

滨海盐碱地混交林效应研究

杜振宇, 马海林, 马丙尧, 刘方春, 邢尚军

(山东省林业科学研究院, 山东 济南 250014)

摘要:为探讨混交造林在黄河三角洲滨海盐碱地上的长期应用效果,调查了3个不同混交林和4个树种纯林的生长现况,对比研究了混交林中各树种与相应纯林之间在生长状况、叶片营养和生理生化特性上的差异。结果表明,土壤盐渍化的长期影响造成该地区人工混交林的总体生长状况较差,27 a后的保存率处于43.3%~70.4%之间。与刺槐纯林相比,刺槐与白蜡、白榆和臭椿混交后其胸径、树高和保存率均显著降低,叶片中的氮、磷、钾、叶绿素含量和相对含水量减少,抗逆性能明显下降。与刺槐混交后,白蜡的生长状况和叶片特性受到一定程度的抑制,然而白榆和臭椿的胸径、树高、叶片营养元素和叶绿素含量均明显高于各自纯林;白榆和臭椿在与刺槐混交后其抗逆性能较纯林得到明显改善,主要表现为超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性和脯氨酸含量显著升高,而叶片中的束缚水/自由水比值和丙二醛(MDA)含量显著降低。

关键词:混交林;黄河三角洲;生长状况;叶片营养;抗逆性能

中图分类号:S714 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2015)01-0144-06

Effects of Mixed Forests in Coastal Saline Soil

DU Zhen-yu, MA Hai-lin, MA Bing-yao, LIU Fang-chun, XING Shang-jun

(Shandong Academy of Forestry, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract:In order to explore the long-term effects of mixed afforestation in costal saline soil in the Yellow River delta, current status of 3 mixed and 4 pure plantations was investigated and the differences between mixed and pure plantations in growth, leaf nutrition and physico-biochemical characteristics were compared in this study. The results showed that the general growth status of mixed plantations was less desirable, only having a survival percentage of 43.3%—70.4%, due to long-term soil salinization. Compared with pure locust (*Robinia pseudoacacia*) plantation, DBH (diameter at breast height), tree height and survival percentage of locust were all significantly reduced after mixed-planted with velvet ash (*Fraxinus velutina*), siberian elm (*Ulmus pumila*) and Tree-of-Heaven (*Ailanthus altissima*). Similarly, the contents of N, P, K and chlorophyll in leaves, leaf relative water content and stress tolerance ability of locust decreased in mixed plantations. Mixed afforestation constrained the growth and leaf characteristics of velvet ash in comparison to its pure plantation. The DBH, tree height, leaf nutritional element and chlorophyll contents of Siberian elm and Tree-of-Heaven were higher than those of pure plantations, respectively. The stress tolerance ability of both siberian elm and Tree-of-Heaven was elevated much due to the significant increase of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) activities and proline content, and the decrease of the ratio of bound water to free water and malondialdehyde (MDA) content in leaves.

Key words:mixed plantation; the Yellow River delta; growth status; leaf nutrition; stress tolerance activity

森林是构成陆地生态系统的主体,其生态服务功能在维持地球生态平衡方面发挥着重要作用^[1]。随着全球环境的不断恶化,荒漠化及盐碱化灾害日趋严重,土地盐碱化问题已经对世界生态环境安全、社会经济发展带来了严重的威胁^[2]。黄河三角洲位于渤海南部的黄河入河口沿岸地区,在环渤海地区发展中具有重要战略地位。该区由于地下水矿化度高,加之气候干旱,极易引起土壤盐渍化,造就了其生态系统的脆弱性^[3]。为了缓解环境恶化,维护生态平衡,在三角洲地区开展以森林植被恢复为主的生态修复是重建黄河三角洲脆弱生态系统的重要措施^[4]。

