

门思润,朱列书,彭 妙. 磷肥类型及施用量对烤烟光合特性的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(9):76-79.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.09.016

磷肥类型及施用量对烤烟光合特性的影响

门思润,朱列书,彭 妙

(湖南农业大学,湖南长沙 410128)

摘要:研究烤烟叶绿素相对含量及叶片各光合指标的变化规律,从而探讨湘烟 5 号光合同化过程中的磷需求规律,为湘烟 5 号的合理施肥及优质生产提供理论依据。以湘烟 5 号为材料,采用大田小区试验,设置 4 种磷肥种类的不同施磷水平,不施磷为对照组,观测光合指标的变化。研究表明:各磷肥处理下叶绿素含量变化呈单峰曲线,旺长期达到最大值,成熟期迅速降低。叶绿素相对含量表现为高磷 > 低磷,当施用过磷酸钙时叶绿素含量表现最佳;除施用混合磷肥外,净光合速率表现为中磷 > 高磷 > 低磷。蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)不同生育期内均表现为先升高后降低的规律。施用钙镁磷肥和过磷酸钙时各时期光合指标明显优于其他磷肥,且随施磷量增加呈上升趋势。种植时以施用过磷酸钙 108 kg/hm^2 、混合磷肥 $108 \sim 144\text{ kg/hm}^2$ 对提高烟叶质量效果最佳。有利于提高烟叶的光合强度,加速光合同化产物的积累。

关键词:烤烟;磷肥;类型;施用量;光合指标;化合作用;叶绿素含量

中图分类号:S572.01 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)09-0076-04

磷是继氮之后影响植物生长的第 2 位大量元素,在植物中占干质量总量的 $0.05\% \sim 0.30\%$ [1]。烟叶是烟株的营养器官及经济器官,烟株产量的形成与烟叶对光能的利用效率紧密相关。磷素与烟草叶片光合作用的各个环节都联系紧密。光合作用的基础是叶绿体,叶绿体由被膜、基质和类囊体 3 个部分组成,而磷脂是构成叶绿体被膜与类囊体膜的主要成分。NADP⁺氧化型辅酶是光合作用中的递氢体和递电子体,在物质和能量转化中起重要作用。而磷作为 NADP⁺、磷脂的组成成分,参与光合作用各阶段的物质转化与能量传递 [2]。光合作用剧烈程度受 RuBP 羧化酶再生能力和活性的

影响,而适宜的磷酸(Pi)浓度是 RuBP 羧化酶合成的必要条件之一 [3]。资料显示,缺磷条件下,类囊体膜上 ATP 合成酶活性降低,叶绿体同化力形成受到影响,从而影响磷酸丙糖含量及 RuBP 激酶的活性,阻碍 RuBP 的再生,使同化产物的运输能力降低 [4-6]。叶绿体每同化 3 分子 CO_2 即同化 1 分子 Pi,因此,间质中 Pi 含量随着光反应的进行不断下降, Pi 浓度不足,光合作用将无法正常运行 [7]。因此,磷与烟株光合作用密切相关。周开勇等研究表明,缺磷条件下,烟草光呼吸将增强。严重缺磷下,光呼吸/光合作用甚至高达 1.4 左右 [8-9]。施磷能在一定程度上抑制光呼吸,同时促使叶片从外界吸取较多的磷以满足及增强光合作用。

SPAD 值是用来衡量一株植物叶绿素相对含量的参数。SPAD 值与植物叶绿素含量相关,通过测量植物叶片的 SPAD 值变化,得出叶绿素含量的变化趋势。SPAD 值常常用来判定叶色,研究作物产量、品质,指导施肥 [10]。研究表明,磷肥的施用对植株叶绿素含量的提高有很大的促进作用,在一定

收稿日期:2017-07-29

基金项目:湖南省烟草专卖局重点项目(编号:08-12Aa04)。

作者简介:门思润(1993—),男,湖南常德人,硕士研究生,主要从事烟草栽培育种研究。E-mail:284695794@qq.com。

通信作者:朱列书,研究员,主要从事烟草栽培育种研究。E-mail:zls5888@aliyun.com。

研究[J]. 中国油料作物学报,2010,32(1):57-64,70.

