

间作对氮调控玉米光合速率和光合氮利用效率的影响

朱启林¹ 向蕊¹ 汤利^{1,2} 龙光强^{1,2*}

¹云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; ²农业部云南耕地保育科学观测实验站, 昆明 650201

摘要 研究间作后作物光合碳同化和光合氮利用效率(PNUE)对氮投入的响应, 对阐释间作产量优势的氮调控效应, 指导间作氮肥管理有重要意义。本研究设置玉米(*Zea mays*)单作、玉米间作两种种植模式的4个氮水平(N0, 0 kg·hm⁻²; N1, 125 kg·hm⁻²; N2, 250 kg·hm⁻²; N3, 375 kg·hm⁻²), 分析间作与施氮量对玉米叶片特征、光合参数、PNUE和产量的影响。结果表明: 与单作相比, 间作显著增加玉米叶片的叶干质量和比叶质量; 各施氮水平(除N3)下, 间作中靠近马铃薯(*Solanum tuberosum*)侧的玉米叶面积均显著高于单作玉米。单间作对比发现, 间作提高了玉米光饱和点和暗呼吸速率。单作、间作靠玉米侧(I-M)、间作靠马铃薯侧(I-P)的玉米PNUE均随施氮量增加而降低, 降幅以I-P最大; 施氮量低于250 kg·hm⁻²时, 相同施氮量下的玉米PNUE和净光合速率(P_n)均以I-P最高, I-M和单作次之。间作显著提高了玉米产量(土地当量比>1)。该研究中当施氮量≤250 kg·hm⁻²时, 间作I-P的玉米叶片P_n和PNUE显著提高可能是间作玉米产量提高的重要原因。

关键词 间作; 施氮水平; 叶片含氮量; 光合速率; 光合氮利用效率

朱启林, 向蕊, 汤利, 龙光强 (2018). 间作对氮调控玉米光合速率和光合氮利用效率的影响. 植物生态学报, 42, 672–680. DOI: 10.17521/cjpe.2018.0033

Effects of intercropping on photosynthetic rate and net photosynthetic nitrogen use efficiency of maize under nitrogen addition

ZHU Qi-Lin¹, XIANG Rui¹, TANG Li^{1,2}, and LONG Guang-Qiang^{1,2*}

¹College of Resources and Environmental Science, Yunnan Agriculture University, Kunming 650201, China; and ²Yunnan Scientific Observation Station for Cultivated Land Conservation of the Ministry of Agriculture, Kunming 650201, China

Abstract

Aims The aim of this study was to explore the response of photosynthetic carbon assimilation and photosynthetic nitrogen (N) use efficiency (PNUE) of maize to intercropping system of maize and potato under different N addition, which has a great significance for the N regulation and N fertilizer management for the increase in intercropping yield.

Methods In order to analyze the effects of intercropping and additional N level on leaf characteristics, photosynthetic parameters, PNUE and yield of maize, field experiment with mono- and inter-cropping system under four N addition levels (N0, 0 kg·hm⁻², N1, 125 kg·hm⁻², N2, 250 kg·hm⁻² and N3, 375 kg·hm⁻²) treatments were set up.

Important findings The results showed that inter-cropping planting significantly increased leaf dry mass of maize and leaf mass per area compared with maize monoculture. Among different N treatment levels (except N3), leaf area of maize under intercropping close to potato increased compared with that under maize monoculture. Intercropping also increased the light saturation point of photosynthesis and dark respiration rate of maize compared with maize monoculture. PNUE decreased as the increasing of N levels in monoculture maize, intercropping maize leaves close to potato (I-P) and leaves close to maize of other row (I-M), and the largest decline was found in I-P. At the same N level (less than 250 kg N·hm⁻²), PNUE and photosynthetic rate (P_n) of maize in I-P were significantly higher than those in M and I-M system. Intercropping system significantly improve the yield of maize (land equivalent ratio > 1). This study concluded that higher PNUE and P_n of maize close to the potato

收稿日期Received: 2018-01-31 接受日期Accepted: 2018-04-25

基金项目: 云南省农业联合专项(2017FG001-027)、云南省中青年学术技术带头人后备人才项目(2017HB027)和国家自然科学基金项目(41201289和41361065)。Supported by the Yunnan Agricultural Joint Project (2017FG001-027), the Reserve Talent Young Academic and Technical Leaders of Yunnan Province (2017HB027), and the National Natural Science Foundation of China (41201289 and 41361065).

* 通信作者Corresponding author (ynaulong2316@163.com)

contributed to the increase of intercropped maize yield under less than or equal to 250 kg N·hm⁻² addition.

Key words intercropping; nitrogen level; leaf nitrogen content; photosynthetic rate; photosynthetic nitrogen use efficiency

Zhu QL, Xiang R, Tang L, Long GQ (2018). Effects of intercropping on photosynthetic rate and net photosynthetic nitrogen use efficiency of maize under nitrogen addition. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 672–680. DOI: 10.17521/cjpe.2018.0033

氮是构成植物光合器官关键的营养元素, 在植物的光合作用中起着至关重要的作用(Evans, 1983; Yang *et al.*, 2010)。合理施氮可以提高植物叶片的叶绿素含量、酶含量和酶活性, 进而促进光合作用(Furbank *et al.*, 1987)。光合速率是光合作用参数中最重要的指标, 而光合速率与叶片氮含量的比值, 即光合氮利用效率(PNUE), 作为表征植物叶片养分利用和生理特性的重要参数, 可充分反映植物氮分配及其对光合作用的影响(刘涛等, 2016)。植物叶片中参与光合作用氮的占比和光合酶活性大小均影响PNUE (Hikosaka, 2004), PNUE越高, 则表明作物氮利用率越高(Ghallnoum *et al.*, 2005)。合理施氮有助于提高叶片光合速率(Pal *et al.*, 2005), 进而提高PNUE, 达到增产效果(申丽霞等, 2005)。因此, 研究作物光合作用和PNUE, 是揭示不同氮环境下的作物增产效应的重要机理途径。总体上, 前人有关施氮量对作物光合特性、氮素利用率和产量关系的探讨较多(吕丽华等, 2008; 楚光红和章建新, 2016), 但这些试验主要基于单作条件来开展, 对于间作等生长环境下的研究报道少见。

间作条件下, 施氮量对作物光合作用和PNUE的影响值得深入研究, 原因在于间作引起的遮阴或种间竞争是否可以通过施氮来缓解甚至消除。前期研究表明, 遮阴会造成叶片光合速率降低(Vos & Pelvander, 2001), 而增施氮肥可有效缓解遮阴对光合作用的不利影响(孙年喜等, 2005; 王帅等, 2008)。宋航等(2017)研究发现, 弱光胁迫条件下, 增施氮肥可以改善玉米(*Zea mays*)的光合特性; 在一定程度上光、氮互补可以有效调控植物叶片的光合作用(段巍巍等, 2007)。间作种植体系中, 形成高矮相错的结构, 造成作物不同方位叶片光照的变化, 必将造成光合作用的差异(肖继坪等, 2011; 焦念元等, 2013b)。同时, 间作体系的作物遮阴动态变化、加之养分之间的互作关系和作物之间根际影响等(Mushagalusa, 2008; 马心灵等, 2017), 将使间作后氮对作物光合作用和PNUE的影响更加复杂。

