

氮磷添加对考来木光合特性和叶绿素荧光的影响

张志录¹, 刘中华¹, 彭舜磊¹, 吕秀立²

(1. 平顶山学院 化学与环境工程学院, 河南 平顶山 467000; 2. 上海市园林科学规划研究院 植物研究所, 上海 200232)

摘要: 氮磷是植物生长的关键养分因子, 对植物的生长发育非常重要。通过梯度施肥试验, 研究了土壤添加氮磷对考来木 *Correa carmen* 光合生理参数和叶绿素荧光参数的影响。结果表明: ①单施磷肥, 考来木叶片叶绿素质量分数、净光合速率 (P_n) 及荧光最大光化学效率 (F_v/F_m) 等光合效率指标随着磷肥施用量的增加而下降, 初始荧光 (F_0) 和非光化学猝灭系数 (q_{NP}) 等光能耗散指标则随着磷肥施用量的增加而增加。②单施氮肥, 考来木叶片光合效率指标随着氮肥施用量的增加而增加; 当氮肥施用量达 $247.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 后, 考来木的光合效率随着氮肥施用量的增加而下降。光能耗散指标则呈相反趋势。③磷肥的施用效果随着施氮量的增大而提高, 氮肥的施用效果随着施磷量的增大而先升后降, 其中低氮高磷和低磷高氮的施肥处理均降低考来木的光合效率。在氮肥施用量为 $247.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 磷肥施用量为 $36.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的施肥组合下, 考来木的光合效率最高。表明氮磷均具有提高考来木光合效率的作用, 但考来木对磷反应敏感、需求量低, 在低氮土壤中增施磷肥可降低考来木的光合效率; 若氮磷同时增施, 可显著提高考来木的光合效率, 两者最佳配比为 $m(\text{氮}):m(\text{磷})=6.83:1.00$ 。图 2 表 2 参 30

关键词: 植物学; 叶绿素荧光; 氮磷添加; 光合生理; 考来木

中图分类号: S718.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2019)03-0459-09

Photosynthetic traits and chlorophyll fluorescence of *Correa carmen* leaves with N and P additions

ZHANG Zhilu¹, LIU Zhonghua¹, PENG Shunlei¹, LÜ Xiuli²

(1. College of Chemistry and Environmental Engineering, Pingdingshan University, Pingdingshan 467000, Henan, China; 2. Institute of Botany, Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, Shanghai 200232, China)

Abstract: To ascertain the effects of nitrogen (N) and phosphorus (P), key nutrients during plant growth, on *Correa carmen*, twelve gradient fertilization experiments were designed, and the photosynthetic physiological parameters and chlorophyll fluorescence parameters of *C. carmen* leaves were determined. The seedlings of *C. carmen* were planted in pots with different amount of N fertilizer (NH_4NO_3) and P fertilizer ($\text{NaH}_2\text{PO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$). P fertilizer doses (calculated by PO_4^{3-}) were 0, 36.3, 56.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. N fertilizer doses (calculated by N) were 0, 197.9, 247.9 and 297.9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. After 1 month, 4 months and 7 months respectively, the photosynthetic physiological parameters of seedling leaves were measured by the CIRAS-3 portable photosynthesis system, such as net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), transpiration rate (T_r), etc. At the same time, chlorophyll fluorescence parameters were measured by imaging modulation PAM-2500 chlorophyll fluorescence spectrometer, too, such as initial fluorescence (F_0), maximum fluorescence (F_m), maximum photochemical efficiency (F_v/F_m), photochemical quenching coefficient (q_p), non-photochemical quenching coefficient (q_{NP}), etc. Then N and P contents of leaves were determined by Kjeldahl method and Molybdenum antimony anti-absorption spectrophotometry method, chlorophyll contents were determined by acetone and

收稿日期: 2018-06-19; 修回日期: 2018-09-06

基金项目: 河南省科技攻关计划资助项目(162102110070)

作者简介: 张志录, 副教授, 博士, 从事植物生理生态方面的研究。E-mail: 276996899@qq.com

ethanol mixture extraction method. The variation of experimental data was analyzed by ANOVA and multiple comparison, and the multiple comparison was analyzed by the least significant difference method (LSD). Results showed that (1) with added P fertilizer alone, the photosynthetic efficiency indexes of *C. carmen* leaves including chlorophyll content, P_n , and F_v/F_m decreased ($P < 0.05$), but light dissipation indexes including F_0 and non-photochemical quenching (q_{NP}) extinction coefficient increased ($P < 0.05$). (2) With added N fertilizer alone, as dose increased to $247.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, photosynthetic efficiency indexes increased ($P < 0.05$) but decreased ($P < 0.05$) as the dose exceeded it. The light dissipation index showed the opposite trend. (3) The application effect of P fertilizer increased with an increase dose of N fertilizer, and the application effect of N fertilizer increased ($P < 0.05$) first and then decreased ($P < 0.05$) with an increased dose of P fertilizer. With less N fertilizer but more P fertilizer or with less P fertilizer but more N fertilizer, the photosynthetic efficiency of *C. carmen* leaves decreased significantly ($P < 0.01$). Photosynthetic efficiency indexes were highest when N fertilizer dose was $247.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and P fertilizer dose was $36.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Thus, *C. carmen* was sensitive to P with a low demand, and when adding P fertilizer to low-N soils, the photosynthesis efficiency indexes of *C. carmen* decreased, but when both N fertilizer and P fertilizers were added, they increased greatly. [Ch, 2 fig. 2 tab. 30 ref.]