[2] 武汉区域气候中心. 湖北省 2014 年 3—9 月气候趋势预测[J]. 江汉平原生态与农业气象,2013,4(10):1-2.

[3] 李金才,魏凤珍,王成雨,等. 孕穗期土壤渍水逆境对冬小麦根系衰老的影响[J]. 作物学报,2006,32(9):1355-1360.

[4] Schmall M, Thomas F M. Morphological and physiological reactions of young deciduous trees (*Quercus robur* L., *Q. petraea* [Matt.] Liebl., *Fagus sylvatica* L.) to waterlogging[J]. Plant and Soil, 2000,225(1/2):227-242.

[5] 周广生,朱旭彤. 湿害后小麦生理变化与品种耐湿性的关系[J]. 中国农业科学,2002,35(7):777-783.

[6] Pocięcha, E, Koscielnik, et al. Effects of root flooding and stage of development on the growth and photosynthesis of field bean (*Vicia faba* L.) [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2008,30(4):529-535.

[7] 张晓平,薛召东,郝冬梅,等. 亚麻耐渍的生理机制研究初探[J]. 中国麻业科学,2007,29(3):169-172.

[8] 李阳生,李清清. 淹涝胁迫对水稻生育后期的生理特性和产量性状的影响[J]. 武汉植物学研究,2000,18(2):117-122.

[9] 张学昆,陈 洁,王汉中,等. 甘蓝型油菜耐湿性的遗传差异鉴定[J]. 中国油料作物学报,2007,29(2):204-208.

[10] 刁操铨. 作物栽培学各论(南方本)[M]. 北京:中国农业出版社,1994:304-331.

[11] 陈建勋,王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州:华南理工大学出版社,2002:119-124.

[12] 宋丰萍,胡立勇,周广生,等. 渍水时间对油菜生长及产量的影响[J]. 作物学报,2010,36(1):170-176.

[13] Alseher R G, Erturk N, Heath L S. Role of super oxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants[J]. Journal of Experimental Botany, 2002,53(372):1331-1341.

范围内,叶片的叶绿素含量与光合速率呈正相关关系^[11-14]。之前关于磷对烟草光合作用影响的研究多集中在光呼吸和光合作用同化产物及分配方面,关于磷肥对烟草 SPAD 值及其他光合特性影响的研究不多。本试验通过测定植物叶绿素相对含量,研究叶绿素相对含量与磷肥施肥种类及用量水平之间的关系。同时,结合净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)等光合特性参数,根据烟草不同生育期生长特点,探索磷肥类型和施用量的最佳组合。

1 材料与方法

1.1 试验材料

田间试验于 2015 年 12 月至 2016 年 7 月在湖南农业大学中南烟草基地进行。试验田块为黏壤土,试验地地势平坦,土壤肥力均匀,排灌条件较好,种植前茬作物为水稻,试验地土壤基本理化性状如表 1。供试品种为湖南省自育烤烟品种湘烟 5 号。

表 1 供试土壤基本理化性状

土壤类型	pH 值	含量				
		有机质 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	全磷 (g/kg)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
水稻田黄土壤	6.5	28.8	89.7	0.61	20.4	109.8

