

氮素形态对马铃薯叶片光合色素及其荧光特性的影响

乔建磊¹ 于海业^{2*} 宋述尧¹ 肖英奎² 张蕾² 张艳平²

(1. 吉林农业大学 园艺学院, 长春 130118;

2. 吉林大学 生物与农业工程学院, 长春 130025)

摘要 基于不同形态的氮素营养栽培试验, 分析了不同氮素形态下马铃薯叶片光合色素含量的变化及其与叶绿素荧光动力学参数之间的关系。结果表明: 不同形态的氮素营养对马铃薯叶片中叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的含量均产生了较大的影响, 其中在发棵期和结薯期表现得较为明显。但不同形态的氮素营养对叶绿素 a 与叶绿素 b 含量的比值影响不大, 从幼苗期至结薯期均无显著差异 ($P > 0.05$)。此外, 本研究还发现, 以叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素 3 种光合色素的含量作为模型自变量, 所建立的叶片 PS II 光化学效率及 PS II 潜在活性的三元回归模型具有较高的精度, 各生育时期所对应的模型决定系数均在 0.865 以上, 能够较好地反映马铃薯叶绿素荧光动力学参数与叶片光合色素含量之间的关系。研究结果对马铃薯氮肥的高效管理具有指导意义。

关键词 马铃薯; 氮素; 光合色素; PS II; 光化学效率

中图分类号 S 532

文章编号 1007-4333(2013)03-0039-06

文献标志码 A

Effects of nitrogen forms on photosynthetic pigment and chlorophyll fluorescence characteristics of potato leaves

QIAO Jian-lei¹, YU Hai-ye^{2*}, SONG Shu-yao¹, XIAO Ying-kui², ZHANG Lei², ZHANG Yan-ping²

(1. College of Horticulture, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China;

2. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract To study the effects of different nitrogen forms on the Photosynthetic characteristics of potato leaves, the photosynthetic pigment contents in leaves at different growth stages were analyzed, and the relationships between chlorophyll fluorescence kinetics parameters and photosynthetic pigment contents were discussed. The results showed that their effects on contents of chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoids in leaves were significant during tuber formation stage. However, their effect on the content ratio of chlorophyll a/b was not obvious, and there was no significant difference among different treatments from seedling stage to tuber formation stage. In addition, the regression models of PS II photochemical efficiency and potential activity based on the contents of chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoids have higher accuracy, and the determination coefficient of model in each growth stage was higher than 0.865. Thus they can be used to describe the relationship between chlorophyll fluorescence kinetics parameters and photosynthetic pigment contents in leaves. The results provide a scientific basis for nitrogen management in potato.

Key words potato; nitrogen; photosynthetic pigment; PS II; photochemical efficiency

氮是植物生长发育过程中所必需的营养元素, 是原生质、细胞核、生物膜等物质的重要组成成分。然而, 植物对氮素的吸收和利用不仅取决于自身的生理特性, 而且还与其生长环境中所提供的氮源密

切相关^[1-3]。

硝态氮(NO_3^- -N)和铵态氮(NH_4^+ -N)是植物吸收氮素的主要形态, 植物对栽培环境中不同形态的氮素营养所作出的反应存在较大的差异^[4-6]。近些

收稿日期: 2012-11-21

基金项目: 国家 863 计划项目(2007AA10Z203); 吉林省科技发展计划项目(20090566)

第一作者: 乔建磊, 博士研究生, E-mail: qiaojianlei918@163.com

通讯作者: 于海业, 教授, 博士, 主要从事农业生物环境研究, E-mail: haiye@jlu.edu.cn

年,国内外很多学者开展了马铃薯氮素营养的研究^[7-8],但主要集中在氮素营养的吸收、转运、分配以及代谢酶活性等方面,而关于氮素营养的形态对马铃薯光合生理的影响机理尚不清晰,鉴于此,本研究通过设计不同形态的氮素营养栽培试验,分析不同生育时期马铃薯叶片光合色素含量的变化规律,并探讨不同氮素形态下马铃薯叶片叶绿素荧光动力学参数的响应机制,为深入研究马铃薯氮素营养的调控机理及提高氮素营养的利用效率奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计