Key words: botany; chlorophyll fluorescence; nitrogen and phosphorus additions; photosynthetic physiology; *Correa carmen*

氮和磷是限制生态系统中植物生长的关键养分因子,对植物的生长有重要的作用,影响着生态系统的生产力和生态过程^[1-2]。在自然生态系统中,植物的生长一般表现为氮限制、磷限制或者氮磷共同限制^[3]。荣钺钺等^[4]研究表明:植物体内氮磷及其比例能充分反映土壤养分供应与植物养分需求的动态平衡,可表征土壤氮素或磷素对植物生长的限制。氮磷添加可调节土壤养分转化^[5],提高植物的净初级生产力^[6-7],但长期、连续、过量的氮磷输入会降低植物的净光合速率和净初级生产力^[8-9]。植物通常会对自身资源进行配置、补偿和平衡,以最大限度减小环境变化对自身的不良影响。因此,探索植物与环境之间的关系,研究土壤-植物相互作用及碳、氮、磷循环,一直都是生态学的研究重点^[10]。作为植物对环境变化最敏感的器官,叶片的功能性状能快速、准确地反映植物对环境变化的响应与适应机制^[11-12],是当前研究生态系统响应环境变化的重要方法和依据^[13]。考来木 *Correa carmen* 为芸香科 Rutaceae 考来木属 *Correa* 的常绿灌木,其株型密集,花朵繁多,花型奇特、芳香且多彩、花期长,具有较高的园林观赏价值,被誉为“冬之精灵”^[14]。因此,考来木作为珍稀的冬花类园林植物,在冬季少花的华中、华北地区被迅速推广,市场占有率与日俱增。科学的养分管理是提高幼苗生产力和城市园林生态系统功能的主要措施,但目前,有关考来木对肥料添加的生理响应研究尚无报道,现有的研究成果主要集中在快速繁殖^[15]和耐高温干旱^[16]等逆境生理方面。鉴于此,研究了12种土壤氮磷添加比例对考来木叶片营养含量、光合生理指标和叶绿素荧光参数的影响,分析了叶片功能性状与土壤氮磷化学计量特征的关系,以期对考来木的栽培管理和养分调控等提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

2年生红花考来木幼苗,栽于白色塑料盆中,1株·盆⁻¹。花盆规格为12 cm(高)×12 cm(上口径)×9 cm(底径),装干土质量0.6 kg·盆⁻¹。盆土取自平顶山市新城区白龟山下0~20 cm的表层土,黄棕壤,有机质质量分数为21.2 g·kg⁻¹,速效氮质量分数为97.9 mg·kg⁻¹,速效磷质量分数为16.3 mg·kg⁻¹,速效钾质量分数为79.2 mg·kg⁻¹,pH 8.18。

氮肥采用川化集团有限责任公司生产硝酸铵(NH₄NO₃),氮质量分数≥15%;磷肥采用北京康普汇维科技有限公司生产的磷酸二氢钠(NaH₂PO₄·2H₂O),为化学纯(98%)。

试验用水为平顶山市自来水公司提供的自来水,经四川优普超纯科技有限公司生产的UPT-II-20T UPT超纯水机进行超纯过滤后直接使用或储存备用。

1.2 实验设计

1.2.1 施肥处理 采用盆栽控制实验法。将取回的土样置于温室试验区的水泥地面上风干, 粉碎后均匀地掺入硫酸钾(K_2SO_4)和硫酸亚铁($FeSO_4$), 以降低 pH 值并补充钾肥, K_2SO_4 掺入量(按纯钾计)为 $75 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $FeSO_4$ 掺入量(按商品量计)为 $70 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 土壤 pH 值调为 7.0~7.5。将土样分成 3 堆, 添加不同数量的磷肥: P_0 , 不添加磷肥, 试验中作为对照处理; P_1 , 添加磷肥(按磷酸根计)为 $36.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (干土); P_2 , 添加磷肥为 $56.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (干土)。充分掺拌均匀, 备用。将 P_0 , P_1 , P_2 分别分成 4 堆, 共 12 堆。每堆添加相应数量的氮肥: N_0 , 不添加氮肥; N_1 , 添加氮肥(按纯氮计)为 $197.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; N_2 , 添加氮肥为 $247.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; N_3 , 添加氮肥为 $297.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。12 堆即为 12 个施肥处理, 分别编号为 P_0N_0 , P_0N_1 , P_0N_2 , P_0N_3 , P_1N_0 , P_1N_1 , P_1N_2 , P_1N_3 , P_2N_0 , P_2N_1 , P_2N_2 , P_2N_3 。

1.2.2 试验分组 于 2016 年 2 月 24 日, 将配制好的土样装入花盆, 同时栽入考来木幼苗。各堆土样分 3 批装盆, 3 盆·批⁻¹。将同批装的 36 盆作为 1 组, 3 批即 3 次重复, 共 108 盆。幼苗上盆后浇透水, 置于智能温室中生长。

1.3 指标测定及方法

1.3.1 土壤速效氮磷质量分数 土壤速效氮采用扩散吸收法测定。土壤速效磷采用钼锑抗混合液分光光度法测定。

1.3.2 叶片氮磷质量分数及叶绿素质量分数测定 分别于 2016 年 3 月 20 日, 6 月 20 日, 9 月 20 日, 采摘考来木枝条上的健康功能叶, 保湿蔽光处理并立即带回实验室, 用去离子水清洗干净后, 留少许进行叶绿素质量分数测定。其余在烘箱中 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒量, 取出冷却, 粉碎, 过 0.25 mm 筛, 备用。叶片全氮质量分数采用张薇等^[17]的凯氏定氮法测定。叶片全磷质量分数采用钼锑抗吸光光度法测定。叶绿素质量分数采用孙俊宝等^[18]的方法测定。

1.3.3 光合生理与叶绿素荧光参数 (1)光合生理指标的测定。选择考来木枝条中部健康功能叶, 采用美国 CIRAS-3 便携式光合作用测定系统测定其净光合速率(P_n , $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 气孔导度(G_s , $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 胞间二氧化碳摩尔分数(C_i , $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$), 蒸腾速率(T_r , $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 光合有效辐射(P_{AR} , $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。每株测定 3 枚叶片, 取其平均值。光合测定时, 将仪器连接好后按“on”开机, 按“F2”进入设置界面, 设置叶室窗口为长方形, $18 \text{ mm}\times 25 \text{ mm}$; 光源为 LED, 红光, 光强为 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; 控制参比二氧化碳摩尔分数为 $390 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$; 控制参比空气湿度为 80%~100%。(2)叶绿素荧光参数的测定。利用德国 WALZ 公司的 Imaging PAM-2500 调制式叶绿素荧光仪, 按照付为国等^[19]的方法测定。

