

颜廷帅,姜振升,侯文通,等. 缺铁及不同铁源对水培大白菜生物量、光合参数和矿质元素含量的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(6):275-278.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.06.077

缺铁及不同铁源对水培大白菜生物量、光合参数和矿质元素含量的影响

颜廷帅,姜振升,侯文通,刘振香,贾亮

(金正大生态工程集团股份有限公司/农业部植物营养与新型肥料创制重点实验室/复合肥料国家地方联合工程研究中心,山东临沭 276700)

摘要:以大白菜(*Brassica pekinensis* L.)为试材,研究缺铁处理和硫酸亚铁、柠檬酸亚铁、柠檬酸铁、EDTA-Fe 这 4 种相同铁元素浓度铁源对水培大白菜生物量、光合参数和氮、磷、钾、钙、镁、铁元素含量的影响。结果表明,与缺铁处理相比,加入不同铁源可显著提高大白菜植株的干质量、净光合速率、气孔导度,细胞间 CO_2 浓度显著降低;不同铁源处理时,大白菜老叶中的全氮含量显著升高,镁含量显著降低;硫酸亚铁、柠檬酸铁处理时,大白菜根中的铁元素含量升高,柠檬酸亚铁处理时,大白菜根和新叶中的铁元素含量升高;柠檬酸亚铁处理时,大白菜新叶和老叶的钙含量、新叶镁含量显著低于缺铁处理和其他铁源处理;不同铁源处理时,大白菜根中的磷含量相对最高,而缺铁处理时大白菜新叶中的磷含量相对最高。

关键词:缺铁;大白菜;生物量;光合参数;矿质元素;柠檬酸亚铁

中图分类号: S634.106 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)06-0275-03

铁是植物必需的微量元素,参与植物光合作用和叶绿素合成,在植物氧化还原反应和电子传递过程中具有重要的作用^[1]。铁在土壤中虽然含量丰富,但植物体缺铁的现象仍然比较普遍,这是由于土壤中有效铁的含量很低,尤其在碱性土壤中,有效铁的浓度非常低^[2]。据统计,世界上约 1/3 的土壤为碱性土壤。因此,土壤有效铁含量不足成为作物生长发育最大的限制因子之一^[3]。铁肥的施用可以改善土壤的缺铁状况。最早铁肥以无机铁源 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 FeCl_3 为主^[4],后有以有机态铁为铁源的营养液配方得到应用,但有机态铁性质不稳定在一定程度上限定了其应用^[5],对于以何种铁源作为铁肥仍存在争议。本试验以大白菜(*Brassica pekinensis* L.)为供试材料,采用水培方式,设置缺铁和不同铁源处理,探究缺铁和不同铁源处理对大白菜生长、光合参数和矿质元素含量的影响,为铁肥的合理施用提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

3~4 张叶片的大白菜幼苗,由营养钵催芽生长。供试水为蒸馏水,铁含量小于 0.000 1 mg/L。

1.2 方法及处理

试验于 2015 年 9 月 5 日开始,采用水培法。选取长势一致的 15 株大白菜幼苗,转入 1/2 Hoagland 和 Arnon 全浓度溶液^[6]进行培养,每天通气 2 h;待大白菜幼苗生长 7 d,将大白菜

菜幼苗随机分为 5 组,每组 3 株,分别移入缺铁、含硫酸亚铁(Fe^{2+})、柠檬酸亚铁(Fe^{2+})、EDTA-Fe(Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 混合物)、柠檬酸铁(Fe^{3+})的 Hoagland 和 Arnon (全浓度)溶液中继续培养 18 d,每天通气 2 h,每 7 d 更换 1 次营养液,不同铁源处理的铁元素浓度均为 2.8 mg/L;取样测定。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 光合参数 大白菜收获前,用英国 PP Systems 公司生产的 CIRAS-2 便携式光合作用测定仪,于 09:00—11:00 采用固定光强 $800 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 测定每株大白菜功能叶片相同叶位的细胞间隙 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(E)、气孔导度(G_s)和净光合速率(P_n)等光合相关参数。

1.3.2 干质量 将大白菜分为根、老叶、新叶 3 个部分,放于信封中置于干燥箱 105 ℃ 杀青 30 min,75 ℃ 烘干至恒质量,称量根系和地上部的干质量。样品备存,用于测定氮、磷、钾、钙、镁、铁元素含量。