供试马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)品种为春薯4号。试验于吉林大学生物与农业工程学院试验地进行(经度: E125°19'; 纬度: N43°52'),土壤类型为黑土。土壤基本理化性质: 0~30 cm层土壤容重为1.36 g/cm³、有机质含量为24.7 g/kg、全氮含量为1.26 g/kg、碱解氮57.4 mg/kg、速效磷11.4 mg/kg、速效钾116.8 mg/kg、pH 6.58。

试验按硝态氮与铵态氮的配比($\text{NO}_3^- \text{-N} : \text{NH}_4^+ \text{-N}$)不同共设计5个处理,分别为100% : 0、75% : 25%、50% : 50%、25% : 75%和0 : 100%,依次记为T₁、T₂、T₃、T₄和T₅。硝态氮肥采用硝酸钠,铵态氮肥采用碳酸氢铵,各处理总的施氮量均为110 kg/hm²,其中70%作为基肥,30%作为追肥于齐苗后施入。磷肥和钾肥的施用量分别为P₂O₅ 106 kg/hm²和K₂O 225 kg/hm²,均作为基肥施用。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 叶绿素荧光动力学参数

叶绿素荧光动力学参数采用植物效能分析仪Handy-PEA(Hansatech,英国生产)进行测定,叶片

暗适应时间为20 min。选取不同处理植株相同部位的功能叶片进行指标测定,每个处理测试10株。通过测定和计算获取相应的荧光参数^[9]: 初始荧光F₀、最大荧光F_m、可变荧光F_v、叶片PS II光化学效率(F_v/F_m)和叶片PS II潜在活性(F_v/F₀)。

1.2.2 叶片光合色素含量

在叶绿素荧光动力学参数采集完成后,将所测试的叶片摘下,装入自封袋,带入实验室用于光合色素含量分析,利用分光光度法测定其叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素的含量^[10]。

1.3 数据处理

试验数据采用SPSS 13.0统计软件进行分析和分析,用新复极差法检验各处理间差异显著性。并对不同生育时期马铃薯叶片PS II光化学效率(F_v/F_m)及其潜在活性(F_v/F₀)与叶片光合色素含量之间的相关性进行检验。

2 结果与分析

2.1 不同氮素形态对马铃薯叶片光合色素含量的影响

在不同形态的氮素营养条件下,马铃薯叶片中叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素的含量均存在较大的差异,其中在发棵期和结薯期表现得更为明显,但不同形态的氮素处理对叶绿素a与叶绿素b含量的比值影响不大,从幼苗期至结薯期均无显著差异(表1)。通过比较不同处理植株叶片中叶绿素总含量(叶绿素a+叶绿素b)的差异可以发现,T₃和T₄处理对应的植株叶片中叶绿素总含量要高于其他几个处理,而且在幼苗期和发棵期T₃和T₄2个处理间差异并不显著,但随着生育期的推进,两者之间的差异越来越明显,在结薯期两者的差异达到显著水平。

表1 不同氮素形态对马铃薯叶片光合色素含量的影响

Table 1 Effects of different nitrogen forms on the contents of photosynthetic pigments in potato leaves

