

· 研究报告 ·

营养液照光引起的化学变化及其对植物生长的影响

李佳, 陈金星, 李止正*

中国科学院上海生命科学研究院植物生理生态研究所, 上海 200032

摘要 水稻(*Oryza sativa*)根系照光实验表明, 光的效应随循环水影响到不照光的植株, 暗示营养液中发生了化学变化。在Si (K_2SiO_3)和Fe (FeEDTA)组成的溶液模拟系统中, 分别照射LED-紫光或阳光, 观察到反应液的OD₄₀₀值随光照时间的延长而增加。光照引起的化学变化发生在FeEDTA和 K_2SiO_3 之间。化学变化只与光能量有关, 与溶液温度无关, 这是一种光化学反应。光化反应溶液的光吸收从OD₃₆₀到OD₅₆₀都有明显增高。LED-蓝光和阳光诱导产生的并含FeEDTA-SiO₃成分并能吸收光的二元螯合铁硅酸盐复合物附着在衬底膜上, 形成三元复合物。衬底膜上可见大量的颗粒, 其中有些是反光的微晶颗粒。除LED-蓝光和阳光外, LED-紫光、LED-红光和LED-红外光也能诱导产生光谱性质相同的螯合铁硅酸盐复合物。制备含螯合铁硅酸盐复合分子的溶液并进行植物生长实验, 结果显示小球藻生长好, 死亡的藻体分解褪色后留下的是褐色的蓬松团状铁-硅化物。经螯合铁硅酸盐复合物处理的水稻干重增加明显。

关键词 发光二极管, 阳光, 光化反应, 螯合铁硅酸盐复合物, 植物生长

李佳, 陈金星, 李止正 (2016). 营养液照光引起的化学变化及其对植物生长的影响. 植物学报 51, 58–67.

20世纪90年代, 本实验室作过一系列蔬菜和花卉的柱式无土栽培研究(龚颂福和李止正, 1995, 2002a, 2002b, 2003)。为了进一步提高柱式栽培植物的产量和质量, 需给密植的植物群体补充足够的光能。给植物地上部补充人工光源是常见的途径, 这样势必消耗大量电能, 不符合节能减排原则。通过光导纤维引导阳光到立柱栽培区成本太高, 即使实验很成功, 性价比低, 应用价值有限。我国农村地区习惯在冬季休耕晒田以提高地温, 次年春播后, 出苗率高, 幼苗生长好。环境中红外线无处不在, 生活在土壤中的根系与不同物体间的红外交流是常见现象。根细胞具全能性, 根的幼嫩组织在光下可能被诱导形成光受体, 后者携带光能到地上部。得到有机养料的植物叶色深、茎秆粗、开花早且结果多, 都源于有机养料中含有光能。

2000年以来, 笔者一直探索从植物根部补充光能, 先是采用LED-白光等7种彩色灯, 分别在水稻(*Oryza sativa*)等4种植物的根系环境中照光, 已获3项发明专利(李止正和陈金星, 2005)。后续改用阳光实验。本研究拟探索营养液光照对植物生长的影响机

制, 以期为相关研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验栽培装置的组装

购置尺寸为5 mm不同颜色的LED灯: LED-白光、LED-蓝光、LED-黄光、LED-红光、LED-紫光、LED-绿光和LED-红外光共7种。按照栽培盆钵内圆底面的结构(龚颂福和李止正, 2002a, 2002b)分别制作含45只单色LED的光板, 用环氧树脂包裹防水, 放在栽培盆钵的底部。各光板的电源线连接在同一只电源灯光控制箱的对应接口, 电源控制箱再连接一只定时器, 后者接总电源, 组装成用于根系照光实验的光源系统(图1)。

购置扬程仅有1 m的潜水泵, 放入栽培装置(图2)的底盆(蓄水盆)中, 每盆1只。各潜水泵的电源线分别插入同一接线板的插口, 后者连接另一只定时器, 再接总电源, 组成栽培装置的水循环系统。栽培盆钵、底盆、照光系统和水循环系统组装成一套完整的实验栽培装置(图2)。本实验用6种光源, 可分别

收稿日期: 2014-12-11; 接受日期: 2015-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(No.41271236)和上海市科委重点科技攻关(No.Y359Z3A721)

* 通讯作者。E-mail: zzl@sippe.ac.cn



图1 6种LED光源系统

6种LED光源分别为LED-红光、LED-绿光、LED-黄光、LED-紫光、LED-蓝光和LED-白光

Figure 1 6 different LED devices for root system illumination experiments

6 kinds of LED: LED-red, LED-green, LED-yellow, LED-purple, LED-blue, and LED-white

组装6套栽培装置。

1.2 实验材料与栽培管理

植物材料为水稻(*Oryza sativa* L.)沪早4号和小球藻(*Chlorella beijerinch*)。采用水培法观察不同植物对根系照光的反应。

将已发芽的种子用湿岩棉包裹,放入有漏孔的小钵内,再插入装满溶液的栽培盆钵的栽培孔中。因此,植株的根一经长出就受到光源由下而上的垂直照射。蓄水盆和栽培盆钵可装6 L营养液。每日6:00至18:00循环灌溉,18:00至次日6:00停灌。培养期间不更换营养液,每天只补充消耗的营养液,直至实验结束。根部照光的时间与水循环同步。因植物的地上部和根部在白天受到上下两种光的照射,故称为双照光处理。所有实验均在普通玻璃温室内进行。

