西北林学院学报 2018,33(2):48-55
Journal of Northwest Forestry University

doi:10.3969/j.issn.1001-7461.2018.02.08

甘肃沿黄灌区枣树叶片中叶绿素年变化规律研究

胡秉芬,黄华梨*,赵晓芳,季元祖,张露荷,戚建莉,张广忠

(甘肃省林业科学研究院 林业研究所,甘肃 兰州 730020)

摘　要:为了研究枣树叶片叶绿素年变化规律,以甘肃沿黄灌区23个枣树品种为材料,运用分光光度法测定叶绿素含量,研究了枣树不同生育期叶片叶绿素a、叶绿素b、叶绿素总量和叶绿素a/b值的变化问题。结果表明,在枣树整个生育期,不同品种的叶绿素a、叶绿素b、叶绿素总量的变化趋势相同,从展叶期(5月10日)到枣晚熟期(10月9日),叶绿素含量不断增加,而叶绿素a/b值呈缓慢下降趋势;23个枣树品种叶片叶绿素a、b及总量(a+b)的年平均含量分别为3.336～4.986、0.798～1.506 mg·dm^{-2}和4.134～6.489 mg·dm^{-2},a/b的比值为3.306～4.192。所有供试枣树品种中蜂蜜罐枣和晋赞大枣的叶绿素含量较高,而新郑早红枣和小梨枣的叶绿素含量较低。方差分析结果显示,不同枣树品种在不同生育期叶绿素a、叶绿素b、叶绿素总含量和叶绿素a/b比值均存在显著的品种间差异(P<0.05),叶绿素含量受品种遗传特性的影响较大。

关键词:枣树;叶片;叶绿素;变化规律

中图分类号:S718.3　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1001-7461(2018)02-0048-08

Changes of Chlorophyll Content in Jujube Leaves in Gansu Yellow River Irrigation Area

HU Bing-fen, HUANG Hua-li*, ZHAO Xiao-fang, JI Yuan-zu, ZHANG Lu-he, QI Jian-li, ZHANG Guang-zhong

(*Forest Research Institute, Academy of Forestry Science, Lanzhou, Gansu* 730020, *China*)

Abstract: To study the regularity of chlorophyll content in jujube leaves, 23 jujube varieties in the irrigation area along the Yellow River in Gansu were tested with spectrophotometric method, the changes of chlorophyll content in leaves at different growth stages of jujube were determined, including chlorophyll a, b, a+b and a/b. The results showed that in the whole jujube growth period, the contents of chlorophyll a, b and a+b of different varieties increased gradually from the leaf stage (May 10th) to the late maturing period (October 9th), but a/b reduced slowly. The annual average contents of chlorophyll a, b and a+b in the leaves of 23 jujube varieties were about from 3.336 mg·dm^{-2} to 4.986 mg·dm^{-2}, from 0.798 mg·dm^{-2} to 1.506 mg·dm^{-2}, and from 4.134 mg·dm^{-2} to 6.489 mg·dm^{-2}, respectively, and the ratio of a/b was about from 3.306 to 4.192. In all the tested varieties, the chlorophyll contents of Mifengguanzao and Jinzan were higher, while the chlorophyll contents of Xinzhengzaohongzao and Xiaolizao were lower. The results of variance analysis showed that the chlorophyll contents of different jujube cultivars were influenced by the genetic characteristics of different varieties. There were significant differences in chlorophyll a, b, a+b and a/b ratios at different growth stages (P<0.05).

Key words: *Ziziphus jujuba*; leaf blade; chlorophyll; change regulation

叶片是植物光合作用的主要器官,叶片中的叶绿体是植物进行光合作用的细胞器,光合作用中光

收稿日期:2017-06-07　**修回日期:**2017-09-07

基金项目:林业公益性行业科研专项"甘肃沿黄灌区枣产业升级关键技术研究与示范"(201304702)。

作者简介:胡秉芬,女,博士,副研究员,研究方向:经济林育种。E-mail:bf9134hu@163.com

* **通信作者:**黄华梨,男,正高级工程师,研究方向:经济林和自然保护管理。E-mail:gshhl@hotmail.com

能的吸收、传递、转化和水裂解等过程均是在具有一定分子排列和空间构象并镶嵌于类囊体膜上的蛋白复合体中进行的。叶绿素作为色素蛋白结合的有机小分子在稳定反应中心复合体和捕光天线复合体中是必需的[1]。叶绿素 a 吸收红光较多,而叶绿素 b 吸收蓝紫光较多,二者的比例对植物吸收光能的作用也有较大影响,叶绿素就是通过影响植物的光合作用来进一步影响植物体的其他生理生化活动[2]。叶绿素含量可表征植物的光合强度[3]、发育阶段[4]和生长状况[5]及生理代谢水平和营养条件[6],叶绿素含量与作物产量性状相关[7],了解和掌握叶片的叶绿素含量变化规律是提高作物产量的理论基础。近年来,许多研究者在不同的作物上对叶片叶绿素含量的消长规律[8-10]、叶绿素含量与光合特性的关系[11-12]、叶绿素组成、a/b 比值及其遗传特性[13-14]等方面进行了大量研究,但枣树方面缺乏上述研究。为此,本研究选用甘肃沿黄灌区 23 个枣树品种为材料,运用分光光度法,测定叶片叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量(a+b)及 a/b 比值,方差分析不同枣树品种间叶绿素含量的差异,研究枣树不同发育期叶绿素含量的组成及其变化,以期揭示枣树叶片叶绿素含量的年变化规律,为当地选择优良适生枣品种提供理论参考。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验区在甘肃省白银市靖远县双龙乡黄河灌区枣园内,是甘肃省林业科学研究院在靖远县双龙乡新建的枣树示范园。示范园内枣树为 4 年生,栽植密度为 1.5 m×3 m,不同品种按顺序排列,10 株为 1 小区,植株生长健壮,树高 1~2.7 m,正常管理。该枣园地势平坦,所在地海拔 1 350 m,年平均气温 7.5℃,年平均降水量 185.6 mm。土壤为沙壤土,pH 值 8.0~8.5。

1.2　试验材料与仪器

供试材料为甘肃省林业科学研究院枣树示范园内 4 年生的 23 个枣树品种:小梨枣、新郑早红枣、葫芦枣、骏枣、尜尜枣、金谷大枣、早脆王、冷白玉、马铃脆枣、悠悠、晋矮 4 号、晋矮 3 号、六月鲜、蜂蜜罐枣、不落酥、马牙白、晋赞大枣、壶瓶枣、新星枣、甘酥佛枣、冬枣、灰枣。

仪器试剂:直径 0.346 cm=0.034 6 dm 的打孔器、带有刻度并具塞的三角瓶、紫外可见分光光度计(UV-1600PC 型,上海美谱达仪器有限公司)、1 cm 比色皿、80%丙酮、95%乙醇及乙醇-丙酮混合液(体积比 1∶1)等。