生育时期 Growth stage	氮素处理 Treatment	叶绿素 a/ (mg/g) Chlorophyll a	叶绿素 b/ (mg/g) Chlorophyll b	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b	叶绿素 a+b/ (mg/g) Chlorophyll a+b	类胡萝卜素/ (mg/g) Carotenoids
幼苗期 Seedling stage	T ₁	1.438±0.120 a	0.586±0.027 a	2.454±0.126 a	2.024±0.135 a	0.328±0.041 a
	T ₂	1.472±0.103 a	0.593±0.032 a	2.482±0.132 a	2.065±0.129 a	0.325±0.036 a
	T ₃	1.526±0.127 a	0.589±0.031 a	2.590±0.134 a	2.115±0.146 a	0.353±0.034 a
	T ₄	1.573±0.106 a	0.619±0.028 a	2.541±0.126 a	2.192±0.138 a	0.350±0.043 a
	T ₅	1.495±0.115 a	0.578±0.036 a	2.518±0.137 a	2.073±0.141 a	0.334±0.037 a

续表

生育时期 Growth stage	氮素处理 Treatment	叶绿素 a/ (mg/g) Chlorophyll a	叶绿素 b/ (mg/g) Chlorophyll b	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b	叶绿素 a+b/ (mg/g) Chlorophyll a+b	类胡萝卜素/ (mg/g) Carotenoids
发棵期 Development stage	T ₁	1.659±0.113 b	0.671±0.029 b	2.472±0.130 a	2.330±0.102 b	0.361±0.024 b
	T ₂	1.722±0.105 ab	0.665±0.035 ab	2.589±0.124 a	2.387±0.127 b	0.358±0.038 b
	T ₃	1.816±0.128 a	0.712±0.038 a	2.551±0.156 a	2.528±0.142 a	0.384±0.032 a
	T ₄	1.807±0.127 a	0.725±0.032 a	2.492±0.118 a	2.532±0.127 a	0.380±0.041 a
	T ₅	1.704±0.132 b	0.672±0.041 b	2.536±0.117 a	2.376±0.118 b	0.367±0.031 ab
结薯期 Tuber formation	T ₁	1.563±0.091 c	0.628±0.037 b	2.489±0.098 a	2.191±0.145 c	0.308±0.034 b
	T ₂	1.703±0.086 b	0.670±0.033 b	2.542±0.107 a	2.373±0.126 b	0.356±0.035 a
	T ₃	1.724±0.093 b	0.682±0.028 b	2.528±0.113 a	2.406±0.133 b	0.347±0.040 a
	T ₄	1.853±0.104 a	0.749±0.037 a	2.474±0.126 a	2.602±0.139 a	0.351±0.032 a
	T ₅	1.685±0.102 b	0.687±0.039 b	2.453±0.114 a	2.372±0.148 b	0.326±0.029 b

注：同一列内各生育时期不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: different small letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level in each growth stage.

2.2 不同氮素形态对马铃薯叶绿素荧光动力学参数的影响

在幼苗期,不同氮素形态处理对马铃薯叶片初

始荧光 F_0 的影响不大,各处理间的差异不显著,但在发棵期和结薯期, T_1 和 T_2 处理明显高于 T_3 和 T_4 处理(图 1(a))。从发棵期到结薯期,除 T_4 处理