玉米马铃薯(*Solanum tuberosum*)间作是典型的

高秆-矮秆作物间作模式, 在亚热带和温带地区广泛应用, 具有降低作物病虫害发病率、提高作物光照利用率和功能叶片光合速率等优势(黄进勇等, 2003; Banik & Sharma, 2009; 焦念元等, 2013a)。然而, 不同氮水平下间作如何影响玉米光合特性和氮肥利用效率, 最终引起产量差异尚不明确。因此, 我们选取玉米马铃薯间作种植模式, 设置4个氮水平, 比较单作玉米、间作条带中靠近玉米和马铃薯侧玉米叶片的光合特性与PNUE, 以探讨不同供氮条件下间作促进玉米增产的光合机理和对氮光合利用的差异, 为合理调控氮以发挥间作产量优势提供理论支持和实践指导。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验于2014年在昆明寻甸大河桥农场(23.53° N, 103.22° E, 海拔1 953.5 m)内进行。该地降水集中在7至9月, 年降水量1 040 mm, 年蒸发量为2 384 mm, 属北亚热带季风气候, 年平均气温14.7 °C, 无霜期301天。土壤pH值为7.8, 有机质含量10.5 mg·kg⁻¹, 碱解氮含量34.7 mg·kg⁻¹, 速效磷含量5.8 mg·kg⁻¹, 速效钾含量51.3 mg·kg⁻¹, 本试验数据为2014年玉米抽穗期测得。

供试玉米品种为‘耕源寻单7号’; 马铃薯品种为‘会泽2号’。小区试验采用随机区组设计, 每个处理3次重复, 2种植模式(玉米马铃薯间作(I), 玉米单作(M)), 4个氮水平, 以当地玉米生产施氮量(常规施氮, N2, 250 kg·hm⁻²)为基础, 分别增施氮50% (高氮处理, N3, 375 kg·hm⁻²)和减施氮50% (低氮处理, N1, 125 kg·hm⁻²), 同时设不施氮(N0, 0 kg·hm⁻²)的对照。8个处理, 24个小区, 每小区面积32.5 m² (5 m × 6.5 m)。单作玉米株距25 cm, 行距50 cm; 间作玉米和单作行株距一致, 2行玉米、2行马铃薯(即行比2:2)的间作种植方式, 其中马铃薯株距35 cm, 行距50 cm; 小区周边设置1 m的保护行, 种植玉米。

氮肥分基肥、小喇叭口期追肥和大喇叭口期追肥3次施入, 分别占总施氮量的40%, 25%和35%;

各处理中玉米磷钾肥均以基肥施入, 磷肥(P_2O_5 的用量)施用 $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 钾肥(K_2O 的用量)施用 $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1.2 采样与测定方法

1.2.1 光合特性指标及光合光响应曲线测定

在玉米抽穗期, 选取晴朗无风天气的8:30–11:30, 测定每个小区玉米叶光合指标。用LI-6400便携式光合测定仪(LI-COR, Lincoln, USA), 每个处理随机选择3株有代表性的玉米, 每株玉米测定8片叶片。单作玉米选取生殖生长中光合作用最强的(棒上下各4叶) 8片叶片, 间作分别对同一株玉米的两侧, 即靠近马铃薯侧玉米叶片(I-P)和靠近玉米侧玉米叶片(I-M)的各4片叶片进行测定(图1)。测定玉米叶片的净光合速率(P_n , $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、蒸腾速率(T_r , $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、气孔导度(G_s , $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、胞间 CO_2 浓度(C_i , $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)等生理参数。

设定光照强度(PFD)梯度分别为2 000、1 500、1 000、800、600、400、300、200、150、100、80、60、40、20和0 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 选择常规施氮条件下单作和间作各1株有代表性的玉米, 测定玉米穗位叶叶片光合速率对光强的响应, 以PFD为横坐标, P_n 为纵坐标, 计算光合-光强响应曲线。用光强低于150 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的数据进行线性回归, 求得回归方程的斜率等参数计算表观量子效率(AQY)和光补偿点等(焦念元等, 2013a)。

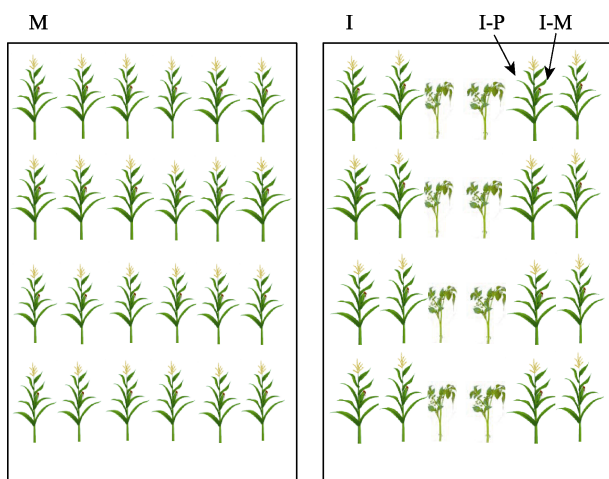


图1 玉米单作和间作示意图。I, 间作; I-M, 靠近玉米侧的玉米叶片; I-P, 靠近马铃薯侧的玉米叶片; M, 单作。

Fig. 1 Illustration of maize monoculture and intercropping maize and potato. I, intercropping; I-M, intercropping maize leaves close to maize of other row; I-P, intercropping maize leaves close to potato; M, monoculture.

1.2.2 叶片氮含量测定与计算

(1)叶面积测定: 每个小区随机选取5株玉米, 对应单间作中光合指标测定时的叶片选择方式(图1), 剪取抽穗期玉米叶片, 用LI-3000C便携式叶面积仪(LI-COR, Nebraska, USA)测定叶片面积。叶片杀青后烘干用于测定干物质质量。

(2)植株氮素含量测定: 样品于105 °C杀青30 min, 80 °C烘干至恒质量, 粉碎后用浓硫酸-过氧化氢消煮, 采用凯氏定氮法测定氮含量(闫艳红等, 2011)。比叶质量(LMA , $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) = 叶干质量/叶面积。单位干质量叶片氮含量(N_{mass} , $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)为叶片氮含量与叶干质量之商; 单位面积氮含量(N_{area} , $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)由 N_{mass} 和 LMA 计算所得, 即 $N_{\text{area}} = N_{\text{mass}} \times LMA$ 。

1.2.3 PNUE与土地当量比计算

(1) PNUE参照文献(李大勇等, 2013)计算, 即 $PNUE (\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}) = P_n / N_{\text{area}}$ 。