1.3　试验方法

从 2016 年 5 月 10 日开始(展叶期),每月采 1 次样,2016 年 10 月 9 日(晚熟期)最后一次取样。每个品种在枣树树冠外围中部东、西、南、北 4 个方位选取二次枝中部枣股发达的枣吊中部各采 2 片叶,擦净叶片表面污物,用打孔器沿每个枣树叶片主叶脉两侧对应部位打下 4 个小圆片(圆叶面积 $S=\pi r^2=3.14\times0.173\ \mathrm{cm}\times0.173\ \mathrm{cm}=0.375\ 9\ \mathrm{cm}^2=0.003\ 759\ \mathrm{dm}^2$),直接放入具塞三角瓶中,加入乙醇-丙酮混合液(1∶1)定容至 6 mL,封口后室温暗处浸泡提取。待材料完全变白后,取叶绿素浸提液用紫外可见分光光度计在 663 nm 和 645 nm 波长点比色测定吸光度(A),记录数据。每个品种重复试验 3 次。

1.4　指标测定方法和数据处理

分光光度法测定叶绿素含量主要依据 Arnon 公式[15],其计算方法是:分别以提取液作空白,用紫外可见分光光度计在 663 nm 和 645 nm 波长点测定吸光度(A),并计算叶绿素含量($\mathrm{mg\cdot dm^{-2}}$)。

$$\text{叶绿素 a 含量}=(12.7A663-2.69A645)\times\frac{V}{1\ 000\times W} \tag{1}$$

$$\text{叶绿素 b 含量}=(22.9A645-4.68A663)\times\frac{V}{1\ 000\times W} \tag{2}$$

$$\text{叶绿素总量}=\text{叶绿素 a 含量}+\text{叶绿素 b 含量}=(20.21A645+8.02A663)\times\frac{V}{1\ 000\times W} \tag{3}$$

式中,$A663$、$A645$ 分别为相应波长点的吸光度(A),V 为提取液的体积(mL),W 为叶面积($\mathrm{dm^2}$)。

采用 Microsoft Office Excel2003 软件处理数据,制作图表;采用 SPSS19.0 软件进行单因素方差分析和 Duncan 法多重比较,比较显著性水平设定为 $a=0.05$。

2　结果与分析

2.1　枣树不同品种不同生育期叶片叶绿素 a 含量的变化

从表 1 可以看出,不同枣树品种在不同生育期叶片叶绿素 a 含量不同,但总的变化趋势一致,各个品种叶绿素 a 含量基本上表现为前期稍低,然后逐渐升高,在生育后期较稳定的变化规律。23 个枣树品种不同生育期叶片叶绿素 a 含量的平均值也呈现这一变化趋势:2.896 $\mathrm{mg\cdot dm^{-2}}$(5 月 10 日)<3.420 $\mathrm{mg\cdot dm^{-2}}$(6 月 12 日)<3.856 $\mathrm{mg\cdot dm^{-2}}$(7 月 10 日)<4.269 $\mathrm{mg\cdot dm^{-2}}$(8 月 14 日)<4.911 $\mathrm{mg\cdot dm^{-2}}$(9 月 10 日)<4.940 $\mathrm{mg\cdot dm^{-2}}$(10 月 9

日)。但一些表现早熟的品种如孔府酥脆枣、尜尜枣、马牙白、悠悠、新郑早红枣、冬枣和甘酥佛枣在10月份生育后期叶绿素 a 开始降低。

以所有供试枣树品种在不同生育期叶片叶绿素 a 含量的平均值为对照,叶绿素 a 含量高于平均值的品种有骏枣、蜂蜜罐枣、晋赞大枣、甘酥佛枣、冬枣、六月鲜;叶绿素含量低于平均值的品种有新郑早红枣、小梨枣、早脆王、马牙白、冷白玉;其余品种孔府酥脆枣、葫芦枣、尜尜枣、金谷大枣、马铃脆枣、悠悠、晋矮 4 号、晋矮 3 号、不落酥、壶瓶枣、新星枣、灰枣的叶绿素 a 含量均与平均值相近。

对叶片叶绿素 a 含量进行方差分析和多重比较(表 1),结果显示,在同一生育期,不同品种的叶绿素 a 含量间均存在显著的品种间差异;23 个枣树品种叶片叶绿素 a 的年平均含量为 3.336~4.986 mg·dm^{-2},所有供试枣树品种叶片叶绿素 a 的年总平均含量为 4.049 mg·dm^{-2}。

表 1 不同品种枣树不同生育期叶片叶绿素 a 含量变化(mg·dm^{-2},*mean*±*SD*,*n*=3)

Table 1 Changes of chlorophyll a contents in leaves of different jujube varieties(mg·dm^{-2},*mean*±*SD*,*n*=3)

