

# 藕莲根状茎表面的铁膜特性和成分分析

孙雨辰<sup>1</sup>, 于浩<sup>1</sup>, 郑寨生<sup>2</sup>, 张尚法<sup>2</sup>, 丁林贤<sup>1</sup>, 蔡妙珍<sup>1\*</sup>

(1. 浙江师范大学地理与环境科学学院, 浙江金华 321004; 2. 浙江省金华市农业科学研究院, 浙江金华 321000)

**摘要:** 以 10 个藕莲(*Nelumbo nucifera* Gaertn.)品种为材料, 比较分析了其根状茎表面的铁膜厚度及化学组成。结果显示: 总 Fe 含量最高的是‘尖头白荷’, 其次是‘鄂莲 6 号’和‘温州山东藕’, 最低的是‘鄂莲 7 号’和‘苏州花藕’; 根状茎表面的铁膜中 Fe (Ⅲ) 和 Fe (Ⅱ) 分别占总 Fe 含量的 64.1% ~ 85.8% 和 14.2% ~ 35.9%。扫描电子显微镜(SEM)观察发现, 铁膜表面呈絮状或颗粒状; 能谱分析(EDX)检测到铁膜中存在 Fe、C、O、Al、Si, 随着铁膜增厚还在‘尖头白荷’根状茎表面的铁膜中检测到 K、P 和 Ca。本研究通过对藕莲根状茎表面的铁膜特性及成分比较, 发现供试的 10 个品种中‘鄂莲 7 号’和‘苏州花藕’属于铁膜低沉积品种。

**关键词:** 藕莲; 根状茎; 铁膜特性; 化学组成

中图分类号: Q946.91; S645.1

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2015)02-0244-07

## Comparison of Iron Plaque Characterization and Associated Elements on the Surface of Lotus Rhizomes

SUN Yu-Chen<sup>1</sup>, YU Hao<sup>1</sup>, ZHENG Zhai-Sheng<sup>2</sup>, ZHANG Shang-Fa<sup>2</sup>,  
DING Lin-Xian<sup>1</sup>, CAI Miao-Zhen<sup>1\*</sup>

(1. College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China;

2. Jinhua Academy of Agricultural Sciences, Jinhua, Zhejiang 321007, China)

**Abstract:** Ten lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) cultivars were used to investigate the amounts and chemical composition of iron plaque on the rhizome surface. Iron formed a continuous precipitate on the rhizome surface. ‘Jiantoubaihe’ had the largest amounts of total Fe on the surface of the lotus rhizomes, followed by ‘Elian No.6’ and ‘Wenzhouhangdongou’, with ‘Elian No.7’ and ‘Suzhouhuaou’ having the least total Fe. Most of the total Fe was Fe (Ⅲ) (64.1% – 85.8%), with a small percentage of Fe (Ⅱ) (14.2% – 35.9%). Scanning electron micrographs (SEM) demonstrated that the iron plaque was unevenly distributed on the rhizome surface, and had a porous or flocculent structure. Energy dispersive X-ray (EDX) showed that the iron plaque mainly contained Fe, C, O, Al and Si. In addition K, P and Ca were also detected on the rhizome surface of ‘Jiantoubaihe’. Among the ten cultivars, ‘Elian No. 7’ and ‘Suzhouhuaou’ formed the thinnest iron plaque.

**Key words:** *Nelumbo nucifera* Gaertn.; Rhizome; Iron plaque characterization; Chemical composition

莲(*Nelumbo nucifera* Gaertn.)因具有较高的经济价值、丰富的营养和医疗保健作用, 其种植面

积和总产量位居水生蔬菜之首<sup>[1]</sup>。浙江省的藕莲种植面积在近几年呈现出持续增加的趋势, 据统

收稿日期: 2014-06-23, 退修日期: 2014-07-13。

基金项目: 浙江省公益性技术应用研究计划项目(2012C22043); 金华市科学技术研究计划项目(2014-2-038); 浙江省大学生科技创新活动计划暨新苗人才计划项目(2013R404012)。

作者简介: 孙雨辰(1990-), 女, 硕士, 主要从事环境生态学研究(E-mail: yuchen0602@yeah.net)。

\* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: mzcai@zjnu.cn)。

计, 至2008年栽培面积已达 $7 \times 10^3 \text{ hm}^2$ <sup>[2]</sup>。然而, 随着藕莲的产业化发展, 影响其生产的一系列问题慢慢凸现, 如根状茎表面产生的褐红色铁膜已成为保鲜与加工产业化发展的主要限制因素之一<sup>[3]</sup>。对于多年种植藕莲且具有潜在产生铁膜的农田, 生产上可采取的经济、有效的措施是培育与栽植铁膜沉积量较低的藕莲品种。