1.2 试验设计及其方法

采用双因素随机区组试验,A 因素为磷肥类型,包括 4 种磷肥类型,分别为 A_1 (过磷酸钙)、 A_2 (磷酸一铵)、 A_3 (钙镁磷肥)、 A_4 [混合磷肥(50% 过磷酸钙 + 50% 钙镁磷)]。B 因素为磷肥浓度,包括 3 个磷肥浓度,分别为 B_1 (72 kg/hm²)、 B_2 (108 kg/hm²)、 B_3 (144 kg/hm²),即 N : P : K 比例分别为 B_1 (1.0 : 0.6 : 2.2)、 B_2 (1.0 : 0.9 : 2.2)、 B_3 (1.0 : 1.2 : 2.2)。对照 CK 为不施磷处理。共 13 个处理,2 次重复,共 26 个小区,采用双因素随机区组排列,每小区种植烟株 60 株。所有试验材料于 2015 年 12 月播种,2016 年 4 月移栽。基追肥按 6 : 4 施用,其中磷肥全部用作基肥。氮肥为硝酸铵与硫酸铵,施氮量为 120 kg/hm²,选用硝酸钾与农用硫酸钾作为钾肥,施钾量为 264 kg/hm²。田间具体栽培管理措施参照当地优质烟叶生产技术标准。

1.3 测定内容及方法

在团棵期(移栽 30 d)、旺长期(移栽 60 d)、成熟期(移栽 90 d),采用便携式叶绿素测定 SPAD 仪测定烟株 SPAD 值,每个处理随机选取 5 株生长正常的烟株,每株分别测量从最上边数第 4 张(代表上部叶)、第 9 张(代表下部叶),每张烟叶测定基部、中部和顶部的相对叶绿素含量(SPAD 值),求平均值。在晴朗天气的中午,采用美国产 Li-6400 便携式光合系统测量仪测定光合作用各项指标,包括净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)。

1.4 数据处理

所有数据分析、作图用 Excel 2003 和 SPSS 19.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 烟株叶绿素相对含量

由表 2 可知,随着生育期的推进,SPAD 值总体变化趋势

为先逐渐升高后急剧降低。团棵期时,SPAD 值在 36.3 ~ 42.3,均高于对照组均值(34.0),其中 A_1B_3 最大, A_4B_1 最低且任意磷肥浓度处理下的 SPAD 值均表现为 $A_1 > A_3 > A_2 > A_4$ 。进入旺长期后,SPAD 值达到最高峰。团棵期和旺长期时,在任意磷肥浓度下施用过磷酸钙后的 SPAD 值明显优于其他组;进入成熟期后,各组 SPAD 值迅速下降,其中施用过磷酸钙组在各浓度条件下的 SPAD 值均低于其他磷肥组。成熟期,各组 SPAD 值迅速下降,含量大表现为 $A_2 > A_3 > A_4 > A_1$ 。这是由于随着叶片成熟,烟叶内叶绿素迅速分解,含量随之减少。同时,施磷组的 SPAD 值明显低于不施磷的对照组均值(26.8)。 A_1 组下降幅度最大,组内不同浓度间分别下降 22.7、23.6、26.1,说明 A_1 组处理内烟株成熟速度最快。

表 2 不同处理对烟株 SPAD 值影响

移栽时间 (d)	磷浓度	SPAD 值			
		A_1	A_2	A_3	A_4
30	B_1	38.8	37.7	37.7	36.3
	B_2	40.0	38.4	39.2	37.5
	B_3	42.3	38.0	38.8	37.5
60	B_1	43.9	41.6	40.0	35.4
	B_2	42.9	43.5	41.0	40.0
	B_3	45.4	43.1	42.4	41.9
90	B_1	21.2	28.6	28.2	24.9
	B_2	18.7	24.8	23.8	20.8
	B_3	19.3	22.1	23.4	21.3

注:移栽后 30、60、90 d 的 CK 的 SPAD 值分别为 34.0、37.4、26.8。

磷肥类型一致时,团棵期 A_1 、 A_4 组内 SPAD 值随着施磷量增加而上升, A_2 、 A_3 组呈现“ $B_2 > B_3 > B_1$ ”的规律;旺长期各组内均表现为高磷大于低磷;成熟期 A_1 、 A_4 组表现为 $B_1 > B_3 > B_2$, A_2 、 A_3 组表现为 $B_1 > B_2 > B_3$ 。说明适当增加磷肥用量,可加速叶绿素的分解,促使烟叶成熟。