黄河三角洲地区在 20 世纪 80 年代营造了大量的防护林,主要造林树种为刺槐(*Robinia pseud-acacia*),绒毛白蜡(*Fraxinus velutina*)、白榆(*Ulmus pumila*)、臭椿(*Ailanthus altissima*)等,其中刺槐与其他树种构建的人工混交林是主要的造林模式。这些混交林在滨海盐碱地环境中经过多年生长,虽然表现出不同的生长特征,但对于防风固沙、保持水土、涵养水源、改善气候均发挥了重要作用。以黄河三角洲地区典型长期人工混交林为对象,通过与各自构成树种的纯林进行比较,对其林木生长、叶片营养及生理生化特性进行了研究,可为滨海盐碱地人工林树种选择和配置模式优化提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于山东省东营市河口区,地处黄河三角洲东北部,属于暖温带大陆季风性气候。全年平均气温 12.3℃,极端最高气温达 41.9℃,极端最低气温 -23.3℃,≥0℃积温 4 784℃,≥10℃积温 4 183℃。太阳辐射年总量 5 146~5 411 MJ·m⁻²,年日照时数 2 571~2 865 h,平均 2 682 h,是我国日照较丰沛的地区之一。平均无霜期 210 d。年降水量 542~842 mm,年蒸发量 1 962.1 mm,是降水量的 3.6 倍,春季是强烈的蒸发期,蒸发量占全年的 51.7%^[5-6]。

1.2 生长调查和样品采集

研究对象为 27 a 的当地典型人工林,供试林分共有 7 个,分别为刺槐与另外 3 个树种(白蜡、白榆和臭椿)构建的混交林,以及这 4 个树种的相应纯林。以上林分中除了刺槐白蜡林为 3:1 行状混交模式,其他均为 1:1 行状混交模式,株行距均为 2.5 m×3.0 m,1985 年春季采用 1 年生苗营造,林地

土壤类型为盐化潮土。各林分的林地相邻,林龄和立地条件基本相同。

在供试人工林中各设置 0.06 hm² 的标准地 3 块,按标准地进行各项生长因子的调查和取样。对标准地林木逐株进行胸径、树高测定,记录树木缺失和死亡情况。

在同一林分相同树种中分别选取 3 株有代表性的样树,每株取 2 枝,采集树冠向阳的中上部成熟叶片,装于塑料袋内,带回实验室,用去离子水清洗干净,然后在 105℃ 下杀青 15 min 后,转至 80℃ 下烘干、粉碎用于 N、P、K 含量的测定。同时取新鲜叶片立刻装入液氮罐,用于含水量、叶绿素、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、丙二醛(MDA)和脯氨酸的测定。

1.3 测试方法

取烘干后的叶片样品,磨碎过 20 目筛,经 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后,分别采用凯氏法、钼钼黄比色法和火焰光度法测定 N、P、K 含量^[7]。采用烘干法,测定叶片相对含水量;分别采用烘干法和称重法测定叶片总含水量和自由水含量,二者之差为束缚水含量,计算出束缚水/自由水比值;叶绿素含量采用乙醇浸提,分光光度法测定;SOD 活性采用氮蓝四唑光还原法测定;POD 活性采用愈创木酚法测定;MDA 含量的测定采用硫代巴比妥酸法,脯氨酸含量采用磺基水杨酸提取,茚三酮显色法测定^[8]。

1.4 数据分析

采用 Statistica 6.0 统计软件进行统计分析,利用 Excel 2007 分别进行数据计算和图形制作。

2 结果与分析

2.1 滨海盐碱地人工林的长期生长状况

受土壤盐渍化的长期影响,黄河三角洲滨海盐碱地人工林的总体生长状况较差(表 1),生长 27 a 后 3 个混交林中各树种的保存率在 43.3%~70.4%之间,4 个纯林中保存率最高的为刺槐纯林,大小顺序依次为:刺槐林>白蜡林>臭椿林>白榆林;而生长情况最好的为白蜡纯林,其次为刺槐纯林,二者的胸径和树高均明显大于白榆和臭椿纯林。

刺槐与白蜡、白榆和臭椿分别构建混交林后,林木的生长状况与纯林相比发生明显改变。在刺槐白蜡混交林中,刺槐和白蜡的胸径较各自纯林略有下降,没有显著性差异,而树高均出现显著降低,降幅分别为 38.0%和 25.2%;刺槐和白蜡混交后,二者的保存率均有所降低,其中刺槐的保存率下降幅度较大,降低了 25.2%。刺槐与白榆混交后,刺槐的

胸径和树高均有显著减小,保存率略有降低,而白榆的胸径和树高却出现显著升高现象,保存率增加了26.1%。在刺槐臭椿混交林中,刺槐的胸径较纯林略有降低,而树高降幅较大,为31.08%,保存率则