目前对藕莲的研究主要集中在优良品种选育、生理生化特性以及遗传改良等方面<sup>[4-6]</sup>; 在生产实践上也主要着眼于综合栽培技术、平衡施肥技术等方面<sup>[7,8]</sup>。关于藕莲根状茎表面铁膜预防与去除的报道较少, 主要是通过人工增氧、施石灰和收获前割荷叶等方法预防铁膜的产生<sup>[3]</sup>, 或是通过化学试剂(如柠檬酸)清洗去除根状茎表面已经存在的铁膜, 这些方法具有费时、费力等缺点。本实验以10个藕莲品种为材料, 通过比较不同品种间根状茎表面铁膜数量及主要成分的差异, 以期筛选出铁膜低沉积品种, 促进藕莲的产业化发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

实验于2013年4月在金华市农业科学研究院水生蔬菜试验基地进行, 水泥种植池大小为 $2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ , 内填稻田栽培土35 cm。土壤pH 5.31, 含有机质13.9 g/kg、铵态氮29.6 mg/kg、硝态氮17.3 mg/kg、速效磷11.1 mg/kg、速效钾72.8 mg/kg。每池定植3株大小适中、已去除全部侧芽的种藕。10个供试品种由金华市农业科学研究院水生蔬菜研究所提供, 分别为‘东河早藕’、‘鄂莲1号’、‘鄂莲6号’、‘鄂莲7号’、‘鄂莲8号’、‘杭州藕’、‘湖州早白荷’、‘尖头白荷’、‘苏州花藕’、‘温州山东藕’。2013年9月采收根状茎, 并统计主藕的节数和总长度、单个藕节的直径和长度等生物学特性; 将整支藕切割成单节后分别单独存放于保鲜袋中, 并于当天冰冻保藏带回实验室; 用自来水冲洗粘附在藕节表面的泥土和污物后, 再用去离子水冲洗2~3次, 沥去表面水分后测定铁膜特性及其化学组成。

### 1.2 实验方法

每一品种取主藕后把节往前的第2节, 并用无

菌封口膜包裹藕节两端。将第2藕节放入1 mol/L HCl中常温浸泡1.5 h, 然后吸取5 mL浸提液(以5 mL 1 mol/L HCl作空白对照)并稀释至100 mL; 再吸取5 mL稀释液置于25 mL容量瓶中, 加入1 mol/L NaAc 5 mL和1.5 g/L邻啡啰琳5 mL定容。实验平行重复3次, 并测定溶液在510 nm和390.5 nm处的吸光值。根据公式 $C_{(\text{Fe II})} = 5.049A_{510} - 0.6029A_{390.5}$ (mg/L)和 $C_{(\text{Fe III})} = 20.029A_{390.5} - 5.049A_{510}$ (mg/L)分别计算Fe(II)、Fe(III)含量。

藕莲根状茎表面铁膜中总Fe含量测定: 采用DCB(柠檬酸钠-碳酸氢钠-连二亚硫酸钠)法提取铁膜<sup>[9,10]</sup>。将主藕后把节往前的第2藕节放于烧杯内, 加入450 mL DCB提取液(顺次加入0.3 mol/L柠檬酸钠400 mL、1.0 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 50 mL、10 g连二亚硫酸钠)后迅速摇匀, 并用薄膜封口; 静置1.5 h后, 将提取液过滤到容量瓶里, 再用蒸馏水冲洗藕莲根状茎至少3次, 均定容到1000 mL容量瓶中即为浸提液; 同时, 以450 mL DCB提取液作空白对照, 并用蒸馏水定容至1000 mL容量瓶中; 然后从1000 mL容量瓶中分别吸取4 mL浸提液和4 mL空白对照置于50 mL容量瓶中, 加入10%盐酸羟胺1 mL、1 mol/L醋酸钠8 mL、0.1%邻啡啰琳10 mL, 定容到50 mL容量瓶中并显色20 min; 实验平行重复3次, 测定溶液在530 nm处的吸光值, 并根据绘制的铁标准曲线计算总Fe含量。