1.4 数据处理与统计分析

数据的初步统计与整理、作图等由 Excel 完成, 数据变异度的方差分析和最小显著差数法(LSD)多重比较由 SPSS 23.0 完成。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对考来木叶片氮磷的影响

由表 1 可知: 磷肥施用量相同, 考来木叶片的氮磷质量分数均随氮肥施用量的增加而提高。处理间叶片的氮质量分数差异极显著($P<0.01$), 磷质量分数差异显著($P<0.05$); 氮肥施用量相同, 考来木叶片的氮质量分数随磷肥施用量的增加而呈先增后减的趋势, 处理间差异不显著。叶片的磷质量分数随磷肥水平的提高而增加, 处理间差异极显著($P<0.01$)。可见, 增施氮肥, 不仅可显著提高叶中氮的质量分数, 还能提高磷的质量分数; 增施磷肥, 不仅可显著提高叶中磷的质量分数, 还能提高氮的质量分数。氮肥和磷肥具有相互增效的生态效应。随着氮肥、磷肥施用量的增大, 叶片的氮磷质量分数相应增加, 过量施肥会引起氮素或磷素在植物体内的累积。

考来木叶片氮的季节变化明显, 而磷相对稳定。叶片氮质量分数呈现由春至夏增加、由夏至秋减少的趋势。叶片磷质量分数的季节变化趋势与氮相同, 但季节差异不显著。相较于中国常见植物叶片的平均水平(氮为 $20.24 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 磷为 $1.12 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[20-23], 考来木叶片的氮磷质量分数明显偏低, 与平均水平差异极显著。

表1 不同施肥处理下考来木叶片氮磷的变化

Table 1 Changes of nitrogen and phosphorus in *Correa carmen* leaves under different fertilization treatments

处理	$w_{\text{氮}}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$			$w_{\text{磷}}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$			$m(\text{氮}):m(\text{磷})$		
	3月20日	6月20日	9月20日	3月20日	6月20日	9月20日	3月20日	6月20日	9月20日
P ₀ N ₀	15.09±0.04 g	16.38±0.04 h	15.67±0.06 g	0.49±0.01 e	0.53±0.02 d	0.47±0.01 e	30.80±0.11 a	30.91±0.11 a	33.34±0.12 c
P ₀ N ₁	16.22±0.05 f	18.22±0.05 g	17.08±0.08 f	0.56±0.02 e	0.62±0.02 d	0.49±0.01 e	28.96±0.09 b	29.39±0.10 b	34.86±0.12 b
P ₀ N ₂	17.62±0.05 c	20.09±0.07 e	18.56±0.07 d	0.64±0.02 e	0.77±0.03 c	0.52±0.01 e	27.53±0.08 c	26.09±0.09 d	35.69±0.13 a
P ₀ N ₃	18.47±0.06 b	21.84±0.07 c	19.24±0.08 b	0.69±0.02 e	0.78±0.03 c	0.54±0.02 e	26.77±0.08 d	28.00±0.09 c	35.63±0.12 a
P ₁ N ₀	15.04±0.04 g	16.26±0.04 h	15.63±0.05 g	0.58±0.01 e	0.79±0.03 c	0.59±0.02 e	25.93±0.07 e	20.58±0.08 f	26.49±0.10 d
P ₁ N ₁	16.84±0.05 e	18.85±0.07 f	17.74±0.06 e	0.75±0.03 e	0.87±0.04 c	0.82±0.03 d	22.45±0.07 f	21.67±0.08 e	21.63±0.09 e
P ₁ N ₂	18.96±0.06 a	21.32±0.07 d	18.93±0.07 c	0.93±0.04 d	1.09±0.05 b	0.95±0.04 c	20.39±0.06 h	19.56±0.08 h	19.93±0.08 g
P ₁ N ₃	18.89±0.05 a	22.43±0.05 b	19.77±0.08 a	0.98±0.04 d	1.11±0.05 b	0.97±0.04 c	19.28±0.06 i	20.21±0.08 g	20.38±0.09 f
P ₂ N ₀	15.01±0.04 g	16.21±0.06 h	15.58±0.05 g	0.72±0.03 e	1.05±0.05 b	0.81±0.03 d	20.85±0.06 g	15.44±0.05 l	19.23±0.08 h
P ₂ N ₁	17.09±0.05 d	18.93±0.06 f	17.83±0.06 e	1.09±0.05 c	1.14±0.05 b	1.13±0.06 b	15.68±0.05 j	16.61±0.06 k	15.78±0.07 i
P ₂ N ₂	19.13±0.06 a	22.74±0.09 a	19.24±0.08 b	1.24±0.06 b	1.31±0.06 a	1.26±0.06 a	15.43±0.05 k	17.36±0.07 i	15.27±0.06 j
P ₂ N ₃	19.08±0.06 a	21.95±0.08 c	19.18±0.08 b	1.38±0.06 a	1.32±0.06 a	1.28±0.06 a	13.83±0.04 l	16.63±0.06 j	14.98±0.06 k

说明：数值为平均值±标准差；同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

2.2 不同施肥处理对考来木叶片叶绿素的影响

由表2可知：在春、夏、秋各季节中，氮磷肥施用水平对考来木叶片叶绿素质量分数的影响是相同的。在磷肥添加量相同的4个施氮肥水平中，叶绿素质量分数由高到低依次为N₂、N₃、N₁和N₀。在氮肥添加量相同的3个施磷肥水平中，叶绿素质量分数在N₀水平下的3个磷肥梯度中，叶绿素质量分数由高到低依次为P₀、P₁和P₂，即叶绿素质量分数随磷肥添加水平的提高而降低；在N₁、N₂、N₃任一水平下，叶绿素质量分数均以P₁处理最高，P₂处理最低，P₀处理居中。各季节中考来木的叶绿素质量分数均以P₁N₂处理最高。