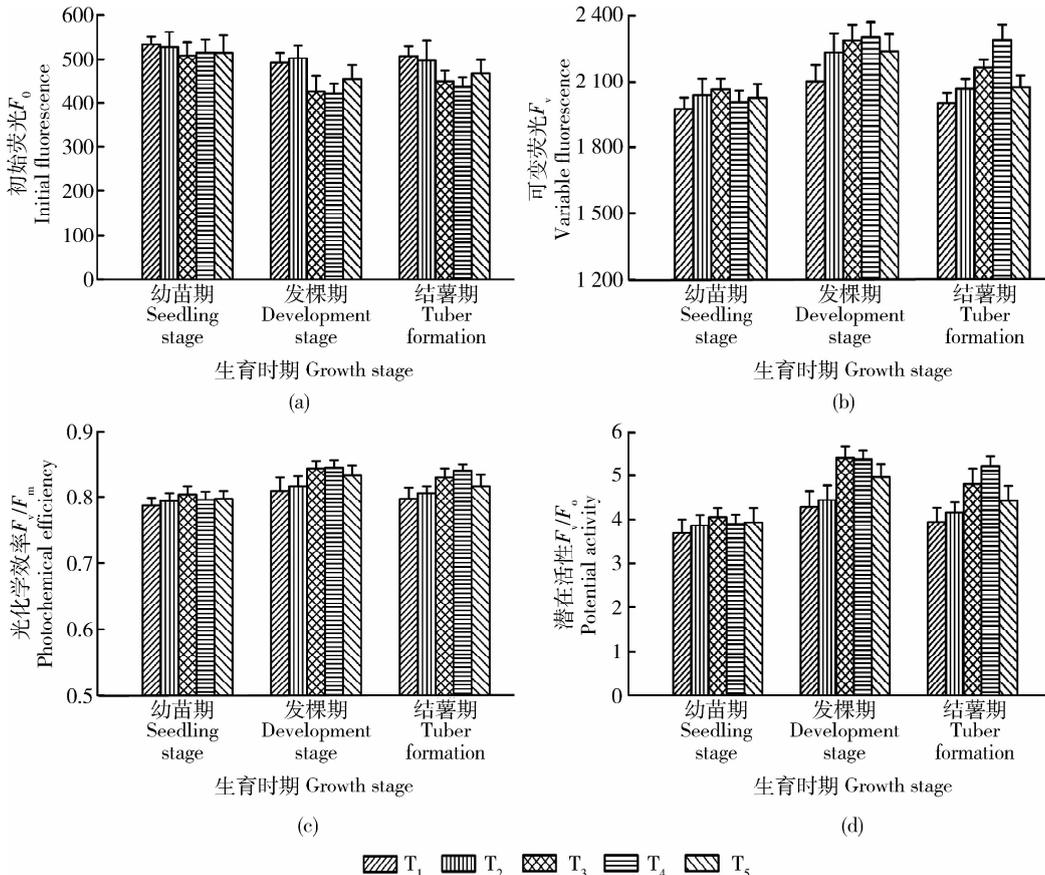


图 1 不同氮素形态对马铃薯叶绿素荧光动力学参数的影响

Fig. 1 Effects of different nitrogen forms on chlorophyll fluorescence kinetics parameters of potato leaves

之外,其他几个处理对应的植株叶片可变荧光 F_v 值均显著下降(图 1(b))。在发棵期, T_4 处理植株叶片 PS II 光化学效率 (F_v/F_m) 及其潜在活性 (F_v/F_0) 分别较 T_1 处理植株高出 4.1% 和 24.9%, 而在结薯期, T_4 处理组叶片 PS II 光化学效率及其潜在活性分别较 T_1 处理组高出 5.6% 和 33.2%, 两者之间的差异有所增大(图 1(c)、(d))。通过分析叶绿素荧光动力学参数的变化趋势可知, 不同氮素形态对马铃薯叶片 PS II 反应中心的光合电子传递能力及原初电子受体的光还原活性均产生了较大的影

响, 其中 T_3 和 T_4 处理较有利于提高马铃薯叶片的 PS II 光化学效率及 PS II 潜在活性。

2.3 叶绿素荧光动力学参数与叶片光合色素含量相关性分析

从叶绿素荧光动力学参数 (F_v/F_m 、 F_v/F_0) 与叶片光合色素含量的相关性检验结果(表 2) 可以看出, 叶片 PS II 光化学效率与叶绿素 a 含量的相关系数在发棵期最高, 达到 0.913, 而其与叶绿素 b 含量的相关系数在结薯期最高, 达到 0.889。与叶绿素 a 和叶绿素 b 相比, 叶片中类胡萝卜素的含量与叶片

表 2 叶绿素荧光动力学参数 (F_v/F_m 、 F_v/F_0) 与光合色素含量的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between chlorophyll fluorescence kinetics parameters and photosynthetic pigment contents in leaves of potato