1.3.3 主要元素含量测定 将烘干的大白菜干样磨碎,准确称取 0.200 g,用 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2$ 联合消煮法煮至澄清,氮、磷、钾含量分别采用凯氏定氮法、钒钼黄比色法、火焰光度法测定^[7],钙、镁、铁含量采用 ICP-AES 法测定^[8]。

1.4 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2007 软件进行处理,采用 SPSS 16.0 软件进行统计分析和差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 缺铁和不同铁源处理对水培大白菜生物量的影响

由表 1 可见,与缺铁处理相比,加入不同铁肥时,大白菜根系和地上部干质量均显著增加,不同铁源处理之间大白菜根系和地上部干质量无显著性差异;柠檬酸亚铁处理时,大白菜根系和地上部的干质量相对最大,较缺铁处理分别增加 115.65%、176.98%。

收稿日期:2016-01-14

基金项目:山东省科技重大专项(新兴产业)(编号:2015ZDXX0502B02)。
作者简介:颜廷帅(1989—),男,山东临沂人,主要从事植物营养与新型肥料研究。E-mail:yanaiyanzhi@163.com。

通信作者:姜振升,硕士,农艺师,主要从事植物营养与新型肥料研究。E-mail:jzssdau@163.com。

表 1 缺铁和不同铁源处理对水培大白菜干重的影响

处理	根系干质量 (g/株)	地上部干质量 (g/株)	总干质量 (g/株)
缺铁	0.147 ± 0.035b	1.147 ± 0.516b	1.293 ± 0.481b
硫酸亚铁	0.293 ± 0.040a	2.657 ± 0.240a	2.950 ± 0.235a
柠檬酸亚铁	0.317 ± 0.107a	3.177 ± 0.826a	3.493 ± 0.770a
EDTA - Fe	0.187 ± 0.025a	2.903 ± 0.651a	3.090 ± 0.629a
柠檬酸铁	0.227 ± 0.090a	2.933 ± 1.026a	3.160 ± 0.941a

注:同列数据后不同小写字母表示处理间有显著性差异。下同。

2.2 缺铁和不同铁源处理对水培大白菜光合作用的影响

由表 2 可见,与缺铁处理相比,不同铁源处理大白菜的净

表 2 缺铁和不同铁源处理对水培大白菜光合参数的影响

处理	细胞间隙 CO ₂ 浓度 (μmol/mol)	蒸腾速率 [mmol/(m ² ·s)]	气孔导度 [mmol/(m ² ·s)]	净光合速率 [μmol/(m ² ·s)]
缺铁	411.33a	2.03b	766.67e	5.53b
硫酸亚铁	380.00b	2.87ab	1 526.00c	15.97a
柠檬酸亚铁	383.67b	3.10a	1 405.00d	15.63a
EDTA - Fe	370.67b	2.17b	2 650.00a	17.33a
柠檬酸铁	372.67b	1.97b	1 903.33b	16.63a

2.3 缺铁和不同铁源处理对水培大白菜各组织元素含量和分布的影响

2.3.1 铁元素 由表 3 可知,各处理大白菜,根中的铁含量相对最高,老叶次之,新叶最低;在根中,硫酸亚铁、柠檬酸亚铁、柠檬酸铁处理的铁含量较缺铁处理有显著上升,分别上升 417.80%、226.67%、442.20%;在老叶中,各处理的铁含量无显著性差异;在新叶中,柠檬酸亚铁处理的铁含量显著高于其他处理,较缺铁处理增加了 53.79%。这说明硫酸亚铁、柠檬酸亚铁、柠檬酸铁促进了大白菜根系对铁的吸收,同时柠檬酸亚铁促进了铁向大白菜新叶运输;使用 EDTA - Fe 对大白菜根系铁的吸收和向地上部的转运无明显效果。

表 3 缺铁和不同铁源处理的大白菜各组织铁含量

处理	铁含量(mg/kg)		
	根	老叶	新叶
缺铁	1 500 ± 600c	357 ± 21a	132 ± 83b
硫酸亚铁	7 767 ± 1 358a	463 ± 76a	127 ± 6b
柠檬酸亚铁	4 900 ± 954b	393 ± 35a	203 ± 51a
EDTA - Fe	1 833 ± 153c	417 ± 75a	49 ± 22b
柠檬酸铁	8 133 ± 1 365a	457 ± 85a	107 ± 34b