2 结果与讨论

2.1 水稻根系照光实验

实验设白、蓝、红、紫、绿和黄共6组不同颜色LED照光处理。每组分设4种处理:(1)具有LED光源系统的水栽培装置;(2)与此装置并联的不照光的水培装置CK1;(3)单独的不具光源的水培栽培装置CK2;(4)土培对照CK3。

用自来水配制硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)完全营养液,其中铁(FeEDTA)浓度为 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (低于常规浓度 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),另外,特定加入高浓度的、化学性质活泼且在光电转换过程中起关键作用的硅元素($\text{K}_2\text{SiO}_3\cdot x\text{H}_2\text{O}$, $\text{Si } 9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。溶液中的其它营养成分和用量按照常规。溶液 $\text{pH}5.5\text{--}6.5$ 。实验过程中,6组不同的照光实验都表现出相同的变化进程。这里以LED-蓝光照光组(图3A)为例,描述照光引起的叶色变化。实验开始后,水稻生长在铁营养不足的溶液中。当水稻生长至5片叶时,除CK3土培植株生长正常外,其它各组植株都与LED-蓝光处理(图3A)一样出现了老叶枯黄的现象,而新生叶较好。如LED-蓝光处理的叶色较绿,与其相连的CK1叶色次之,这与常见的缺铁表现不同,只有单独不照光的CK2植株呈正常表现,新叶仍为黄色。本实验各处理的叶色黄化程度依次是:受到光源直接照射的植株 $\text{CK1}<\text{CK2}$,表明根系照光可缓解叶色黄化。

为了分析叶色黄化的原因,此后每隔5天向各组水培(除CK3外)装置(图2)中增加Fe($1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, FeEDTA)。当Fe浓度达到常规浓度($2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)时,各组水稻的黄色症状未见恢复。此后继续每隔5天加Fe($1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),当Fe浓度达到 $6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,溶液中Fe累积量是常规用量的2.4倍。并联的两装置(照光处理和CK1)植株黄叶症状消失,转为生长正常(图3B-G),证明根系照光引起的黄叶原因是缺铁。

有趣的是,图3中全部6组不同的照光处理的光影响可从光源处传递到CK1装置中并使植株像土培植株一样正常生长。6组LED直接照射根系的效果不同,其中只有LED-紫光和LED-红光直接照射引起明显伤害,植株枯黄,生长缓慢(图3D, G),但与其并联的CK1都能分别恢复正常(图3D, G)。这说明循环的照光溶液含有光受体,而且光受体的形成与光的性质(波长)无关,只与光能有关。不照光的CK2植株虽然

