

施氮对旱地冬小麦旗叶衰老及其 活性氧代谢的影响

高茂盛^a, 吴清丽^b, 廖允成^b, 温晓霞^b

(西北农林科技大学 a. 林学院, b. 农学院, 陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 【目的】揭示施氮量对冬小麦旗叶叶片衰老及其活性氧代谢的影响, 为冬小麦的合理施氮提供理论依据。【方法】设置 4 个施氮梯度(0, 138, 276 和 345 kg/hm²), 测定分析各施氮处理冬小麦旗叶叶绿素和丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性及可溶性蛋白质含量等指标的变化规律。【结果】在小麦开花后各时期, 4 个施氮处理中, 以 276 kg/hm² 处理冬小麦旗叶叶绿素含量最高, 叶片衰老迟缓, 代谢强度降低缓慢, 过氧化程度低, 其他处理较 276 kg/hm² 处理叶绿素含量及衰老指标等均有所下降。【结论】适量施氮(276 kg/hm²)可提高冬小麦旗叶叶绿素和可溶性蛋白质含量及 SOD 和 CAT 活性、降低膜脂过氧化程度, 过量施氮(345 kg/hm²)反而促进了冬小麦旗叶的衰老。

【关键词】 过量施肥; 冬小麦; 活性氧代谢; 旗叶

【中图分类号】 S512.1⁺10.62

【文献标识码】 A

【文章编号】 671-9387(2009)06-0073-06

Aging of Winter wheat flag leaves and oxygen metabolism under nitrogen provision

GAO Mao-sheng^a, WU Qing-li^b, LIAO Yun-cheng^b, WEN Xiao-xia^b

(a. College of forest, b. College of Agronomy, Northwest A&F
University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 The study was to promulgate the aging changes of Winter wheat flag leaves and oxygen metabolism under nitrogen provision. 【Method】 The experiment investigated the chlorophyll contents, photosynthetic rates, MDA content, SOD and POD activities and solvable protein content in the flag leaves of winter wheat at different rates of nitrogen provision(0, 138, 276 and 345 kg/hm²). 【Result】 Each time after flowering, the chlorophyll contents of the flag leaf were the highest, leaf senescence was postponed, metabolism intensity reduced slowly and the peroxidation degree was low when the amount of the nitrogen-provision was 276 kg/hm². The chlorophyll content and the senile target and so on were not as good as the treatments in which the nitrogen-provision was 0, 138, 345 kg/hm². 【Conclusion】 Right amount of nitrogen provision(276 kg/hm²) raises the chlorophyll content, the soluble protein content, the SOD and CAT activities, reduces the peroxidation degree of the membrane fat, and over nitrogen-provision(345 kg/hm²) promotes the leaf senescence of winter wheat.

Key words: over nitrogen-provision; Winter wheat; activate oxygen; flag leaf

* [收稿日期] 2008-09-12

[基金项目] 国家自然科学基金项目(30671227, 30300213); 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD15B06); 陕西省自然科学基金项目(2006C104, 2005C105); 西北农林科技大学“青年学术骨干支持计划”项目; 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-07-0700)

[作者简介] 高茂盛(1986—), 男, 内蒙古呼和浩特市土左旗人, 在读博士, 主要从事农业资源利用及高效农作制度研究。
E-mail: hsgms@163.com

[通信作者] 廖允成(1969—), 男, 安徽六安人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业资源利用及农业生态研究。
E-mail: yunchengliao@163.com

小麦冠层叶片的功能状况决定着籽粒灌浆物质的生产与积累,小麦生育后期根系和叶片的早衰,是影响产量的重要因素之一^[1]。大量的研究表明,小麦在衰老过程中,叶片叶绿素含量显著下降,各种抗氧化酶(超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT))活力也下降,导致体内产生与清除活性氧的动态平衡被打破,使氧自由基大量积累,引起生物大分子损伤,从而影响光合作用的正常进行,净光合速率明显降低,叶片迅速衰老^[2-6]。在植物衰老过程中,活性氧积累对植物产生伤害的一个重要机制是,活性氧直接或间接地启动膜脂的过氧化作用,导致膜损伤或破坏,引起膜脂过氧化产物丙二醛(MDA)含量增加^[7]。因此,活性氧代谢失调是引起作物叶片早衰的重要原因^[8]。