2.3.2 氮、磷和钾元素 由表 4 可知,不同铁源处理的大白菜全氮含量以新叶最高,老叶次之,根相对最低,缺铁处理大白菜根的氮含量高于老叶;在根中,硫酸亚铁处理的氮含量高于其他处理;在老叶中,不同铁源处理的氮含量均显著高于缺铁处理,其中硫酸亚铁处理最高;在新叶中,柠檬酸亚铁处理的氮含量较其他处理有显著降低。由于氮是易移动的元素,缺氮情况下老叶中的氮会向新叶转移,导致老叶氮含量降低,缺铁抑制了大白菜对氮的吸收。

由表 5 可见,不同铁源处理的大白菜磷含量以根最高,新叶次之,老叶最低,缺铁处理的大白菜新叶中磷含量高于根;在根中,柠檬酸铁处理的磷含量高于其他处理;在新叶中,柠檬酸亚铁处理较缺铁处理的磷含量有显著降低;在老叶中,各处理的磷含量无显著性差异;缺铁情况下,新叶中磷含量最

光合速率显著升高,其中,EDTA - Fe 处理的大白菜净光合速率相对最高,较缺铁处理增加 213.38%,与其他铁源处理的大白菜净光合速率无显著性差异;缺铁处理时,大白菜功能叶片胞间 CO₂ 浓度显著高于其他处理,这可能是由于缺铁导致光合电子传递受阻,进而抑制光合作用,造成 CO₂ 无法被吸收利用,使 CO₂ 在细胞间隙累积;不同铁源处理时大白菜的气孔导度均显著升高,其中,EDTA - Fe 处理气孔导度相对最大,较缺铁处理增加了 245.65%;大白菜细胞间隙 CO₂ 浓度较缺铁处理显著降低;柠檬酸亚铁处理时,大白菜的蒸腾速率相对最高,为 3.10 mmol/(m²·s)。另外,试验还表明,气孔导度值与净光合速率呈正相关,这与 Wong 等的研究结果^[9] 相同。

表 4 缺铁和不同铁源处理的大白菜各组织中氮含量

处理	氮(%)		
	根	老叶	新叶
缺铁	3.070 ± 0.164b	2.877 ± 0.068d	5.450 ± 0.403a
硫酸亚铁	3.613 ± 0.045a	4.500 ± 0.098a	4.950 ± 0.823ab
柠檬酸亚铁	3.147 ± 0.107ab	3.703 ± 0.168c	4.153 ± 0.261b
EDTA - Fe	2.820 ± 0.322b	4.310 ± 0.246ab	5.550 ± 0.165a
柠檬酸铁	3.087 ± 0.435b	4.160 ± 0.056b	5.550 ± 0.532a

表 5 缺铁和不同铁源处理的大白菜各组织中磷含量

处理	全磷(%)		
	根	老叶	新叶
缺铁	0.903 ± 0.150b	0.650 ± 0.122a	0.947 ± 0.015a
硫酸亚铁	1.413 ± 0.126a	0.583 ± 0.042a	0.890 ± 0.060ab
柠檬酸亚铁	0.903 ± 0.181ab	0.550 ± 0.035a	0.830 ± 0.036b
EDTA - Fe	0.950 ± 0.271b	0.633 ± 0.086a	0.920 ± 0.020ab
柠檬酸铁	1.423 ± 0.084b	0.633 ± 0.101a	0.877 ± 0.081ab

高,这是由于在缺铁情况下,磷向大白菜新叶的运输增加,对磷的吸收也增加。

由表 6 可知,各处理大白菜的钾含量以老叶最高,新叶次之,根最低;在根中,硫酸亚铁、柠檬酸铁处理的钾含量显著高于其他处理;在老叶中,各处理的钾含量无显著性差异;在新叶中,硫酸亚铁处理的钾含量相对最高,柠檬酸亚铁处理的钾含量最低。

表 6 缺铁和不同铁源处理的大白菜各组织中钾含量

处理	钾(%)		
	根	老叶	新叶
缺铁	0.980 ± 0.017b	5.113 ± 1.211a	4.097 ± 0.482a
硫酸亚铁	1.820 ± 0.934a	5.257 ± 0.123a	4.527 ± 0.670ab
柠檬酸亚铁	0.990 ± 0.633b	4.520 ± 0.678a	3.090 ± 0.226b
EDTA - Fe	0.843 ± 0.224b	5.167 ± 0.168a	4.177 ± 0.180ab
柠檬酸铁	1.187 ± 0.407a	5.487 ± 0.940a	4.267 ± 0.677ab