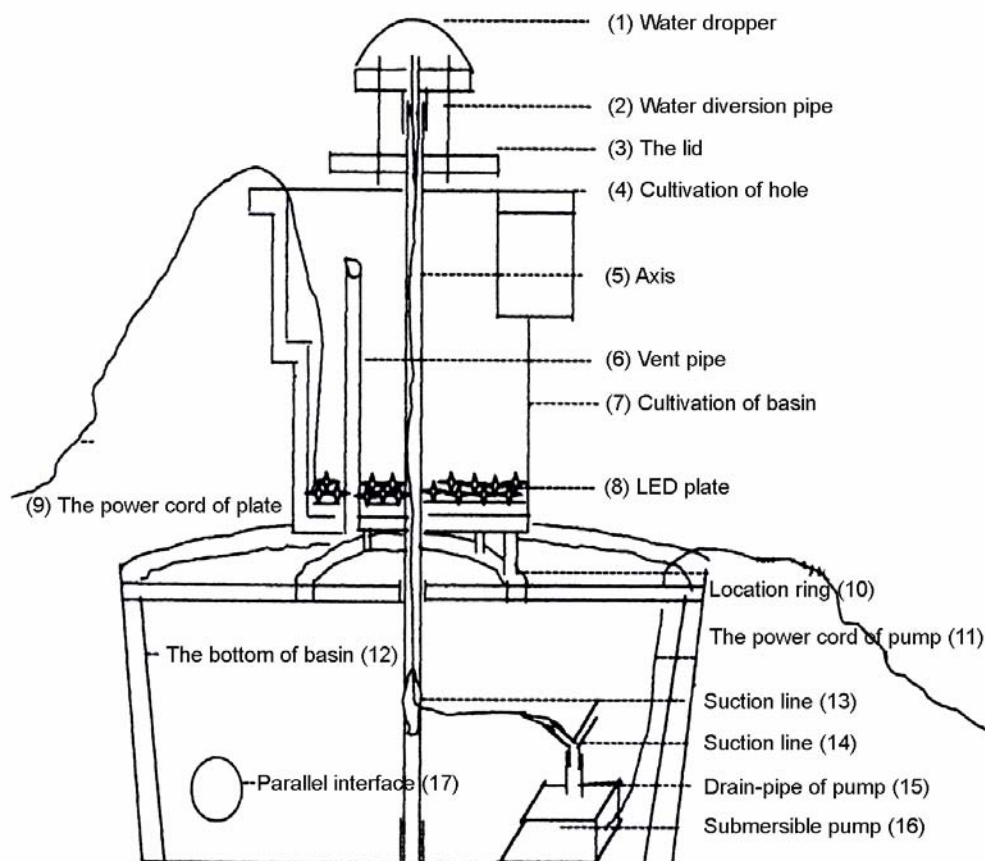


图2 实验栽培装置纵剖面示意图

Figure 2 The schematic diagram of vertical section of the culture device

也得到了与各照光组一样多的FeEDTA，但因没有光的影响，叶片仍为黄色，生长缓慢，说明FeEDTA对缺铁的CK2植株不起恢复作用，同时也暗示各并联的照光处理溶液中，FeEDTA已发生了形态变化。溶液中唯一不寻常的因子就是有多量硅元素，推测硅与FeEDTA结合，产生了复合物FeEDTA-SiO₃。该复合物在光下形成，随水循环，并可治愈水稻生理缺铁症。20世纪80年代曾有文献(邹邦基, 1980)述评过量的硅元素抑制无机铁元素的吸收。本实验显示FeEDTA的吸收也被抑制，这可能就是CK2植株缺铁而不能恢复的原因。

2.2 模拟实验

2.2.1 模拟溶液反应系统的配制

选取水培营养液成分中的FeEDTA和K₂SiO₃组成模

拟液体反应系统(reaction system, RS)。具体配制方法是在1 000 mL的烧杯中分别装入1 000 mL FeEDTA和K₂SiO₃混合液(表1)。RS1中的FeEDTA由Na₂EDTA和FeSO₄自制而成。RS2中的FeEDTA来自德国产品Librel BMX，即EDTA型微量元素混合物，以其中的FeEDTA含量为标准配制。

2.2.2 阳光和LED照光效果的比较

取各含1 000 mL RS1溶液的2只烧杯，在一只烧杯中置入LED-紫光板，放入暗箱中照光8个昼夜；另一只烧杯放在普通玻璃温室内，日照8天，夜晚不照光。每天定时取样，用721分光光度计在波长400 nm处测定溶液的吸光值(OD₄₀₀) (此前实验证明，溶液在OD₃₉₀₋₄₂₀处有吸收峰)。

图4曲线原点是溶液的起始OD₄₀₀值，在此基础

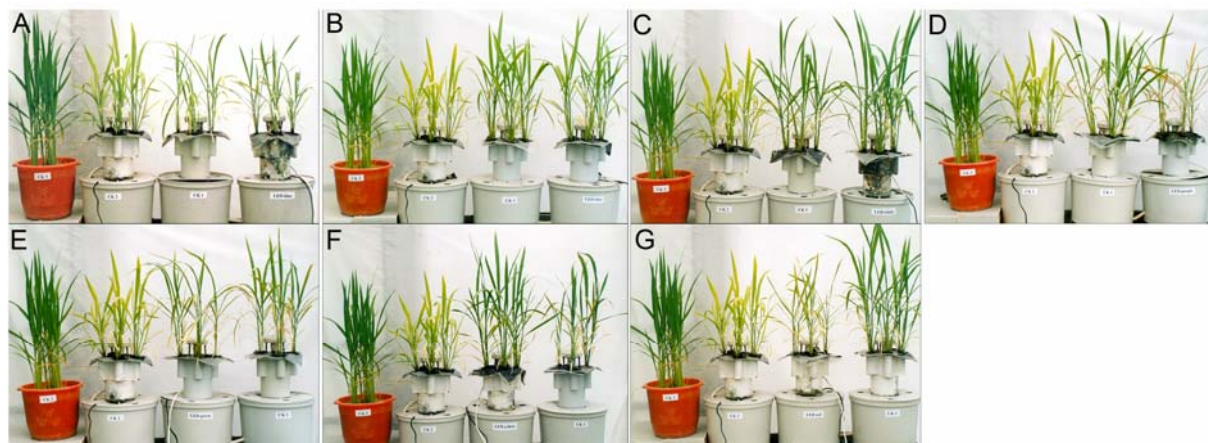


图3 不同LED光源对植株缺铁症状发生与恢复的影响

(A) 铁浓度为 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时LED-蓝光实验组植株具缺铁症状; (B)–(G) 加铁至 $6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后植株缺铁症状的恢复情况; 实验组依次为LED-蓝光、LED-白光、LED-紫光、LED-绿光、LED-黄光和LED-红光; 各组装置由左至右分别为CK3土培、CK2、单独水培和CK1/LED并联水培。(A)–(D) LED光板在右边栽培盆钵内; (E)–(G) LED光板在左边栽培盆钵内。

Figure 3 The Fe deficiency symptom and its recovery of rice plants in series experiments of LED illumination to root system in the solution

(A) Fe deficiency symptom of rice plants in solution with $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Fe; (B)–(G) The recovery of Fe deficiency symptom of rice plants in solution with $6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Fe; The experimental groups were LED-blue, LED-white, LED-purple, LED-green, LED-yellow and LED-red, respectively; Sets in each group, from left to right, was CK3 soil culture, CK2, independent hydroponics, and CK1/LED illuminated in connected hydroponics. (A)–(D) The LED board was in the right pot; (E)–(G) The LED board was in the left pot.