品种	5 月 10 日	6 月 12 日	7 月 10 日	8 月 14 日	9 月 10 日	10 月 9 日	平均值
新郑早红枣	2.719±0.010j	2.861±0.006p	3.378±0.010p	3.537±0.008r	3.767±0.009k	3.756±0.007r	3.336±0.007o
小梨枣	2.549±0.005n	3.377±0.005i	3.669±0.014k	3.722±0.008p	3.330±0.004l	4.016±0.006p	3.444±0.003n
孔府酥脆枣	2.723±0.008j	3.055±0.012n	3.586±0.013l	4.283±0.008jk	5.334±0.007cdef	4.969±0.004i	3.992±0.003i
葫芦枣	2.649±0.010k	2.792±0.006q	3.651±0.007k	4.405±0.006i	4.848±0.007hi	4.246±0.005n	3.765±0.003k
骏枣	3.077±0.008f	3.722±0.010e	4.044±0.013g	4.655±0.009g	5.530±0.007bc	6.265±0.012a	4.549±0.007c
尖尖枣	2.294±0.008o	3.309±0.006k	4.330±0.008d	4.503±0.007h	5.227±0.007defg	4.407±0.006l	4.012±0.003i
金谷大枣	2.579±0.008lm	2.941±0.005o	3.457±0.011o	4.189±0.006l	5.071±0.007fgh	5.787±0.008e	4.004±0.007i
早脆王	2.638±0.005k	2.756±0.019r	3.491±0.011n	3.710±0.008p	4.011±0.011jk	4.759±0.005j	3.561±0.002m
冷白玉	2.558±0.010mn	3.346±0.006j	3.539±0.010m	4.102±0.007m	3.768±0.008k	4.780±0.009j	3.682±0.002l
马铃脆枣	2.600±0.005l	3.124±0.008m	3.898±0.010i	4.697±0.010f	5.379±0.007bcde	5.591±0.009g	4.215±0.006f
悠悠	2.630±0.006k	2.644±0.004s	3.569±0.007lm	4.268±0.006k	4.822±0.417hi	4.311±0.006m	3.707±0.069l
晋矮 4 号	2.906±0.010h	3.525±0.005h	4.033±0.012g	3.731±0.005p	5.464±0.006bcd	6.176±0.006b	4.306±0.003e
晋矮 3 号	3.085±0.008f	3.629±0.006g	4.319±0.012d	3.812±0.012o	4.803±0.010hi	4.303±0.007m	3.992±0.008i
六月鲜	3.480±0.008c	3.533±0.008h	4.116±0.008f	4.730±0.007e	5.473±0.010bcd	5.623±0.008f	4.493±0.006d
蜂蜜罐枣	2.994±0.007g	4.137±0.006b	5.218±0.010a	5.625±0.005a	5.897±0.005a	6.045±0.006c	4.986±0.003a
不落酥	2.589±0.010l	3.131±0.006m	3.918±0.006hi	3.959±0.007n	5.151±0.005efg	5.606±0.006fg	4.059±0.004h
马牙白	3.157±0.005d	3.388±0.006i	2.898±0.010q	3.337±0.010s	4.800±0.006hi	3.840±0.009q	3.570±0.005m
晋赞大枣	3.550±0.009b	4.544±0.006a	4.269±0.013e	5.548±0.006b	5.634±0.008b	5.868±0.009d	4.902±0.008b
壶瓶枣	2.810±0.005i	4.117±0.006b	3.944±0.011h	4.294±0.009j	5.028±0.008gh	5.592±0.010g	4.298±0.006e
新星枣	3.083±0.005f	3.218±0.005l	2.577±0.009r	3.659±0.005q	4.600±0.007i	5.186±0.005h	3.721±0.004l
甘酥佛枣	3.616±0.008a	3.661±0.009f	4.462±0.015c	4.831±0.005d	4.135±0.006j	4.076±0.007o	4.130±0.007g
冬枣	3.176±0.004d	3.834±0.005d	4.557±0.008b	4.957±0.009c	6.137±0.005a	4.673±0.006k	4.556±0.003c
灰枣	3.134±0.005e	4.011±0.005c	3.775±0.013j	3.641±0.007q	4.735±0.005i	3.741±0.011r	3.839±0.006j
平均值	2.896±0.003f	3.420±0.002e	3.856±0.006d	4.269±0.004c	4.911±0.015b	4.940±0.005a	4.049

注:同列标有不同小写字母者表示品种间差异显著($P<0.05$)。表 2~表 4 同。

2.2 不同品种枣树不同生育期叶片叶绿素 b 含量的变化

从表 2 可以看出,不同枣树品种不同生育期叶片叶绿素 b 含量不同,变化趋势缓慢升高。23 个枣树品种不同生育期叶片叶绿素 b 含量的平均值也呈现这一变化趋势:0.699 mg·dm^{-2}(5 月 10 日)<0.817 mg·dm^{-2}(6 月 12 日)<1.047 mg·dm^{-2}(7 月 10 日)<1.15 mg·dm^{-2}(8 月 14 日)<1.379 mg·dm^{-2}(9 月 10 日)<1.435 mg·dm^{-2}(10 月 9 日)。在枣树生育后期,一些叶绿素 a 开始降低的品种孔府酥脆枣、尜尜枣、马牙白、新郑早红枣、冬枣和甘酥佛枣,它们的叶绿素 b 也有所降低。

以所有供试枣树品种在不同生育期叶片叶绿素 b 含量的平均值为对照,总体上看,叶绿素 b 含量高于平均值的品种有蜂蜜罐枣、晋赞大枣、甘酥佛枣、冬枣、六月鲜;叶绿素含量低于平均值的品种有新星枣、新郑早红枣、小梨枣、早脆王、马牙白、冷白玉;其余品种骏枣、孔府酥脆枣、葫芦枣、尜尜枣、金谷大枣、马铃脆枣、悠悠、晋矮 4 号、晋矮 3 号、不落酥、壶瓶枣、灰枣的叶绿素 b 含量均与平均值相近。与叶绿素 a 含量不同的是,骏枣的叶绿素 b 含量与平均值相近,新星枣的叶绿素 b 低于平均值。

对叶片叶绿素 b 含量进行方差分析和多重比较(表 2),结果显示,在同一生育期,不同品种的叶绿素 b 含量间均存在显著的品种间差异($P<0.05$);23个枣树品种叶片叶绿素b的年平均含量在0.798

表 2　不同品种枣树不同生育期叶片叶绿素 b 含量变化($mg \cdot dm^{-2}$, $mean \pm SD$, $n=3$)

Table 2　Changes of chlorophyll b contents in leaves of different jujube varieties($mg \cdot dm^{-2}$, $mean \pm SD$, $n=3$)