2.2 烟株光合特性参数

2.2.1 烟株叶片净光合速率 由表 3 可知,随着烟株生育期的推进,净光合速率呈逐渐下降的趋势。从团棵期进入旺长期净光合速率仅略微下降,进入成熟期降低幅度加大,这与 SPAD 值变化有较小差异。相同适宜磷浓度条件下,团棵期与旺长期均为 $A_4 > A_1 > A_3 > A_2$,组间差异明显;成熟期大体为 $A_1 > A_4 > A_3 > A_2$ 。总体而言, A_1 和 A_4 组内的净光合速率较高,烟株在施用这 2 种磷肥时光合积累最多。

表 3 不同处理对烟株叶片净光合速率的影响

移栽时间 (d)	磷浓度	净光合速率[$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]			
		A_1	A_2	A_3	A_4
30	B_1	21.66	18.41	18.98	23.69
	B_2	24.34	19.86	22.61	24.76
	B_3	23.51	19.13	22.35	24.88
60	B_1	19.21	17.11	17.06	20.61
	B_2	22.50	17.91	19.85	22.59
	B_3	21.46	17.77	19.66	23.41
90	B_1	15.83	13.46	13.43	16.09
	B_2	17.26	14.61	14.94	16.88
	B_3	16.17	13.84	14.03	16.72

注:移栽后 30、60、90 d CK 的净光合速率分别为 18.04、16.23、10.56 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

同一磷肥类型条件下,团棵期(除 A₄ 组外)不同浓度间净光合速率均为 B₂ > B₃ > B₁。旺长期时,A₁、A₂、A₃ 磷浓度和 P_n 关系与前期表现一致,说明 A₁、A₂、A₃ 组在 B₂ 浓度下光合积累能力最强。团棵期和旺长期时,A₄ 组则随着施磷量增加,烟叶光合积累能力逐渐上升,在 B₃ 时最高;进入成熟期后,A₄ 组随磷浓度增加也表现出先增后减的趋势,在 B₂ 时最高。说明随着烟叶的成熟,烟叶内含物逐渐被分解,叶绿素含量急剧下降,烟叶净光合速率随之下降,但浓度间下降差异不明显。

2.2.2 烟株叶片蒸腾速率 由表 4 可知,各处理间蒸腾速率(T_r)均呈现先升高后降低的规律。团棵期,高磷 T_r 大于低磷,中磷最佳,其中 A₄ 组平均值最高,为 4.93 mmol/(m²·s),A₂ 组平均值最低,为 3.83 mmol/(m²·s)。进入旺长期后,烟株对矿物质需求加大,加之试验地气温明显升高,烟株为避免高温灼伤,蒸腾作用加强,其中施用过磷酸钙的 A₁ 组烟叶长势好,开片快,T_r 较高,平均值为 9.03 mmol/(m²·s),施用钙镁磷肥的 A₃ 组 T_r 最高,平均达 9.14 mmol/(m²·s),这可能与此组田间移栽位置有关,A₃ 组种植于试验田最南边,旁边无遮挡物,通风性最好,蒸腾速率高。成熟期由于烟叶新陈代谢速率降低,营养需求减弱,蒸腾速率有所下降,4 组成熟期 T_r 均表现为高磷 > 中磷 > 低磷;对照组由于进入成熟期较慢,T_r 水平仍较高。总体而言,不同磷肥施用量与蒸腾速率间无明显相关规律,但不同磷肥种类下 T_r 表现差异明显,其中以施用过磷酸钙和钙镁磷肥 T_r 最高。

