *通讯作者 (责任作者), E-mail: chentb@igsnrr.ac.cn

Biography: NIE Canjun (1980—), male; * Corresponding author, E-mail: chentb@igsnrr.ac.cn

et al, 2004). 动态焚烧气氛会影响植物样品热解过程的氧化、还原氛围及蒸汽压等条件, 最终影响样品焚烧的裂解程度、热解温度区间及焚烧产物等 (Wang et al, 2005; Julia et al, 2006). 升温速率对热分析试验结果会产生一定影响. 升温速率越快, 越容易导致热滞后现象; 升温速度过慢会影响焚烧的效率, 使焚烧过程中的一些反应现象分散与复杂, 增加准确解析热分析曲线的难度 (Haykiri-Acma et al, 2006). 因此, 在利用热分析的研究过程中, 首先应确定适宜的热解气氛和升温速率.

砷超富集植物蜈蚣草 (*Pteris vittata* L.) 生长速度快, 生物量大, 体内砷含量最高可达到植物体干重的 2.34% (陈同斌等, 2002), 并已成功用于湖南郴州的砷污染土壤修复. 在其修复过程中, 每年会产生 $5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上的干物质 (廖晓勇等, 2004). 如何安全处置这些大量产生的植物修复收获物, 是植物修复领域中面临的一个现实问题. 一般认为, 焚烧既可以大幅度减少其体积, 而且可以回收贵重金属 (Anderson et al, 1999), 因此, 被认为是处置超富集植物收获物的适宜途径. 为此, 本文以不同含砷浓度的蜈蚣草和大叶井口边草 (*P. cretica* L.) 为例, 研究了砷超富集植物的焚烧特征及其与植物含砷浓度的关系.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 供试材料

采集种植在不同含砷浓度的土壤上的蜈蚣草和大叶井口边草 (地上部), 先用自来水洗净, 再用去离子水冲洗 2~3 次, 60 °C 下烘 48 h, 粉碎, 磨细待用. 生长在高砷土壤 ($97.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 上的蜈蚣草 (下称高砷蜈蚣草) 与大叶井口边草 (下称高砷大叶井口边草) 砷含量分别为 $1380 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1620 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 生长在低砷土壤 ($30.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 上的蜈蚣草 (下称低砷蜈蚣草) 与大叶井口边草 (下称低砷大叶井口边草) 砷含量分别为 $14.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $69.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

2.2 试验方案与数据处理

采用同步热差分析仪 (Pyris Diamond TG/DTA, Perkin-Elmer 公司) 进行热差分析. 试验基本条件为: 称样 10 mg 左右, 气体流速保持在 $10 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 温度范围是 60~800 °C.

热解气氛的比较: 空气和氮气 2 种气氛对高砷蜈蚣草和高砷大叶井口边草热解特性的影响, 升温

速率为 $25 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$.

升温速率的比较: 设置 3 个升温速率分别为 $10 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $25 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $50 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$, 供试植物为高砷蜈蚣草, 热解气氛为空气.

不同砷含量超富集植物的热解特性比较: 比较不同砷含量的蜈蚣草和大叶井口边草的热解特性差异, 热解气氛为空气, 升温速率为 $25 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$.

试验过程中采用热差分析仪自动记录热重分析值 (TG)、微商热重值 (DTG) 和差热分析值 (DTA), 对数据进行归一化处理后采用 SigmaPlot 9.0 软件作图.

3 结果与分析 (Results)

3.1 不同热解气氛下砷超富集植物的热解特征

在 200 °C 之前, 4 个不同处理样品的 TG 曲线基本重合 (图 1A). 样品在 200 °C 之前失重主要是由于样品中存在一定残余吸附水分的缘故, 这说明气氛对样品失水过程影响很小. 氮气气氛条件下, 样品在 800 °C 处仍存在明显的失重趋势; 而空气气氛下, 样品在 500 °C 附近失重就基本停止. 这表明, 砷超富集植物样品在空气气氛下热解更完全, 所需温度较氮气气氛低. 在 200~800 °C 区间中, 高砷蜈蚣草在氮气气氛下的重量残留率变化较其它样品小, 最后失重比例仅为 71.5%, 远小于高砷蜈蚣草在空气气氛下的失重比例 (86.6%). 高砷大叶井口边草在 2 种气氛下失重比例很接近, 相差仅为 2.5%. 空气气氛下, 在 350~500 °C 温度区间内, 2 种砷超富集植物均存在 2 个失重速率平台与降温的拐点. 高砷蜈蚣草在第 1 个拐点的温度明显低于高砷大叶井口边草, 但降温趋势要小于高砷大叶井口边草; 第 2 个降温拐点基本重合. 而氮气气氛下并不存在拐点, 可能是由于样品在空气气氛下剧烈热解过程中发生吸热反应的缘故. 这与图 1C 中 DTA 曲线存在向高温方向倾斜的趋势相吻合.