各处理的考来木叶片叶绿素质量分数，均呈由春季至夏季增加，由夏季至秋季减少的趋势。叶绿素质量分数的季节变化趋势与叶片的氮磷的相同。Pearson相关分析表明：考来木叶片的叶绿素质量分数与土壤添加氮肥和磷肥用量及考来木叶片的氮磷质量分数呈显著正相关($P<0.05$)。

总之，增施氮肥可显著提高考来木叶片的叶绿素质量分数。在低氮的土壤条件下，增施磷肥，考来木叶片的叶绿素质量分数下降；在高氮的土壤条件下，增施磷肥可提高考来木叶绿素质量分数，但进一步提高施磷量，则叶绿素质量分数下降。说明考来木对磷的需求量较小，提高土壤或叶片中氮素水平可加速考来木对磷吸收与代谢。

表2 不同施肥处理下考来木叶片叶绿素的变化

Table 2 Changes of chlorophyll content of *Correa carmen* leaves under different fertilization levels

处理	$w_{\text{叶绿素}}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$			处理	$w_{\text{叶绿素}}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$		
	3月20日	6月20日	9月20日		3月20日	6月20日	9月20日
P ₀ N ₀	2.63 ± 0.01 h	3.94 ± 0.03 h	3.04 ± 0.02 h	P ₁ N ₂	3.37 ± 0.03 a	4.99 ± 0.05 a	3.70 ± 0.04 a
P ₀ N ₁	2.93 ± 0.02 f	4.45 ± 0.04 d	3.18 ± 0.03 g	P ₁ N ₃	3.20 ± 0.03 b	4.43 ± 0.04 d	3.59 ± 0.04 b
P ₀ N ₂	3.12 ± 0.02 d	4.88 ± 0.04 b	3.54 ± 0.03 c	P ₂ N ₀	2.48 ± 0.01 j	3.52 ± 0.03 j	2.87 ± 0.02 j
P ₀ N ₃	3.15 ± 0.02 c	4.35 ± 0.04 e	3.39 ± 0.03 d	P ₂ N ₁	2.85 ± 0.02 g	4.06 ± 0.04 g	3.20 ± 0.03 g
P ₁ N ₀	2.57 ± 0.01 i	3.77 ± 0.03 i	2.97 ± 0.02 i	P ₂ N ₂	2.88 ± 0.02 g	4.71 ± 0.05 c	3.40 ± 0.03 d
P ₁ N ₁	3.08 ± 0.02 e	4.24 ± 0.04 f	3.29 ± 0.03 e	P ₂ N ₃	2.96 ± 0.02 f	4.33 ± 0.04 e	3.25 ± 0.03 f

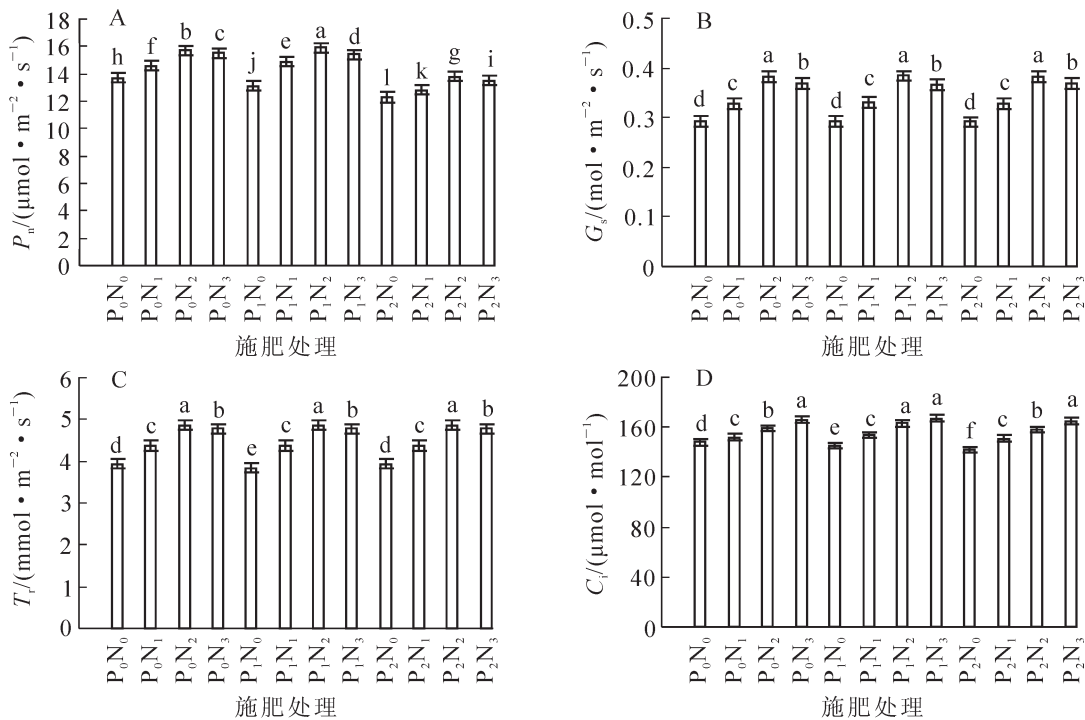
说明：数值为平均值±标准差；同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

2.3 不同施肥处理对考来木叶片光合生理指标的影响

由图1可知：考来木叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)对土壤施氮肥水平的响应趋势一致，即随土壤施氮肥水平的提高而呈先增加后减小的趋势，在N₂水平下达最高值。叶片细胞间二氧化碳摩尔分数(C_i)值则随土壤施氮肥水平的提高呈持续增加的趋势，在N₃水平下达最高值。如在土壤施磷肥水平为P₁的4个氮肥梯度中，N₁、N₂和N₃处理的 P_n 分别比N₀处理高7.46%、13.43%和