品种	5 月 10 日	6 月 12 日	7 月 10 日	8 月 14 日	9 月 10 日	10 月 9 日	平均值
新郑早红枣	0.668±0.003l	0.666±0.001q	0.755±0.002q	0.820±0.002t	0.915±0.002j	0.961±0.002u	0.798±0.002p
小梨枣	0.564±0.001p	0.703±0.001n	0.979±0.004l	0.940±0.002r	0.974±0.001ij	1.015±0.002t	0.863±0.001o
孔府酥脆枣	0.687±0.002k	0.802±0.003j	0.886±0.003n	1.182±0.002h	1.511±0.002c	1.373±0.001m	1.074±0.001i
葫芦枣	0.628±0.002n	0.550±0.001s	1.025±0.002k	1.150±0.002i	1.249±0.002f	1.140±0.001r	0.957±0.001l
骏枣	0.714±0.002i	0.845±0.002h	1.029±0.003k	1.194±0.002g	1.459±0.002cd	1.919±0.004c	1.193±0.002c
尖尖枣	0.459±0.002r	0.794±0.001k	1.086±0.002i	1.135±0.002j	1.347±0.002e	1.151±0.002q	0.996±0.001k
金谷大枣	0.701±0.002j	0.621±0.001r	0.828±0.003p	1.107±0.001k	1.357±0.002e	1.758±0.002e	1.062±0.002i
早脆王	0.660±0.001m	0.693±0.005o	0.893±0.003n	1.008±0.002p	1.020±0.003hi	1.184±0.001p	0.910±0.001n
冷白玉	0.537±0.002q	0.742±0.001m	0.874±0.002o	1.016±0.002o	1.070±0.002h	1.380±0.003l	0.937±0.000m
马铃脆枣	0.541±0.001q	0.750±0.002l	1.106±0.003h	1.213±0.003f	1.511±0.002c	1.556±0.003i	1.113±0.002g
悠悠	0.667±0.002l	0.661±0.001q	0.946±0.002m	1.191±0.002g	1.372±0.119e	1.396±0.002k	1.039±0.020j
晋矮 4 号	0.715±0.002i	0.846±0.001h	1.060±0.003j	1.090±0.002l	1.534±0.002c	1.781±0.002d	1.171±0.001d
晋矮 3 号	0.722±0.002h	0.880±0.002e	1.315±0.004d	1.044±0.003n	1.412±0.003de	1.217±0.002o	1.098±0.002h
六月鲜	0.812±0.002c	0.841±0.002h	1.120±0.002g	1.271±0.002e	1.487±0.003c	1.641±0.002g	1.195±0.001c
蜂蜜罐枣	0.734±0.002g	1.178±0.002b	1.576±0.003a	1.535±0.001b	1.913±0.002a	2.079±0.002a	1.503±0.001a
不落酥	0.609±0.002o	0.695±0.001o	1.028±0.002k	1.106±0.002k	1.406±0.001de	1.677±0.002f	1.087±0.001h
马牙白	0.817±0.001c	0.812±0.001i	0.828±0.003p	0.983±0.003q	1.395±0.002de	1.141±0.003r	0.996±0.002k
晋赞大枣	0.953±0.002a	1.328±0.002a	1.325±0.004c	1.629±0.002a	1.820±0.003b	1.979±0.003b	1.506±0.002a
壶瓶枣	0.788±0.001e	0.998±0.002c	1.093±0.003i	1.062±0.002m	1.331±0.002e	1.610±0.003h	1.147±0.002e
新星枣	0.751±0.001f	0.678±0.001p	0.625±0.002r	0.905±0.001s	1.176±0.002g	1.415±0.001j	0.925±0.001m
甘酥佛枣	0.852±0.002b	0.856±0.002g	1.214±0.004e	1.372±0.001d	1.260±0.002f	1.212±0.002o	1.128±0.002f
冬枣	0.798±0.001d	0.984±0.001d	1.335±0.002b	1.458±0.003c	1.807±0.001b	1.310±0.002n	1.282±0.001b
灰枣	0.703±0.001j	0.869±0.001f	1.165±0.004f	1.041±0.002n	1.384±0.001de	1.101±0.003s	1.044±0.002j
平均值	0.699±0.001f	0.817±0.000e	1.047±0.002d	1.150±0.001c	1.379±0.004b	1.435±0.001a	1.088

～1.506 $mg \cdot dm^{-2}$之间,其中,蜂蜜罐枣和晋赞大枣的叶绿素 b 含量最高,新郑早红枣和小梨枣的叶绿素 b 含量最低;所有供试枣树品种叶片叶绿素 b 的年总平均含量为 1.088 $mg \cdot dm^{-2}$。

2.3　不同品种枣树不同生育期叶片叶绿素总量(a+b)的变化

从表 3 可以看出,不同枣树品种不同生育期叶片叶绿素总量(a+b)的变化趋势与叶绿素 a 含量的变化趋势一致,基本上表现为生育前期稍低,然后逐渐升高,在生育后期较稳定的变化规律,23 个枣树品种不同生育期叶片叶绿素总量(a+b)的平均值也呈现这一变化趋势:3.595 $mg \cdot dm^{-2}$(5 月 10 日)＜4.237 $mg \cdot dm^{-2}$(6 月 12 日)＜4.904 $mg \cdot dm^{-2}$(7 月 10 日)＜5.420 $mg \cdot dm^{-2}$(8 月 14 日)＜6.289 $mg \cdot dm^{-2}$(9 月 10 日)＜6.374 $mg \cdot dm^{-2}$(10 月 9 日)。同叶绿素 a 一样,一些表现早熟的品种如孔府酥脆枣、尜尜枣、马牙白、悠悠、新郑早红枣、冬枣和枣甘酥佛枣在 10 月份生育后期叶绿素总量(a+b)开始降低。

以所有供试枣树品种在不同生育期叶片叶绿素总量(a+b)的平均值为对照,总体上看,叶绿素总量(a+b)高于平均值的品种有骏枣、蜂蜜罐枣、晋赞大枣、甘酥佛枣、冬枣、六月鲜;叶绿素含量低于平均值的品种有新郑早红枣、小梨枣、早脆王、马牙白、冷白玉;孔府酥脆枣、葫芦枣、尜尜枣、金谷大枣、马铃脆枣、悠悠、晋矮 4 号、晋矮 3 号、不落酥、壶瓶枣、新星枣、灰枣等品种的叶绿素 a 含量均与平均值相近。

对叶片叶绿素总量(a+b)进行方差分析和多重比较(表 3),结果显示,在同一生育期,不同品种的叶绿素总量(a+b)间均存在显著的品种间差异($P<0.05$);23 个枣树品种叶片叶绿素总量(a+b)的年平均含量为 4.134～6.489 $mg \cdot dm^{-2}$,其中,蜂蜜罐枣和晋赞大枣的叶绿素总量(a+b))最高,新郑早红枣和小梨枣的叶绿素总量(a+b)最低。所有供试枣树品种叶片叶绿素总量(a+b)的年总平均含量为 5.136 $mg \cdot dm^{-2}$。

2.4　不同品种枣树不同生育期叶片叶绿素 a/b 比值的变化

由表 4 可以看出,不同品种枣树不同生育期叶绿素 a/b 不同,从展叶期(5 月 10 日)到枣晚熟期(10 月 9 日),各品种叶绿素 a/b 呈现缓慢下降的变化趋势,不同生育期叶绿素 a/b 的平均值也呈现这一变化趋势,由 4.181 渐变为3.486。叶绿素 a/b 比值在整个生育进程中呈现缓慢下降的变化趋势与许

多品种的相关研究结果相同[16]。

对叶片叶绿素 a/b 比值进行方差分析和多重比较(表 4),结果显示,在同一生育期,不同品种的叶绿素 a/b 间均存在显著的品种间差异($P<0.05$);23 个枣树品种叶片叶绿素 a/b 的年均比值为 3.306～4.192,其中,蜂蜜罐枣和晋赞大枣的叶绿素 a/b 的年均比值最小,新郑早红枣和小梨枣 a/b 的年均比值最大。所有供试枣树品种叶片叶绿素 a/b 总的年均比值为 3.826。高等植物叶片叶绿素 a/b 比值一般约为 3∶1,这个比例常因植物的种类而异[17]。

表 3 不同品种枣树不同生育期叶片叶绿素(a+b)含量变化(mg·dm^{-2},$mean\pm SD$,$n=3$)

Table 3 Changes of chlorophyll (a+b) contents in leaves of different jujube varieties(mg·dm^{-2},$mean\pm SD$,$n=3$)