表 4 不同处理对烟株叶片蒸腾速率的影响					
移栽时间 (d)	磷浓度	蒸腾速率[mmol/(m ² · s)]			
		A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
30	B ₁	4.39	3.35	3.68	4.47
	B ₂	5.28	4.11	3.99	5.32
	B ₃	4.91	4.02	4.23	5.01
60	B ₁	8.84	6.24	8.88	7.28
	B ₂	9.22	7.68	9.31	8.46
	B ₃	9.04	7.71	9.22	7.69
90	B ₁	5.21	4.55	5.54	5.69
	B ₂	5.86	6.14	6.05	6.41
	B ₃	6.15	6.51	6.55	6.69

注:移栽后 30、60、90 d 的 CK 的蒸腾速率分别为 3.04、6.21、5.87 mmol/(m²·s)。

2.2.3 烟株叶片气孔导度 由表 5 可知,气孔导度在各生育期变化不大,略微呈现先升高后降低的规律。团棵期 G_s 略小,可能是因为此时叶龄较低,开片未完全,气孔打开程度受限,各组内随施磷量增加,气孔导度逐渐提高,说明前期足量的磷营养有利于烟叶气孔的打开。进入旺长期后,各处理 G_s 明显上升,有利于充分吸收养分,加强光合产物的同化;同时,在同一施磷量下,A₂ 组气孔导度远低于其他组,说明磷酸一铵在各生育期中对气孔导度的影响较小。成熟期后,尽管光合速率有所降低,但由于成熟阶段外界气温过高,蒸腾作用仍处于较高水平,对 CO₂ 的吸收维持在相似水平,以致气孔导度较旺长期下降不明显。A₃ 组由于种植位置优势,旺长期后 G_s 均维持在较高水平。总体而言,不同磷肥类型 G_s 表现为 A₄ > A₁ > A₃ > A₂。磷肥类型相同时,随着施磷量增加,气孔导度有所提高。

表 5 不同处理对烟株叶片气孔导度的影响					
移栽时间 (d)	磷浓度	气孔导度[mmol/(m ² ·s)]			
		A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
30	B ₁	0.46	0.29	0.44	0.57
	B ₂	0.55	0.30	0.49	0.64
	B ₃	0.57	0.34	0.51	0.65
60	B ₁	0.67	0.47	0.79	0.74
	B ₂	0.84	0.57	0.79	0.88
	B ₃	0.76	0.42	0.81	0.84
90	B ₁	0.59	0.39	0.62	0.66
	B ₂	0.78	0.51	0.77	0.86
	B ₃	0.67	0.38	0.66	0.81

注:移栽后 30、60、90 d CK 的气孔导度分别为 0.19、0.27、0.25 mmol/(m²·s)。

2.2.4 烟株叶片胞间 CO₂ 浓度 由表 6 可知,团棵期不同磷肥类型间 C_i 表现出随施磷量增加而增加的趋势。旺长期与团棵期类似,在中磷条件下,A₁、A₃ 组 C_i 值较大。进入成熟期后,C_i 值均大幅下降。

团棵期 A₁、A₂、A₃ 组 C_i 值随施磷量增加而上升,A₄ 组先增后降,在 B₂ 时 C_i 值最大。旺长期 C_i 值处于 266.28 ~ 412.52 μL/L,最高/最低达 1.55 倍;除 A₂B₃ 外,其余所有处理较团棵期均有所升高;A₁、A₃ 组内变化规律和团棵期一致,而 A₂ 组 B₁ 最高,B₃ 最低,A₄ 组 B₁ 最高,B₂ 最低。说明当用过磷酸钙和钙镁磷作磷肥来源时,提高施磷量有利于增加烟叶 C_i 值,增强光合能力。进入成熟期 C_i 值均有所下降,但中磷处理下降幅度相对较小。说明适宜的磷肥用量能延缓成熟期烟叶 C_i 值的降低,保证光合底物的提供。