11.19%， G_s 分别增加了 13.01%，31.51%和 25.68%， T_r 分别增加了 10.96%，23.32%和 21.14%； C_i 分别增加了 6.21%，12.41%和 15.17%，均达到显著甚至极显著水平。可见，考来木叶片的光合生理各项指标均与氮肥添加水平呈显著的正相关关系($P<0.05$)。

施磷肥对考来木叶片的光合生理指标的影响与施氮肥不同。在 N_0 水平下的 3 个磷肥添加梯度中， P_n ， G_s ， T_r 和 C_i 均随着施磷肥水平的提高而下降；在 N_1 ， N_2 ， N_3 任一水平下，3 个磷肥梯度中的各项光合生理指标均随着施磷肥水平的提高而呈先增加后降低的趋势， P_1 处理下达最大值， P_2 处理下为最小值。表明在低氮土壤条件下增施磷肥，对考来木叶片的光合生理产生抑制效应；提高土壤氮水平，磷抑制现象缓解或消除。在高氮土壤中施磷肥，对光合生理产生促进效应；随着磷肥用量的进一步提高，光合生理受抑制。总的看来，磷对光合生理指标的影响受氮水平的制约。方差分析表明：磷肥施用量对考来木叶片净光合速率影响显著($P<0.05$)，对其他光合生理指标的影响差异不显著。



不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

图 1 不同施肥处理下考来木叶片光合生理指标的变化

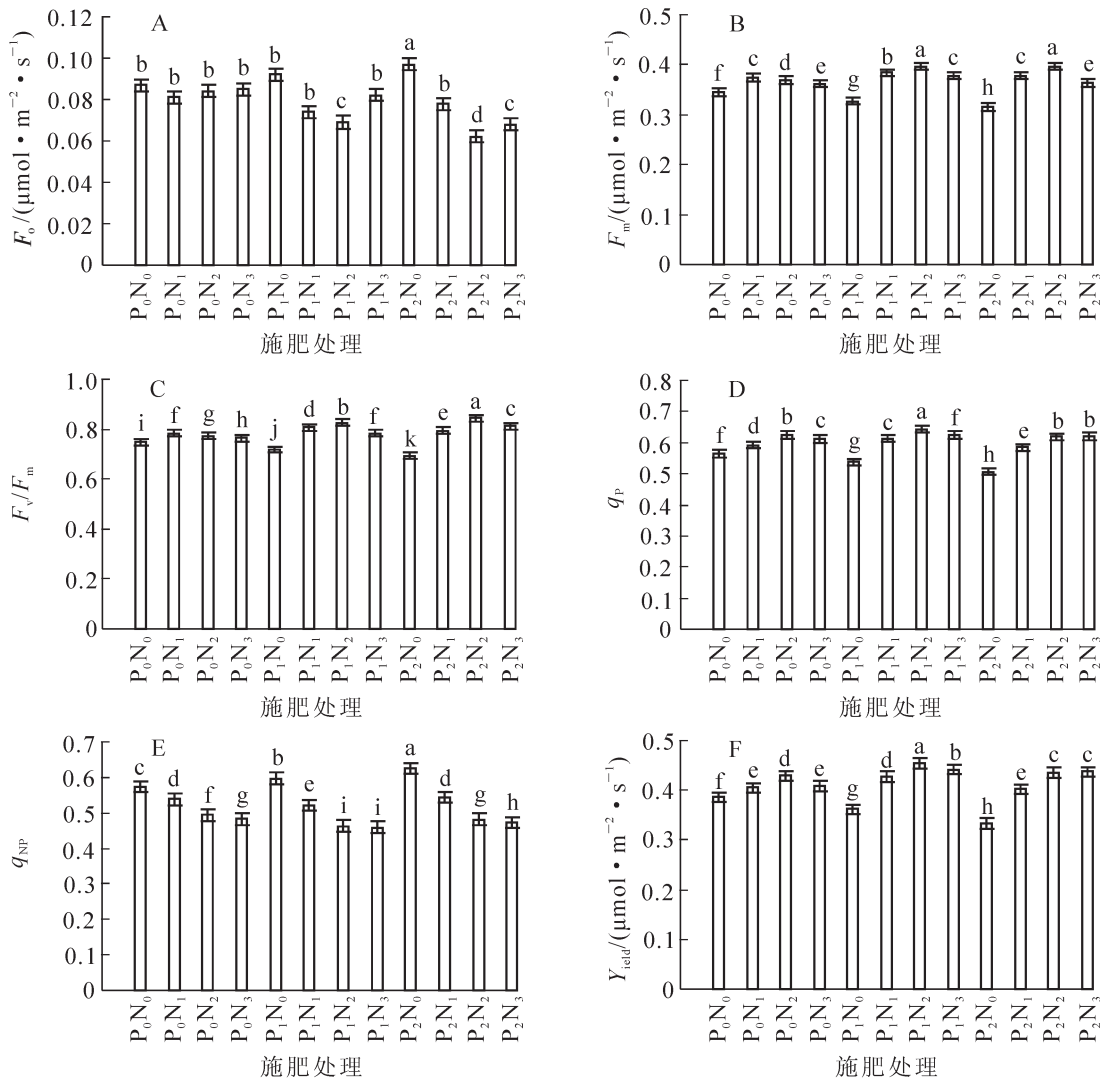
Figure 1 Changes of photosynthetic physiological index of *Correa carmen* leaves under different fertilization levels

2.4 不同施肥处理对考来木叶片叶绿素荧光的影响

由图 2 可知：在磷肥添加量相同的 4 个氮肥处理中，初始荧光(F_0)随氮肥添加量的增加而呈先降低后增加的变化趋势，最大荧光(F_m)和最大光化学效率(F_v/F_m)呈先增加后降低的变化趋势。其中在 P_1 水平下， N_1 ， N_2 ， N_3 处理的 F_0 分别比 N_0 处理降低， F_m 和 F_v/F_m 分别比 N_0 处理增加。表明向土壤中添加氮肥，可提高考来木的光化学效率潜能；若氮肥添加过量(N_3 处理)， F_0 升高，表明光系统 II (PS II) 活性受抑制或受损伤。总体上，在适量施肥的基础上，氮与考来木的光化学潜能呈正相关关系。