品种	5 月 10 日	6 月 12 日	7 月 10 日	8 月 14 日	9 月 10 日	10 月 9 日	平均值
新郑早红枣	3.388±0.013i	3.527±0.008o	4.133±0.012q	4.357±0.010s	4.682±0.011k	4.717±0.008v	4.134±0.009q
小梨枣	3.113±0.006m	4.080±0.007j	4.648±0.018l	4.662±0.010q	4.304±0.005l	5.031±0.008s	4.306±0.004p
孔府酥脆枣	3.410±0.010i	3.857±0.015l	4.473±0.017n	5.465±0.011i	6.844±0.009cd	6.342±0.005j	5.065±0.003ij
葫芦枣	3.277±0.013j	3.342±0.007q	4.675±0.009l	5.555±0.008h	6.097±0.009g	5.385±0.007q	4.722±0.004l
骏枣	3.790±0.010f	4.567±0.013f	5.072±0.017hi	5.850±0.011f	6.989±0.009c	8.184±0.015a	5.742±0.009d
尖尖枣	2.753±0.009n	4.103±0.008j	5.416±0.011f	5.638±0.009g	6.574±0.008de	5.558±0.008o	5.007±0.004j
金谷大枣	3.280±0.010j	3.562±0.006n	4.285±0.014p	5.296±0.007k	6.427±0.008efg	7.545±0.011e	5.066±0.008ij
早脆王	3.298±0.006j	3.450±0.024p	4.384±0.014o	4.718±0.010p	5.031±0.014j	5.943±0.006m	4.471±0.003o
冷白玉	3.096±0.012m	4.088±0.008j	4.413±0.012o	5.118±0.008l	4.838±0.010jk	6.160±0.012k	4.619±0.002mn
马铃脆枣	3.142±0.006l	3.874±0.010kl	5.005±0.012j	5.910±0.013e	6.890±0.009cd	7.147±0.012h	5.328±0.008f
悠悠	3.296±0.008j	3.305±0.005r	4.515±0.009m	5.459±0.007i	6.194±0.536g	5.707±0.008n	4.746±0.089l
晋矮 4 号	3.622±0.012h	4.371±0.007h	5.093±0.015h	4.822±0.007o	6.999±0.007c	7.957±0.007c	5.477±0.003e
晋矮 3 号	3.807±0.010f	4.509±0.008g	5.634±0.016d	4.856±0.015n	6.215±0.013fg	5.519±0.009p	5.090±0.011hi
六月鲜	4.291±0.010c	4.374±0.010h	5.236±0.011g	6.002±0.009d	6.960±0.013c	7.264±0.011f	5.688±0.007d
蜂蜜罐枣	3.728±0.008g	5.315±0.008b	6.794±0.013a	7.160±0.007a	7.810±0.007a	8.124±0.008b	6.489±0.004a
不落酥	3.199±0.013k	3.826±0.008m	4.945±0.008k	5.065±0.009m	6.557±0.006def	7.283±0.007f	5.146±0.005h
马牙白	3.974±0.006d	4.200±0.008i	3.726±0.012r	4.320±0.013t	6.195±0.008g	4.981±0.012t	4.566±0.007n
晋赞大枣	4.503±0.011a	5.872±0.008a	5.594±0.017e	7.177±0.008a	7.453±0.011b	7.847±0.012d	6.408±0.010b
壶瓶枣	3.598±0.007h	5.115±0.008c	5.038±0.014ij	5.356±0.011j	6.360±0.010efg	7.203±0.013g	5.445±0.007e
新星枣	3.834±0.006e	3.895±0.006k	3.202±0.011s	4.564±0.006r	5.777±0.008h	6.601±0.006i	4.646±0.005m
甘酥佛枣	4.468±0.010b	4.517±0.011g	5.676±0.018c	6.203±0.006c	5.395±0.008i	5.287±0.009r	5.258±0.009g
冬枣	3.974±0.005d	4.818±0.007e	5.892±0.011b	6.416±0.012b	7.944±0.006a	5.983±0.008l	5.838±0.003c
灰枣	3.836±0.006e	4.880±0.007d	4.940±0.017k	4.682±0.009q	6.119±0.006g	4.842±0.014u	4.883±0.007k
平均值	3.595±0.004f	4.237±0.003e	4.904±0.008d	5.420±0.006c	6.289±0.019b	6.374±0.006a	5.136

2.5 不同品种枣树叶片叶绿素年平均含量的比较

对不同枣树品种叶片叶绿素年均含量的方差分析结果见表 1～表 3。方差分析结果显示,不同枣树品种叶绿素 a、b 及总量(a+b)的年平均含量间均存在显著的品种间差异($P<0.05$)。所有供试枣树品种叶片叶绿素 a、b 及总量(a+b)的年总平均含量分别约为 4.049、1.088 mg·dm^{-2} 和 5.136 mg·dm^{-2}。从图 1 可看出,23 个供试枣树品种叶片叶绿素 a、b 及总量(a+b)的年平均含量的差异。新郑早红枣、小梨枣、早脆王、马牙白、冷白玉、新星枣、葫芦枣、悠悠、灰枣、尜尜枣、金谷大枣、孔府酥脆枣、晋矮 3 号这些品种的叶绿素 a、b 及总量(a+b),都依次升高,但均低于年总平均含量,其中新郑早红枣和小梨枣最低;不落酥、甘酥佛枣、马铃脆枣、壶瓶枣、晋矮 4 号、六月鲜、骏枣、冬枣、晋赞大枣、蜂蜜罐枣这些品种的叶绿素 a、b 及总量(a+b),也依次升高,但均高于年总平均含量,其中晋赞大枣和蜂蜜罐枣最高。

对不同枣树品种叶片叶绿素 a/b 年均比值的方差分析结果见表 4。结果显示,不同枣树品种叶绿素 a/b 的年均比值间均存在显著的品种间差异($P<0.05$)。从图 1 看出,不同枣树品种 a/b 的品种间差异变化趋势与叶绿素 a、b 及总量(a+b)的品种间差异变化趋势相反:叶绿素 a、b 及总量(a+b)较高的品种 a/b 比值较低,相反叶绿素 a、b 及总量(a+b)较低的品种 a/b 比值较高。蜂蜜罐枣和晋赞大枣叶绿素总量的年均值最大,分别约为 6.489 mg·dm^{-2} 和 6.408 mg·dm^{-2},而叶绿素 a/b 的年均比值最小,分别约为 3.426 和 3.306,相反新郑早红枣和小梨枣叶绿素总量的年均值最小,分别约为4.134 mg·dm^{-2} 和 4.306 mg·dm^{-2},而叶绿素 a/b 的年均比值却最大,分别约为 4.192 和 4.061,其他品种介于其间。这与梨、杏的叶绿素变化相似[14,18]。