表 6 不同处理对烟株叶片胞间 CO ₂ 浓度的影响					
移栽时间 (d)	磷浓度	胞间 CO ₂ 浓度(μL/L)			
		A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
30	B ₁	316.51	297.59	294.50	299.62
	B ₂	333.54	306.57	355.24	325.51
	B ₃	356.52	326.40	384.75	304.52
60	B ₁	324.84	329.46	363.65	389.51
	B ₂	363.35	308.54	384.65	329.54
	B ₃	412.52	266.28	404.84	367.54
90	B ₁	234.65	284.45	257.54	265.84
	B ₂	256.84	265.81	279.28	274.65
	B ₃	283.67	254.84	250.49	254.28

注:移栽后 30、60、90 d CK 的胞间 CO₂ 浓度分别为 240.24、274.11、201.69 μL/L。

3 讨论

3.1 施磷对烤烟叶绿素相对含量的影响

烤烟叶绿素参与烟株光合作用,将太阳能转化成化学能贮藏在有机化合物中,其 SPDA 值能在一定程度上反映烟叶进行光合能力。试验中叶绿素含量变化呈单峰曲线,旺长期达到最大值,成熟期迅速降低,这与烟株生长状况是一致的。高守疆等根据烟草叶片缺磷时光呼吸大大增强以及其他试验结果发现,光呼吸有回补叶绿体进行光合作用所需的磷的作用^[15],此理论在本研究中得到证实。陈国林在水稻研究中也

存在类似结论,各磷肥类型中均为高磷 > 低磷,说明低磷下叶片光合作用减弱^[16]。生长早期施用过磷酸钙,SPAD 值较高,成熟期较低,这在一定程度上反映了施用该种磷肥有利于烟株正常落黄。而施用磷酸二铵时,旺长期之前叶绿素含量较低,后期相对较高,是因为此组烟株补施过量钾肥,贪青现象严重,进入成熟期较晚。

3.2 施磷对烤烟光合特性指标的影响

试验结果显示,净光合速率在移栽后 30 d 达最大值,此后逐渐下降。这可能与烟株前期生长降水充足、肥料见效快导致前期光合产物积累迅速有关。除施用混合磷肥外,其余各组均为中磷 > 高磷 > 低磷,与郭东海之前关于磷胁迫对烤烟生长影响结论^[17]一致。施用磷酸一铵组生长后期感染花叶病毒,发病率高,使得成熟期组内各光合参数明显偏低。Crafts - Brandner 等关于磷营养对于光合作用的影响研究指出,普通烟草栽培种 G28 和 KY14 叶片光合强度随磷水平的提高而提高^[18]。随着烟叶的成熟,烟叶内含物逐渐被分解,叶绿素含量急剧降低,烟叶净光合速率等指标随之下降。当施磷水平一定时,各处理表现出随生育期推进,烟叶光合作用先增强后减弱,这与崔志燕等对施磷水平对烟叶光合特性影响的试验结论^[19]基本一致。说明在适宜范围内施磷肥,可显著增强烟叶光合性能。与此结论相似,本试验中所有肥料类型中高磷处理光合强度均大于低磷。施用钙镁磷肥叶片的蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度均明显高于其他磷肥类型,且各参数随施磷量的增加而增加。

4 结论

研究表明,湘烟 5 号在类似本试验土壤环境条件下,随着生育期的推进,SPAD 值、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)总体呈现出先逐渐升高后急剧降低的趋势,其中气孔导度变化差异小。团棵期和旺长期时,在任意磷肥浓度下施用过磷酸钙后的 SPAD 值明显优于其他组;进入成熟期后,各组 SPAD 值迅速下降,其中施用过磷酸钙组在各浓度条件下的 SPAD 值均低于其他磷肥组。随烟株生育期的推进,各磷肥类型组的净光合速率在任意浓度条件下均呈现出逐渐下降趋势,进入成熟期后下降尤为明显。施用混合磷肥有利于提高净光合速率,在适磷量时达到最高。不同磷肥施用量与蒸腾速率间无明显相关规律,但不同磷肥种类下蒸腾速率差异明显,其中以施用过磷酸钙和钙镁磷肥 T_r 最高。磷酸一铵在各生育期中对气孔导度的影响较小;磷肥类型相同时,随着施磷量增加,气孔导度有所提高。不同磷肥类型间,胞间 CO_2 浓度表现出随施磷量增加而增加的趋势,当用过磷酸钙和钙镁磷肥作磷肥来源时,提高施磷量有利于增加烟叶 C_i 值,增强光合能力。