在 N_0 处理中，考来木叶片的 F_0 和 F_m 均随磷肥添加量的增加而呈现持续增加趋势，而 F_v/F_m 则呈持续降低的趋势。 P_1 和 P_2 处理的 F_0 分别比 P_0 处理增加了 8.33%和 25.00%； F_m 分别增加了 6.90%和 10.34%，均达极显著水平； F_v/F_m 分别下降了 0.35%和 3.47%，达显著水平。在 N_1 ， N_2 ， N_3 处理中， F_0 随磷肥添加量的增加而呈先降低后增加的趋势，差异不显著； F_m 和 F_v/F_m 均呈先升高后降低的趋势，其中 F_v/F_m 差异显著($P<0.05$)。

由图 2 还可看出：在 N_0 处理下，考来木叶片的光化学猝灭系数(q_p)和实际光化学量子产量(Y_{ield})均随磷肥添加量的增加而降低，非光化学猝灭系数(q_{NP})随磷肥添加量的增加而增加。其中 P_1 和 P_2 处理的 q_p 和 Y_{ield} 比 P_0 处理有所下降，而 q_{NP} 依次增加。很显然，磷肥添加水平的提高对考来木叶片 PS II 的光



不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)

图2 不同施肥处理下考来木叶片叶绿素荧光的变化

Figure 2 Changes of chlorophyll fluorescence of *Correa carmen* leaves under different fertilization levels

化学活性具有抑制作用。在 N_1 , N_2 , N_3 处理中, 随着磷肥添加水平的提高, q_P 和 Y_{ield} 均先增大后降低, 最大值均出现在 P_1 水平; q_{NP} 先降低后增高, 最小值亦在 P_1 水平。由此可见, 氮肥添加水平的提高, 可逐渐减弱施磷对考来木叶片光化学活性的抑制作用。

在不同处理下, 考来木叶片的 q_P , q_{NP} 和 Y_{ield} 随着施用氮磷肥比例的不同变化趋势不同。在 P_0 和 P_1 水平下, q_P 和 Y_{ield} 均随氮磷比例的增加而先增加后减少, 且均在氮肥施用量为 $247.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 N_2 处理达最大值; 而 q_{NP} 随氮磷比例的增加呈先降低后升高的趋势, 最小值出现在 N_2 处理; 在 P_2 水平下, q_P 和 Y_{ield} 均随氮磷比例的增加而持续增加, 而 q_{NP} 则随氮磷比例的增加而持续降低。

方差分析和 LSD 显著性检验表明: 考来木施用氮磷肥对叶片的叶绿素荧光特征影响显著。其中, 考来木叶片的荧光产量 Y_{ield} 及最大光化学效率 F_v/F_m 均在氮肥添加量为 $247.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 磷肥添加量为 $36.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 氮磷比为 6.83 的 P_1N_2 处理中达最高值, 说明 P_1N_2 是考来木施用氮磷肥的最佳组合, 可作为考来木栽培的施肥依据。

3 讨论

外源氮磷的输入, 在很大程度上改变了陆地生态系统中土壤氮磷的可利用状态, 从而对植物的初级生产力产生了重要影响, 因此施肥已成为一项促进植物生长的常规管理措施^[20]。但过度施肥或不合理施肥则会使土壤-植被系统中营养元素失衡, 造成土壤酸化或植物减产甚至受到伤害^[21-22]。氮磷是植物光合

器官建造必不可少的营养元素, 叶中氮磷质量分数直接影响叶绿素水平和光合能力。研究表明: 叶中氮磷质量分数与土壤氮磷水平存在着显著的正相关关系^[23-26]。本研究中, N_1 , N_2 , N_3 处理的光合性能及荧光产量比 N_0 处理依次提高, 表明向土壤中添加氮肥或磷肥是提高植物的光合性能和荧光产量的有效措施。

在 N_0 处理下向土壤中添加磷, 植物体内磷素累积水平较高, 而无机磷是 1,5 二磷酸核酮糖羧化酶 (RuBPCase) 的一种竞争性抑制剂^[27-28], 高浓度的磷可能抑制了 RuBPCase 的活性使光合效率下降, 或增强了光呼吸而使光合效率降低。因此, 在 N_0 处理下, 叶片的光合效率及荧光产能等均随磷素水平的提高而降低。而此时向土壤中添加氮素, 考来木的叶绿素合成增多, 需要更多的磷参与到光合器官的建造, 使叶中磷的积累和抑制减弱或消除, 光合效率提高。但磷素添加水平的进一步提高, 考来木叶中又开始积累无机磷而使光合性能降低。在氮素的各个添加水平下, 考来木的最大光合效率均出现在 P_1 处理中, 说明氮磷均具有促进考来木光合作用的效果, 且两者具有相互增效的生态效应。这与张玉斌等^[29]的研究结果一致。