有研究表明,合理施肥能延缓植物叶片早衰,使叶片在植物发育后期能保持较高的光合性能^[9-11]。追施氮肥可提高 SOD 活性,降低叶片 MDA 含量,延缓衰老,有利于籽粒灌浆^[12-13];合理施氮是调控植物早衰的重要途径之一^[14]。但有关梯度施氮,特别是过量施氮对冬小麦旗叶衰老及活性氧代谢特性影响的研究,尚未见详细报道。鉴于此,本研究设置了 4 个施氮梯度,检测不同施氮水平下冬小麦旗叶的 SOD 和 CAT 活性及叶绿素、MDA 和可溶性蛋白质含量,以期揭示不同施氮量对冬小麦生长发育的影响,为冬小麦的合理施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2007-10 在西北农林科技大学农作一站进行,该站位于渭河三道台塬地区(东经 108°24',北纬 34°20',海拔 521 m),气候属于典型的半湿润气候,代表了陕西关中平原地区的气候资源。供试冬小麦品种为西农 9814。试验地土壤 pH 值为 7.35,0~40 cm 土壤基本肥力状况为:有机质 9.28 g/kg,速效氮 11.53 mg/kg,速效钾 113.48 mg/kg,速效磷 6.32 mg/kg。

试验共设 4 个施氮(纯氮)梯度,分别为 0,138,276 和 345 kg/hm²,分别以 T1、T2、T3 和 T4 表示,肥料种类为尿素(含 N 量 46%),小区面积 20.4 m²(长 6.8 m,宽 3 m),重复 3 次,完全随机排列。各处理均以过磷酸钙作底肥,用量为 1 500 kg/hm²,其他栽培管理措施同高产田。

1.2 测定项目与方法

在小麦开花期,选择同一天开花、生长基本一致

且无病虫害的小麦主茎挂牌标记,之后从第 6 天开始,每隔 6 d 于上午 8:00 采样,每小区取具有代表性的标记植株主茎旗叶各 6 片。所采样品及时放入冰壶,带回实验室,洗净叶片表面的尘土和污物并用吸水纸小心擦干,去除叶脉,剪碎混匀,用于测定各项指标,重复 3 次。

1.2.1 叶绿素含量 在分析天平上准确称取 0.05 g 剪碎的样品,用体积分数 80%丙酮研磨并定容至 10 mL,待样品完全退色后,以体积分数 80%丙酮作空白调零,在分光光度计上分别于 645 和 663 nm 处测定样品光密度,按 Inskeep 法^[15]计算叶绿素含量。

1.2.2 酶活性 取 0.500 g 剪碎的样品,置预冷研钵中,加 50 mmol/L 冷磷酸盐缓冲液(pH 7.8)10 mL,在冰浴中研磨提取,匀浆于 2℃下 20 000 g 冷冻离心 20 min,收集上清液即为酶提取液。取酶提取液,参考文献[15],采用 Beers 和 Sizars 改进法测定 CAT 活性、NBT 光化还原法测定 SOD 活性,采用考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白质含量。

1.2.3 MDA 含量 取 2 支试管,一支管加 50 mmol/L 磷酸盐缓冲液(pH 7.8)1.5 mL(对照管),另一支管加 1.5 mL 1.2.2 节的酶提取液(反应管),各管分别加 5 g/L 硫代巴比妥酸(TBA)溶液 2.5 mL,混匀,在 100℃沸水浴上准确加热 20 min,立即置冰水浴中冷却。然后 1 800 g 离心 10 min,取上清液,用分光光度计分别在 450,532 和 600 nm 波长下,以对照管作参比,测定反应管的光密度,参考文献[15]的方法计算 MDA 含量。