2.3.3 钙、镁元素 由表 7 可知,各处理大白菜的钙含量以老叶最高;在根中,各处理的钙含量无显著性差异;在老叶、新

叶中,柠檬酸亚铁处理的钙含量显著低于其他处理,柠檬酸亚铁抑制了钙向地上部的运输和分配。

表 7 缺铁和不同铁源处理的大白菜各组织中钙含量

处理	钙(%)		
	根	老叶	新叶
缺铁	1.177 ± 0.031a	3.910 ± 0.250a	1.913 ± 0.340a
硫酸亚铁	1.303 ± 0.310a	3.647 ± 0.206a	1.637 ± 0.275a
柠檬酸亚铁	0.897 ± 0.264a	3.043 ± 0.257b	0.880 ± 0.246b
EDTA - Fe	1.270 ± 0.779a	3.777 ± 0.076a	1.527 ± 0.163a
柠檬酸铁	1.590 ± 0.550a	3.527 ± 0.167a	1.540 ± 0.208a

由表 8 可知,各处理大白菜的镁含量以老叶最高,新叶次之,根最低;在根中,硫酸亚铁、柠檬酸铁处理的镁含量较其他处理有显著上升;在老叶中,不同铁源处理的镁含量较缺铁处理有显著降低;在新叶中,柠檬酸亚铁处理的镁含量较其他处理有显著降低,柠檬酸亚铁抑制了镁向地上部的运输和分配。

表 8 缺铁和不同铁源处理的大白菜各组织中镁含量

处理	镁(%)		
	根	老叶	新叶
缺铁	0.157 ± 0.042b	0.673 ± 0.070a	0.437 ± 0.100a
硫酸亚铁	0.327 ± 0.031a	0.583 ± 0.050b	0.387 ± 0.057a
柠檬酸亚铁	0.153 ± 0.051b	0.473 ± 0.023c	0.240 ± 0.010b
EDTA - Fe	0.223 ± 0.047ab	0.523 ± 0.051bc	0.363 ± 0.058a
柠檬酸铁	0.310 ± 0.092a	0.543 ± 0.023bc	0.363 ± 0.015a

3 结论与讨论

铁的缺乏影响植物体的生长和代谢,缺铁植物叶绿体片层结构发生变化,严重时叶绿体解体,光合电子传递链中断,净光合速率下降,同化产物的形成受阻^[10]。本试验缺铁大白菜表现出典型的缺铁黄化现象,净光合速率和生物量显著降低,与前人的研究结论^[10]一致。

氮、磷、钾被称为肥料三要素,植物对氮、磷、钾的需要量较多,而土壤中含量较少,需要大量补充,而不同铁源的加入对氮、磷、钾在植物体内的含量和分布产生影响。氮是植物生长发育需求量最大的营养元素,既是构成植物有机体的结构物质,也是植物生理代谢过程中起催化作用的物质^[11]。试验结果表明,缺铁处理大白菜老叶中的氮含量显著低于铁处理,这是由于缺铁抑制了大白菜对氮的吸收,而氮是可以重复利用的元素,氮含量不足情况下大白菜老叶中的氮会向新叶转移,从而造成老叶中氮含量显著降低。有研究表明,植物体对铁、磷元素的吸收存在拮抗效应^[12]。本试验中,缺铁处理大白菜新叶中的磷含量相对最高,这表明在缺铁情况下磷向新叶的运输增加,大白菜对磷的吸收增加。钾元素参与植物生长发育中许多重要的生理生化过程,在维持细胞膨压、调节酶的活性等过程中具有重要的作用,并且促进了光合作用的进程和光合产物的运输^[13]。本试验中,硫酸亚铁和柠檬酸铁处理的大白菜根中钾含量显著高于其他处理,表明加入这 2 种铁肥促进了大白菜对钾的吸收;而柠檬酸亚铁处理的大白菜新叶中钾含量显著低于缺铁处理,表明加入柠檬酸亚铁可能抑制了钾元素向地上部的转运。

镁和钙是植物所必需的中量元素,镁在光合作用、酶的活化和蛋白质合成等进程中具有重要作用^[14]。钙能稳定细胞壁和细胞膜的结构,存在于液泡中的钙具有渗透调节作用,细

胞的正常有丝分裂需要少量钙的参与,钙作为第二信使在细胞转导中具有重要作用^[15-16]。钙含量不足容易引起大白菜干烧心^[17]。缺铁情况下,大白菜老叶中的镁含量有显著下降,可能是由于缺铁情况下叶绿素合成受阻,光合速率下降^[18]。缺铁情况下,柠檬酸亚铁处理老叶和新叶中的镁和钙含量有显著降低,这说明加入柠檬酸亚铁可能抑制了大白菜对钙和镁向地上部的转运。