### 1.3 铁膜形貌观察和元素分析

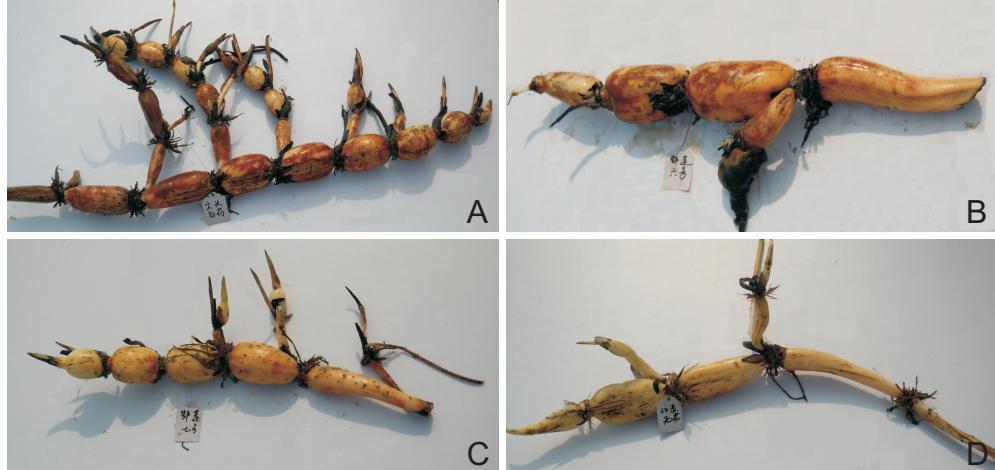
根据1.2实验方法测定得到的藕莲根状茎表面铁膜中的总Fe含量, 选取铁膜较厚和较薄的6个品种(‘东河早藕’、‘鄂莲1号’、‘鄂莲6号’、‘鄂莲8号’、‘湖州早白荷’、‘尖头白荷’)进行铁膜形貌观察和元素分析。取主藕后把节往前第2藕节具铁膜的表皮5 cm×5 cm, 于真空冷冻干燥器中干燥后, 小心剪取表皮中部展开部分2 cm×2 cm, 并用导电胶将其粘于样品台。铁膜形貌观察以及元素分析采用带HORIBA能谱(EDX)的HITACHI S-4800型扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)检测, 加速电压为15 kV, 放大倍数为200倍。

## 2 结果与分析

### 2.1 莲藕根状茎表面铁膜中 Fe (Ⅱ)、Fe (Ⅲ) 和总 Fe 含量

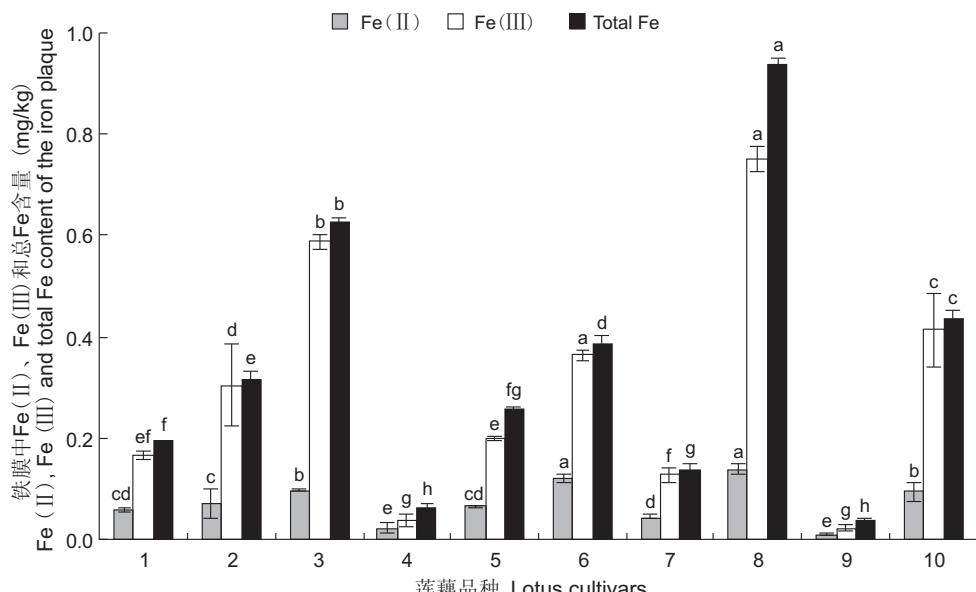
莲藕根状茎刚被挖出时，表皮有明显可见的红棕色铁膜，尤其是主藕后把节往前的第1、2和3节(图1)。对每个品种第2藕节表面铁膜中 Fe

(Ⅱ)、Fe (Ⅲ) 和总 Fe 含量(图2)的测定分析表明，‘尖头白荷’根状茎表面铁膜的总 Fe 含量最高，其次是‘鄂莲6号’和‘温州山东藕’，这3个品种的根状茎表面有较厚的铁膜形成且基本覆盖了整个根状茎。‘鄂莲7号’和‘苏州花藕’根状茎表面的铁膜总 Fe 含量较低，铁膜颜色较浅且以零星斑点的形式覆盖在根状茎表面。



A: ‘尖头白荷’；B: ‘鄂莲6号’；C: ‘鄂莲7号’；D: ‘苏州花藕’。  
A: ‘Jiantoubaihe’; B: ‘Elian No. 6’; C: ‘Elian No. 7’; D: ‘Suzhouhuaou’.