(2)土地当量比(LEP)用于表示间作系统内物种对资源利用的竞争性大小, 表达式为: $LER = (Y_i / Y_m)$, 式中: Y_i 和 Y_m 分别代表间作玉米和单作玉米产量(Al-Dalain, 2009)。当 $LER = 1$ 时, 间作玉米与单作玉米产量相当, 在不同体系中对同一有限资源有相等的利用能力; $LER > 1$ 表示间作玉米的互补作用大于竞争作用, 具有间作的产量优势, 幅度愈高, 增产效益愈大; $LER < 1$ 表明种间竞争大于种间促进, 没有间作优势。

1.2.4 水分利用效率和气孔限制值计算

按以下公式计算水分利用效率(WUE)和气孔限制值(L_s)

$$WUE = P_n / T_r$$

$$L_s = 1 - C_i / C_a$$

式中, C_a 指大气 CO_2 浓度。

1.3 计算公式及数据处理

采用Excel 2010对间作玉米马铃薯产量、生物量、光合参数及叶片特征进行方差分析处理, 通过SPSS 20.0软件对文中数据进行单因素方差分析, 用最小显著极差法(LDS)进行不同处理之间的显著性检验($p < 0.05$)。

2 结果和分析

2.1 不同氮水平下间作对玉米产量的影响

由表1可知, 同种植植模式, 单作玉米与间作玉米产量在N1、N2、N3水平差异不显著, 但显著高于

N0水平; 相比N0, 单作玉米产量增幅92.86%–130.12%, 间作玉米产量增幅63.13%–90.98%。单作与间作玉米生物量随施氮量增加的变化趋势与产量相同, N2、N3水平无显著差异, 显著高于N0、N1水平。

相同施氮水平下, 相比单作, 间作玉米增产19.88%–45.56%。与单作相比, 间作玉米在N1、N2、N3水平生物量显著提高。*LER*在各氮水平均大于1, 说明间作玉米具有产量优势。

2.2 间作对玉米叶片光合参数与光响应曲线的影响

2.2.1 净光合速率(P_n)与胞间二氧化碳浓度(C_i)

从图2可见, 同一种植模式下, 单作和间作I-M的 P_n 呈现随施氮量增加而升高的变化趋势, 而间作I-P的 P_n 随施氮量增加, 先升高后降低, N2水平最高, 显著高于其他氮水平。相同氮水平下单作、间作I-M和间作I-P的 P_n 比较, 在N0、N1、N2水平间作I-P的 P_n 显著高于单作和间作I-M, 相比单作提高21.31%–23.53%; 较I-M提高28.91%–43.70%, N3水平单作、间作I-M和间作I-P的 P_n 差异不显著(图2A)。间作I-M和间作I-P的 C_i 随施氮量增加呈现降低趋势(图2B)。

2.2.2 气孔导度(G_s)与蒸腾速率(T_r)

间作I-P的 G_s 在N0、N1、N2水平, 显著高于单作和间作I-M, 较单作和间作I-M增幅分别为28.43%–54.96%, 16.55%–50.69%, N3差异不显著; 各氮水平单作和I-M的 G_s 差异不显著(图2C)。间作I-P的 T_r 在N1、N2水平显著高于单作和间作I-M, 较单作提高26.44%、30.91%, 较间作I-M提高27.71%、34.81%, N0、N3水平无显著差异(图2D)。间作I-P的 G_s 和 T_r 均随施氮量增加呈现先升高后降低的趋势。

2.2.3 气孔限制值(L_s)和水分利用效率(*WUE*)

对比相同种植模式不同氮水平 L_s , 单作玉米在

N2水平显著高于其他处理, 间作I-M和间作I-P在N3水平显著高于其他处理; 单间作对比, N2水平单作玉米 L_s 显著高于间作I-M和间作I-P(图2E)。对比同一氮水平不同种植模式*WUE*, N0、N1水平间作I-P显著高于单作和间作I-M, 较单作分别提高10.45%、11.73%; 较间作I-M的12.99%、13.09%, N3水平差异不显著(图2F)。

2.2.4 光合-光强响应曲线

对比单间作玉米光合-光强响应曲线(图3), 低于200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光照强度拟合回归看出, 间作玉米光补偿点为23 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 单作玉米为14 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 单作较间作降低了39.10%; 与单作相比, 间作玉米表观量子效率提高了11.7%。

间作玉米的光饱和点高于单作, 间作种植模式提高了玉米的最大光合速率。当光照强度低于700 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 单作 P_n 高于间作, 当光照强度超过700 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 间作高于单作, 说明间作提高了玉米对强光的吸收能力, 降低了玉米对弱光的吸收能力。单作和间作的暗呼吸速率分别为0.81 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、1.12 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 单作较间作降低了29.43%, 间作玉米呼吸消耗的光合产物要高于单作。

2.3 不同氮水平下间作对玉米叶片氮素特征的影响

由表2可知, 同一种植模式下, 施氮显著增加玉米叶片叶面积和叶干质量; 相同施氮水平不同种植模式比较, I-P的叶干质量在N1、N2、N3水平显著高于单作、I-M。I-M和I-P的*LMA*随氮水平增加, 呈现出先增加后降低的趋势。同一种植模式不同施氮水平, 单作、I-M和I-P的 N_{mass} 、 N_{area} 均随施氮量增加而增加; N_{mass} 在各氮水平平均后, 表现出I-P > I-M > 单作的趋势。两种种植模式下*PNUE*随施氮量增加

表1 不同氮水平对玉米产量、生物量的影响($\times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)(平均值 \pm 标准偏差)

Table 1 Effects of N levels on yield and biomass of maize ($\times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)(mean \pm SD)

| 氮水平 N level ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) | 产量 Yield | | 生物量 Biomass | | 土地当量比 Land equivalent ratio |
|---|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | I | M | I | M | |
| 0 (N0) | 7.54 \pm 0.23 ^{Aa} | 5.18 \pm 0.71 ^{Aa} | 17.62 \pm 1.01 ^{Aa} | 14.88 \pm 1.24 ^{Aa} | 1.46 |
| 125 (N1) | 12.30 \pm 1.57 ^{Ab} | 9.99 \pm 1.63 ^{Ab} | 25.69 \pm 0.52 ^{Ab} | 21.84 \pm 0.73 ^{Bb} | 1.23 |
| 250 (N2) | 14.40 \pm 1.67 ^{Ab} | 11.69 \pm 1.97 ^{Bb} | 28.82 \pm 1.88 ^{Ac} | 24.90 \pm 2.73 ^{Bc} | 1.23 |
| 375 (N3) | 14.29 \pm 1.47 ^{Ab} | 11.92 \pm 1.11 ^{Bb} | 28.63 \pm 2.33 ^{Ac} | 25.20 \pm 1.75 ^{Bc} | 1.20 |

不同小写字母代表同一种植模式下的不同氮水平间差异显著($p < 0.05$)。不同大写字母代表同一施氮水平下间作和单作之间差异显著($p < 0.05$)。I, 间作; M, 单作。

Different lowercase letters indicate significant difference among different N levels in the same planting pattern ($p < 0.05$). Different capital letters mean significant difference between monoculture and intercropping at the same N level ($p < 0.05$). I, intercropping; M, monoculture.