表 4　不同品种枣树不同生育期叶片叶绿素 a/b 比值的变化(*mean*±*SD*,*n*=3)

Table 4　Change of chlorophyll a/b in leaves of different jujube varieties (*mean*±*SD*,*n*=3)

品种	5 月 10 日	6 月 12 日	7 月 10 日	8 月 14 日	9 月 10 日	10 月 9 日	平均值
新郑早红枣	4.062±0.006l	4.290±0.004f	4.461±0.010a	4.316±0.004a	4.109±0.006a	3.912±0.003c	4.192±0.004a
小梨枣	4.511±0.007d	4.799±0.004b	3.746±0.000hij	3.941±0.020c	3.418±0.003ij	3.953±0.003b	4.061±0.004d
孔府酥脆枣	3.968±0.006n	3.808±0.003j	4.081±0.035cd	3.618±0.004j	3.522±0.009h	3.618±0.002g	3.769±0.006j
葫芦枣	4.229±0.006h	5.086±0.005a	3.570±0.007lm	3.832±0.002f	3.881±0.002c	3.731±0.005e	4.055±0.003d
骏枣	4.306±0.006f	4.404±0.003e	3.942±0.011fg	3.894±0.005d	3.754±0.036de	3.262±0.003q	3.927±0.009e
尖尖枣	5.005±0.010a	4.163±0.003g	3.990±0.003ef	3.950±0.017c	3.877±0.002c	3.825±0.005d	4.135±0.002b
金谷大枣	3.671±0.005r	4.734±0.004b	4.150±0.023b	3.783±0.002g	3.740±0.002e	3.290±0.001p	3.895±0.004g
早脆王	3.991±0.006m	3.980±0.003h	3.909±0.000g	3.678±0.003i	3.926±0.005b	4.020±0.002a	3.917±0.001ef
冷白玉	4.768±0.008c	4.514±0.003d	4.039±0.008de	4.035±0.003b	3.518±0.002h	3.460±0.004k	4.056±0.001d
马铃脆枣	4.812±0.008b	4.045±0.122h	3.526±0.003m	3.870±0.002e	3.555±0.003g	3.587±0.007h	3.899±0.021fg
悠悠	3.938±0.006o	3.982±0.014h	3.773±0.000hi	3.580±0.002k	3.510±0.003h	3.089±0.002r	3.645±0.003l
晋矮 4 号	4.068±0.006kl	4.164±0.005g	3.709±0.097ijk	3.424±0.002n	3.556±0.005g	3.469±0.001k	3.732±0.018k
晋矮 3 号	4.269±0.006g	4.128±0.003g	3.285±0.000op	3.657±0.005i	3.401±0.002j	3.535±0.002j	3.712±0.002k
六月鲜	4.293±0.005f	4.193±0.006g	3.671±0.006k	3.733±0.013h	3.677±0.005f	3.428±0.002l	3.832±0.000i
蜂蜜罐枣	4.082±0.005j	3.509±0.002k	3.311±0.000o	3.661±0.003i	3.081±0.001l	2.911±0.003t	3.426±0.001n
不落酥	4.250±0.000g	4.498±0.007d	3.798±0.014h	3.579±0.002k	3.666±0.002f	3.338±0.004o	3.855±0.003h
马牙白	3.872±0.005p	4.141±0.029g	3.507±0.008m	3.389±0.005o	3.438±0.002i	3.354±0.011o	3.617±0.009m
晋赞大枣	3.728±0.004q	3.423±0.002l	3.231±0.008p	3.403±0.003o	3.094±0.003l	2.957±0.007s	3.306±0.003o
壶瓶枣	3.559±0.005s	4.129±0.005g	3.604±0.003l	4.034±0.010b	3.772±0.004d	3.459±0.014k	3.759±0.005j
新星枣	4.112±0.005i	4.743±0.004b	4.127±0.006bc	4.040±0.003b	3.914±0.002b	3.664±0.002f	4.100±0.001c
甘酥佛枣	4.251±0.005g	4.280±0.003	3.679±0.003jk	3.519±0.002l	3.283±0.002k	3.370±0.006n	3.730±0.003k
冬枣	3.967±0.015n	3.891±0.005i	3.415±0.003n	3.392±0.007o	3.398±0.001j	3.566±0.002i	3.605±0.003m
灰枣	4.455±0.004e	4.618±0.003c	3.244±0.003op	3.496±0.002m	3.419±0.004ij	3.388±0.009m	3.770±0.002j
平均值	4.181±0.000b	4.240±0.007a	3.729±0.009c	3.731±0.003c	3.587±0.003d	3.486±0.003e	3.826

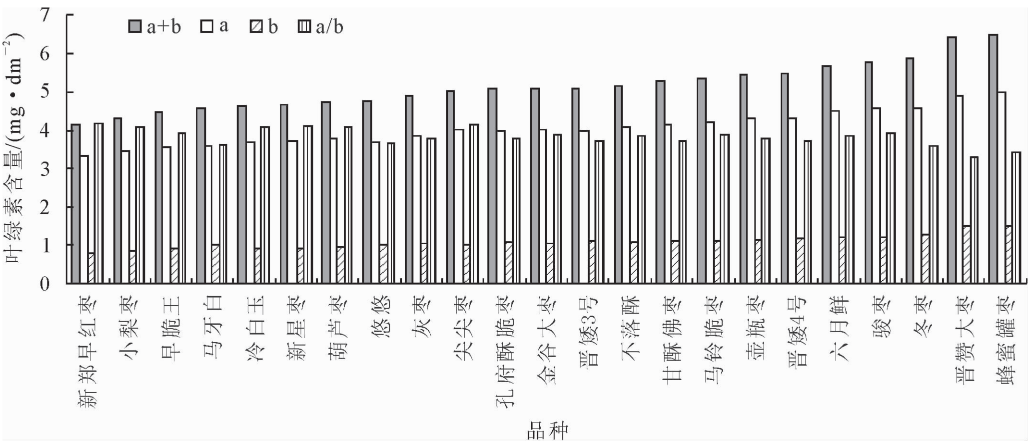

图 1　不同品种枣树叶绿素年平均含量的变化

Fig. 1　Changes of chlorophyll annual average content among jujube varieties

3　结论与讨论

本研究叶绿素含量的测定结果表明,在枣树整个生育期,不同枣树品种叶片叶绿素含量不同,叶绿素 a 含量与叶绿素总量(a+b)的变化趋势一致,基本上表现为生育前期稍低,然后逐渐升高,到生育后期又降低的变化规律。所有供试枣树品种叶绿素 a 和叶绿素总量(a+b)在不同生育期的平均含量也呈现这一变化规律。而叶绿素 b 在整个生长季节缓慢增长。5 月份枣树展叶期的叶片为幼嫩叶片,尚未发育完全,所以叶绿素合成量较少,随着叶龄、叶面积的增大,叶绿素含量迅速增加,到了 8 月份每个品种叶片的叶绿素含量较高,说明叶片发育较完全,叶绿素合成达到最高。8 月中旬到 10 月上旬一直保持较高水平,而后呈下降态势。这个结果与范淑秀[19]、潘波[20]、张晶晶[10]等的研究结果基本一致。供试枣树品种叶绿素 a/b 值均呈缓慢下降趋势。刘贞琦[12]的研究认为,当叶绿素 a/b 比值减少时,能提