图1 莲藕根状茎表面的铁膜  
Fig. 1 Iron plaque on the lotus rhizome surface



1: ‘东河早藕’；2: ‘鄂莲1号’；3: ‘鄂莲6号’；4: ‘鄂莲7号’；5: ‘鄂莲8号’；6: ‘杭州藕’；7: ‘湖州早白荷’；8: ‘尖头白荷’；9: ‘苏州花藕’；10: ‘温州山东藕’。下同。

1: ‘Donghezaou’; 2: ‘Elian No. 1’; 3: ‘Elian No. 6’; 4: ‘Elian No. 7’; 5: ‘Elian No. 8’; 6: ‘Hangzhouou’; 7: ‘Huzhouzaobaihe’; 8: ‘Jiantoubaihe’; 9: ‘Suzhouhuaou’; 10: ‘Wenzhoushandongou’. Same below.

图2 莲藕根状茎表面铁膜中 Fe (Ⅱ)、Fe (Ⅲ) 和总 Fe 含量  
Fig. 2 Fe (Ⅱ), Fe (Ⅲ) and total Fe content of the iron plaque on the lotus rhizome surface

10个藕莲品种根状茎表面的铁膜中, Fe(Ⅱ)和Fe(Ⅲ)分别占总Fe含量的14.2%~35.9%和64.1%~85.8%;且Fe(Ⅲ)含量是Fe(Ⅱ)的2~6倍(图3),这是铁膜呈红棕色的主要原因。

## 2.2 藕莲根状茎表面铁膜的形貌观察和成分分析

根据10个藕莲品种根状茎表面铁膜中的总

Fe含量,选取铁膜较厚和较薄的6个品种进行铁膜形貌观察和能谱分析。由图4的SEM形貌观察可见,铁膜表面呈颗粒状,其中‘东河早藕’、‘鄂莲1号’、‘鄂莲6号’和‘尖头白荷’根状茎铁膜表面的颗粒物较为细小、平滑,而‘鄂莲8号’和‘湖州早白荷’铁膜表面的颗粒物较粗大(图4)。

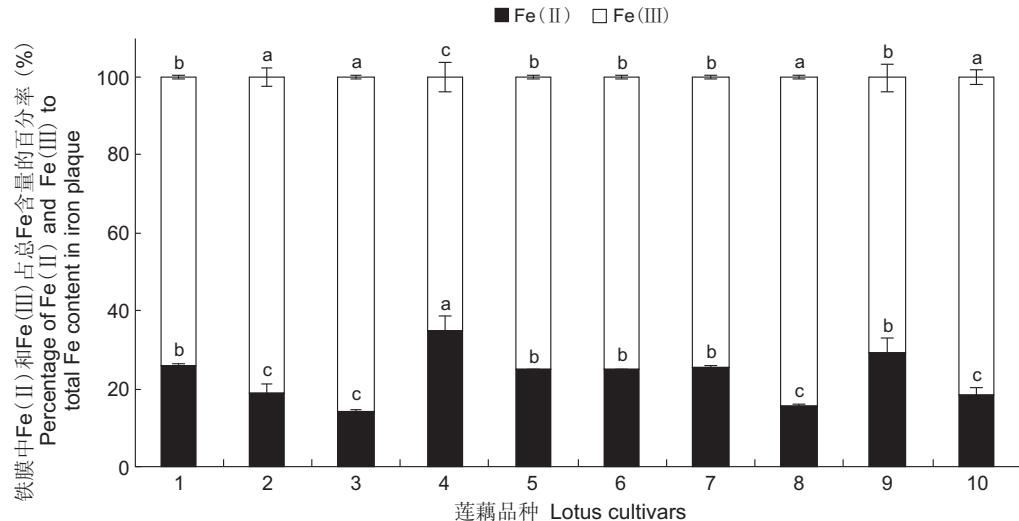
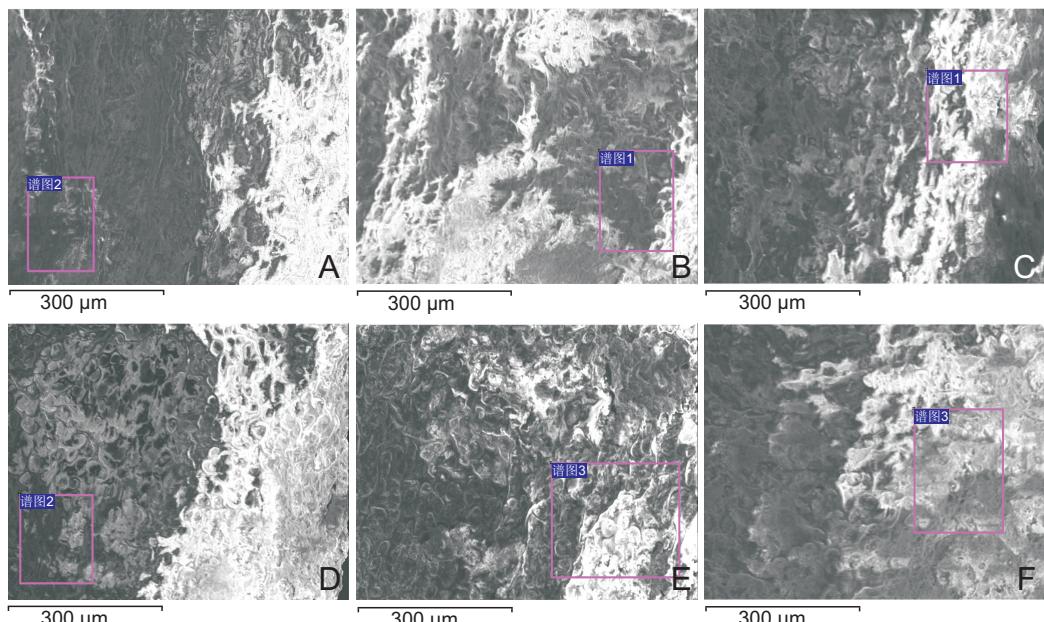