荧光参数可以反映丰富的光合机构信息, 常作为光合作用的无损探针应用在光合性能的研究中^[30]。初始荧光 F_0 一般较小且稳定, 当植物遭受胁迫时, F_0 升高; 与此同时, F/F_m 显著下降。本研究中, F_0 值随土壤磷水平提高, 即氮磷比的降低而逐渐升高, F/F_m , q_P 和 Y_{ield} 均持续降低, 说明在低氮土壤中施磷肥给考来木造成了高磷胁迫。而此时增施氮肥, F/F_m , q_P 和 Y_{ield} 均升高。表明高磷胁迫下考来木发生了光抑制则光合作用减弱, 从而由光合作用引起的 q_P 降低; 同时 PS II 的光化学量子产量 Y_{ield} 也随光抑制而下降。

q_{NP} 的变化规律也可以用“磷胁迫”来解释。众所周知, 叶绿素分子吸收的光能有 3 个去处: 荧光、光合和热量, 三者之间存在着竞争, 即此消彼长。叶片将所获取的光能, 大部分用于光合作用, 少部分以光的形式释放出来 (即荧光); 当光能过剩时, 便以热能的形式 (即 q_{NP}) 耗散掉。因此, q_{NP} 可表达植物的光保护能力。本研究中, 在低氮土壤中添加磷, 考来木叶中无机磷累积而发生磷胁迫, 光化学猝灭即光合作用对光能的利用率降低, 则更多的光能以 q_{NP} 的形式耗散出来。此时提高土壤氮水平, 则 q_{NP} 下降。这可能是土壤氮水平的提高, 刺激了考来木叶片 PS II 反应中心从而活性增强, 电子传递速率增大, 进而原初光能转换效率提高, 即较多的光能用于光合作用, 则光能的热耗散减少。

4 结论

考来木对磷反应敏感, 需求量低, 因此不宜单施, 尤其在低氮土壤中更为不宜。若需施磷肥, 则应与氮肥同施, 氮肥磷肥同施可相互提高肥效。其中, 最佳施肥组合氮肥为 $247.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 磷肥为 $36.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 最佳氮磷比为 $m(\text{氮}):m(\text{磷})=6.83:1.00$ 。

5 参考文献

- [1] ELSER J J, BRACKEN M E, CLELAND E E, *et al.* Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems [J]. *Ecol Lett*, 2007, **10**(12): 1135 - 1142.
- [2] VITOUSEK P M, PORDER S, HOULTON B Z, *et al.* Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions [J]. *Ecol Appl*, 2010, **20**(1): 5 - 15.
- [3] 张仁懿, 徐当会, 杨智永, 等. 植物 N:P 化学计量特征对亚高寒草甸限制类型的指示作用研究[J]. 中国草地学报, 2014, **36**(3): 79 - 83.
ZHANG Renyi, XU Danghui, YANG Zhiyong, *et al.* The indicative function of N:P stoichiometry characteristics on the nutrient limitation on the subalpine grassland [J]. *Chin J Grassl*, 2014, **36**(3): 79 - 83.
- [4] 荣钺钺, 刘京涛, 夏江宝, 等. 莱州湾湿地柽柳叶片 N, P 生态化学计量学特征[J]. 生态学杂志, 2012, **31**(12): 3032 - 3037.
RONG Qiangqiang, LIU Jingtao, XIA Jiangbao, *et al.* Leaf N and P stoichiometry of *Tamarix chinensis* L. in Laizhou Bay wetland, Shandong Province of East China [J]. *Chin J Ecol*, 2012, **31**(12): 3032 - 3037.
- [5] 罗亲普, 龚吉蕊, 徐沙, 等. 氮磷添加对内蒙古温带典型草原净氮矿化的影响[J]. 植物生态学报, 2016, **40**(5): 480 - 492.

- LUO Qinqu, GONG Jirui, XU Sha, *et al.* Effects of N and P additions on net nitrogen mineralization in temperate typical grasslands in Nei Mongol, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2016, **40**(5): 480 – 492.
- [6] 杨晓霞, 任飞, 周华坤, 等. 青藏高原高寒草甸植物群落生物量对氮、磷添加的响应[J]. 植物生态学报, 2014, **38**(2): 159 – 166.
- YANG Xiaoxia, REN Fei, ZHOU Huakun, *et al.* Responses of plant community biomass to nitrogen and phosphorus additions in an alpine meadow on the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2014, **38**(2): 159 – 166.
- [7] 陈慧敏, 石福习, 杨桂生, 等. 养分添加对三江平原沼泽化草甸植物群落组成和地上生物量的影响[J]. 生态学杂志, 2016, **35**(6): 1440 – 1446.
- CHEN Huimin, SHI Fuxi, YANG Guisheng, *et al.* Effects of nutrient addition on plant community composition and aboveground biomass in a marshy meadow in the Sanjiang Plain [J]. *Chin J Ecol*, 2016, **35**(6): 1440 – 1446.
- [8] HIDAKA A, KITAYAMA K. Divergent patterns of photosynthetic phosphorus-use efficiency versus nitrogen-use efficiency of tree leaves along nutrient-availability gradients [J]. *J Ecol*, 2009, **97**(5): 984 – 991.
- [9] 白雪, 程军回, 郑淑霞, 等. 典型草原建群种羊草对氮磷添加的生理生态响应[J]. 植物生态学报, 2014, **38**(2): 103 – 115.
- BAI Xue, CHENG Junhui, ZHENG Shuxia, *et al.* Ecophysiological responses of *Leymus chinensis* to nitrogen and phosphorus additions in a typical steppe [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2014, **38**(2): 103 – 115.
- [10] 韦莉莉, 卢昌熠, 丁晶, 等. 丛枝菌根真菌参与下植物-土壤系统的养分交流及调控[J]. 生态学报, 2016, **36**(14): 4233 – 4243.
- WEI Lili, LU Changyi, DING Jing, *et al.* Functional relationships between arbuscular mycorrhizal symbionts and nutrient dynamics in plant-soil-microbe system [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36**(14): 4233 – 4243.
- [11] LI Su, LIU Wenyao, LI Dawen. Bole epiphytic lichens as potential indicators of environmental change in subtropical forest ecosystems in southwest China [J]. *Ecol Indic*, 2013, **29**: 93 – 104.
- [12] ELUMEEVA T G, ONIPCHENKO V G, WU Y. Leaf functional traits of plants of alpine pastures at the Eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Moscow Univ Biol Sci Bull*, 2015, **70**(1): 46 – 52.
- [13] 盘远方, 陈兴彬, 姜勇, 等. 桂林岩溶石山灌丛植物叶功能性状和土壤因子对坡向的响应[J]. 生态学报, 2018, **38**(5): 1581 – 1589.
- PAN Yuanfang, CHEN Xingbin, JIANG Yong, *et al.* Changes in leaf functional traits and soil environmental factors in response to slope gradient in Karst hills of Guilin [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38**(5): 1581 – 1589.
- [14] 吕秀立. 冬之精灵: 考来木[J]. 园林, 2011(6): 76.
- LÜ Xiuli. Winter elf: *Correa carmen* [J]. *Garden*, 2011(6): 76.
- [15] 吕秀立. 考来木离体培养及产业化研究[J]. 园林科技, 2013(2): 11 – 13.
- LÜ Xiuli. Study on culturing and industrialization of *Correa carmen* in vitro [J]. *Sci Technol Landscape Archi*, 2013(2): 11 – 13.
- [16] 张志录, 刘中华, 陈明辉, 等. 高温干旱胁迫下考来木幼苗的生理响应[J]. 北方园艺, 2017(19): 81 – 88.
- ZHANG Zhilu, LIU Zhonghua, CHEN Minghui, *et al.* Physiology response of *Correa carmen* seedlings to combined elevated temperature and drought stress [J]. *North Hortic*, 2017(19): 81 – 88.
- [17] 张薇, 付响, 李季芳, 等. 基于凯氏定氮法与杜马斯燃烧法测定土壤全氮的比较研究[J]. 中国农学通报, 2015, **31**(35): 172 – 175.
- ZHANG Wei, FU Yun, LI Jifang, *et al.* Comparative study on Kjeldahl method and Dumas Combustion method for total nitrogen measurement in soil [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2015, **31**(35): 172 – 175.
- [18] 孙俊宝, 王建新. 樱桃叶绿素含量测定方法研究[J]. 山西农业科学, 2010, **38**(3): 18 – 19, 33.
- SUN Junbao, WANG Jianxin. Study on method for determination of chlorophyll in cherry leaves [J]. *J Shanxi Agric Sci*, 2010, **38**(3): 18 – 19, 33.
- [19] 付为国, 王凡坤, 赵云, 等. 土壤氮磷化学计量特征对小麦光合气体交换参数和叶绿素荧光参数的影响[J]. 西北植物学报, 2016, **36**(7): 1435 – 1442.
- FU Weiguo, WANG Fankun, ZHAO Yun, *et al.* Effects of soil nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics on photosynthetic gas exchange and chlorophyll fluorescence of wheat [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2016, **36**(7): 1435 – 1442.