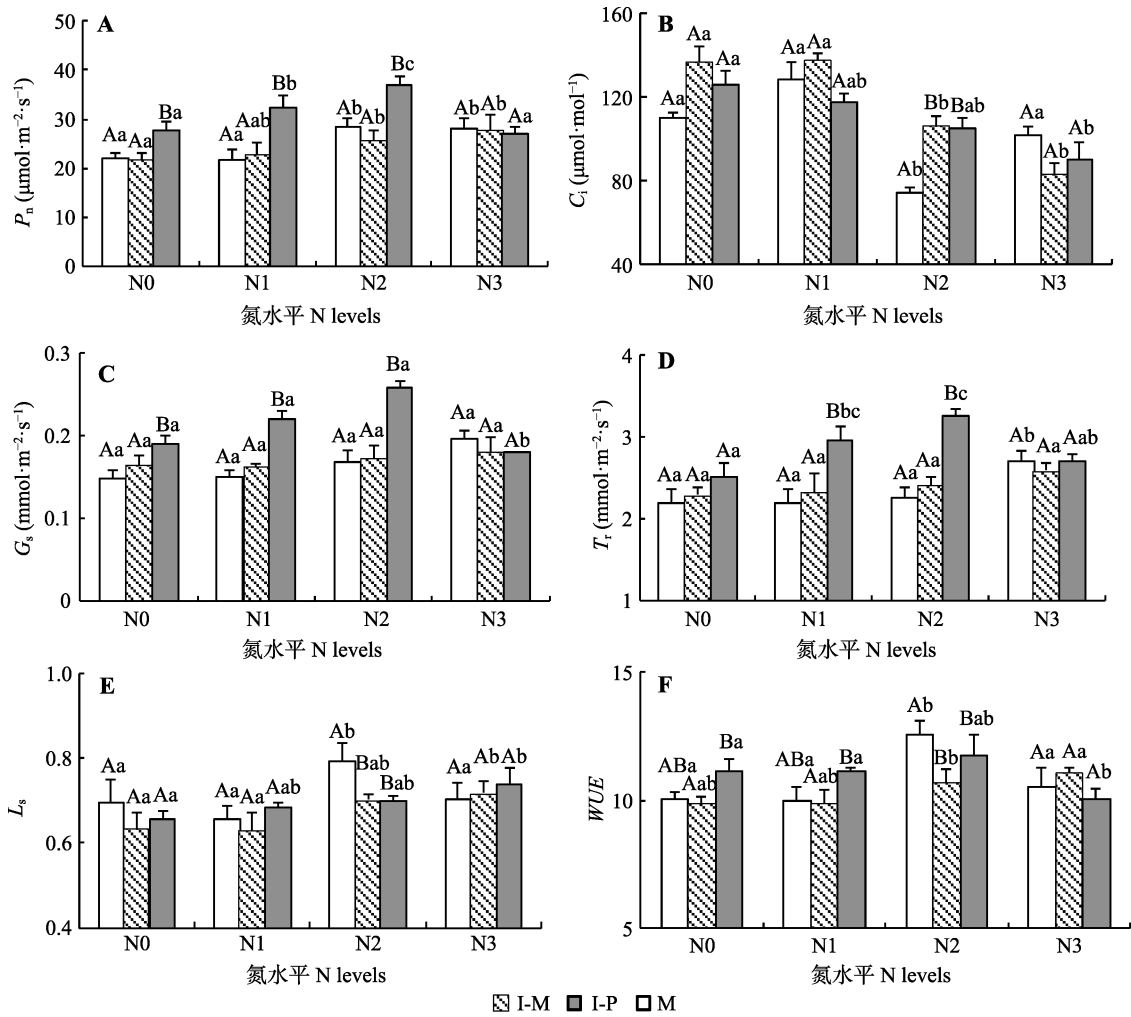


图2 不同氮水平下单作和间作对玉米光合特征参数的影响(平均值+标准偏差)。不同小写字母代表同一种植模式下的不同氮水平间差异显著($p < 0.05$)。不同大写字母代表同一施氮水平下间作和单作之间差异显著($p < 0.05$)。I-M, 靠近玉米侧玉米叶片; I-P, 靠近马铃薯侧玉米叶片; M, 单作; P_n , 净光合速率; C_i , 胞间 CO_2 浓度; G_s , 气孔导度; T_r , 蒸腾速率; L_s , 气孔限制值; WUE , 水分利用效率。

Fig. 2 Effects of monoculture and intercropping on photosynthetic characteristics of maize under different nitrogen levels (mean + SD). Different lowercase letters indicate significant difference among different N levels in the same planting pattern ($p < 0.05$). Different capital letters mean significant difference between monoculture and intercropping at the same N level ($p < 0.05$). I-M, intercropping maize leaves close to maize of other row; I-P, intercropping maize leaves close to potato; M, monoculture; P_n , net photosynthetic rate; C_i , intercellular CO_2 concentration; G_s , stomatal conductance; T_r , transpiration rate; L_s , stomatal limitation; WUE , water use efficiency.

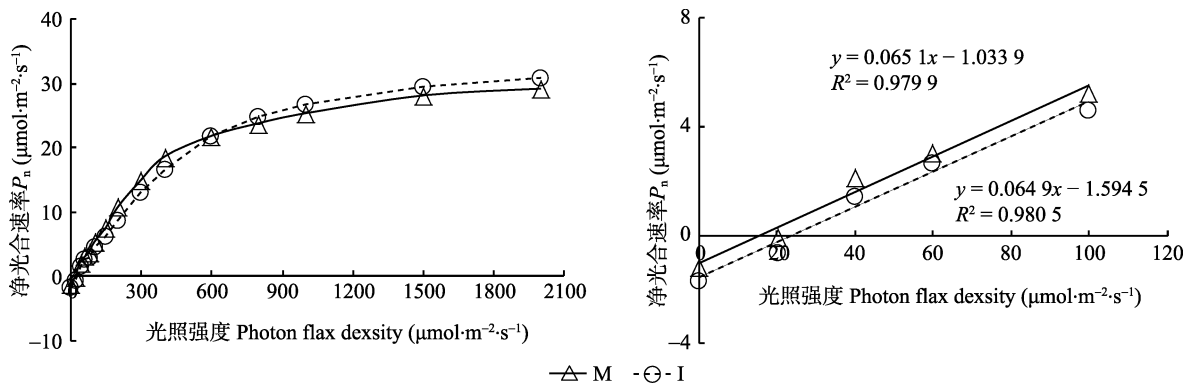


图3 单作和间作玉米叶片光响应曲线。I, 间作; M, 单作; P_n , 净光合速率。

Fig. 3 Response of net photosynthetic rate (P_n) of maize leaves to photon flux density at monoculture and intercropping planting. I, intercropping; M, monoculture.