由图 1B 可以看出, 高砷蜈蚣草与高砷大叶井口边草在空气与氮气气氛下燃烧的失重速率 (DTG) 差异明显. 在空气气氛条件下, 高砷蜈蚣草与高砷大叶井口边草均存在 2 个 DTG 峰值, 第 1 个 DTG 峰值均高于第 2 个 DTG 峰值, 在氮气气氛下却只有 1 个峰值; 而且, 同种植物在空气气氛中的第 1 个 DTG 峰值远远大于其在氮气气氛条件下的相应峰值, 其峰值相差均在 5 倍左右, 这表明有氧存在的气氛能够促进这 2 种砷超富集植物的热解. 无论是在

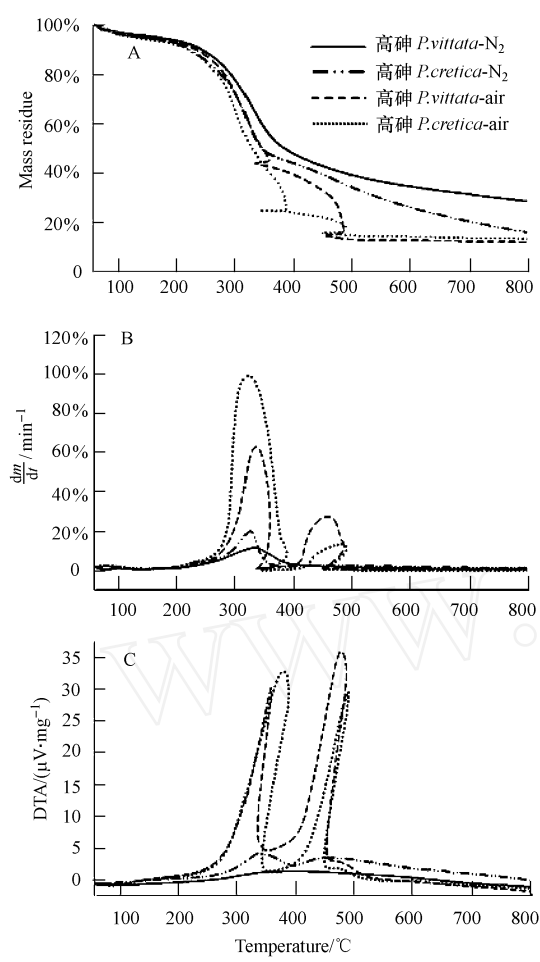


图 1 不同气氛下砷超富集植物的热解特征

Fig 1 DTG, DTA and TG curves of As-hyperaccumulator under different atmosphere

空气气氛还是在氮气气氛下,高砷大叶井口边草的第 1 个 DTG 峰值均明显大于高砷蜈蚣草的第 1 个 DTG 峰值;在第 2 个 DTG 峰值中,高砷蜈蚣草的 DTG 峰值又比高砷大叶井口边草高 1 倍. 在不同气氛处理条件下,2 种超富集植物均在 300 附近快速分解,但高砷大叶井口边草在 300 附近分解更剧烈,样品分解速率高于高砷蜈蚣草;而有氧气氛条件下,高砷蜈蚣草在 450 附近分解速率明显大于高砷大叶井口边草.

从图 1C 中可知,高砷蜈蚣草与高砷大叶井口边草在空气气氛下热解过程中释放的热量明显要大于氮气气氛. 由于样品中存在一定残余水分和作用力较小的吸附水,在 200 之前 4 个处理均为吸热过程. 高砷大叶井口边草在 2 种气氛条件下均存在 2 个明显的放热峰;高砷蜈蚣草在空气气氛下也存在 2 个明显的放热峰,而在氮气气氛下仅存在 1

个较矮的放热宽峰. 在 600 之后,空气气氛下 2 种超富集植物存在较小的吸热;而在氮气气氛下,2 种超富集植物在 600 后 DTA 值均略大于 0,存在较小的放热. 从 DTA 曲线变化与放热峰高可以知道,在氮气气氛条件下,高砷大叶井口边草在 60 ~ 800 的热解过程中释放的热量要明显高于高砷蜈蚣草;在空气气氛下,高砷大叶井口边草的第 1 个放热峰面积要明显大于高砷蜈蚣草,而第 2 个放热峰面积小于高砷蜈蚣草. 但 2 种超富集植物在 60 ~ 800 热解区间内释放的热量相近.