图3 藕莲根状茎表面铁膜中Fe(Ⅱ)和Fe(Ⅲ)占总Fe含量的百分率

Fig. 3 Percentage of Fe(Ⅱ) and Fe(Ⅲ) to total Fe content in iron plaque on the lotus rhizome surface



图中方块圈出的地方表示DEX分析的取样点。A: ‘东河早藕’; B: ‘鄂莲1号’; C: ‘鄂莲6号’; D: ‘鄂莲8号’; E: ‘湖州早白荷’; F: ‘尖头白荷’。下同。

The area marked by a square indicates the sampling point in DEX analysis. A: ‘Donghezaoou’; B: ‘Elian No. 1’; C: ‘Elian No. 6’; D: ‘Elian No. 8’; E: ‘Huzhouzaobaihe’; F: ‘Jiantoubaihe’. Same below.

图4 藕莲根状茎表面铁膜的形貌观察(SEM, 200×)  
Fig. 4 SEM views of iron plaque on the lotus rhizome surface

EDX 能谱分析表明, 6 个藕莲品种根状茎表面铁膜中均能检测到 Fe、C 和 O(图 5), 其中 C、O 的总质量分数为 88.5% ~ 99.2%。除 ‘鄂莲 8 号’ 外, 其它 5 个品种的铁膜中均含有 Al、Si, 其中 Si 的质量分数为 0.29% ~ 3.39%, Al 的质量分数为 0.35% ~ 1.34%; 且 ‘鄂莲 6 号’(图 5: C) 和 ‘尖头白荷’(图 5: F) 的铁膜中 Fe、Al 和 Si 的峰值明显要高于其余 4 个品种。此外, ‘尖头白荷’ 中 Fe 的质量分数为 3.92%, 而其余 5 个品种中均为微量(< 0.1%); 在 ‘尖头白荷’ 的铁膜中还检测到 K、P 和 Ca, 表明根状茎表面的铁膜越厚, 其上吸附或固定的元素种类和数量越多。

### 3 讨论

植物根表铁膜的产生与其适应淹水环境有关, 铁膜常见于水稻(*Oryza sativa*)<sup>[11,12]</sup>、宽叶香蒲(*Typha latifolia*)<sup>[13]</sup>、芦苇(*Phragmites australis*)<sup>[14]</sup>、灯芯草(*Juncus bulbosus*)<sup>[15]</sup>和水生蔬菜等。不同物种或同一物种的不同品种间铁膜厚度均有差异, 该过程受生物自身因素如根系氧化力和通气组织结构等<sup>[16-18]</sup>, 以及非生物因素如土壤的基本特性(氧化-还原潜力、有机质含量和土壤 pH 值)、铁氧化菌活性、土壤溶液中  $\text{Fe}^{2+}$  浓度等调控<sup>[19-22]</sup>。本研究 10 个藕莲品种根状茎表面形成的