总之,加入不同铁源,显著增加了大白菜的生物量和光合效率,促进了大白菜对氮的吸收,抑制了大白菜对磷的吸收;柠檬酸亚铁处理大白菜使其对铁的吸收效率相对最高,但抑制了对钾、钙、镁向地上部的转运;与其他铁源处理大白菜相比,EDTA - Fe 处理的大白菜对铁的吸收相对最弱。硫酸亚铁、柠檬酸铁处理对大白菜的生长、生物量和元素含量均有正向影响,然而考虑到土壤施肥过程中,硫酸亚铁遇空气易氧化,造成土壤中铁的有效浓度降低,因此,综合考虑,大白菜以柠檬酸铁作为铁肥相对较好。

参考文献:

[1] 吴慧兰,王 宁,凌宏清. 植物铁吸收、转运和调控的分子机制研究进展[J]. 植物学通报,2007,24(6):779-788.

[2] Guerinet M L, Yi Y. Iron: nutritious, noxious, and not readily available[J]. Plant Physiology,1994,104(3):815-820.

[3] Lindsay W L, Schwab A P. The chemistry of iron in soils and its availability to plants[J]. Journal of Plant Nutrition,1982,5(4/5/6/7):821-840.

[4] Chaney R L, Muns J B, Cathey H M. Effectiveness of digested sewage sludge compost in supplying nutrients for soilless potting media[J]. J Am Soc Hort Sci,1980,105:485-489.

[5] De Bootdt M, Veronck O. The physical properties of the substrates in horticulture[J]. Acta Horticulture,1972(26):37-44.

[6] Hoagland D R, Arnon D I. The water - culture method for growing plants without soil [M]. California Agricultural Experiment Station,1950.

[7] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.

[8] Anderson K A. Micro - digestion and ICP - AES analysis for the determination of macro and micro elements in plant tissues[J]. Atomic Spectroscopy,1996,17(1):30-33.

[9] Wong S C, Cowan I R, Farquhar G D. Leaf conductance in relation to rate of CO₂ assimilation: I. Influence of nitrogen nutrition, phosphorus nutrition, photon flux density, and ambient partial pressure of CO₂ during ontogeny[J]. Plant Physiology,1985,78(4):821-825.

[10] 金亚波, 韦建玉, 王 军. 植物铁营养研究进展 I:生理生化[J]. 安徽农业科学,2007,35(32):10215-10219.

[11] 郝建军, 于 洋, 张 婷. 植物生理学[M]. 北京:化学工业出版社,2013.

[12] 郑录庆. 水稻铁磷互作的分子机理及富铁转基因水稻研究[D]. 杭州:浙江大学生命科学院,2009.

[13] 胡笃敬, 董任瑞, 葛旦之. 植物钾营养的理论与实践[M]. 长沙:湖南科学技术出版社,1993:58-109.

[14] 汪 洪, 褚天铎. 植物镁素营养的研究进展[J]. 植物学通报,1999,16(3):245.

[15] Marschner H, Rimmington G. Mineral nutrition of higher plants[J]. Plant Cell and Environment,1988,11:147-148.

陈梦华,赵盈丽,游少鸿,等. 商陆及其同源四倍体叶绿素荧光参数的日变化[J]. 江苏农业科学,2016,44(6):278-280.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.06.078

商陆及其同源四倍体叶绿素荧光参数的日变化

陈梦华¹, 赵盈丽², 游少鸿¹, 刘 杰¹, 杨明匀¹, 何昌杰¹

(1. 桂林理工大学广西矿冶与环境科学实验中心, 广西桂林 541004; 2. 广西博世科环保科技股份有限公司, 广西南宁 530007)

摘要:为选育用于植物修复的更具优异光合特性的超富集植物,以商陆(*Phytolacca acinosa*)及其同源四倍体为研究对象,采用 PAM-2500 便携式调制叶绿素荧光仪测定其植株叶片的叶绿素荧光参数日变化。测定结果表明:初始荧光(F_0)、最大荧光产量(F_m')、PS II 的最大光合量子产量(F_v/F_m)、PS II 的实际光合量子产量[$Y(II)$]及通过 PS II 的电子传递速率(ETR)均存在明显的日变化。其中 F_m' 、 F_v/F_m 、 $Y(II)$ 值随时间呈先降后升的变化趋势,最小值出现在 12:00 或 14:00 左右,至 18:00 时商陆及其同源四倍体 F_v/F_m 值分别恢复到 08:00 时的 97.4%、98.8%;而 F_0 、 ETR 随着时间呈先升后降的变化规律,四倍体较二倍体 ETR 平均值高 35.49%。综上,二者在强光下均表现出可逆的光抑制。商陆同源四倍体较二倍体具有更优良的光合特性,对强光环境表现出更强的耐性,用于锰污染植物修复领域更具研究价值。