1.2.4 净光合速率 在小麦开花期,各处理选择生长一致的旗叶挂牌标记,选择晴天,于上午 9:00~11:00 在人工光下测定旗叶净光合速率。试验所用仪器为 Li-6400 便携式光合作用测定仪(美国 LI-COR 公司生产),测定光强 1 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

1.2.5 产量及构成因素调查 在小麦成熟期,选取生长均匀一致的 1 m² 地上植株样进行产量构成因素调查,收获期按常规方法考种测产。

1.3 数据分析

采用 Excel、SAS8.01 及 Origin75 等软件对试验数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 施氮水平对冬小麦旗叶叶绿素含量及净光合速率的影响

叶绿素含量的高低决定了叶片光合速率的大小,其降解速率的大小,在一定程度上反映了叶片衰

老的快慢^[9]。从图 1 可以看出,各处理冬小麦旗叶绿素含量均在花后 12 d 达到最大值,之后下降,至花后 24 d 开始急剧下降,各处理花后 12~36 d 小麦旗叶绿素含量的下降幅度依次为:T1(92%)>T4(89.7%)>T2(87.8%)>T3(85%);T3 处理各期叶绿素含量均高于其他处理($P<0.05$)。说明在小麦旗叶绿素急剧下降阶段,氮肥延缓了叶绿素的降解,但过量施氮反而会加速叶绿素的降解。

由图 2 可以看出,各处理冬小麦花后旗叶净光合速率的变化趋势是一致的,均在开花期达到最大值,之后降低,花后 18 d 开始急剧下降;花后不同时间, T3 处理的旗叶净光合速率最高,且与各处理差

异达到极显著水平($P<0.01$),T1 处理小麦旗叶净光合速率最低。

花后旗叶净光合速率的下降速度,能较好地反映旗叶的衰老程度。由图 2 还可以看出,花后 12~36 d,各处理旗叶净光合速率下降幅度依次为:T1(91%)>T4(90.7%)>T2(89.7%)>T3(86.6%),T3 处理旗叶净光合速率下降速度最慢;施氮量达 345 kg/hm² 时,冬小麦花后旗叶净光合速率开始急剧下降。表明适量增加施氮量,可以延缓冬小麦旗叶净光合速率的下降,但施氮量过高反而会导致冬小麦旗叶净光合速率急剧下降。

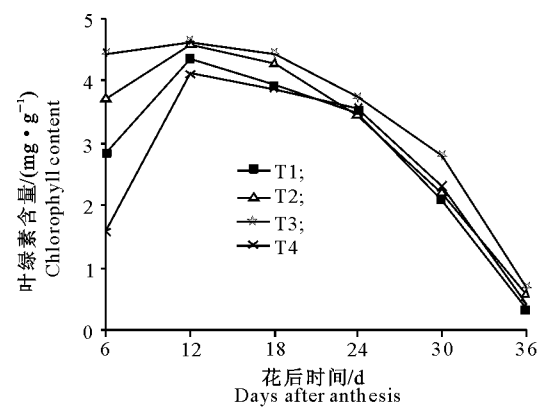


图 1 不同施氮处理对冬小麦旗叶绿素含量的影响
Fig.1 Effect of different treatments on flag leaf chlorophyll content of winter wheat

2.2 施氮水平对冬小麦旗叶 SOD 活性的影响

SOD 是植物体内消除活性氧的主要酶之一,也是生物防御膜脂过氧化物及活性氧伤害的重要保护酶之一^[16],其可以消除植物体内过多积累的氧自由基,延缓植物衰老,进而提高作物产量。施氮水平对冬小麦旗中叶 SOD 活性的影响见图 3。