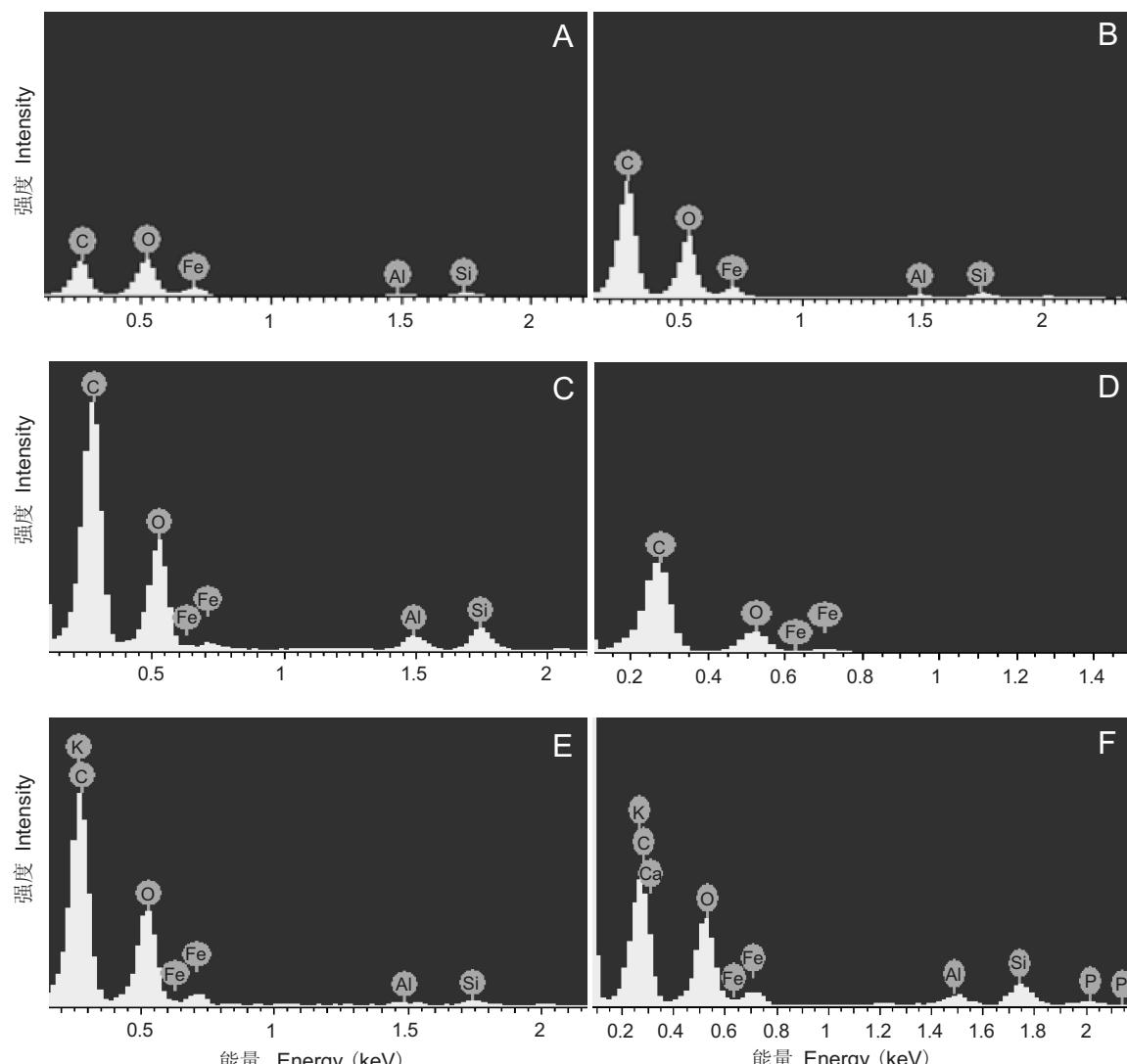


图 5 藕莲根状茎表面铁膜的能谱(EDX)分析  
Fig. 5 EDX spectra of iron plaque on the lotus rhizome surface

铁膜厚度不同,除‘苏州花藕’铁膜颜色较浅外,其余9个品种均观察到明显可见的红棕色铁膜包裹于整个根状茎表面或是以块状形式沉积在根状茎表面,这与不同水稻品种根表铁膜厚度的观察结果一致<sup>[17,23,24]</sup>。由于田栽实验过程中土壤和水肥管理条件较为一致,藕莲根状茎表面的铁膜厚度差异应主要来源于品种和生长期差异。铁膜是在藕莲根状茎成熟期形成的,而这一过程恰好是根状茎通气组织完全形成时,即氧气运输能力强;此外,也是夏季气温较高的时期(7月~8月),二者均加速了铁膜形成。‘尖头白荷’根状茎表面的铁膜最厚,根据水生植物根表铁膜厚度与根系径向泌氧(radial oxygen loss, ROL)能力呈显著正相关关系<sup>[25]</sup>,笔者推测该品种光合能力、根系氧化力强,有较多的光合产物产生,同时旺盛的根系氧化力使根状茎有充足的ROL产生,导致大量的Fe<sup>2+</sup>被氧化沉积在表面。‘苏州花藕’在整个生长期都未发现明显可见的铁膜,属于铁膜低沉积品种,适宜推广种植。‘苏州花藕’这一“铁膜低沉积”特性可能与根状茎孔隙度较低、叶柄的通气组织发育程度低有关,但目前没有相关的实验数据支持,还需通过测定根状茎解剖结构、皮层细胞壁厚度<sup>[26]</sup>和光合强度<sup>[27]</sup>等进行深入分析。