均呈现降低趋势; 在N0、N1、N2水平, I-P的PNUE显著高于单作和I-M, 随施氮量增加, 不同种植模式PNUE之间的差异逐渐降低。

进一步分析施氮量与单作、间作I-M和间作I-P的 P_n 、 N_{area} 和PNUE之间增量的关系(表3)可知, N1、N2水平间作I-P的 P_n 增量高于单作与I-M, N3水平I-P出现负增长; 间作I-P的 N_{area} 增幅高于单作和I-M; PNUE降幅随施氮量增加呈现I-P > I-M > 单作。

3 讨论

3.1 施氮量对单作和间作玉米净光合速率的影响

施氮量与 P_n 关系的研究在诸多作物上曾有报道。本研究中, 玉米单作条件下, 当施氮量不高于N2时, P_n 随施氮量增加而增大, 从N2增加50%施氮量到N3时, P_n 维持N2时的水平。然而, 在间作条件下, 施氮量不高于N2时 P_n 随施氮量增加而增大, 但

表2 不同氮水平对单作和间作玉米叶片形态特征的影响(平均值±标准偏差)

Table 2 Effects of N levels on morphological characteristics of maize leaves grown in monoculture and intercropping pattern (mean ± SD)

| 叶片指标 Leaf indexes | 种植模式 planting pattern | 氮水平 N level (kg·hm ⁻²) | | | |
|--|--------------------------|------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | | 0 (N0) | 125 (N1) | 250 (N2) | 375 (N3) |
| 叶面积 Leaf area (cm ² ·leaf ⁻¹) | M | 308 ± 14 ^{Aa} | 466 ± 26 ^{Ab} | 493 ± 19 ^{Ab} | 553 ± 28 ^{Ac} |
| | I-M | 283 ± 17 ^{Aa} | 478 ± 19 ^{Ab} | 524 ± 13 ^{ABb} | 562 ± 22 ^{Ac} |
| | I-P | 394 ± 8 ^{Ba} | 498 ± 16 ^{Bb} | 549 ± 23 ^{Bc} | 576 ± 12 ^{Ac} |
| 叶干质量 Leaf dry mass (g·leaf ⁻¹) | M | 1.71 ± 0.09 ^{Aa} | 2.55 ± 0.08 ^{Ab} | 2.68 ± 0.10 ^{Ab} | 2.86 ± 0.22 ^{Ab} |
| | I-M | 1.19 ± 0.07 ^{Ba} | 2.66 ± 0.19 ^{Ab} | 2.68 ± 0.14 ^{Ab} | 3.02 ± 0.19 ^{Ac} |
| | I-P | 1.44 ± 0.11 ^{ABa} | 2.90 ± 0.16 ^{Bb} | 3.30 ± 0.28 ^{Bb} | 3.62 ± 0.10 ^{Bc} |
| 比叶质量 LMA (g·m ⁻²) | M | 55.72 ± 3.97 ^{Aa} | 54.90 ± 4.22 ^{Aa} | 54.41 ± 1.87 ^{Aa} | 51.82 ± 4.94 ^{Aa} |
| | I-M | 42.42 ± 5.11 ^{Ba} | 58.33 ± 2.16 ^{Abc} | 63.00 ± 3.86 ^{Bb} | 53.78 ± 4.60 ^{Ac} |
| | I-P | 36.65 ± 2.07 ^{Ba} | 55.59 ± 4.78 ^{Abc} | 62.75 ± 2.21 ^{Bc} | 48.82 ± 3.76 ^{Bb} |
| 单位质量含氮量 N_{mass} (g·kg ⁻¹) | M | 14.55 ± 1.30 ^{Aa} | 21.62 ± 1.04 ^{Ab} | 31.02 ± 0.89 ^{Ac} | 34.04 ± 1.15 ^{Ac} |
| | I-M | 15.99 ± 0.71 ^{Aa} | 23.78 ± 1.03 ^{Ab} | 31.17 ± 0.76 ^{Ac} | 34.08 ± 0.80 ^{Ac} |
| | I-P | 18.68 ± 0.86 ^{Ba} | 24.86 ± 0.66 ^{Ab} | 32.97 ± 1.23 ^{Ac} | 37.12 ± 0.49 ^{Ac} |
| 单位面积含氮量 N_{area} (mg·cm ⁻²) | M | 0.42 ± 0.05 ^{Aa} | 0.62 ± 0.01 ^{Ab} | 0.84 ± 0.06 ^{Abc} | 0.89 ± 0.06 ^{Ac} |
| | I-M | 0.34 ± 0.03 ^{Aa} | 0.69 ± 0.08 ^{Ab} | 0.82 ± 0.06 ^{Ac} | 0.92 ± 0.06 ^{Ac} |
| | I-P | 0.36 ± 0.03 ^{Aa} | 0.72 ± 0.05 ^{Ab} | 0.91 ± 0.01 ^{Ac} | 0.93 ± 0.02 ^{Ac} |
| 光合氮利用效率 PNUE (CO ₂ μmol·g ⁻¹ ·s ⁻¹) | M | 49.85 ± 5.24 ^{Aa} | 32.57 ± 0.48 ^{Ab} | 32.73 ± 2.37 ^{Ab} | 32.01 ± 2.39 ^{Ab} |
| | I-M | 64.71 ± 6.25 ^{Ba} | 31.53 ± 2.03 ^{Ab} | 28.65 ± 0.23 ^{Ab} | 26.32 ± 5.41 ^{Ab} |
| | I-P | 75.58 ± 5.38 ^{Ca} | 47.14 ± 5.39 ^{Bb} | 39.29 ± 5.40 ^{Bc} | 30.28 ± 2.06 ^{Ad} |

不同小写字母代表同一种模式下的不同氮水平间差异显著($p < 0.05$)。不同大写字母代表同一施氮水平下间作和单作之间差异显著($p < 0.05$)。I-M, 靠近玉米侧玉米叶片; I-P, 靠近马铃薯侧玉米叶片; M, 单作; LMA, 比叶质量; N_{mass} , 单位质量含氮量; N_{area} , 单位面积含氮量; PNUE, 光合氮利用效率。Different lowercase letters indicate significant difference among different N levels in the same planting pattern ($p < 0.05$). Different capital letters mean significant difference between monoculture and intercropping at the same N level ($p < 0.05$). I-M, intercropping maize leaves close to maize of other row; I-P, intercropping maize leaves close to potato; M, monoculture, LMA, leaf mass per area; N_{mass} , nitrogen content unit mass; N_{area} , nitrogen content per unit area; PNUE, photosynthetic nitrogen use efficiency.