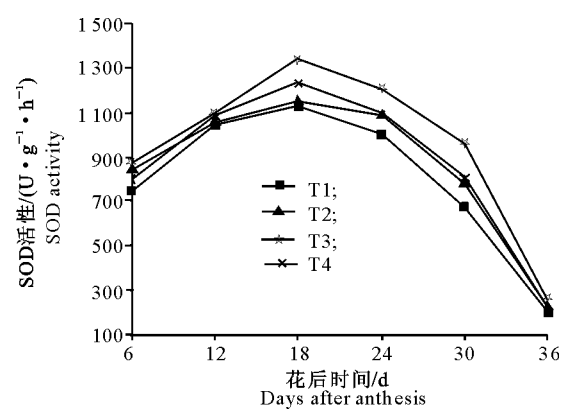


图 3 不同施氮处理对冬小麦花后旗叶 SOD 活性的影响
Fig.3 SOD activity of different treatments after anthesis

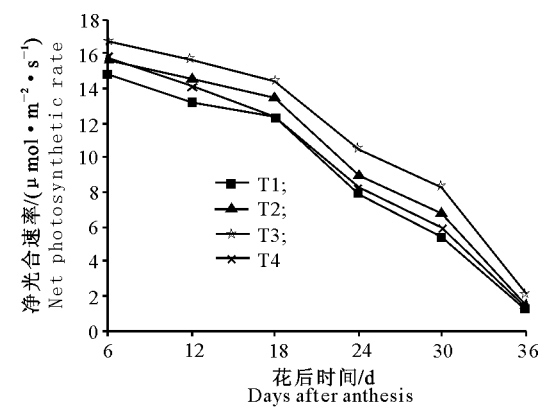


图 2 不同施氮处理对冬小麦旗叶净光合速率的影响
Fig.2 Effect of different treatments on flag leaf net photosynthetic rate of winter wheat

图 3 表明,不同施氮处理的 SOD 活性变化趋势基本一致,在花后 18 d 达到最大值,之后下降,至花后 30 d 开始迅速下降;18~36 d 各处理 SOD 活性下降幅度依次为: T3(80%)<T4(81%)<T2(81.4%)<T1(82.2%)。

由图 3 可知,施氮量由 0 kg/hm² 增加到 276 kg/hm²,冬小麦旗叶 SOD 活性显著增加;施氮量由 276 kg/hm² 增加到 345 kg/hm²,冬小麦旗叶 SOD 活性不再增加,反而有所下降,说明过量施氮反而降低了冬小麦旗叶的 SOD 活性。

2.3 施氮水平对冬小麦旗叶 CAT 活性的影响

H₂O₂ 具有强氧化性,是导致氧毒害的活性氧之一,植物组织中高浓度的 H₂O₂ 主要靠 CAT 清除^[17]。从图 4 可以看出,各处理 CAT 活性变化趋势基本一致,均随小麦成熟期的接近呈现先上升后下降的变化趋势;花后 12 d,各处理小麦旗叶 CAT 活性达到最大值,之后开始下降,至花后 24 d 开始迅速下降。24~36 d 各处理 CAT 活性下降幅度依

次为:T3(88.9%)<T4(90.1%)<T2(92.1)<T1(97.8%)。

从图 4 还可以看出,施氮量由 0 kg/hm² 增加到 276 kg/hm²,冬小麦旗叶 CAT 活性显著增加;施氮量由 276 kg/hm² 增加到 345 kg/hm²,冬小麦旗叶 CAT 活性不再增加,反而有所下降,说明过量施氮反而降低了冬小麦旗叶的 CAT 活性。

2.4 施氮水平对冬小麦旗叶 MDA 含量的影响

MDA 含量的高低,反映了叶片衰老过程中膜脂过氧化水平和质膜受损的程度^[18]。由图 5 可以看出,随着冬小麦花后生育进程的推进及植株的衰

老,各处理冬小麦旗叶 MDA 含量持续上升,花后 24 d 以前,各处理 MDA 含量增加较慢,24 d 后迅速上升,30 d 后 MDA 含量上升又变缓慢,至 36 d 时达到最大值。