表1 模拟反应系统成分

Table 1 Composition of imitated solution reaction system

Reaction system (RS)	Ingredients	Compound and source
RS1	$100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Fe+ $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Si	FeEDTA (self-made), $\text{K}_2\text{SiO}_3\cdot x\text{H}_2\text{O}$ (goods)
RS2	$100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Fe+ $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Si	FeEDTA (Librel BMX), $\text{K}_2\text{SiO}_3\cdot x\text{H}_2\text{O}$ (goods)

上, 随光照时间的增加, OD_{400} 值持续上升。至第8天, 阳光照射处理 OD_{400} 值达到0.2, LED-紫光处理 OD_{400} 值则不足0.2, 说明阳光照射的效果略好。

2.2.3 阳光和液温对RS1系统的影响

取各含1 000 mL RS1溶液的2只烧杯, 记录原液的 OD_{400} 值, 然后, 取其中一只杯用黑布包裹, 2只杯都密封好并同时放入玻璃温室中接受阳光照射。每天定时测定两杯的液温及 OD_{400} 值。处理10天后的结果见表2。

表2显示, 在10天处理过程中, 日光下溶液的 OD_{400} 值每天都在上升, 而黑布包裹的处理溶液虽得到相同日照, 但在处理前6天中 OD_{400} 都停在原点未变,

后4天处理也是微小升高, 总体是水平线趋势。再比较两处理的液温, 在10个测试点(天)中, 黑暗处理有6个点的液温高于阳光直射处理, 但都没有引起 OD_{400} 值上升。结果说明液温对RS1液体 OD_{400} 值的变化没有影响。说明FeEDTA和 K_2SiO_3 之间发生光化学反应。

取2份1 000 mL的RS2 (表1)溶液, 以其中不含 K_2SiO_3 成分的为对照(CK), 配制后即刻记录2种溶液的吸收光谱, 然后将2种溶液置于阳光下, 28天后再次测定其吸收光谱, 结果如图5A所示。

图5A显示, EDTA型微量元素混合液加Si元素, 同样表现出单独FeEDTA加Si的反应结果(图4; 表2), 未观察到多种EDTA型微量元素对Si/Fe结合的干扰

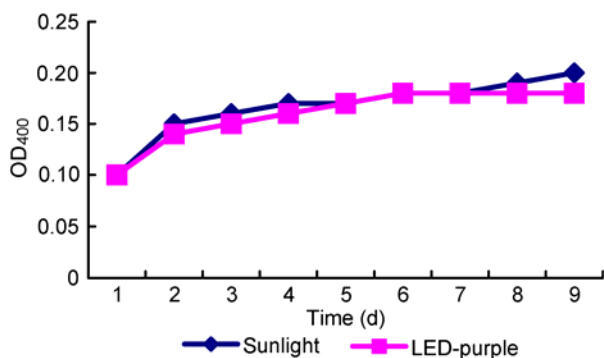


图4 不同光源对RS1系统的影响

Figure 4 The OD₄₀₀ changes induced by sunlight and LED-purple in system RS1

表2 光和水温对RS1系统的影响

Table 2 Effects of sunlight and water temperature on the system RS1

Treatment time (d)	Sunlight RS1 in dark (CK)		Sunlight RS1	
	OD ₄₀₀	Water (°C)	OD ₄₀₀	Water (°C)
0	0.10	—	0.10	—
1	0.10	38	0.12	35
2	0.10	27	0.13	26
3	0.10	26	0.14	25
4	0.10	24	0.15	24
5	0.10	24	0.16	24
6	0.10	30	0.17	30
7	0.10	27	0.18	27
8	0.11	33	0.19	32
9	0.11	33	0.20	32
10	0.11	32	0.23	31

现象, 说明在混合溶液中, FeEDTA和SiO₃⁻²的结合极易(选择性)发生。然后, 将图5A中2种处理的光下记录分别减去其对照的相应结果并作图, 结果如图5B所示。不含Si对照(CK)的OD在波长360–400 nm波段是负增长, 在420–560 nm波段稍增长, 但对光的吸收总体稳定在很低的水平。而添加Si的RS2处理, 在360–560 nm波段下OD有明显增加, 峰值在420 nm处明显提高。

结果表明, 所谓光化反应, Si (SiO₃⁻²)主要防止近紫外(360–400 nm)对FeEDTA的破坏, 并增强其对360–560 nm波段光的吸收。

2.2.4 不同光源诱导的光化产物

将LED-蓝光、LED-紫光、LED-红光和LED-红外光

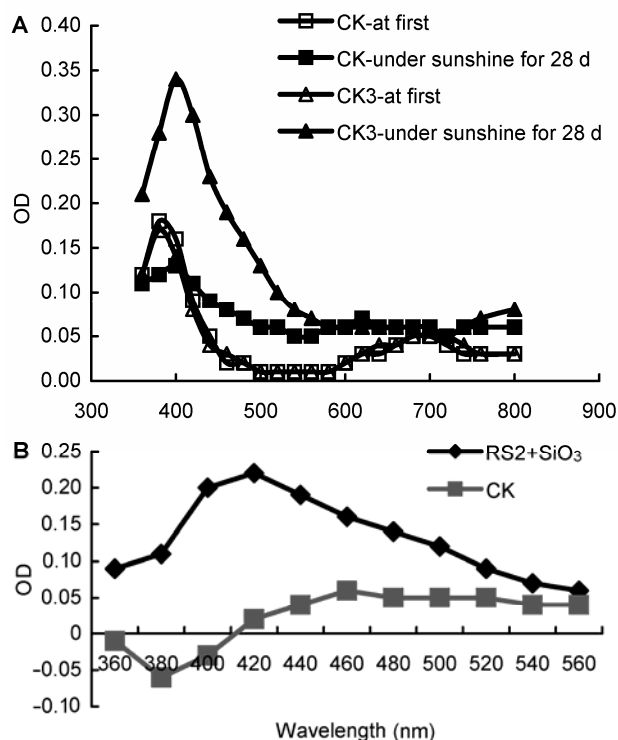


图5 RS2系统在日光下28天后的光谱(A)及光化反应分析(B)