荧光动力学参数 Fluorescence kinetics parameters	生育时期 Growth stage	光合色素含量 Photosynthetic pigment content		
		叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	类胡萝卜素 Carotenoids
F_v/F_m	幼苗期 Seedling stage	0.762*	0.673	0.436
	发棵期 Development stage	0.913**	0.781*	0.734*
	结薯期 Tuber formation	0.896**	0.889**	-0.125
F_v/F_0	幼苗期 Seedling stage	0.652	0.754*	0.419
	发棵期 Development stage	0.924**	0.823*	0.751*
	结薯期 Tuber formation	0.830*	0.906**	-0.187

注: * 和 ** 分别表示在 0.05 水平和 0.01 水平显著相关。

Note: * and ** indicate the correlation is significant at 0.05 level and 0.01 level, respectively.

荧光动力学参数 (F_v/F_m 、 F_v/F_0) 的相关系数明显较低。

以不同生育时期所测试的马铃薯叶片作为样本, 建立叶绿素荧光动力学参数关于叶片光合色素含量的回归模型(表 3、4), 分析结果表明, 不论是叶

片 PS II 光化学效率, 还是 PS II 潜在活性, 其三元线性回归模型的决定系数 R^2 均较二元线性回归模型的决定系数要高, 因此, 三元线性回归模型更适合用来描述马铃薯叶绿素荧光动力学参数与叶片光合色

表 3 PS II 光化学效率对叶片光合色素含量的回归分析结果

Table 3 Regression analysis of PS II photochemical efficiencies to photosynthetic pigment contents in leaves

回归模型形式 Regression model form	生育时期 Growth stage	回归方程 Regression equation	决定系数 R^2 Determination coefficient
二元线性回归 Binary linear regression	幼苗期 Seedling stage	$y=0.107x_1-0.260x_2+0.790$	0.763
	发棵期 Development stage	$y=0.113x_1+0.258x_2+0.448$	0.824
	结薯期 Tuber formation	$y=0.064x_1+0.204x_2+0.569$	0.859
三元线性回归 Ternary linear regression	幼苗期 Seedling stage	$y=0.086x_1-0.241x_2+0.082x_3+0.783$	0.865
	发棵期 Development stage	$y=0.046x_1-0.180x_2+1.510x_3+0.313$	0.892
	结薯期 Tuber formation	$y=0.595x_1-0.770x_2-0.868x_3+0.622$	0.918

注: 表中 x_1 、 x_2 、 x_3 和 y 分别代表叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、类胡萝卜素含量和 PS II 光化学效率。

Note: x_1 , x_2 and x_3 in table 3 represent the content of chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoids, respectively; y represents the photochemical efficiency of PS II in leaves.

表 4 PS II 潜在活性对叶片光合色素含量的回归分析结果

Table 4 Regression analysis of PS II potential activities to photosynthetic pigment contents in leaves

回归模型形式 Regression model form	生育时期 Growth stage	回归方程 Regression equation	决定系数 R^2 Determination coefficient
二元线性回归 Binary linear regression	幼苗期 Seedling stage	$y=2.590x_1-6.336x_2+3.799$	0.805
	发棵期 Development stage	$y=3.797x_1+9.393x_2-8.210$	0.860
	结薯期 Tuber formation	$y=1.811x_1+6.697x_2-3.141$	0.854
三元线性回归 Ternary linear regression	幼苗期 Seedling stage	$y=1.942x_1-5.765x_2+2.459x_3+3.601$	0.871
	发棵期 Development stage	$y=5.142x_1+4.281x_2+9.716x_3-9.593$	0.927
	结薯期 Tuber formation	$y=2.419x_1+5.623x_2-8.025x_3-0.586$	0.903

注:表中 x_1 、 x_2 、 x_3 和 y 分别代表叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、类胡萝卜素含量和 PS II 潜在活性。

Note: x_1 , x_2 and x_3 in table 4 represent the content of chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoids, respectively; y represents the potential activity of PS II in leaves.