综上所述,种植时以施用过磷酸钙 108 kg/hm^2 、50% 过磷酸钙 + 50% 钙镁磷肥 ($108 \sim 144 \text{ kg/hm}^2$) 对提高烟叶质量效

果最佳,有利于提高烟叶的光合强度,加速光合同化产物的积累。

参考文献:

- [1] 王 琪,徐程扬. 氮磷对植物光合作用及碳分配的影响[J]. 山东林业科技,2005(5):59-62.
- [2] Sa T M, Israel D W. Energy status and functioning of phosphorus - deficient soybean nodules[J]. Plant Physiology, 1991, 97(3): 928-935.
- [3] Jacob J, Lawlor D W. Stomatal and mesophyll limitations of photosynthesis in phosphate deficient sunflower, maize and wheat plants[J]. Journal of Experimental Botany, 1991, 42(241): 1003-1011.
- [4] 胡 锋,黄俊丽,秦 峰,等. 植物叶绿体类囊体膜及膜蛋白研究进展[J]. 生命科学,2011,3(3):291-298.
- [5] 潘晓华,石庆华,郭进耀. 无机磷对植物叶片光合作用的影响及其机理的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报,1997,3(3):201-208.
- [6] 周 伟. 磷肥用量对烤烟生长发育及产质量的影响[D]. 长沙:湖南农业大学,2008.
- [7] 高守疆,陈升枢,李明启. 薄膜氧电极测定光合作用的 HCO_3^- 浓度问题[J]. 植物生理学报,1989(3):52-53.
- [8] 周开勇,陈升枢,李明启. 不同磷营养水平对烟草叶片光合作用和光呼吸的影响[J]. 分子植物(英文版),1993,19(1):3-8.
- [9] 刘雪松,刘贞奇,赵德刚,等. 烤烟成熟过程中光合特性的变化[J]. 贵州农学院学报,1991,10(1):1-6.
- [10] 艾天成,李方敏,周治安,等. 作物叶片叶绿素含量与 SPAD 值相关性研究[J]. 湖北农学院学报,2000,20(1):6-8.
- [11] Mae T. Physiological nitrogen efficiency in rice: nitrogen nutilization, photosynthesis and yield potential[J]. Plant and Soil, 1997, 196(2):201-210.
- [12] 岳寿松,于振文. 磷对冬小麦后期生长及产量的影响[J]. 山东农业科学,1994(1):13-15.
- [13] 徐洪文,卢 妍,朱先灿. 丛枝菌根对玉米叶片 SPAD 值及光合作用光响应特征的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(11):119-121.
- [14] 杨荣超,田海清,李 斐,等. 基于甜菜冠层高光谱红边参数的 SPAD 值诊断[J]. 江苏农业科学,2017,45(11):153-156.
- [15] 高守疆,陈升枢,李明启. 不同磷营养水平对烟草叶片光合作用和光呼吸的影响[J]. 植物生理学报,1989,15(3):281-287.
- [16] 陈国林. 水稻节水灌溉的生理生态效应研究[J]. 江西农业大学学报,1996,18(2):160-166.
- [17] 郭东海. 不同烤烟品种对磷胁迫的生理响应[D]. 长沙:湖南农业大学,2014.
- [18] Crafts - Brandner S J, Salvucci M E, Sims J L, et al. 磷营养对烟草植株生长和非结构碳水化合物积累的影响[J]. 中国烟草,1992(2):43-49.
- [19] 崔志燕,陈富彩,张 玲,等. 不同施磷水平对烟叶氮磷钾含量、光合特性和产质量的影响[J]. 河南农业大学学报,2016,50(2):171-175