略有下降;与刺槐混交后,臭椿的胸径和树高均有显著升高,增幅分别为72.5%和21.1%,而保存率下降了13.7%。

表 1 不同人工林的生长特征

Table 1 Growth characteristics of different plantations

林分	树种	平均胸径/cm	平均树高/m	保存率/%	郁闭度
槐蜡林	刺槐	16.32±0.78cd	6.50±0.19f	43.3	0.83
	白蜡	20.43±0.62a	8.99±0.26cd	57.4	
槐榆林	刺槐	14.32±0.25e	7.49±0.31e	59.6	0.75
	白榆	18.71±0.53b	9.42±0.37c	70.4	
槐椿林	刺槐	17.22±0.39c	7.23±0.26e	60.0	0.72
	臭椿	17.84±0.38bc	8.51±0.40d	44.1	
刺槐林	刺槐	17.63±0.67bc	10.49±0.53b	68.5	0.74
白蜡林	白蜡	20.66±0.45a	12.02±0.72a	62.9	0.82
白榆林	白榆	15.48±0.41d	6.88±0.17ef	44.3	0.53
臭椿林	臭椿	10.34±0.76f	7.03±0.22e	57.8	0.56

注:同一列中不同字母表示在 $p<0.05$ 水平下差异显著;表中的槐蜡林、槐榆林和槐椿林分别代表刺槐白蜡混交林、刺槐白榆混交林和刺槐臭椿混交林。表2~表4同。

2.2 滨海盐碱地混交造林对林木叶片营养和叶绿素含量的影响

植物叶片的N、P、K是反应植物营养状况的重要指标,其含量高低直接关系到植物的生长情况。由表2看出,刺槐与白蜡、白榆和臭椿分别混交后其叶中N、P含量略有减小,但未达到显著差异,而K含量却有显著降低,表明刺槐的叶片营养水平在混交造林后有所下降。与白蜡纯林相比,刺槐白蜡混交林中白蜡叶片的N、P、K含量没有发生显著性改变。白榆、臭椿与刺槐混交后,叶片的N、P和K含

量均有明显增加,说明这2个树种在与刺槐构建混交林后,营养状况可得到一定改善。

叶绿素是参与光合作用光能吸收、传递和转化的重要色素。与刺槐纯林相比,3个混交林中刺槐的叶绿素含量均有显著降低(表2)。白蜡与刺槐混交后,叶片中叶绿素含量较白蜡纯林叶片中的含量亦有显著下降。白榆与刺槐混交后,叶绿素含量较白榆纯林出现明显升高,而臭椿与刺槐混交后则较臭椿纯林则出现显著降低。

表 2 不同人工林中各树种叶片的养分和叶绿素含量

Table 2 Leaf nutrient and chlorophyll contents of each tree species in different plantations

林分	树种	N/%	P/%	K/%	叶绿素/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
槐蜡林	刺槐	3.72±0.08b	0.70±0.03b	2.04±0.10b	51.06±0.13h
	白蜡	3.24±0.07c	0.61±0.02de	1.49±0.11d	61.49±0.22c
槐榆林	刺槐	3.62±0.07b	0.65±0.05bc	1.77±0.03c	47.46±0.91i
	白榆	3.26±0.04c	0.63±0.03cd	1.92±0.13bc	60.54±0.75cd
槐椿林	刺槐	3.87±0.09b	0.67±0.06bc	2.16±0.11ab	52.65±1.34g
	臭椿	4.03±0.08a	0.91±0.07a	2.35±0.12a	59.14±0.68de
刺槐林	刺槐	3.87±0.05b	0.74±0.04b	2.31±0.06a	55.88±1.15f
白蜡林	白蜡	3.22±0.05c	0.58±0.03e	1.47±0.04d	62.87±1.09b
白榆林	白榆	3.09±0.03d	0.62±0.01cd	1.73±0.07c	57.78±0.86ef
臭椿林	臭椿	3.37±0.10c	0.64±0.02cd	2.03±0.07b	65.73±0.81a