表3 不同氮水平对间作玉米净光合速率(P_n)、单位面积叶片含氮量(N_{area})及光合氮利用效率(PNUE)的影响

Table 3 Effects of intercropping pattern on net photosynthetic rate (P_n), nitrogen content per unit area (N_{area}) and photosynthetic nitrogen use efficiency (PNUE) of maize leaves grown under different nitrogen levels

| 氮水平 N rate (kg·hm ⁻²) | P_n (%) | | | N_{area} (%) | | | PNUE (%) | | |
|--------------------------------------|-----------|------|------|----------------|-------|-------|----------|-------|-------|
| | M | I-M | I-P | M | I-M | I-P | M | I-M | I-P |
| 0 (N0) | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 125 (N1) | -1.8 | 4.8 | 16.2 | 50.2 | 116.5 | 86.8 | -34.7 | -51.3 | -37.6 |
| 250 (N2) | 28.8 | 18.8 | 32.5 | 98.6 | 172.1 | 158.6 | -34.3 | -55.7 | -48.0 |
| 375 (N3) | 27.6 | 28.9 | -3.0 | 101.9 | 174.9 | 173.5 | -35.8 | -59.3 | -59.9 |

表中每一列数值为该指标相对于在N0时的增减幅度百分比; 带“-”的数值表示降低, 其他数值表示增加。I-M, 靠近玉米侧玉米叶片; I-P, 靠近马铃薯侧玉米叶片; M, 单作。

The values in each column in the table were the percentage of increase or decrease of any N treatment compared with N0. The value with “-” indicates a decrease, and the other values indicate an increase. I-M, intercropping maize leaves close to maize of other row; I-P, intercropping maize leaves close to potato; M, monoculture.

在N2增加到N3时, 即当施氮量远远超过作物氮需求时, 表现出施氮降低了 P_n 的作用。先前研究指出, 在一定范围内, P_n 随叶片氮含量增加呈线性增加关系, 当高于这一含量, 则为指数关系(Bindraban, 1999; 陈永山等, 2008), 可能因为过量施氮通过非气孔限制降低 P_n (王东等, 2007), 但是相同的氮水平下单间作光合速率的响应截然不同, 这一现象未见报道, 值得后续深入研究。同时, 对比单间作玉米, 我们也发现, 间作后玉米 P_n 对施氮量的响应程度远比在单作时敏感, 即相等氮肥增加量可获得更高的 P_n 增加, 这可能正是在间作后施氮对玉米增产的贡献要高于单作的原因。

前人研究指出, 最大光合速率随叶片氮含量增加呈指数关系, 即叶片氮含量低时, 随氮含量增加快速增加, 到一定阈值时缓慢降低(张彦群等, 2015)。本研究中单作与间作I-P的 P_n 与 N_{mass} 和 P_n 与 N_{area} 之间呈先升高后降低的指数关系(数据没列出), 证明了叶片氮含量达到一定阈值后, P_n 随叶片氮含量的增加不再增加。在对小麦(*Triticum aestivum*)的研究中, 小麦叶片 N_{area} 为 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 是重要转折点(Tambussi *et al.*, 2005)。从本研究可以看出, 在玉米中, P_n 随 N_{area} 增加出现转折的 N_{area} 值大致为 $0.9 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$, 但尚需进一步的研究论证。

3.2 不同氮水平下间作对PNUE的影响

PNUE随施氮量增加而降低, 主要原因是叶片氮含量的提高幅度要远高于 P_n 的提高幅度, 导致PNUE降低(李勇, 2011), 本研究的结果与之相同。本研究中在施氮量不高于N2时, 间作叶片PNUE高于单作, 这可能与光合系统中Rubisco酶的活性及占比有关(Cheng & Fuchigami, 2000)。由于间作叶片光照条件优于单作, 强光下植株的硝酸还原酶活性提高, 硝酸盐含量降低, 氮素利用效率提高, P_n 显著升高, 进而提高了PNUE (Li *et al.*, 2013)。然而施氮量达到N3水平时, 单作与间作叶片的PNUE差异不再显著, 主要原因是叶片氮含量过高导致Rubisco酶活性降低, Rubisco酶仅以氮库形式存储, 催化能力并没有得到提高(Warren *et al.*, 2003)。

3.3 施氮量-光合氮利用效率-产量之间的关系

我们的试验结果证实, 玉米马铃薯间作中随施氮量增加, 玉米的间作产量优势(LER)逐渐降低(表1)。尽管单作和间作中, 均存在加大施氮量增加了叶片氮含量, 且 P_n 又随叶片氮含量增加而变大的现

象, 但间作后叶片氮含量增加对提高 P_n 的作用越来越弱, PNUE随施氮量增加的降幅更大(表3), 这可能正是间作在高氮(N3)下间作优势更低的原因。进一步比较玉米两侧叶片的PNUE可以看出, I-P的PNUE快速下降对间作玉米产量优势逐渐降低的贡献更大。前期文献指出, 高氮条件下水稻(*Oryza sativa*) PNUE降低是由于Rubisco酶活性降低, 同时叶片氮含量的增长速度不能与 CO_2 传导度保持同步造成的(李勇, 2011)。如能进一步从提高玉米高氮下的Rubisco酶活性, 增强光合氮利用效率这一角度进行遗传改良, 对发掘间作在高氮下的产量优势意义深远。

3.4 间作中玉米两侧叶片相关参数的差异

光与氮的互作效应对光合产物的生产与分配及碳、氮代谢具有显著效应(袁野等, 2011; 关义新等, 2000)。我们的研究发现, 间作中同一株玉米的不同受光侧(I-P和I-M)含氮量和光合参数表现出较大的差异。大多情况下I-P的 P_n 大于I-M, 这间接反映出间作后玉米对强光的适应能力更高这一特征; 施氮量不高于N2时, I-P的 P_n 大于I-M, 同时我们的数据也显示I-P的 N_{area} 大于I-M (表2), 这可能因为: I-P光照强度高于I-M, 强光提高了硝酸还原酶和谷氨酸脱氢酶活性, 降低了叶片中硝酸盐含量; 进一步增施氮(N3), I-P的 P_n 优势不复存在, N_{area} 的表现也是如此, 这与先前的研究结果一致(Hikosaka, 2004; 李耕等, 2010)。

本研究中施氮量不高于N2时, I-P的PNUE大于I-M, 这与I-P光照更充足, 具有更高的 P_n 有关。当施氮量达到N3水平时, I-P的PNUE不再具有优势, 主要因为施氮量达到一定值后, P_n 不再增加, 叶片氮含量过高, 导致氮素储存于不直接参与光合的磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶(PEP_c)中, 而直接参与光合的Rubisco酶活性并没有增强, 进而导致了高氮下PNUE的降低(Ding *et al.*, 2005)。间作I-P的 P_n 和PNUE的提高是间作产量优势的主要原因, 对于高氮条件下, 如何在光合酶活性、基因表达层次提高I-P的 P_n 和PNUE是一个有趣的问题, 可深入研究。