综合分析图 1 A、B 与 C 可以知道,高砷蜈蚣草与高砷大叶井口边草在不同气氛条件下具有相似的热解特征,但在 300 和 450 附近的热解程度存在明显差异,这可能与 2 种超富集植物组成成分等有关. 如 Ghetti 等 (1996) 研究表明,木质素含量越高,在 450 附近的热解失重峰越明显. 由此看来,蜈蚣草组成成分中所含木质素的比例可能要高于大叶井口边草. 同时,空气气氛可以显著促进植物的热解,并且呈现 2 个明显的热解区间,在对应的区间上释放出比氮气气氛更多的热量,并且样品最终热解程度要明显高于氮气气氛. 因此,在砷超富集植物的后续处理热分析研究中,为了保证样品充分热解并反映其热解特征,宜选择空气气氛为热解气氛条件.

3.2 不同升温速率下砷超富集植物的热解特征

从图 2 A 中 TG 曲线来看,10 · min⁻¹ 与 25 · min⁻¹ 升温速率下,分别在 320 和 450 附近存在 2 个失重降温的平谷峰,而 50 · min⁻¹ 升温速率下为一条平缓的失重直线. 从样品 TG 失重比例来看,样品焚烧过程中质量减少量均接近 90%,说明升温速率对蜈蚣草质量的减少量影响不显著,与 Kercher 等 (2001) 研究焚烧升温速率对锯木粉失重比例结果相同. 3 个升温速率的 TG 曲线减重区间主要集中在 200 ~ 460 之间,10 · min⁻¹、25 · min⁻¹ 和 50 · min⁻¹ 各个升温速率质量减少比例依次为: 84%、87%、79%. 表明 25 · min⁻¹ 升温速率的失重区间相对集中.

从图 2 B 可知,在 10 · min⁻¹、25 · min⁻¹ 和 50 · min⁻¹ 3 个升温速率下,蜈蚣草的失重初始至焚烧基本完成的温度区间分别为 296 ~ 427、280 ~ 480、230 ~ 576. 这表明,随着升温速率的增加,初始失重的起始温度呈降低的趋势,而焚烧完成的温度呈升高的趋势,这与 Haykiri-Ama 等

(2006)研究结果相吻合. 升温速率的增加也会使失重速率的峰值温度向高温方向偏移: 升温速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时存在 2 个 DTG 失重速率峰, 峰值温度分别为 $325\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $459\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $357\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $477\text{ }^{\circ}\text{C}$; 到升温速率为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时却只有 1 个 DTG 失重速率宽峰, 峰值温度为 $464\text{ }^{\circ}\text{C}$. 其原因可能是颗粒之间存在间隙而使热传递速率减缓: 在高升温速率条件下, 样品表面迅速升温, 而样品内部升温速度慢, 因此出现温度滞后, 使峰值滞后而重合在一起 (Haykiri-Acma *et al*, 2006). 因此, 在蜈蚣草的热分析试验中升温速率不宜过高.