2.3 滨海盐碱地混交造林对林木叶片含水量的影响

叶片相对含水量能较好地反映植物水分状况。自由水和束缚水含量常与植物生长、抗性有密切关系;束缚水与自由水比值较低的植物组织或器官,代谢较旺盛,反之则生长较缓慢,但抗性较强^[9]。与刺槐纯林相比,刺槐白蜡混交林中刺槐叶片的相对含

水量出现显著下降,而刺槐白榆混交林和刺槐臭椿混交林中的刺槐叶片的相对含水量则变化不大(表3);3个混交林中刺槐叶片的束缚水/自由水比值均较纯林有显著增加。刺槐白蜡混交林中白蜡叶片的相对含水量较纯林也明显降低,而束缚水/自由水比值则显著升高,同刺槐叶片含水量的变化规律相似。与白蜡不同,白榆和臭椿与刺槐混交后其叶片相对

含水量均有显著升高,束缚水/自由水比值则出现显著下降。

表 3 不同人工林各树种的叶片含水量

Table 3 Leaf water contents of each tree species in different plantations

林分	树种	相对含水量/%	自由水/%	束缚水/%	束缚水/自由水
槐蜡林	刺槐	44.20±1.62g	18.61±0.64b	43.85±0.61g	2.36±0.17h
	白蜡	68.83±0.19d	14.52±0.36d	52.37±1.02c	3.61±0.15e
槐榆林	刺槐	69.41±0.28c	11.11±0.75e	44.48±0.11g	4.00±0.23d
	白榆	66.03±0.83e	9.43±0.62f	49.79±0.73d	5.28±0.39c
槐椿林	刺槐	72.70±1.16b	15.48±0.47c	47.05±1.05e	3.04±0.19f
	臭椿	70.26±0.57c	6.41±0.51g	53.44±0.72c	8.33±0.76b
刺槐林	刺槐	69.19±0.34cd	23.05±2.56a	41.67±1.36i	1.81±0.24i
白蜡林	白蜡	82.15±2.08a	16.80±1.28bc	45.25±0.64f	2.69±0.14g
白榆林	白榆	62.50±1.15f	6.68±1.07g	57.14±0.95a	8.55±0.46b
臭椿林	臭椿	63.39±1.27f	4.67±0.33 h	55.33±0.87ab	11.85±1.05a

2.4 滨海盐碱地混交造林对林木叶片抗逆性能的影响

SOD 和 POD 是细胞的酶保护系统,可有效的清除逆境产生的活性氧等自由基,对延缓植物组织衰老和提高抗性有着积极的作用^[10]。MDA 是膜脂过氧化的最终产物,积累后会对膜和细胞产生一定的伤害^[11]。脯氨酸是植物体内重要的渗透调节物质,在逆境条件下可调节细胞内溶质渗透势,从而维持细胞生长、气孔开放和光合作用等生理过程正常进行^[12]。以上这些指标可综合反映长期土壤盐渍化对人工混交林叶片抗逆性能的影响。

刺槐白蜡混交林中刺槐、白蜡叶片的 SOD、POD 活性均较其纯林明显降低,MDA 含量则明显

升高(表 4);刺槐的脯氨酸含量降低显著,白蜡却没有出现显著性改变。在刺槐白榆混交林中,刺槐叶片的 SOD、POD 活性和脯氨酸含量较纯林均有较大幅度下降,MDA 含量没有显著性改变;相比之下,白榆叶片的 SOD、POD 活性和脯氨酸含量则显著高于白榆纯林叶片中的相应指标,MDA 含量却有显著降低。刺槐与臭椿混交后,其叶片的 SOD、POD 活性、MDA 和脯氨酸含量较纯林的变化规律与刺槐白蜡混交林中的刺槐相似,而臭椿与刺槐混交后这 4 个抗逆性指标与刺槐白榆混交林中白榆的变化相近,SOD、POD 活性和脯氨酸含量较臭椿纯林出现明显升高现象,MDA 含量则有显著降低。

表 4 不同人工林各树种的叶片抗逆性能

Table 4 Stress tolerance indicatives in leaves of each tree species in different plantations