素含量之间的关系。与叶绿素 a 和叶绿素 b 相比,类胡萝卜素的含量与叶绿素荧光动力学参数 (F_v/F_m 、 F_v/F_0) 之间的相关系数明显较低(表 2), 但将其作为一个模型变量纳入到回归模型中, 可以提高模型的精度。

3 讨论与结论

光合作用是作物生产的基础, 叶绿素和类胡萝卜素作为重要的光合色素参与光能的吸收、传递和分配, 在植物生长发育过程中起着关键性的作用^[11-13]。栽培环境中营养的供应直接关系着作物叶片的光合功能^[14-15]。大量研究表明, 氮素营养对作物叶片光合色素的合成及叶绿素荧光动力学特性具有显著的调控作用^[16-17]。张绪成等发现, 小麦叶片中光合色素的含量与施氮量密切相关, 当施氮量不超过 180 kg/hm^2 时, 叶片中光合色素的含量随着施氮量的增加而显著升高^[18]; 通过增施适量的氮肥不仅能够提高小麦叶片 PS II 潜在活性 (F_v/F_0)、PS II 光化学效率 (F_v/F_m) 及光化学猝灭系数 (qP), 而且还降低了非光化学猝灭系数 (NPQ), 有效地促进了光合碳同化^[19]; 上官周平等研究表明, 适量追施氮肥 (300 kg/hm^2) 可以改善棉花叶片的光合功能^[20], 提高 PS II 反应中心开放部分的比例, 使表观光合电子传递速率及 PS II 总的光化学量子产量上升。这些学者从氮肥施用量的角度, 阐述了氮素营养的调控效应。本研究重点探讨了氮素营养的形态对马铃薯叶片光合生理的影响, 结果表明, 不同氮素形态对马铃薯叶片中叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡

萝卜素的含量均产生了较大的影响, 其中在发棵期和结薯期表现得较为明显, 这说明不同的氮素营养形态影响了马铃薯叶片光合色素的合成与代谢。但不同形态的氮素营养对马铃薯叶片中叶绿素 a 与叶绿素 b 含量的比值影响不大, 从幼苗期至结薯期均无显著差异 ($P>0.05$)。叶绿素荧光动力学特性可以反映叶片光合系统光能利用效率及相关生理信息的变化^[21-22]。本研究结果表明, 氮素营养的形态不同, 马铃薯叶片荧光特性呈现出较大的差异, 其中当硝态氮与铵态氮的配比 ($\text{NO}_3^- \text{-N} : \text{NH}_4^+ \text{-N}$) 为 25% : 75% 时, 马铃薯叶片 PS II 光化学效率及其潜在活性较高, 有利于提高叶片对光能的利用效率, 这也进一步说明了对马铃薯氮素营养进行调控具有重要的意义。此外, 回归分析结果还表明, 以叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素 3 种光合色素的含量作为模型自变量所建立的马铃薯叶绿素荧光动力学参数的回归模型具有较高的精度, 各生育时期所对应的模型决定系数 R^2 均在 0.865 以上, 能够较好地反映马铃薯叶片 PS II 光化学效率及其潜在活性与叶片光合色素含量之间的关系。

参 考 文 献

- [1] Wang Z H, Li S X. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on plant growth and nitrate accumulation in vegetables[J]. J Plant Nutr, 2004, 27(3): 539-556
- [2] 王立为, 潘志华, 高西宁, 等. 不同施肥水平对旱地马铃薯水分利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(2): 54-58
- [3] Dong H Z, Kong X Q, Li W J, et al. Effects of plant density and nitrogen and potassium fertilization on cotton yield and uptake