由图 5 还可以看出,施氮延缓了冬小麦旗叶 MDA 含量的累积,施氮量由 0 kg/hm² 增加到 276 kg/hm²,冬小麦旗叶 MDA 含量增加缓慢;施氮量由 276 kg/hm² 增加到 345 kg/hm²,冬小麦旗叶 MDA 含量积累进程加快;花后各个时期,以 T3 处理的 MDA 含量最低,T1 最高。表明过量施氮会加速冬小麦旗叶 MDA 含量的累积。

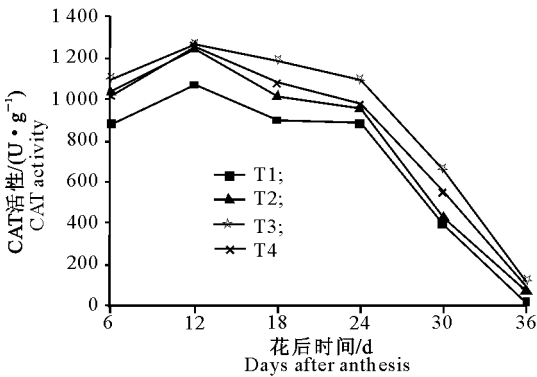


图 4 不同施氮处理对冬小麦花后旗叶 CAT 活性的影响
Fig. 4 CAT activity of different treatments after anthesis

2.5 施氮水平对冬小麦旗叶可溶性蛋白质含量的影响

施氮水平对冬小麦旗叶可溶性蛋白质含量的影响见图 6。从图 6 可以看出,各处理冬小麦花后旗叶可溶性蛋白质含量整体变化趋势基本一致,均在花后 12 d 达到最大值,之后开始下降,至成熟期降至最低,这是由于从灌浆期后开始,由于氮素向籽粒转运,旗叶可溶性蛋白质含量明显下降,至成熟期降至最低。小麦旗叶可溶性蛋白质含量,从灌浆到成熟期的下降速率决定了其衰老程度。花后 12~36 d,各处理冬小麦旗叶可溶性蛋白质含量的下降幅度依次为:T3(66.9%)<T2(73.3%)<T4(86.2%)<T1(92.9%)。

从图 6 还可以看出,施氮量由 0 kg/hm² 增加到 276 kg/hm²,花后冬小麦旗叶可溶性蛋白质含量显著增加;施氮量由 276 kg/hm² 增加到 345 kg/hm²,冬小麦旗叶可溶性蛋白质含量不再增加,反而有所下降,表明过量施氮会降低冬小麦旗叶的可溶性蛋白质含量。

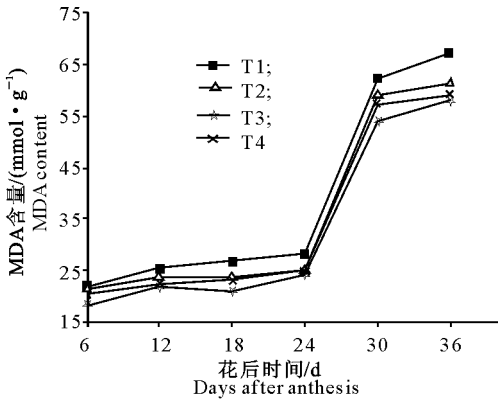


图 5 不同施氮处理对冬小麦花后旗叶 MDA 含量的影响
Fig. 5 MDA content of different treatments after anthesis