林分	树种	SOD /(U·g ⁻¹ ·min ⁻¹)	POD /(U·g ⁻¹ ·min ⁻¹)	MDA /(nmol·g ⁻¹)	脯氨酸 /(μg·g ⁻¹)
槐蜡林	刺槐	504.13±21.92bc	28.29±1.39g	46.52±4.32b	836.26±21.57f
	白蜡	117.36±11.15h	63.24±4.37d	13.08±1.73e	394.94±42.13g
槐榆林	刺槐	476.83±26.08c	23.72±1.14h	34.76±1.59c	877.34±15.66e
	白榆	161.98±23.97f	98.75±6.81a	22.80±3.25d	1156.16±40.05ab
槐椿林	刺槐	302.55±19.23d	30.71±2.28fg	44.54±2.96b	1073.24±58.81bc
	臭椿	553.04±38.67b	81.47±4.06b	42.41±2.17b	1220.15±41.58a
刺槐林	刺槐	662.81±49.52a	35.19±3.76ef	33.27±3.05c	1163.32±44.07ab
白蜡林	白蜡	143.24±15.26fg	74.21±2.81c	9.48±0.67f	402.64±55.08g
白榆林	白榆	123.41±13.26gh	72.33±4.53c	31.29±2.81c	896.45±40.25de
臭椿林	臭椿	266.42±15.35e	42.18±3.34e	60.63±5.16a	964.63±51.63cd

3 结论与讨论

3.1 结论

在滨海盐碱立地条件下,刺槐与白蜡、白榆和臭椿混交后的总体生长状况较差,造林 27 a 后人工混交林的林木存活率为 43.3%~70.4%,纯林则均低于 70%。刺槐与白蜡、白榆和臭椿混交后其生长特征均受到明显抑制。与刺槐混交后,白蜡亦受到不利影响;而白榆的生长却得到显著促进,胸径、树高

和保存率均有大幅提高;与刺槐混交后,臭椿虽然生长状况得到一定改善,但保存率出现明显降低。

与刺槐纯林相比,刺槐与白蜡、白榆和臭椿混交后其叶片中的 N、P、K、叶绿素含量和相对含水量减少,抗逆性能明显下降。与刺槐混交后,白蜡的叶片特性受到一定程度的抑制,然而白榆和臭椿的叶片营养元素和叶绿素含量均明显高于各自纯林,抗逆性能得到明显改善,主要表现为 SOD、POD 活性和脯氨酸含量显著升高,而叶片中的束缚水/自由水比

值和 MDA 含量显著降低。

3.2 讨论

3.2.1 土壤盐渍化下人工混交林的生长响应 由于长期受到土壤盐渍化影响,试验地人工纯林和混交林的林木存活率普遍较低。黄河三角洲滨海地区土壤盐分在土层中的分布规律是自上到下逐渐升高,在夏季时土壤水分蒸发量相对较高,导致盐分随水分向上迁移也相对较多,林木生长更容易受到抑制,这可能是导致林分退化严重的主要原因^[13]。

混交林是林业生产中的一种常用造林方式^[14]。刺槐等固 N 树种与非固 N 树种混交林的营造多集中在贫瘠立地上^[15]。对刺槐杨树(*Populus* spp.)、刺槐油松(*Pinus tabulaeformis*)和刺槐黑松(*Pinus thunbergii*)混交林的研究表明,混交林中刺槐的胸径、树高和保存率均明显均优于刺槐纯林^[15-17]。相比之下,刺槐与白蜡、白榆和臭椿等树种的混交林应用较少。本研究发现刺槐与白蜡、白榆和臭椿分别混交后,其生长并未得到促进,胸径、树高和保存率均有所下降。

3.2.2 土壤盐渍化下人工混交林的叶片营养和叶绿素含量 在黄河三角洲滨海盐碱地区,长期生长的刺槐人工林由于受环境胁迫的影响,会不可避免地发生林地退化现象,土壤中盐分会导致土壤物理性况变差,影响土壤中的养分有效性和叶片中的叶绿素含量^[5]。