- of major nutrients in two fields with varying fertility[J]. *Field Crops Res.* 2010, 119(1):106-113
- [4] Ruan J, Zhang F, Wong M H. Effect of nitrogen form and phosphorus source on the growth, nutrient uptake and rhizosphere soil property of *Camellia sinensis* L[J]. *Plant Soil*, 2000, 223:63-71
- [5] Wang Y, Mi G H, Chen Fan Jun, et al. Response of root morphology to nitrate supply and its contribution to nitrogen uptake in maize[J]. *J Plant Nutr.* 2004, 27(12):2189-2202
- [6] 王玉琪, 张建军, 朱国辉, 等. 不同形态氮素培养下水稻叶片中蛋白质差异表达[J]. *植物生理与分子生物学学报*, 2006, 32(4):403-410
- [7] Bélanger G, Walsh J R, Richards J E, et al. Nitrogen fertilization and irrigation affects tuber characteristics of two potato cultivars[J]. *Am J Potato Res.* 2002, 79(4):269-279
- [8] Zebarth B J, Leclerc Y, Moreau G. Rate and timing of nitrogen fertilization of russet burbank potato; Nitrogen use efficiency [J]. *Can J Plant Sci.* 2004, 84(3):845-854
- [9] 乔建磊, 于海业, 肖英奎, 等. 低钾胁迫下马铃薯植株光合机构响应特性[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2011, 41(2):569-573
- [10] 张志良, 瞿伟菁. *植物生理学实验指导*[M]. 北京:高等教育出版社, 2003
- [11] Yang X H, Chen X Y, Ge Q Y, et al. Tolerance of photosynthesis to photoinhibition, high temperature and drought stress in flag leaves of wheat: A comparison between a hybridization line and its parents grown under field condition [J]. *Plant Sci.* 2006, 171(3):389-397
- [12] 裘正军, 宋海燕, 何勇, 等. 应用 SPAD 和光谱技术研究油菜生长期间的氮素变化规律[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(7):150-154
- [13] 何军, 许兴, 李树华, 等. 水分胁迫对牛心朴子叶片光合色素及叶绿素荧光的影响[J]. *西北植物学报*, 2004, 24(9):1594-1598
- [14] 唐延林, 王纪华, 黄敬峰, 等. 水稻成熟过程中高光谱与叶绿素、类胡萝卜素的变化规律研究[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(6):167-173
- [15] Nicodemus M A, Salifu F K, Jacobs D F. Growth, nutrition, and photosynthetic response of blackwalnut to varying nitrogen sources and rates[J]. *J Plant Nutr.* 2008, 31(11):1917-1936
- [16] Richardson M D, Cabrera R I, Murphy J A, et al. Nitrogen-form and entophyte infection effects on growth, nitrogen uptake, and alkaloid content of chewing's fescue turf grass[J]. *J Plant Nutr.* 1999, 22(1):67-79
- [17] 冯伟, 李晓, 王永华, 等. 小麦叶绿素荧光参数叶位差异及其与植株氮含量的关系[J]. *作物学报*, 2012, 38(4):657-664
- [18] 张绪成, 上官周平. 施氮对不同抗旱性冬小麦叶片光合与呼吸的调控[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(11):2064-2069
- [19] 张绪成, 上官周平. 施氮对旱地不同抗旱性小麦叶片光合色素含量与荧光特性的影响[J]. *核农学报*, 2007, 21(3):299-304
- [20] Shangguan Z P, Shao M A, Dyckmans J. Effects of nitrogen nutrition and water deficit on net photosynthetic rate and chlorophyll fluorescence in winter wheat[J]. *J Plant Physiol.* 2000, 156(1):46-51
- [21] Lee H Y, Hong Y N, Chow W S. Photoinactivation of photosystem II complexes and photoprotection by non-functional neighbours in *Capsicum annum* L leaves [J]. *Planta*, 2001, 212:332-342
- [22] 朱咏莉, 李萍萍, 毛罕平, 等. 生菜叶片光谱红边参数对氮营养的响应特征分析[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(11):174-177

责任编辑: 袁文业