水生植物根表铁膜的组分因不同植物种类和生长环境有较大差异,例如,酸性土壤中铁膜会吸附大量Al、P<sup>[28]</sup>,在污染土壤中铁膜会大量沉积As、Cd、Ni和Cu<sup>[16,25,29]</sup>。本实验藕莲根状茎表面的铁膜中Fe(Ⅲ)占总Fe含量的64.1%~85.8%,而Fe(Ⅱ)仅占14.2%~35.9%,这与其它水生植物铁膜的主要组分是Fe(Ⅲ)的结论类似<sup>[26]</sup>。铁膜是两性胶体,可通过吸附和共沉淀结合其它元素<sup>[27]</sup>。本研究通过能谱分析(EDX)表明,6个藕莲品种根状茎表面的铁膜中均能检测到Fe、C和O;除‘鄂莲8号’外,其余5个品种的铁膜中均含有Al、Si。藕莲根状茎表面的铁膜组分与土壤性质密切相关,本实验中藕莲种植土壤pH值为5.31,在酸性土壤中铝易被活化为Al<sup>3+</sup>,Al与Fe、P共沉淀或是以磷酸铝形式沉淀在铁膜中<sup>[30]</sup>,因此在铁膜最厚的‘尖头白荷’中还检测到K、Ca、P等元素。根据王震宇等铁膜中P含量与铁膜厚度存

在显著正相关关系的结果<sup>[31]</sup>,笔者推测‘尖头白荷’铁膜中的P与铁膜能提供更多的吸附或沉淀位点有关。

## 参考文献:

- [1] 刁英, 韩延闯, 何建军, 王清章, 胡中立, 周明全. 莲藕研究进展[J]. 氨基酸和生物资源, 2004, 26(1): 8~11.
- [2] 徐蝉, 胡美华, 郭得平. 浙江省水生蔬菜产业发展现状及展望[J]. 长江蔬菜, 2009(16): 106~109.
- [3] 周俊辉, 孔祥伟, 黄政华. 莲藕除锈与保鲜的初步研究[J]. 江西农业学报, 2007, 19(3): 51~53.
- [4] 程立宝, 李淑艳, 李岩, 尹静静, 陈学好, 李良俊. 莲藕根状茎膨大过程中淀粉合成相关基因的表达[J]. 中国农业科学, 2012, 45(16): 3330~3336.
- [5] 杨美, 付杰, 向巧彦, 刘艳玲. 利用AFLP分子标记技术构建花莲核心种质资源[J]. 中国农业科学, 2011, 44(15): 3193~3205.
- [6] 许金蓉, 王清章, 何建军, 周明全, 胡中立. 莲(地下膨大茎)贮藏及其生理生化研究进展[J]. 氨基酸和生物资源, 2003, 25(2): 4~7.
- [7] 刘冬碧, 陈防, 熊桂云, 巴瑞先, 张富林, 张继铭, 余延丰. 钾营养对莲藕产量形成和氮磷钾养分累积分配的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(5): 978~985.
- [8] 张长伟, 徐文娟, 王玉华, 叶月. 有机、无机肥对莲藕生长和品质的影响及施肥效益分析[J]. 中国农学通报, 2012, 28(7): 261~264.
- [9] Taylor GJ, Crowder AA. Use of the DCB technique for extraction of hydrous iron oxides from roots of wetland plants[J]. Am J Bot, 1983, 70(8): 1254~1257.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 263~270.
- [11] Syu CH, Jiang PY, Huang HH, Chen WT, Lin ZH, Lee DY. Arsenic sequestration in iron plaque and its effect on As uptake by rice plants grown in paddy soils with high contents of As, iron oxides, and organic matter[J]. Soil Sci Plant Nut, 2013, 59(3): 463~471.
- [12] Xu B, Yu S. Root iron plaque formation and characteristics under N<sub>2</sub> flushing and its effects on translocation of Zn and Cd in paddy rice seedlings (*Oryza sativa*) [J]. Ann Bot, 2013, 111(6):