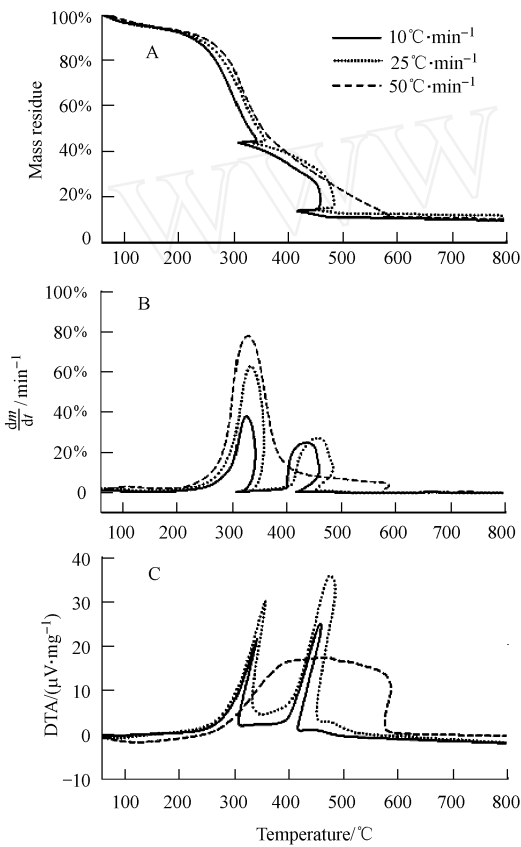


图 2 不同升温速率对蜈蚣草热解特性的影响

Fig 2 DTG, DTA and TG curves of As-hyperaccumulator under different heating rates

3 个处理的 DTG 曲线 (图 2B) 与 DTA 曲线峰值 (图 2C) 相似, 但其峰值温度滞后更明显. $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 与 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温速率下, 蜈蚣草的 DTA 图均有 2 个放热尖峰. 峰值温度分别为 $342\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $459\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $357\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $477\text{ }^{\circ}\text{C}$. 这 2 个处理的 DTA 曲线峰值与 DTG 曲线 (图 2B) 相似, 但其峰值温度滞后更明显. $50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温速率下, 蜈蚣草的 DTA 图只出现 1 个放热宽峰. 在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的升温速率条件下, 第

1 个失重速率峰的相对峰值是后一个失重速率峰值的 2 3 倍. 其原因可能为: 前一个峰是由于样品急剧分解放热形成, 后一个峰则为残余焦炭无焰燃烧放热形成 (Wesołowski *et al*, 2003).

在 $60\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热解温度范围内, $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的升温速率下蜈蚣草热解均可以得到良好的特征曲线, 而 $50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的升温速率下的特征曲线中所反映的信息十分有限. 从实验所需的时间来看, 3 种升温速率下完成整个分析实验过程所需时间分别为 74、40 与 15 min. 一般来说, 一种好的热解实验方法是在充分保证试验精度的前提下尽量缩短实验所需的时间. 因此, 根据上述试验结果, 在砷超富集植物热差分析实验中建议采用 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的升温速率.

3.3 不同砷含量砷超富集植物的热解特征比较

根据上述探索试验得出的适宜热解条件, 在空气气氛和 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的升温速率下对不同砷含量的超富集植物进行了热差分析实验 (图 3). 从图 3A 可以看出, 不同砷含量的蜈蚣草和大叶井口边草的热解趋势相同, 样品失重主要发生在 $200\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度区间, $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时样品的热解程度均接近 90%. 从图 3A 还可以看出, 不同样品的热解过程中均存在 2 个明显的平台与降温拐点. 对同种砷超富集植物而言, 第 1 个拐点处样品的重量残留率均随砷含量的增加而增加. 高砷蜈蚣草第一个拐点的样品残留率 (TG 值) 为 45% 左右, 明显高于高砷大叶井口边草 (TG 值为 25% 左右); 低砷蜈蚣草与低砷大叶井口边草的 TG 曲线则基本重合, 第 1 个拐点处样品残留率都在 20% 左右. 各样品的第 2 个拐点处 (约 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$) 样品残留率非常接近, 样品的砷含量对其基本没有影响. 因此, 砷对 2 种超富集植物热解的影响主要在 $300\sim 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间内. 由此推论, 超富集植物中砷的挥发损失可能主要发生在此温度下.

从图 3B 中可以看出, 低砷蜈蚣草的 DTA 曲线峰面积和 DTG 曲线峰高均与高砷蜈蚣草明显不同. 这种差异可能主要是由于样品中砷浓度的差异所造成的. 在 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近, 低砷蜈蚣草的 DTA 峰高和峰面积、DTG 峰高均明显大于高砷蜈蚣草, 表明在此温度条件下, 低砷蜈蚣草的热解较高砷蜈蚣草更快, 释放的热量更多; 而在 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近, 高砷蜈蚣草的 DTA 峰高和峰面积、DTG 峰高则明显大于低砷蜈蚣草, 表明在此温度条件下, 高砷蜈蚣草的热解较低砷蜈蚣草快, 释放的热量更多. 因此, 在蜈蚣草的