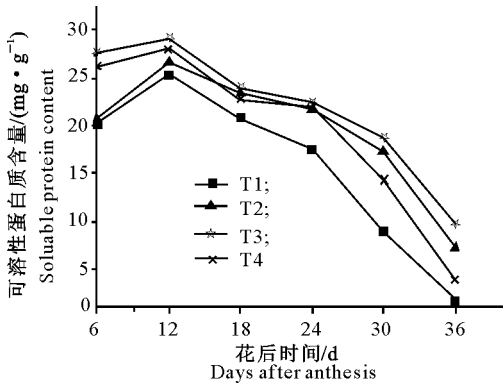


图 6 不同施氮处理对冬小麦花后旗叶可溶性蛋白质含量的影响
Fig. 6 Soluble protein content of different treatments after anthesis

2.6 施氮水平对冬小麦产量及其构成因素的影响

由表 1 可知,旗氮水平为 0~276 kg/hm² 时,冬小麦的产量、穗质量、穗粒数和千粒质量均随施氮量的增加而增大;但施氮量达 345 kg/hm² 时,冬小麦的产量、穗质量、穗粒数及千粒质量反而下降;T3 处理冬小麦产量最高,极显著高于 T2 和 T1 处理。

表 1 施氮量对冬小麦产量及产量构成因素的影响
Table 1 Effect of different nitrogen applications on grain yield and yield component

处理 Treatment	产量/(kg·hm ⁻²) Grain yield	穗质量/g Grain weight per spike	穗粒数 Grains per spike	千粒质量/g 1 000 grain weight
T1	5 999.4 cC	2.341 D	51.3 cBC	45.521 D
T2	7 099.29 bB	2.654 C	54.2 bB	48.893 C
T3	7 599.24 aA	3.171 A	58.3 aA	54.558 A
T4	7 374.26 aAB	2.809 B	52.8 bC	52.706 B

注:同列数据后标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),标不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$)。
Note:Different small letters in the same colum indicate significant difference($P<0.05$),different capital letters in the same colum indicate extremely significant difference ($P<0.01$)

3 讨 论

植物衰老的进程是活性氧代谢失调的过程,植物体在正常代谢过程中可通过多种途径产生活性氧,导致细胞伤害、酶失活,破坏 DNA 复制,从而导致胞内损伤、蛋白质合成受阻、启动膜脂过氧化连锁反应,使维护细胞区域化的膜系统受损或瓦解,加速植物叶片的衰老^[19]。冬小麦籽粒干物质的 70%~80%是在抽穗后形成的,其中 1/3 左右由旗叶供给,因此冬小麦叶片功能期的长短,尤其是开花后功能叶的寿命,对冬小麦籽粒的产量有重要影响^[20]。

本研究结果表明,不同施氮水平下,冬小麦旗叶绿素含量不同,但其变化规律基本一致,均在冬小麦生育后期开始降低,其中 T3 处理的下降速度最慢,T1 的下降速度最快。王法宏等^[16]研究表明,小麦旗叶绿素降解速度下降,光合作用增强,主要是由于小麦根系在土壤中扩展深度的增加所致。导致本试验叶绿素含量变化的可能原因是,适量的氮肥促进了根系的生长,根系在深层土壤的分布增加,从而延缓了小麦旗叶的衰老,高茂盛等^[1]的研究结果也证实了这一点。

本研究结果表明,施氮量由 0 增加到 276 kg/hm²,冬小麦旗叶保护酶活性显著增加,膜脂过氧化程度降低;施氮量由 276 kg/hm² 增加到 345 kg/hm²,冬小麦旗叶保护酶活性不再增加,反而有所下降。表明适量旋氮可延缓冬小麦旗叶的衰老进程,提高其后期保护酶活性,降低膜脂的过氧化程度,而过量施氮可降低了冬小麦旗叶保护酶的活性,鱼欢等^[21]的研究结果也证实了这一点。可见,冬小麦叶片衰老和活性氧代谢与氮肥用量关系密切,依据本研究结果,笔者建议陕西关中地区冬小麦栽培施氮量以 276 kg/hm² 为宜。

[参考文献]