关键词:商陆;四倍体;叶绿素荧光参数;日变化

中图分类号: X173;Q945.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)06-0278-03

植物生长基于光合作用,其光合作用能力的高低直接决定植物的总生长力。植物体内发出的叶绿素荧光与光合作用的反应过程紧密相关^[1],通过叶绿素荧光分析技术测得的叶绿素荧光参数是研究植物光合特性的重要指标。目前,叶绿素荧光分析技术已经成为研究植物光合作用与环境关系以及抗逆生理的重要手段^[2-4]。随着社会的发展和科技的进步,多倍体育种技术广泛应用于培育观赏性更强的花卉^[5]、产量更高的农作物^[6-7]及药用成分含量更高的药材^[8]。植物倍性差异导致生理特性的改变,随之产生不同的生理生化现象^[9]。当今重金属污染日渐严重,关于植物修复更具优异特性的超富集植物的研究迫在眉睫。商陆(*Phytolacca acinosa*)作为药用植物及重金属锰超富集植物,其同源四倍体(4x)的诱导研究已见报道^[10],并已初步证实四倍体具有修复优势。但是其二倍体(2x)及四倍体叶绿素荧光参数的相关研究未见报道。

本研究以商陆二倍体和经秋水仙素诱导所得商陆同源四倍体为材料,对二者叶绿素荧光参数 F_0 、 F_m' 、 F_v/F_m 、 $Y(II)$ 、 ETR 的日变化进行了比较研究。为进一步深入探讨商陆同源多倍体特性提供依据,并为商陆同源四倍体作为锰超富集植

物提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2014 年 6 月于桂林理工大学重金属污染植物修复试验基地进行,供试材料为试验基地内培植的商陆以及经秋水仙素诱导所得商陆同源四倍体。

1.2 试验方法

选取长势一致的商陆二倍体、四倍体植株各 5 株为试验材料,每株取全光照环境下高度和方位一致的生长健壮的中部功能叶 1 张,标记并于每张叶片中部大约相同位置(避开叶脉)进行活体测试。采用便携式调制叶绿素荧光仪(PAM-2500,泽泉科技有限公司 & 泽泉生态开放实验室)于晴天测定各选定叶片的叶绿素荧光参数的日变化(08:00—18:00),每 2 h 测定 1 次,其中叶夹测量的光合有效辐射在 1 200~1 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 范围内,温度为 $(31 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。测定前用特定夹子将各选定叶片暗适应 30 min,而后将夹子对准探头拉下金属遮光片使叶片暴露在饱和脉冲光下 1 s,从仪器中直接读取初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m')等值。2 个反映光系统 II (PS II) 光能利用效率的参数计算如下:

PS II 的最大光合量子产量(反映了样品的光合潜能):

$$F_v/F_m = (F_m' - F_0)/F_m;$$

PS II 的实际光合量子产量:

$$Y(II) = (F_m' - F)/F_m'.$$

1.3 数据分析

数据采用 Excel 2003 和 DPS v7.55 软件进行分析,采用

收稿日期:2015-05-14

基金项目:国家自然科学基金(编号:41001186);广西自然科学基金(编号:2011GXNSFF018003、2013GXNSFBA019210)。

作者简介:陈梦华(1989—),女,广东阳江人,硕士,研究方向为重金属污染修复。E-mail:chanmenghua@163.com。

通信作者:游少鸿,副教授,研究方向为重金属污染修复。E-mail:646761963@qq.com。

[16] Hepler P K. Calcium: a central regulator of plant growth and development[J]. The Plant Cell, 2005, 17(8): 2142-2155.

[17] Mynard D N, Gersten B, Vernell H F. The distribution of calcium as related to internal tip-burn variety and calcium nutrition in cabbage

[J]. Pro Amer Soc Hort Sci, 1965, 86: 392-396.

[18] Spiller S, Terry N. Limiting factors in photosynthesis: II. Iron stress diminishes photochemical capacity by reducing the number of photosynthetic units[J]. Plant Physiology, 1980, 65(1): 121-125.