- 1189–1195.
- [13] Feng H, Qian Y, Gallagher FJ, Wu MY, Zhang WG, Yu LZ, Zhu QZ, Zhang KW, Liu CJ, Tapero R. Lead accumulation and association with Fe on *Typha latifolia* root from an urban brown field site[J]. *Environ Sci Pollut R*, 2013, 20(6): 3743–3750.
- [14] Batty LC, Baker AJM, Wheeler BD, Curtis CD. The effect of pH and plaque on the uptake of Cu and Mn in *Phragmites australis* (Cav.) Trin ex Steudel[J]. *Ann Bot*, 2000, 86(3): 647–653.
- [15] Kusel K, Chabbi A, Trinkwalter T. Microbial processes associated with roots of bulbous rush coated with iron plaques[J]. *Microb Ecol*, 2003, 46(3): 302–311.
- [16] Yang JX, Tam NPY, Ye ZH. Root porosity, radial oxygen loss and iron plaque on roots of wetland plants in relation to zinc tolerance and accumulation[J]. *Plant Soil*, 2014, 374(1–2): 815–828.
- [17] Wu C, Ye ZH, Li H, Wu SC, Deng D, Zhu YG, Wang MH. Do radial oxygen loss and external aeration affect iron plaque formation and arsenic accumulation and speciation in rice[J]. *J Exp Bot*, 2012, 63(8): 2961–2970.
- [18] Li H, Ye ZH, Wei ZJ, Wong MH. Root porosity and radial oxygen loss related to arsenic tolerance and uptake in wetland plants[J]. *Environ Pollut*, 2011, 159(1): 30–37.
- [19] Laskov C, Horn O, Hupfer M. Environmental factors regulating the radial oxygen loss from roots of *Myriophyllum spicatum* and *Potamogeton crispus*[J]. *Aquat Bot*, 2006, 84(4): 333–340.
- [20] Emerson D, Weiss JV, Megonigal JP. Iron-oxidizing bacteria are associated with ferric hydroxide precipitates (Fe-plaque) on the roots of wetland plants[J]. *Appl Environ Microb*, 1999, 65(6): 2758–2761.
- [21] Jia Y, Huang H, Chen Z, Zhu YG. Arsenic uptake by rice is influenced by microbe-mediated arsenic redox changes in the rhizosphere[J]. *Environ Sci Technol*, 2014, 48(2): 1001–1007.
- [22] Huang H, Zhu YG, Chen Z, Yin XX, Sun GX. Arsenic mobilization and speciation during iron plaque decomposition in a paddy soil[J]. *J Soil Sediments*, 2012, 12(3): 402–410.
- [23] Lee CH, Hsieh YC, Lin TH, Lee DY. Iron plaque formation and its effect on arsenic uptake by different genotypes of paddy rice[J]. *Plant Soil*, 2013, 363(1–2): 231–241.
- [24] Liu WJ, Zhu YG, Smith FA, Smith SE. Do iron plaque and genotypes affect arsenate uptake and translocation by rice seedlings (*Oryza sativa* L.) grown in solution culture[J]. *J Exp Bot*, 2004, 55(403): 1707–1713.
- [25] Wang X, Yao HX, Wong MH, Ye ZH. Dynamic changes in radial oxygen loss and iron plaque formation and their effects on Cd and As accumulation in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Environ Geochim Hlth*, 2013, 35(6): 779–788.
- [26] Liu WJ, Zhu YG, Hu Y, Williams PN, Gault AG, Meharg AA, Charnock JM, Smith FA. Arsenic sequestration in iron plaque, its accumulation and speciation in mature rice plants (*Oryza sativa* L.)[J]. *Environ Sci Technol*, 2006, 40(18): 5730–5736.
- [27] 傅友强, 于智卫, 蔡昆争, 沈宏. 水稻根表铁膜形成机制及其生态环境效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1527–1534.
- [28] Chen RF, Shen RF, Gu P, Xiong XY, Du CW, Ma JF. Response of rice (*Oryza sativa*) with root surface iron plaque under aluminium stress[J]. *Ann Bot*, 2006, 98(2): 389–395.
- [29] Huang H, Zhu YG, Chen Z, Yin XX, Sun GX. Arsenic mobilization and speciation during iron plaque decomposition in a paddy soil[J]. *J Soil Sediments*, 2012, 12(3): 402–410.
- [30] Batty LC, Baker AJM, Wheeler BD. Aluminium and phosphate uptake by *Phragmites australis*: The role of Fe, Mn and Al root plaques[J]. *Ann Bot*, 2002, 89(4): 443–449.
- [31] 王震宇, 刘利华, 温胜芳, 彭昌盛, 邢宝山, 李锋民. 2种湿地植物根表铁氧化物胶膜的形成及其对磷素吸收的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(3): 781–786.