4 结论

施氮显著提高了玉米叶片 N_{area} 和 P_n , 降低了PNUE。当施氮量不高于N2 ($250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)时, 单作和间作玉米叶片 P_n 均随施氮量增加而增大, 当施氮

量达到N3 (375 kg·hm⁻²)水平时, 单作和I-M仍然维持N2时的水平, I-P的 P_n 显著降低。在施氮量不高于N2时, I-P的 $PNUE$ 高于单作和I-M, 当施氮量达到N3水平时, 单作 $PNUE$ 不再具有显著差异; 同时随氮水平增加, $PNUE$ 降低幅度表现为I-P > I-M > 单作。玉米马铃薯间作具有明显的产量优势($LER > 1$), 但随施氮量增加间作玉米的产量优势逐渐降低, 主要原因可能是高氮条件下I-P的 P_n 和 $PNUE$ 下降。

参考文献

- Al-Dalain SA (2009). Effect of intercropping of zea maize with potato *Solanum tuberosum*, L. on potato growth and on the productivity and land equivalent ratio of potato and zea maize. *Agricultural Journal*, 4, 164–170.
- Banik P, Sharma RC (2009). Yield and resource utilization efficiency in baby corn-legume-intercropping system in the eastern plateau of India. *Journal of Sustainable Agriculture*, 33, 379–395.
- Bindraban PS (1999). Impact of canopy nitrogen profile in wheat on growth. *Field Crops Research*, 63, 63–77.
- Chen YS, Dai JF, Luo WH, Tai X, Han L, Mi XJ, Ding QF, Pu CX (2008). Quantifying the effects of leaf nitrogen concentration on the maximum leaf gross photosynthesis rate of greenhouse cucumber under different radiation and temperature conditions after flowering. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 24(7), 13–19. [陈永山, 戴剑锋, 罗卫红, 邵翔, 韩利, 米晓洁, 丁琪峰, 卜崇兴 (2008). 叶片氮浓度对温室黄瓜花后叶片最大总光合速率影响的模拟. 农业工程学报, 24(7), 13–19.]
- Cheng L, Fuchigami LH (2000). Rubisco activation state decreases with increasing mitogen content in apple leaves. *Journal of Experimental Botany*, 51, 1687–1694.
- Chu GH, Zhang JX (2016). Effects of nitrogen application on photosynthetic characteristics, yield and nitrogen use efficiency in drip irrigation of super high-yield spring maize. *Journal of Maize Sciences*, 24(1), 130–136. [楚光红, 章建新 (2016). 施氮量对滴灌超高产春玉米光合特性、产量及氮肥利用效率的影响. 玉米科学, 24(1), 130–136.]
- Ding L, Wang KJ, Jiang GM, Biswas DK, Xu H, Li LF, Li YH (2005). Effects of nitrogen deficiency on photosynthetic traits of maize hybrids released in different years. *Annals of Botany*, 96, 925–930.
- Duan WW, Li HL, Xiao K, Li YM (2007). Effects of nitrogen fertilizer on photosynthesis and its physiological and biochemical characteristics in ear-leaf of maize. *Acta Agriculture Boreali-Sinica*, 22(1), 26–29. [段巍巍, 李慧玲, 肖凯, 李雁鸣 (2007). 氮肥对玉米穗位叶光合作用及其生理生化特性的影响. 华北农学报, 22(1), 26–29.]
- Evans JR (1983). Nitrogen and photosynthesis in the flag leaf of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiology*, 72, 292–302.
- Furbank RT, Foyer CH, Walker DA (1987). Regulation of photosynthesis in isolated spinach chloroplasts during orthophosphate limitation. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)—Bioenergetics*, 894, 552–561.
- Ghallnoum O, Evans JR, Chow WS, Andrews TJ, Conroy JP, von Caemmerer S (2005). Faster Rubisco is the key to superior nitrogen-use efficiency in NADP-malic enzyme relative to NAD-malic enzyme C₄ grasses. *Plant Physiology*, 137, 638–650.
- Guan YX, Lin B, Ling BY (2000). The interactive effects of growth light condition and nitrogen supply on maize (*Zea mays* L.) seedling photosynthetic traits and metabolism of carbon and nitrogen. *Acta Agronomica Sinica*, 26, 806–812. [关义新, 林葆, 凌碧莹 (2000). 光、氮及其互作对玉米幼苗叶片光合和碳、氮代谢的影响. 作物学报, 26, 806–812.]
- Huang JY, Li XP, Sun DL (2003). Ecophysiological effects of multiple cropping of winter wheat-spring corn-summer corn in Huanghuaihai Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 14, 51–56. [黄进勇, 李新平, 孙敦立 (2003). 黄淮海平原冬小麦-春玉米-夏玉米复合种植模式生理生态效应研究. 应用生态学报, 14, 51–56.]
- Hikosaka K (2004). Interspecific difference in the photosynthesis-nitrogen relationship: Patterns, physiological causes, and ecological importance. *Journal of Plant Research*, 117, 481–494.
- Jiao NY, Ning TY, Yang MK, Fu GZ, Yin F, Xu GW, Li ZJ (2013a). Effects of maize || peanut intercropping on photosynthetic characters and yield forming of intercropped maize. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 4324–4330. [焦念元, 宁堂原, 杨萌珂, 付国占, 尹飞, 徐国伟, 李增嘉 (2013a). 玉米花生间作对玉米光合特性及产量形成的影响. 生态学报, 33, 4324–4330.]
- Jiao NY, Yang MK, Ning TY, Yin F, Xu GW, Fu GZ, Li YJ (2013b). Effects of maize-peanut intercropping and phosphate fertilizer on photosynthetic characteristics and yield of intercropped peanut plants. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 37, 1010–1017. [焦念元, 杨萌珂, 宁堂原, 尹飞, 徐国伟, 付国占, 李友军 (2013b). 玉米花生间作和磷肥对间作花生光合特性及产量的影响. 植物生态学报, 37, 1010–1017.]
- Li DD, Tian MY, Cai J, Jiang D, Cao WX, Dai TB (2013). Effects of low nitrogen supply on relationships between photosynthesis and nitrogen status at different leaf position in wheat seedlings. *Plant Growth Regulation*, 70, 257–263.
- Li DY, Chen ZY, Xu KZ, Zhang ZA, Wu ZH, Ji P, Zhang P (2013). Changes of nitrogen content in leaf and its correlations with net photosynthetic rate of soybean cultivars released in different years. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 35, 171–178. [李大勇, 陈展宇, 徐克章, 张治安, 武志海, 季平, 张鹏 (2013). 不同年代大豆品种叶片氮含量及其与净光合速率的关系. 中国油料作物学报, 35, 171–178.]
- Li G, Gao HY, Liu P, Yang JS, Dong ST, Zhang JW, Wang JF (2010). Effects of nitrogen fertilization on photosynthetic performance in maize leaf at grain filling stage. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 16, 536–542. [李耕, 高辉