[1] 高茂盛,廖允成,尹振燕,等. 麦秸还田对隔茬冬小麦根系及叶

片衰老的影响 [J]. 西北植物学报,2007,27(2):303-308.
Gao M S, Liao Y C, Yin Z Y, et al. The effect of returning wheat straw into field on the activity of root system and leaf senescence character of winter wheat [J]. Acta Bot. Boreal.-occident. Sin,2007,27(2):303-308. (in Chinese)
[2] 沈文彪,叶茂炳,徐朗莱,等. 小麦旗叶自然衰老过程中清除活性氧能力的变化 [J]. 植物学报,1997,39(7):634-640.
Shen W B, Ye M B, Xu L L, et al. Changes of ability of scavenging active oxygen during natural senescence of wheat flag leaves [J]. Acta Botanical Sinica, 1997, 39 (7): 634-640. (in Chinese)
[3] 王根轩,杨成德,梁厚果. 蚕豆叶片发育与衰老过程中超氧化物歧化酶活性与丙二醛含量变化 [J]. 植物生理学报,1989,15:13-17.
Wang G X, Yang C D, Liang H G. Changes of SOD activity and MDA content during development and senescence of broad bean leaves [J]. Acta Photophysiological Sinica, 1989, 15: 13-17. (in Chinese)
[4] 李柏林,梅慧生. 燕麦叶片衰老与活性氧代谢的关系 [J]. 植物生理学报, 1989,15:6-12.
Li B L, Mei H S. Relationship between oat leaf senescence and activated oxygen metabolism [J]. Acta Photophysiological Sinica, 1989, 15: 6-12. (in Chinese)
[5] 华春,王仁雷. 杂交稻及其三系叶片衰老过程中 SOD、CAT 活性和 MDA 含量的变化 [J]. 西北植物学报,2003,23(3):406-409.
Hua C, Wang R L. Changes of SOD and CAT activities and MDA content during senescence of hybrid rice and three lines leaves [J]. Acta Bot Boreal.-occident Sin, 2003, 23 (3): 406-409. (in Chinese)
[6] 施大伟,陈国祥,张成军,等. 两种高产小麦旗叶自然衰老过程中生理特性的比较 [J]. 西北农业学报,2005,14(2):23-26.
Shi D W, Chen G X, Zhang C J, et al. Comparison of physiological properties between two high-yield wheat varieties during flag natural senescence [J]. Acta Agriculture Boreali-occidentalis Sinica, 2005, 14 (2): 23-26. (in Chinese)
[7] 杨淑慎,高俊凤,李学俊. 高等植物叶片的衰老 [J]. 西北植物学报,2001,21(6):1271-1277.
Yang S S, Gao J F, Li X J. Leaf senescence in higher plant [J]. Acta Bot. Boreal.-occident. Sin, 2001, 21 (6): 271-277. (in Chinese)
[8] 杨淑慎,高俊凤. 活性氧、自由基与植物的衰老 [J]. 西北植物