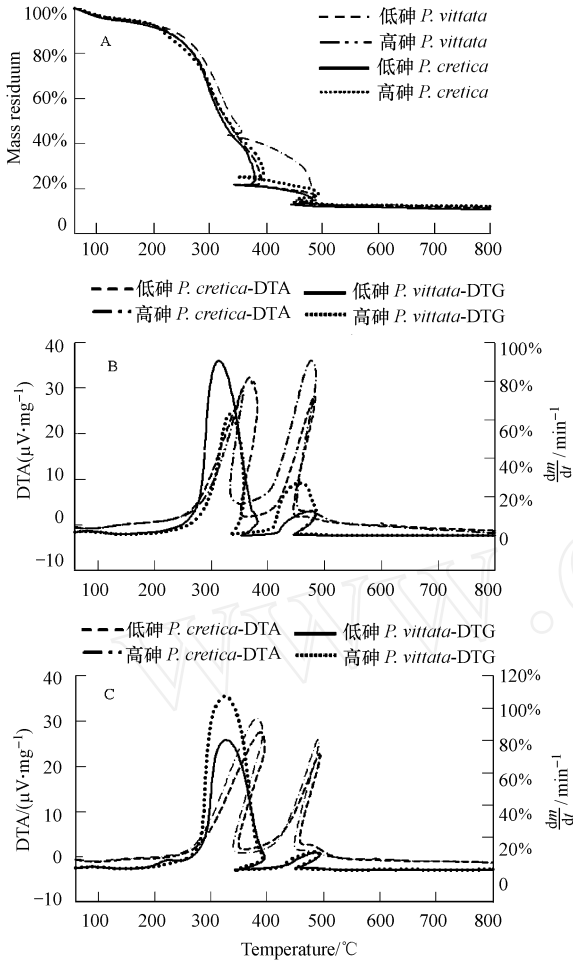


图 3 不同砷超富集植物的焚烧特征曲线

Fig 3 DTG, DTA and TG curves of different hyperaccumulators

热解过程,其体内的砷浓度明显影响热量的释放与失重速率:随着砷浓度的增加,热解过程呈现向高温方向偏移的趋势。

图 3C 中,低砷大叶井口边草与高砷大叶井口边草的热解特征曲线也存在一定差异,低砷大叶井口边草的第 1 个 DTA 峰面积与 DTG 曲线峰高均明显小于高砷大叶井口边草,而第 2 个 DTA 峰面积与 DTG 曲线峰高差异不明显。说明大叶井口边草体内的砷主要在 300 附近影响到其热解过程。这与图 3B 中砷对蜈蚣草热解性质的影响明显不同。产生这种差异的原因可能是蜈蚣草与大叶井口边草所含木质素比例不同,也可能与 2 种超富集植物体内砷的结合形态有关。研究表明:蜈蚣草和大叶井口边草地上部所含的砷主要都是以 As—O 键结合形态存在,但蜈蚣草中所含 As—S 键结合形态比例小于大叶井口边草 (黄泽春等, 2003; Huang *et al* , 2004)。在 300 附近高砷大叶井口边草的 DTG 峰

明显高于高砷蜈蚣草,这也许与植物中砷的存在形态有关。本文的研究结果表明,在超富集植物的后续焚烧处理中,应根据不同植物种类来选择相应的热解条件。

4 结论 (Conclusions)

1)在砷超富集植物的热解试验中,空气气氛比氮气气氛条件能使样品热解更完全,相应的热分解特征曲线更明显; 25 ·min⁻¹ 升温速率下,植物的热分解特征明显,所需时间适中。因此,在砷超富集植物的热分析研究中可以采用空气气氛与 25 ·min⁻¹ 升温速率的试验条件。

2)砷超富集植物的热解过程主要集中在 200 ~ 500 ,但植物体内砷对其热解过程存在明显影响。与低砷蜈蚣草相比,高砷蜈蚣草在 300 左右的热解区间内失重速率减慢,释放的热量减少,而在 450 左右的热解区间内样品热解失重速率增加,释放热量增加;随大叶井口边草体内砷浓度的增加,其在 300 左右失重速率与释放热量均明显增加,但在 450 左右的热解差异不明显。

References:

Anderson C W N, Brooks R R, Chianucci A, *et al* 1999. Phytomining for nickel, thallium and gold [J]. Journal of Geochemical Exploration, 67: 407—415