- 远, 刘鹏, 杨吉顺, 董树亭, 张吉旺, 王敬锋 (2010). 氮素对玉米灌浆期叶片光合性能的影响. *植物营养与肥料学报*, 16, 536–542.]
- Liu T, Lu JW, Ren T, Li XK, Cong RH (2016). Relationship between photosynthetic nitrogen use efficiency and nitrogen allocation in photosynthetic apparatus of winter oil-seed rape under different nitrogen levels. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 22, 518–524. [刘涛, 鲁剑巍, 任涛, 李小坤, 丛日环 (2016). 不同氮水平下冬油菜光合氮利用效率与光合器官氮分配的关系. *植物营养与肥料学报*, 22, 518–524.]
- Li Y (2011). *Studies on Mechanisms of the Effects of Photosynthesis and photosynthetic Nitrogen Use Efficiency of Rice Plants*. PhD dissertation, Nanjing Agricultural University, Nanjing. [李勇 (2011). 氮素营养对水稻光合作用与光合氮素利用率的影响机制研究. 博士学位论文, 南京农业大学, 南京.]
- Lü LH, Zhao M, Zhao JR, Tao HB, Wang P (2008). Canopy structure and photosynthesis of summer maize under different nitrogen fertilizer application rates. *Scientia Agricultura Sinica*, 41, 2624–2632. [吕丽华, 赵明, 赵久然, 陶洪斌, 王璞 (2008). 不同施氮量下夏玉米冠层结构及光合特性的变化. *中国农业科学*, 41, 2624–2632.]
- Ma XL, Zhu QL, Geng CX, Lu ZG, Long GQ, Tang L (2017). Contribution of nutrient uptake and utilization on yield advantage in maize and potato intercropping under different nitrogen application rates. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 28, 1265–1273. [马心灵, 朱启林, 耿川雄, 鲁泽刚, 龙光强, 汤利 (2017). 不同氮水平下作物养分吸收与利用对玉米马铃薯间作产量优势的贡献. *应用生态学报*, 28, 1265–1273.]
- Mushagalusa GN (2008). Shoot and root competition in potato/maize intercropping: Effects on growth and yield. *Environmental & Experimental Botany*, 64, 180–188.
- Pal M, Rao LS, Jain V, Srivastava AC, Pandey R, Raj A, Singh KP. (2005). Effects of elevated CO₂ and nitrogen on wheat growth and photosynthesis. *Biologia Plantarum*, 49, 467–470.
- Shen LX, Wang P, Zhang RB (2005). Effect of nitrogen supply on yield and grain filling in summer maize with different crop density. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 11, 314–319. [申丽霞, 王璞, 张软斌 (2005). 施氮对不同种植密度下夏玉米产量及籽粒灌浆的影响. *植物营养与肥料学报*, 11, 314–319.]
- Song H, Yang Y, Zhou WX, Zhang YQ, Li HP, Li CH (2017). Effects of light, nitrogen and their interaction on photosynthetic traits and matter accumulation of maize. *Journal of Maize Sciences*, 25(1), 121–126. [宋航, 杨艳, 周卫霞, 张勇强, 李鸿萍, 李潮海 (2017). 光、氮及其互作对玉米光合特性与物质生产的影响. *玉米科学*, 25(1), 121–126.]
- Sun NX, Zong XF, Wang SG (2005). Effects of nitrogen supply on photosynthetic traits of maize. *Journal of Southwest Agricultural University (Natural Science)*, 27, 389–392. [孙年喜, 宗学风, 王三根 (2005). 不同供氮水平对玉米光合特性的影响. *西南农业大学学报(自然科学版)*, 27, 389–392.]
- Tambussi EA, Nogués S, Araus JL (2005). Ear of durum wheat under water stress: Water relations and photosynthetic metabolism. *Planta*, 221, 446–458.
- Vos J, Pelvander P (2001). Effects of partial shading of the potato plant on photosynthesis of treated leaves, leaf area expansion and allocation of nitrogen and dry matter in component plant parts. *European Journal of Agronomy*, 14, 209–220.
- Wang D, Yu ZW, Li YQ, Shi GP (2007). Effects of nitrogen fertilizer rate on photosynthetic character, sucrose synthesis in flag leaves and grain yield of strong gluten wheat Jimai 20. *Acta Agronomica Sinica*, 33, 903–908. [王东, 于振文, 李延奇, 史桂萍 (2007). 施氮量对济麦20旗叶光合特性和蔗糖合成及籽粒产量的影响. *作物学报*, 33, 903–908.]
- Wang S, Yang JF, Han XR, Liu XH, Zhan XM, Liu SG (2008). Effect of fertilizer application on photosynthetic traits of spring maize. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, (6), 23–27. [王帅, 杨劲峰, 韩晓日, 刘小虎, 战秀梅, 刘顺国 (2008). 不同施肥处理对旱作春玉米光合特性的影响. *中国土壤与肥料*, (6), 23–27.]
- Warren CR, Dreyer E, Adams MA (2003). Photosynthesis-Rubisco relationships in foliage of *Pinus sylvestris* in response to nitrogen supply and the proposed role of Rubisco and amino acids as nitrogen stores. *Tree*, 17, 359–366.
- Xiao JP, Xie WQ, Guo HC (2011). Characteristics of photosynthesis and yield in potato intercropping with maize. *Chinese Potato*, 25, 339–341. [肖继坪, 颀炜清, 郭华春 (2011). 马铃薯与玉米间作群体的光合及产量效应. *中国马铃薯杂志*, 25, 339–341.]
- Yan YH, Yang WY, Zhang XQ, Chen XL, Chen ZQ (2011). Effects of different nitrogen levels on photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and yield of relay strip intercropping *Glycine max* after blooming. *Acta Prataculturae Sinica*, 20, 233–238. [闫艳红, 杨文钰, 张新全, 陈小林, 陈忠群 (2011). 施氮量对套作大豆花后光合特性、干物质积累及产量的影响. *草业学报*, 20, 233–238.]
- Yang LF, Yan JJ, Cai ZC (2010). Effects of N-applications and photosynthesis of maize (*Zea mays* L.) on soil respiration and its diurnal variation. *Frontiers of Agriculture in China*, 4, 42–49.
- Yuan Y, Wu FZ, Zhou XG, Zhang LZ (2011). Interactive effect of light intensify and nitrogen supply on photosynthetic characteristics of tomato. *Crops*, 1(1), 13–16. [袁野, 吴凤芝, 周新刚, 张丽苗 (2011). 光氮互作对番茄光合特性的影响. *作物杂志*, 1(1), 13–16.]
- Zhang YQ, Wang JD, Gong SH, Sui J (2015). Photosynthetic response of yield enhancement by nitrogen fertilization in winter wheat fields with drip irrigation. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31(6), 170–177. [张彦群, 王建东, 龚时宏, 隋娟 (2015). 滴灌条件下冬小麦施氮增产的光合生理响应. *农业工程学报*, 31(6), 170–177.]