高叶片光合活性。张巨松[21]等认为：作物整个生育期叶绿素 a/b 都是处于下降趋势，叶绿素 a/b 比值的变化可能是植物一种内部节律，它是植物长期适应一定自然气候条件的变化所形成的一种生理特性，受栽培条件影响较小，主要由品种遗传特性决定。

叶绿素含量受遗传控制，同时还在一定程度上受环境条件的影响[12]。欧俊梅[7]等认为：在相同的环境条件下，不同类型小麦在不同时期叶绿素含量均存在较大差异，主要是基因型不同所致。本研究方差分析结果显示，在枣树不同生育期，不同枣树品种间叶绿素 a、b、总量(a＋b)及 a/b 值均存在显著的品种间差异($P<0.05$)，表明不同枣树品种的叶绿素含量受品种遗传特性的影响较大。方差分析结果还表明枣树品种间叶绿素 a/b 值表现出的差异性变化趋势与叶绿素 a、b 及总量(a＋b)的品种间差异性变化趋势相反，叶绿素含量较高的品种 a/b 值较低，相反叶绿素含量较低的品种 a/b 值较高。

本研究所有供试枣树品种叶片叶绿素 a、b 及总量(a＋b)的年平均含量分别为 3.336～4.986、0.798～1.506 $mg \cdot dm^{-2}$ 和 4.134～6.489 $mg \cdot dm^{-2}$。叶绿素 a、b 和叶绿素总量(a＋b)的年总平均含量分别约为 4.049、1.088 $mg \cdot dm^{-2}$ 和5.136 $mg \cdot dm^{-2}$。23 个枣树品种叶片叶绿素 a/b 的年均比值为 3.306～4.192，总的年均比值约为 3.826。

从总体水平看，叶片叶绿素含量较高的枣树品种为六月鲜、骏枣、冬枣、蜂蜜罐枣和晋赞大枣，较低的品种为新郑早红枣、小梨枣、早脆王、马牙白和冷白玉。叶色是反映植物生理功能和生长状态的重要特征[22]。叶绿素 a 呈蓝绿色，叶绿色 b 呈黄绿色。经过连续几年对田间枣树叶片颜色的观察，蜂蜜罐枣和晋赞大枣的叶片颜色最深，其他品种的叶片颜色次之，新郑早红枣和小梨枣的叶色最浅，这与它们的叶绿素含量相符合。

高叶绿素含量在很大程度上能使叶片光合效率得到改善，增强叶片的光合强度，对营养物质的积累十分有利，可全面改善树体的营养状况，继而进一步提高产量。关于叶片叶绿素含量与产量及品质性状的关系，前人已有过相关的研究报道[7]。许大全[23]认为叶片光合速率与作物产量成正相关。本研究中的供试材料是 4 龄枣树，本项目组已侧定了各枣树品种鲜果单株产量和干果含糖量，鲜果单株产量由低到高排序：悠悠＜新郑早红枣＜葫芦枣＜新星枣＜尖尖枣＜晋赞大枣＜早脆王＜冷白玉＜冬枣＜马铃脆枣＜不落酥＜灰枣＜金谷大枣＜六月鲜＜小梨枣＜马牙白＜壶瓶枣＜孔府酥脆枣＜蜂蜜罐枣＜甘酥佛枣＜晋矮 4 号＜晋矮 3 号＜骏枣。干果含糖量由低到高排序：孔府酥脆枣＜新郑早红枣＜晋矮 4 号＜冬枣＜晋赞大枣＜悠悠＜蜂蜜罐枣＜早脆王＜马铃脆枣＜葫芦枣＜六月鲜＜壶瓶枣＜不落酥＜灰枣＜新星枣＜晋矮 3 号＜金谷大枣＜冷白玉＜马牙白＜尖尖枣＜骏枣＜甘酥佛枣＜小梨枣。测定结果显示，不同枣树品种叶片叶绿素含量与其产量及含糖量之间呈不完全对等关系。果树叶片的光合速率与其经济产量表现为正相关还是负相关还涉及到其他一些因素，如光合产物的运输和在根茎叶果实等各类器官的分配等[24]。所以关于不同枣树品种叶绿素含量与产量品质间的关系还有待进一步研究。

参考文献：

[1] HERRIN D L，BATTEY J F，GREER K，*et al*. Regulation of chlorophyll apoprotein expression and accumulation. Re-quirements for carotenoids and chlorophyll[J]. J Biol Chem，1992，267(12)：8260-8269.

[2] 潘尧燕，张志翔，王冬民. 银杏雌雄株某些生理特性的差异[J]. 研究林业勘察设计，1999(1)：102-105.

[3] 郭春爱，刘芳，许晓明. 叶绿素 b 缺失与植物的光合作用[J]. 植物生理学通讯，2006，42(5)：967-973.

[4] 何良荣，赵晓雁，阿依提拉·艾散，等. 南疆 35 个海岛棉品种叶片叶绿素含量特征研究[J]. 中国棉花，2017，44(2)：20-24.
HE L R，ZHAO X Y，AYITILA A S，*et al*. Studies on chlorophyll character in 35 sea-island cotton varieties in south xinjiang[J]. China Cotton，2017，44(2)：20-24.(in Chinese)

[5] 王冰，张羽震，贺文美，等. 山桃叶片叶绿素 SPAD 值颜色特征与时空特征分析[J]. 西北林学院学报，2016，31(5)：311-315.
WANG B，ZHANG Y Z，HE W M，*et al*. Color and spatio-temperal characteristics of chlorophyll SPAD values of *prunus davidiana* leaves[J]. Journal of Northwest Forestry University，2016，31(5)：311-315.(in Chinese)

[6] 李敏夏，张林森，李丙智，等. 苹果叶片高光谱特性与叶绿素含量和 SPAD 值的关系[J]. 西北林学院学报，2010，25(2)：35-39.
LI M X，ZHANG L S，LI B Z，*et al*. Relationship between spectral reflectance feature and their chlorophyll contentrations and SPAD value of apple leaves[J]. Journal of Northwest Forestry University，2010，25(2)：35-39.(in Chinese)

[7] 欧俊梅，王治斌，周强，等. 小麦开花及灌浆期叶片叶绿素含量与产量性状的相关分析[J]. 安徽农业科学，2017，45(7)：42-43，142.