Figure 5 The spectrums of RS2 solution under sunshine for 28 d (A) and analysis of photo-chemical reaction (B) induced by SiO₃ in RS2 system

4种光板分别浸入1 000 mL RS1溶液中, 与没有光板的1 000 mL RS1 (CK)对比。将对照与处理同时放入一只暗箱中, 暗箱周围和具光板的烧杯周围都用黑布密封, 严防光干扰对照处理。实验在室温下进行。LED-蓝光、LED-紫光、LED-红光和不设光板的CK分别连续处理10个昼夜, LED-红外光处理110个昼夜。与此同时, 另设没有光板的1 000 mL RS1于普通玻璃温室内日光下处理10天(晚上不补光)。此实验共有5种光源处理和1种不照光(CK)处理。

实验结束后, 6个液体样品分别于沸水中减压蒸干, 用无水乙醇提取3次。合并提取液, 用1号瓷漏斗过滤, 得滤液为样品A; 再通过2号瓷漏斗过滤, 得滤液为样品B。于水浴上蒸干样品B, 干物质在干燥箱(80°C)中干燥2小时以上, 用8 mL无水乙醇溶解, 过夜。样品B中析出沉淀, 取上清液, 再通过3号瓷漏斗, 得滤液为样品C。沸水浴上去除乙醇, 取干物质于80°C干燥箱中再干燥2小时以上, 冷却后再用8 mL无水乙醇溶解。在721分光光度计上扫描, 结果如图6所示。

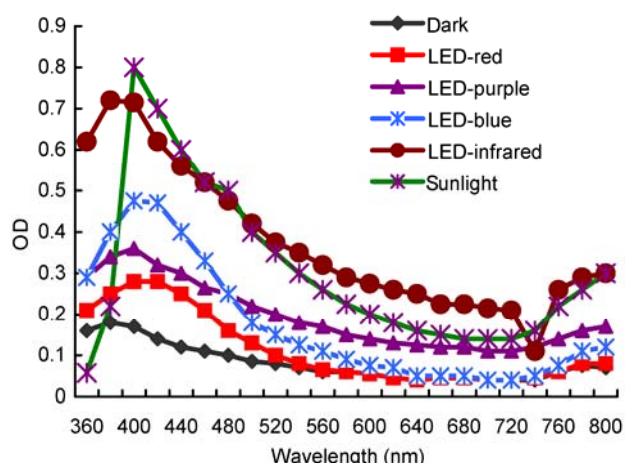


图6 不同光源诱导的光化产物光谱

Figure 6 The absorption spectrum of the photo chemical outcomes induced by different light source in the solution

图6显示, 最下一条曲线为暗箱中的对照处理CK (dark), 其产物的吸收峰在近380 nm处, 基本是FeEDTA分子的吸收峰。其它各光处理产物的吸收峰都在400–420 nm之间, 吸收峰向波长方向偏移, 表明各光照产物的性质相同。

依据吸收峰高度从下依次向上比较各种光照产物的积累, CK (dark)曲线之上是LED-红光的产物, 积累量最低。其次是LED-紫光和LED-蓝光, 都明显高于前者。阳光的效率最高, 其全程光谱都在LED灯之上。需要特别说明的是, 在10天光照期间, LED-红外光处理未显示出OD值的变化, 但在处理110天后, 其光照产物有很明显的光吸收, 接近阳光曲线, 而且在可见光(500–700 nm)区也有明显的吸收, 表明产物积累量甚高。实验结果说明, 光照产物的产生和积累与光的能量有关, 只要能量达到一定程度, 都能诱导产生光化产物。这一结论完全验证了前述不同LED根系照光实验的推论。

2.2.5 光化产物的成分分析

以图6中的对照、LED-蓝光和阳光处理的产物为样品, 采用DIONEX600高效离子色谱仪外标法测试阴离子的电导率, 用12 mmol·L⁻¹ NaOH洗脱, 结果见图7。