- 学报, 2001, 21(2): 215-220.
- Yang S S, Gao J F. Influence of active oxygen and free radical-son plant senescence [J]. *Acta Bot Boreal-occident Sin*, 2001, 21(2): 215-220. (in Chinese)
- [9] 王法宏, 任德昌, 王旭清, 等. 施肥对小麦根系活性、延缓旗叶衰老及产量的效应 [J]. *麦类物学报*, 2001, 21(3): 51-54.
- Wang F H, Ren D C, Wang X Q, et al. Effect of applying fertilizer on root activity, delaying the senescence of the flag leaf and yield in winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2001, 21(3): 51-54. (in Chinese)
- [10] 姜 东, 于振文, 许玉敏, 等. 有机无机肥料配合施用对冬小麦根系和旗叶衰老的影响 [J]. *土壤学报*, 1999, 36(4): 440-447.
- Jiang D, Yu Z W, Xu Y M, et al. Effect of combined application of organic manure and fertilizers on senescence of root and flag leaf in winter wheat [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(1): 440-447. (in Chinese)
- [11] 魏道智, 宁书菊. 喷施不同复合调节剂对小麦后期衰老生理的影响 [J]. *吉林农业科学*, 2003, 28(2): 22-24.
- Wei D Z, Ning S J. Effects of spraying different compound regulators on senescence physiology of wheat during middle to late stages [J]. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2003, 28(2): 22-24. (in Chinese)
- [12] 鱼 欢, 冯伯利, 张 英, 等. 不同栽培模式下冬小麦叶片衰老与活性氧代谢研究 [J]. *作物学报*, 2007, 33(10): 1729-1732.
- Yu H, Feng B L, Zhang Y, et al. Leaf aging and reactive oxygen species metabolism of winter wheat in different cultivation modes [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(10): 1729-1732. (in Chinese)
- [13] 魏道智, 宁书菊. 拔节期追施氮肥对小麦根、叶衰老生理特性的影响 [J]. *河北农业大学学报*, 2003, 26(2): 15-19.
- Wei D Z, Ning S J. Effects of nitrogen fertilizer on the senescence physiological progress of root and leaf of wheat in elongation stage [J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2003, 26(2): 15-19. (in Chinese)
- [14] 王长发, 张嵩午. 冷型小麦旗叶衰老及活性氧代谢特性研究 [J]. *西北植物学报*, 2000, 20(5): 727-732.
- Wang C F, Zhang S W. Characteristics of flag leaf senescence and activated oxygen metabolism for cold type wheat [J]. *Acta Bot. Boreal. -occident. Sin*, 2000, 20(5): 727-732. (in Chinese)
- [15] 高俊凤. 植物生理学实验技术 [M]. 北京: 世界图书出版社, 2000.
- Gao J F. The guidance of plant physiology experiment [M]. Beijing: World Book Press, 2000. (in Chinese)
- [16] 王法宏, 王旭清, 李松坚, 等. 小麦根系扩展深度对旗叶衰老及光合产物分配的影响 [J]. *麦类物学报*, 2003, 23(1): 53-57.
- Wang F H, Wang X Q, Li S J, et al. Effect of vertical distribution of root on senescence of flag leaf and partition of dry matter in high yielding winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2003, 23(1): 53-57. (in Chinese)
- [17] Asada K, Kiso K, Yoshikawa K. Univalent reduction of molecular oxygen by spinach chloroplasts on illumination [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1974, 249: 2175-2184.
- [18] Yamaguchi J, Tanaka A. An image p processing method to measure plant roots traits [J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 1990, 36(2): 337-343.
- [19] 梁秋霞, 曹刚强, 苏明杰, 等. 植物叶片衰老研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2006, 22(8): 282-285.
- Liang Q X, Chao G Q, Shu M J, et al. Research progress on plant leaf senescence [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(8): 282-285. (in Chinese)
- [20] 高茂盛, 廖允成, 吴清丽, 等. 麦秸翻压还田对隔茬冬小麦旗叶抗性的生理效应 [J]. *生态学报*, 2007, 27(10): 4197-4202.
- Gao M S, Liao Y C, Wu Q L, et al. Physiological effects of ploughing wheat straw under soil on flag-leaf resistance of winter wheat under wheat-summer corn rotation [J]. *Acta Ecological Sinica*, 2007, 27(10): 4197-4202. (in Chinese)
- [21] 鱼 欢, 冯伯利, 邓文明, 等. 施氮量和栽培模式对旱地冬小麦旗叶衰老及其活性氧代谢的影响 [J]. *西北植物学报*, 2007, 27(10): 2065-2071.
- Yu H, Feng B L, Deng W M, et al. Winter wheat flag leaf aging and reactive oxygen species metabolism under different nitrogen and cultivation modes in dryland [J]. *Acta Bot Boreal-occident Sin*, 2007, 27(10): 2065-2071. (in Chinese)