非固 N 树种与固 N 树种混交后,其 N 素营养通常会得到改善^[15,18]。本研究也发现,白蜡、白榆和臭椿与刺槐混交后叶片的 N 素营养均得到一定程度促进,但对白蜡只是略有改善,而对白榆和臭椿叶片含 N 量提高幅度较大。对于刺槐混交林叶片 P 和 K 营养的研究目前相对较少。研究发现,与刺槐混交后侧柏(*Platycladus orientalis*)和杨树叶中含磷量大幅下降^[18-19]。本研究表明,与刺槐混交的白色和臭椿叶中 P、K 含量均较纯林有显著增加。总得说来,刺槐对白榆、臭榆 2 个混交树种的树体营养均有较大提高作用,而对白蜡的促进作用相对较小,这可能是由于白蜡对滨海盐碱地的适应性较强,根系主要集中在林地土壤表层,对 N、P、K 养分的吸收利用能力也较强,掩盖了刺槐对其树体营养的影响作用^[20]。刺槐与白蜡、白榆和臭椿混交后,叶绿素含量的变化规律同叶片营养状况的变化规律基本一致。一般而言,植株叶片中的含 N 量与叶绿素含量呈正相关^[21],钾也可促进叶绿素的合成,同时增加了叶绿素荧光动力^[22]。

3.2.3 土壤盐渍化下人工混交林的抗逆性能 土壤盐渍化对人工林的长期影响可能会改变林木对盐

分的适应机制,从而影响其抗逆性能。叶片的束缚水与自由水比值、SOD 和 POD 活性、MDA 含量以及脯氨酸含量是植物抗逆性能的重要生理指标,可综合反映长期土壤盐渍化对人工林叶片抗逆性能的影响。本研究发现,刺槐在滨海盐碱地上分别与白蜡、白榆和臭椿混交造林 27 a 后,叶片自由水下降,而束缚水与自由水比值均出现明显升高现象,束缚水与自由水比值的升高能够增加组织的渗透势,使原生质胶体吸附的水分增多,树体保水能力提高,有效减轻盐胁迫造成的失水伤害。与此同时,刺槐叶片的脯氨酸含量、SOD 和 POD 活性也同时降低,说明混交造林减弱了刺槐体内的渗透调节功能,加剧了活性氧物质对细胞膜的损害,加重了膜脂质过氧化。叶片 MDA 含量的升高进一步说明了在盐碱地上混交造林在长期立地条件下对刺槐细胞膜的伤害作用要大于纯林。与刺槐混交后,白蜡也表现出与刺槐相似现象,但白榆和臭椿的抗逆性能却得到明显增强。与纯林相比,不同树种间混交后的生长特征以及生理生化特性表现出不同的变化规律,这可能与植物的遗传特性、树体间的相互作用以及对土壤盐分的适应性等影响因素之间存在较大差异有关,其中的具体作用机制还有待进一步研究。

参考文献:

[1] 郭朝霞,邓玉林,王玉宽,等.森林生态系统生态服务功能研究进展[J].西北林学院学报,2007,22(1):173-177.
GUO Z X, DENG Y L, WANG Y K, *et al.* Progress on ecological service function of forest ecosystems [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(1): 173-177. (in Chinese)

[2] 教忠意,王保松,施士争,等.林木抗盐性研究进展[J].西北林学院学报,2008,23(5):60-64.
JIAO Z Y, WANG B S, SHI S Z, *et al.* Advances in salt resistance of trees[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(5): 60-64. (in Chinese)

[3] 邢尚军,张建锋.黄河三角洲土地退化机制与植被恢复技术[M].北京:中国林业出版社,2006:70-88.

[4] 何书金.黄河三角洲土地持续利用优化分析[J].地理科学进展,2001,20(4):313-323.
HE S J. Land sustainable use and optimize of the Yellow River delta[J]. Progress in Geography, 2001, 20(4): 313-323. (in Chinese)

[5] 张建锋,邢尚军.环境胁迫下刺槐人工林地土壤退化特征研究[J].土壤通报,2009,40(5):1086-1091.
ZHANG J F, XING S J. Research on soil degradation of *Robinia pseudoacacia* plantation under environmental stress[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(5): 1086-1091. (in Chinese)

[6] 李贻学,东野光亮,李新举.黄河三角洲盐渍土可持续利用对策[J].水土保持学报,2003,17(2):55-58.

LI Y X, DONGYE G L, LI X J. Countermeasure on sustainable utilization of saline soil in Yellow River delta[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(2): 55-58. (in Chinese)

[7] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 24-214.

[8] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 105-261.

[9] 蒋志荣. 沙冬青抗旱机理的探讨[J]. 中国沙漠, 2000, 20(1): 71-74.