[8] 牛立元，茹振钢. 小麦叶片叶绿素含量系统变化规律研究[J]. 麦类作物，1999，19(2)：36-38.

[9] 武德，曹帮华，刘欣玲，等. 盐碱胁迫对刺槐和绒毛白蜡叶片叶绿素含量的影响[J]. 西北林学院学报，2007，22(3)：51-54.
WU D，CAO B H，LIU X L，*et al*. Effect of salt-A1kalic stress on content of chlorophyll in leaves of *Robinia pseudoacacia* and *Frazinus velutina* seeding[J]. Journal of Northwest Forestry University，2007，22(3)：51-54.(in Chinese)

[10] 张晶晶，海波，刘慧鹏. 番茄叶片叶绿素含量变化规律研究[J]. 园艺学，2015(1)：99-100.

ZHANG J J,HAI P,LIU H P. Study on the change of chlorophyll content in tomato leaves [J]. Horticulture,2015(1):99-100.(in Chinese)

[11] 孟军,陈温福,徐正进,等.水稻剑叶净光合速率与叶绿素含量的研究初报[J].沈阳农业大学学报,2008,32(4):247-249.
MENG J,CHEN W F,XU Z,J,*et al*. The study of the net photosynthetic rate and chlorophyll content of rice sword leaf [J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2008,32(4):247-249.(in Chinese)

[12] 刘贞琦,刘振业,马达鹏,等.水稻叶绿素含量及其与光合速率关系的研究[J].作物学,1984,10(1):57-64.

[13] 梁镇林.水稻不同品种叶绿素含量的变异及遗传表现[J].贵州农学院学报,1982(1):11-25.
LIANG Z L. Genetic study on chlorophyll content of rice[J]. Journal of Guizhou Agricultural College,1982(1):11-25.(in Chinese)

[14] 张琦,何天明.早熟梨“新梨七号”不同枝条叶片叶绿素含量的变化[J].北方果树,2003(1):7-9.

[15] 张宪政.植物叶绿素含量测定——丙酮乙醇混合液法[J].辽宁农业科学,1986(3):26—28.

[16] ANDERSON J M,PARK Y I,CHOW S W. Photo inactivation and photo protection of photo system II in nature[J]. Physiol Plant,1997,100:214-223.

[17] 潘瑞炽,董愚得.植物生理学[M].4 版.北京:高等教育出版社,2001:55-136.

[18] 张琦,高疆生,张雪花.杏叶片叶绿素含量的变化规律研究[J].塔里木农垦大学学报,2004,16(4):1-4.
ZHANG Q,GAO J S,ZHANG X H. Study on the change law of chlorophyll content in apricot leaves[J]. Journal of Tarim Land Reclamation University,2004,16(4):1-4.(in Chinese)

[19] 范淑秀,陈温福.超高产水稻品种叶绿素变化规律研究初报[J].沈阳农业大学学报,2005,36(1):14-17.
FAN S X,CHEN W F. Preliminary study on chlorophyll change law of super high yield rice[J]. Journal of Shenyang Agricultural Uinversity,2005,36(1):14-17.(in Chinese)

[20] 潘波,郑王尧.大麦叶片叶绿素含量及消长规律的研究[J].莱阳农学院学报,1990,7(4):266-269.

[21] 张巨松,杜永猛.棉花叶片叶绿素含量消长动态的分析[J].新疆农业大学学报,2002,25(3):7-9.
ZHANG J S,DU Y M. Analysis of growth and decline of chlorophyll content in cotton leaves[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University,2002,25(3):7-9.(in Chinese)

[22] 邢艳秋,黄超,陈世宏.SPAD 叶绿素仪在评价树木叶片光环境和健康水平上的应用初探[J].森林工程,2011,27(1):1-4.
XING Y Q,HUANG C,CHEN S H. Application of SPAD chlorophyll meter in assessing light environment and health status of tree leaves[J]. Forest Engineering,2011,27(1):1-4.(in Chinese)

[23] 许大全.光合速率、光合效率与作物产量[J].生物学通报,1999,34(8):9-10

[24] ZELITCH I. The close relationship between net photosynthesis and crop yield [J]. BioScience,1982,32:706-802.

(上接第 19 页)

[14] 冯志培,赵佳宝,孔玉华,等.种基盘对侧柏幼苗根系形态和生理特性的影响[J].西北林学院学报,2015,30(3):107-112.
FENG Z P,ZHAO J B,KONG Y H,*et al*. Effect of seed-base technique on the root morphological and physiological properties of platycladus orientalis[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(3):107-112.(in Chinese)

[15] PENG H Y,QI Y P,LEE J,*et al*. Proteomic analysis of *Citrus* sinensis,roots and leaves in response to long-term magnesium-deficiency[J]. Bm. Genomics,2015,16(1):253.

[16] 蔡永萍.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业大学出版社,2014.

[17] 张蜀秋.植物生理学实验技术教程[M].北京:科学出版社,2011.

[18] 张立军.植物生理学实验教程[M].北京:中国农业大学出版社,2007.

[19] 陈志刚,张红蕊,周晓红,等.铝胁迫对黑麦草根系抗氧化酶活性和丙二醛含量的诱导特征研究[J].土壤通报,2012(2):391-395.
CHEN Z G,ZHANG H R,ZHOU X H,*et al*. Study on characteristics of antioxidant enzymes activities and MDA contents in lolium multiflorum roots induced by aluminum stress [J]. Chinese Journal of Soil Science,2012(2):391-395.(in Chinese)

[20] TEWARI R K,KUMAR P,SHARMA P N. Magnesium deficiency induced oxidative stress and antioxidant responses in mulberry plants[J]. Scientia Horticulturae,2006,108(1):7-14.

[21] 李妍.铅镉胁迫对小麦幼苗抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响[J].麦类作物学报,2009,29(3):514-517.
LI Y. Effect of lead and cadmium stress on antioxidant enzymes activites and malondialdehyde concentration of wheat [J]. Journal of Triticeae Crops,2009,29(3):514-517.(in Chinese)

[22] 王芳,刘鹏,史锋,等.镁对大豆叶片细胞膜透性和保护酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2005,11(5):659-664.

[23] 田荣荣,王岩,王伟,等.大豆叶片黄酮类及多酚类物质对臭氧浓度升高的响应[J].生态环境学报,2016,25(8):1277-1282.
TIAN R R,WANG Y,WANG W,*et al*. Response of soybean leaves flavonoids and polyphenols to elevated ozone [J]. Ecology and Environmental Sciences,2016,25(8):1277-1282.(in Chinese)

[24] SCANDALIOS J G. Oxygen stress and superoxide dismutases [J]. Plant Physiology,1993,101(1):7.