- [20] 李曼, 靳冰洁, 钟全林, 等. 氮磷添加对刨花楠幼苗叶片 N, P 化学计量特征的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2016, **22**(2): 285 – 291.
LI Man, JIN Bingjie, ZHONG Quanlin, *et al.* Effect of nitrogen and phosphorus fertilization on leaf N and P stoichiometric characteristics of *Machilus pauhoi* seedlings [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2016, **22**(2): 285 – 291.
- [21] WANG Changting, LONG Ruijun, WANG Qilan, *et al.* Fertilization and litter effects on the functional group biomass, species diversity of plants, microbial biomass, and enzyme activity of two alpine meadow communities [J]. *Plant Soil*, 2010, **331**(1/2): 337 – 389.
- [22] LIEB A M, DARROUZET, NARDI A, *et al.* Nitrogen deposition decreases acid buffering capacity of alpine soils in the southern Rocky Mountains [J]. *Geoderma*, 2011, **164**(3/4): 220 – 224.
- [23] BRADSHAW C, KAUTSKY U, KUMBLAD L. Ecological stoichiometry and multi-element transfer in a coastal ecosystem [J]. *Ecosystems*, 2012, **15**(4): 591 – 603.
- [24] 洪江涛, 吴建波, 王小丹. 藏北高寒草原紫花针茅根系碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 山地学报, 2014, **32**(4): 467 – 474.
HONG Jiangtao, WU Jianbo, WANG Xiaodan. Root C:N:P stoichiometry of *Stipa purpurea* in alpine steppe on the Northern Tibet [J]. *Mt Res*, 2014, **32**(4): 467 – 474.
- [25] 李天平. 湘北丘陵区混交阔叶林不同树种土壤 C, N, P 生态化学计量学特征研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.
LI Tianping. *Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus Ecological Stoichiometry of Different Trees in Mixed Broad-Leaved Forest in The Hill Region of Northern Hunan* [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2015.
- [26] LÜ Xiaotao, REED S C, YU Qiang, *et al.* Nutrient resorption helps drive intra-specific coupling of foliar nitrogen and phosphorus under nutrient-enriched conditions [J]. *Plant Soil*, 2016, **39**(8): 111 – 120.
- [27] 吴一群. 高磷对蔬菜生长的影响及其环境效应[D]. 福州: 福建农林大学, 2008.
WU Yiqun. *Effects of High Phosphorus on Vegetable Growth and Its Potential Environmental Impact* [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forest University, 2008.
- [28] YADAV S, IRFAN M, AHMAD A, *et al.* Causes of salinity and plant manifestations to salt stress: a review [J]. *J Environ Biol*, 2011, **32**(5): 667 – 685.
- [29] 张玉斌, 曹庆军, 张铭, 等. 施磷水平对春玉米叶绿素荧光特性及品质的影响[J]. 玉米科学, 2009, **17**(4): 79 – 81.
ZHANG Yubin, CAO Qingjun, ZHANG Ming, *et al.* Effects of phosphorus application on chlorophyll fluorescence characteristic and quality of spring maize [J]. *J Maize Sci*, 2009, **17**(4): 79 – 81.
- [30] 杨程, 李鹏民, 张子山, 等. 叶绿素延迟荧光的发生及其在光合作用研究中的应用[J]. 植物生理学报, 2013, **49**(12): 1277 – 1285.
YANG Cheng, LI Pengmin, ZHANG Zishan, *et al.* Arising of chlorophyll delayed fluorescence and its application in photosynthesis research [J]. *Plant Physiol J*, 2013, **49**(12): 1277 – 1285.