JIANG Z R. Probe into drought-resisting mechanism of *Ammodendron mongolicum* (Maxim) Cheng F[J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(1): 71-74. (in Chinese)

[10] 田小磊, 吴晓岚, 李云, 等. 盐胁迫条件下 γ -氨基丁酸对玉米幼苗 SOD, POD 及 CAT 活性的影响[J]. 实验生物学报, 2005, 38(1): 75-79.

TIAN X L, WU X L, LI Y, *et al.* The effect of gamma-aminobutyric acid in superoxide dismutase, peroxidase and catalase activity response to salt stress in maize seedling[J]. Acta Biologica Experimentalis Sinica, 2005, 38(1): 75-79. (in Chinese)

[11] PICCHIONI G A. Postharvest calcium in filtration delays membrane lipid catabolism in apple fruit [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46: 2452-2457.

[12] 孙彩霞, 刘志刚. 作物抗旱性生理生化机制的研究现状和进展[J]. 杂粮作物, 2002, 22(5): 285-288.

SUN C X, LIU Z G. Status and advances in studies on the physiology and biochemistry mechanism of crop drought resistance[J]. Rain Fed Crops, 2002, 22(5): 285-288.

[13] 董海凤, 杜振宇, 马丙尧, 等. 黄河三角洲人工林地土壤的水盐动态变化[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 48-53.

DONG H F, DU Z Y, MA B Y, *et al.* Dynamic changes of water and salt in soils of different plantations in the Yellow River delta [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(5): 48-53. (in Chinese)

[14] 董建辉, 薛泉宏, 张建昌, 等. 黄土高原人工混交林土壤肥力及混交效应研究[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(3): 31-35.

DONG J H, XUE Q H, ZHANG J C, *et al.* Soil fertility characteristics and mixed effect of plantation forests on Loess Plateau[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2005, 20(3): 31-35. (in Chinese)

[15] 贾黎明. 固氮树种与非固氮树种混交林研究现状[J]. 世界林业研究, 1998, 11(1): 20-26.

JIA L M. The review of mixtures of nitrogen-fixing and non-nitrogen-fixing tree species [J]. World Forestry Research, 1998, 11(1): 20-26. (in Chinese)

[16] 张鼎华, 翟明普. 刺槐油松混交林土壤肥力变化的研究[J]. 林业科技通讯, 2001 (12): 28-30.

[17] 井明伟, 胡建朋, 罗明达. 刺槐黑松混交林枯落物层持水性研究[J]. 山东水利, 2011 (1): 38-40.

[18] 翟明普, 尹伟伦, 张刚民. 北京西山地区侧柏刺槐混交林的研究(Ⅱ)-混交林营养状况和侧柏叶的叶绿素含量[J]. 北京林业大学学报, 1991, 13(1): 128-134.

ZHAI M P, YIN W L, ZHANG G M. Studies on the mixed plantation of *Platycladus orientalis* and *Robinia pseudoacacia* (Ⅱ)-Nutrition status of mixed plantation and chlorophyll content in *Platycladus orientalis* needle[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1991, 13(1): 128-134. (in Chinese)

[19] 李传涵, 王长荣. 杨树和刺槐混植苗对 ^{32}P 的吸收和转移的研究[J]. 华中农业大学学报, 1989, 8(4): 399-401.

LI C H, WANG C R. A study on dynamics of absorbing and transmitting ^{32}P between mix-planted *Populus tomentosa* and *Robinia pseudoacacia* [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 1989, 8(4): 399-401. (in Chinese)

[20] DU Z Y, WANG Q H, XING S J, *et al.* Fine root distribution, characteristics and rhizosphere soil properties in a mixed stand of *Robinia pseudoacacia* and *Fraxinus velutina* in a saline soil[J]. Silva Fennica, 2013, 47(3): 970.

[21] 陈防, 鲁剑巍. SPAD—502 叶绿素计在作物营养快速诊断上的应用初探[J]. 湖北农业科学, 1996 (2): 31-34.

[22] 郭英, 孙学振, 宋宪亮, 等. 钾营养对棉花苗期生长和叶片生理特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(3): 363-368.

GUO Y, SUN X Z, SONG X L, *et al.* Effects of potassium nutrition on growth and leaf physiological characteristics at seedling stage of cotton[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(3): 363-368. (in Chinese)