Chen T B, Wei C Y, Huang Z C, *et al* 2002. Arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and its arsenic accumulation [J]. Chinese Science Bulletin, 47(11): 902—905

Franceschi E, Luciano G, Carosi F, *et al* 2004. Thermal and microscope analysis as a tool in the characterisation of ancient papyri [J]. Thermochimica Acta, 418(1-2): 39—45

Ghetti P, Ricca L, Angelini L. 1996. Thermal analysis of biomass and corresponding pyrolysis products [J]. Fuel, 75(5): 565—573

Huang Z C, Chen T B, Lei M, *et al* 2003. EXAFS studies on arsenic species and its transformation of in arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L [J]. Science in China (Series C), 47(2): 124—129

Haykiri-Acma H, Yaman S, Kucukbayrak S 2006. Effect of heating rate on the pyrolysis yields of rape seed [J]. Renewable Energy, 31: 803—810

Huang Z C, Chen T B, Lei M, *et al* 2004. Direct determination of arsenic species in arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* by EXAFS [J]. Acta Botanica Sinica, 46(1): 46—50

Julia M, Rafael F, Juan A C, *et al* 2006. Thermogravimetric analysis during the decomposition of cotton fabrics in an inert and air environment [J]. Journal of Analytical Applied Pyrolysis, 76: 124—131

Kaboustian J, El-Moselhy T F, Portugal H. 2003. Chemical and thermal analysis of the biopolymers in thyme (*Thymus vulgaris*) [J].

- Thermochimica Acta, 401(2): 77—86
- Kercher A K, Nagle D C. 2001. TGA modeling of the thermal decomposition of CCA treated lumber waste [J]. Wood Science and Technology, 35(4): 325—341
- Liao X Y, Chen T B, Xie H, *et al*. 2004. Effect of application of P fertilizer on efficiency of As removal in contaminated soil using phytoremediation: Field demonstration [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 24(3): 455—462 (in Chinese)
- Wang W S, Wang Y, Yang L J, *et al*. 2005. Studies on thermal behavior of reconstituted tobacco sheet [J]. Thermochimica Acta, 437: 7—11
- Wesołowski M, Konieczny P. 2003. Thermoanalytical, chemical and principal component analysis of plant drugs [J]. International Journal of Pharmaceutics, 262: 29—37
- 中文参考文献:
- 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 2002. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征 [J]. 科学通报, 47(3): 207—210
- 黄泽春, 陈同斌, 雷梅, 等. 2003. 砷超富集植物中砷化学形态及其转化的 EXAFS 研究 [J]. 中国科学 C 辑, 33(6): 488—494
- 廖晓勇, 陈同斌, 谢华, 等. 2004. 磷肥对砷污染土壤的植物修复效率的影响: 田间实例研究 [J]. 环境科学学报, 24(3): 455—462

环境科学领域学术论文中常用数理统计方法的正确使用问题(一)——统计软件的选择

在进行统计分析时, 尽管作者可以自行编写计算程序, 但在统计软件很普及的今天, 这样做是毫无必要的. 因此, 出于对工作效率以及对算法的可靠性、通用性和可比性的考虑, 多数科技期刊都要求作者采用专门的数理统计软件进行统计分析. 我们在处理稿件时经常发现的问题是, 作者未使用专门的数理统计软件, 而采用 Excel 这样的电子表格软件进行统计分析. 由于电子表格软件提供的统计分析功能十分有限, 很难满足实际需要, 除非比较简单的分析, 我们不主张作者采用这样的软件. 目前, 国际上已开发出的专门用于统计分析的商业软件很多, 比较著名有 SPSS (Statistical Package for Social Sciences)、SAS (Statistical Analysis System)、BMDP 和 STATISTICA 等. 其中, SPSS 是专门为社会科学领域的研究者设计的 (但是, 此软件在自然科学领域也得到广泛应用); BMDP 是专门为生物学和医学领域研究者编制的统计软件. 目前, 国际学术界有一条不成文的约定: 凡是用 SPSS 和 SAS 软件进行统计分析所获得的结果, 在国际学术交流中不必说明具体算法. 由此可见, SPSS 和 SAS 软件已被各领域研究者普遍认可. 我们建议《环境科学学报》的作者们在进行统计分析时尽量使用这 2 个专门的统计软件. 目前, 有关这 2 个软件的使用教程在书店中可很容易地买到.

注: 摘自《环境科学学报》27 卷 1 期 171 ~ 173 页