图7A显示, 峰1和峰2是样品FeEDTA, 峰6是样品SiO₃²⁻, 2种阴离子样品互相分离。此样品在分离过

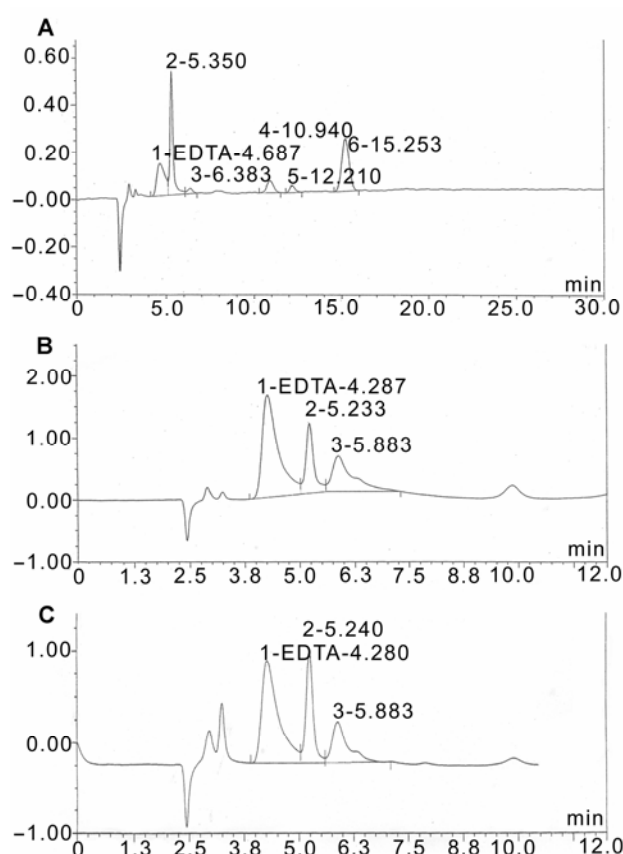


图7 光化产物成分分析

(A) 黑暗中RS1系统中峰1+峰2和峰6的分离; (B) 阳光下RS1系统中产生螯合铁硅酸盐复合体; (C) LED-蓝光照射RS1系统中产生螯合铁硅酸盐复合体

Figure 7 Analysis of contents of photo-chemical outcomes (A) Separate peak 1+2 and peak 6 from the RS1 system in the dark; (B) The complex composed from RS1 system under the sunlight; (C) The complex composed from RS1 system under the LED-blue

程中经历长时间的减压热沸腾过程和散光都没有促进FeEDTA和SiO₃²⁻两种阴离子的复合, 再次验证了表2中的结论, 即水温不参与峰1和峰2与峰6的复合。

图7B显示, 峰1和峰2是样品FeEDTA, 峰3是样品SiO₃²⁻, 峰1、峰2/峰3复合, 一起构成二元复合体, 虽用12 mmol·L⁻¹ NaOH洗脱, 仍没有将峰3完全分离。需要特别指出的是, 峰1、峰2/峰3的底部连接线距图底线的距离有底物作衬, 复合的2种阴离子又被底物复合一起构成三元复合体。

图7C重现了图7B的结果, 也是三元复合体。

因此, 将FeEDTA和K₂SiO₃的混合液在光(LED光或阳光)照射下, 产生含FeEDTA-SiO₃的二元复合物和三元复合物, 都称为螯合铁硅酸盐复合体, 即FeEDTA-SiO₃复合体。各种光源产生的螯合铁硅酸盐复合体有相似的光吸收图谱(图6)。

2.2.6 螯合铁硅酸盐复合体的形态特征及其化学成分
取初步分离的螯合铁硅酸盐复合体样品(图7B, C), 在场发射电子显微镜(JEOL, 型号JEM-2100F, 能谱EDS, OXFORD, INCA)下观察, 得到结果如图8所示。

图8A显示, 螯合铁硅酸盐复合体在电子显微镜下, 由于电场温度关系出现很多圆形气泡, 暗示螯合铁硅酸盐复合体样品(图7B, C)是有机膜, 该膜的化学成分见图8C, 其中包含RS1系统中的主要化学成分, 如碳、氧、铁和硅, 此外还吸附氯、铜、铝和钙4种外来元素。

将3份螯合铁硅酸盐复合体样品混合并浓缩, 再进行观察, 获得结果如图8B和D。结果显示, 多层膜的上表面有无数反差很大的颗粒, 其中部分是微晶颗粒(图8D)。

已知硅元素会反光, 推断可能是FeEDTA-SiO₃颗粒(图8B, C)。

上述结果表明, 在浓缩的情况下螯合铁硅酸盐复合体分子会再次复合并构成复合膜, 后者的表面又吸附(聚集)了很多分散的螯合铁硅酸盐复合体颗粒。

2.3 小球藻实验

藻原液经滤纸过滤, 纯净水冲洗3次, 再用新配制的营养液清洗藻体, 在振荡器上振荡2分钟, 定容至12 mL, 然后各取2 mL藻液加入到各含200 mL培养液(16 mg·L⁻¹ NH₄-N, 5 mg·L⁻¹ P, 12 mg·L⁻¹ K, 5 mg·L⁻¹ Ca, 3 mg·L⁻¹ Mg, 0.2 mg·L⁻¹ FeEDTA, 1滴微量元素)的三角瓶中。于室内距北窗210 cm的桌面上自然光下培养, 日平均散光照度为13.6 μE·s⁻¹·m⁻²。实验从2009年1月至2011年6月, 培养期间只补充水分, 不添不换营养液, 记录结果如图9A。

图9A显示, 中间对照藻体呈黄色。氮营养不足是主要原因, 纯乙醇提取物(0.5 mg·L⁻¹)藻体颜色略深, 90%乙醇提取物(0.5 mg·L⁻¹)藻体呈黄绿色, 其右侧

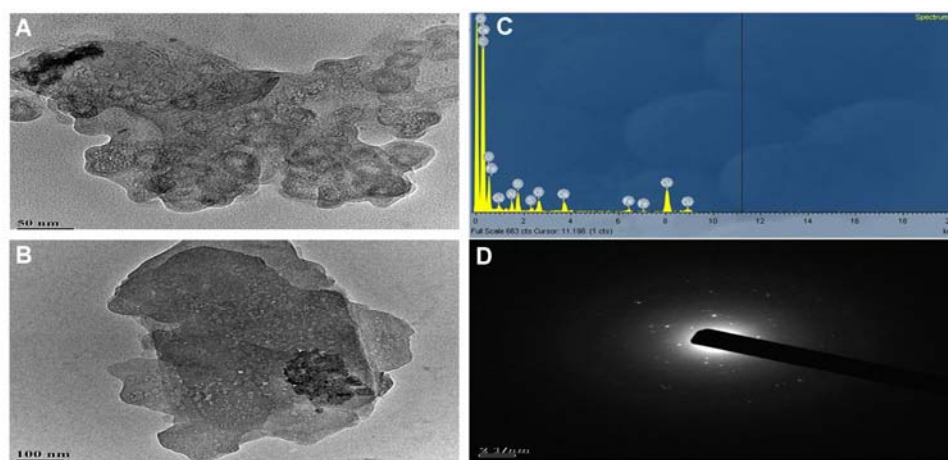


图8 螯合铁硅酸盐复合体的形态特征及其化学成分

(A) 电子显微镜下起泡的螯合铁硅酸盐复合体有机膜状态(Bar=50 nm); (B) 螯合铁硅酸盐复合体的多层膜叠加复合体(膜表面散布无数颗粒)(Bar=100 nm); (C) 螯合铁硅酸盐复合体膜中的化学元素; (D) 螯合铁硅酸盐复合体膜上的微晶颗粒

Figure 8 Morphological characteristics and chemical constituents of FeEDTA-SiO₃ complex

(A) The organic membrane with bubbles of the complex of FeEDTA-SiO₃ under the electron microscope (Bar=50 nm); (B) The membrane overlap of FeEDTA-SiO₃ complex (attention to a lot of pearls on the membrane) (Bar=100 nm); (C) The chemical elements involved in the organic membrane of FeEDTA-SiO₃ complex under the electron microscope; (D) The microcrystal pearls on the membrane of FeEDTA-SiO₃ complex



图9 整合铁硅酸盐复合体初提物对小球藻生长的影响

(A) 样品从左至右依次为 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 90%乙醇提取物、 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 纯乙醇提取物、对照、 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 透析袋内样品和 $0.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 透析袋外样品; (B) 样品在 40°C 以上的暗箱中培养40天(样品顺序同图9A)

Figure 9 Effect of primary extracts of FeEDTA-SiO₃ complex on the growth of *Chlorella beijerinch*

(A) From left to right in proper order: $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ extract with 90% alcohol, $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ extract with pure alcohol, CK, $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ extract in the dialysis bag, and $0.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ extract out of the dialysis bag; (B) The samples were in the dark box of 40°C for 40 d (from left to right in proper order were same as in Figure 9A)

透析袋内样品($0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)比袋外样品($0.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)生长好。总体情况是袋内样品好于袋外样品。原因是袋内样品分子量大, 其表面吸附有大量的FeEDTA-SiO₃分子或颗粒(图8B, D), 能被藻体接触吸收。小球藻在室内常温散光下生长良好。

实验结束后, 将藻体样品(图9A)转移到 40°C 以上暗箱中培养40天, 结果是藻体分解褪色, 留下的是聚合成团状的铁硅化物(图9B), 其色泽如同FeEDTA-SiO₃复合体(图8A, B), 但很蓬松, 且能随水移动, 物体形态不同于FeEDTA-SiO₃复合体。对照呈白色。在图9A中, 左起第4个样品生长最好, 它留下的褐色团状物(图9B, 左2)也最多, 显示褐色团状物与生长情况一致。

2.4 水稻实验

配制NH₄-N完全溶液, 加入 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Fe (FeEDTA), 2

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Si (K₂SiO₃)。培养48天, 考察水稻的生长情况, 结果见表3。

由表3可知, 纯乙醇提取可被透析的袋外物(沸水蒸干), 2种低浓度处理(处理(2)和(3))的分蘖和单株干重都明显高于对照, 其中处理(3)的单株干重是对照的2倍。高浓度的纯乙醇袋外样品(沸水蒸干)显露毒害, 分蘖少, 单株干重低。2种95%乙醇提取物(沸水蒸干)的结果均明显较好, 高浓度处理未显毒性。

2.5 讨论

以往给栽培植物补充光能, 总是利用照明工程, 成本高且不易实施。本研究将光源放在栽培盆钵中, 或蓄水盆中, 通过循环水运送光诱导产物FeEDTA-SiO₃到无光源处, 促进了植物的生长。经过空气层和长距离循环水路也不影响照光效果, 证明光诱导产物FeEDTA-SiO₃很稳定, 对氧化、紫外线及高温均不敏感。这为扩大应用提供了依据。在大蓄水池中安装一定能量的光源, 通过循环水能浇灌大面积的作物, 根系照光有望被应用于现代农业中。

20世纪60年代有文献报道, 营养液中高浓度硅元素抑制铁元素的吸收。本研究在水稻根系照光实验中, 观察到高浓度硅元素同样抑制FeEDTA的吸收, 但不抑制螯合铁硅酸盐FeEDTA-SiO₃的吸收。水稻缺铁症状的恢复表明螯合铁硅酸盐FeEDTA-SiO₃参与了铁营养代谢(图3)。另外, 用FeEDTA-SiO₃喂养的小球藻生长好, 藻体褪色解体后留下的褐色团状物(图9B)也是铁硅化物, 但形态蓬松, 且能随水移动, 是FeEDTA-SiO₃代谢后的产物。FeEDTA-SiO₃是一种新型含光能且又可产业化的有机肥料。在禾谷类作物(如水稻、小麦)中, 硅元素主要积累在根茎组织中, Fe-EDTA-SiO₃分子将改变硅元素的分布状态, 需要铁元素的生理过程可能都有FeEDTA-SiO₃参与, 这使研究FeEDTA-SiO₃分子与植物之间的能量交换成为可能。

在光照的模拟反应系统中, 会生成很多的FeEDTA-SiO₃分子, 即所谓二元体, 这些分子又在静止或被浓缩时聚合结膜, 并吸附FeEDTA-SiO₃分子, 形成所谓三元体。本实验过程中, 笔者可从瓶壁上刮下三元体FeEDTA-SiO₃膜碎片, 但静态液体内部情况不明。而该液体可长久保留在阳光下, 表明其非

表3 整合铁硅酸盐复合体对水稻生长的影响**Table 3** Effect of the FeEDTA-SiO₃ on rice growth

Source and dosage of extracts	Tiller number	Root/shoot	Dry weight (g)
(1) CK	3.0	0.09±0.02	0.67±0.12
(2) Pure alcohol extracts, out of the dialysis bag, OD ₄₀₀ =0.025	4.2	0.15±0.01	1.25±0.02
(3) Ditto, OD ₄₀₀ =0.075	4.3	0.17±0.03	1.49±0.32
(4) Ditto, OD ₄₀₀ =0.22	2.3	0.08±0.01	0.63±0.10
(5) 95% alcohol extracts, out of the dialysis bag, OD ₄₀₀ =0.042	3.8	0.15±0.03	1.29±0.21
(6) Ditto, OD ₄₀₀ =0.176	3.6	0.16±0.02	1.42±0.08

表中数据均为5个植株的平均值。

The data in this table are the average of 5 plants.

常稳定。本研究结果可应用于生物物理学研究。

致谢 衷心感谢南开大学张延焯和张铁群两位教授提供的LED知识和有关信息; 上海农业科学院作物研究所赵志鹏先生提供水稻和小麦种子。衷心感谢华东理工大学分析测试中心栾绍嵘工程师提供DIONEX-600高效离子色谱仪外标法测定结果; 中国科学院上海硅酸盐研究所分析测试中心许钊钊博士提供场发射电子显微镜测定结果。

参考文献

- 龚颂福, 李止正 (1995). 立柱无土栽培研究初报. 应用与环境生物学报 **2**, 187–188.
- 龚颂福, 李止正 (2002a). 花卉柱式无土栽培(CSC). 植物学通报 **19**, 477–483.
- 龚颂福, 李止正 (2002b). 简易柱式无土栽培法. 应用与环境生物学报 **8**, 666–667.
- 龚颂福, 李止正 (2003). 屋顶柱式无土栽培. 植物生理学通讯 **39**, 644–647.
- 李止正, 陈金星 (2005). 水稻铁营养不足症状的发生及发光二极管增进铁营养方法. 中国, ZL200510024101.3. 2009-07-29.
- 李止正, 龚颂福 (2002a). 立柱和柱式无土栽培系统(SCSC)及其在生菜栽培上的应用. 应用与环境生物学报 **8**, 142–147.
- 李止正, 龚颂福 (2002b). 番茄柱式无土栽培(CSC)研究. 应用与环境生物学报 **8**, 492–496.
- 邹邦基 (1980). 植物生活中的硅. 植物生理学通讯 **3**, 14–20.

Chemical Changes Caused by LED Lamps in Nutrient Solution and Its Effect on Plant Growth

Jia Li, Jinxing Chen, Zhizheng Li*

Institute of Plant Physiology and Ecology, Shanghai Institutes for Biological Sciences, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China

Abstract Rice plants were grown in nutrient solution containing Si/FeEDTA and LED light. Plants grown distant from the light source could get effect carried by the circulation of nutrient solution. The solution containing Fe ($100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, FeEDTA) and Si ($100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, K_2SiO_3) was illuminated separately by sunlight and LED-purple in the solution. The OD_{400} of the solution increased with each illuminating day. The chemical change induced by illumination occurred between FeEDTA and K_2SiO_3 . This chemical change was not related to solution temperature ($^{\circ}\text{C}$) but was related to illumination only, so this was a photochemical reaction. The illuminated solution resulted in light absorbance from OD_{360} to OD_{560} . An FeEDTA- SiO_3 complex was isolated from the solution illuminated by LED blue or sunlight. This complex was again absorbed by a lining membrane to form a three-component complex. There was a large amount of complex (e.g., microcrystals) accumulated on the lining membrane. LED-purple, LED-red and LED-infrared could be induced to result in the FeEDTA- SiO_3 complex. *Chlorella beijerinckii* in the nutrient solution containing the FeEDTA- SiO_3 complex grew well; dead algae broke down and left a brown-coloured fluffy ball of Fe-Si complex. The rice plants fed the FeEDTA- SiO_3 complex showed high dry weight per plant.

Key words LED, sunlight, photochemical reaction, FeEDTA- SiO_3 complex, plant growth

Li J, Chen JX, Li ZZ (2016). Chemical changes caused by LED lamps in nutrient solution and its effect on plant growth. *Chin Bull Bot* **51**, 58–67.

* Author for correspondence. E-mail: zzi@sippe.ac.cn