

五种菌草苗期对碱胁迫的生理响应及抗碱性评价

林兴生^{1,3}, 林占熿^{1,3,*}, 林辉^{1,3}, 林冬梅^{1,3}, 罗海凌^{1,3}, 胡应平^{1,3}, 林春梅^{1,3}, 朱朝枝^{2,*}

福建农林大学¹菌草研究所, ²金山学院, 福州350002; ³国家菌草工程技术研究中心, 福州350002

摘要: 为探明菜竹、芦竹、巨菌草、象草、稗草5种菌草对碱胁迫的生理响应及抗碱能力, 分别以0、50、100、125、150、200 mmol·L⁻¹ Na₂CO₃溶液模拟碱胁迫, 测定叶片细胞膜透性, 丙二醛(MDA)和可溶性糖(SS)含量, 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性, 以及恢复试验后植株死亡率, 并利用隶属函数法对以上指标进行综合评价。结果表明, 随Na₂CO₃胁迫浓度的升高, 5种菌草的相对电导率、MDA含量呈上升趋势, SS含量, SOD、POD、CAT活性呈先升高后下降的趋势; 稗草、菜竹、象草、巨菌草、芦竹的生理指标平均隶属函数值分别为0.36、0.95、0.01、0.14、0.83, 半致死Na₂CO₃胁迫浓度分别为107.0、127.7、68.5、78.5、123.0 mmol·L⁻¹; 5种菌草的抗碱能力强弱为: 菜竹>芦竹>稗草>巨菌草>象草。

关键词: 菌草; 生理响应; 碱胁迫; 抗碱性

Physiological Responses and Alkaline-Tolerance Evaluation on 5 Species of Juncao under Alkaline Stress during Seedling Stage

LIN Xing-Sheng^{1,3}, LIN Zhan-Xi^{1,3,*}, LIN Hui^{1,3}, LIN Dong-Mei^{1,3}, LUO Hai-Ling^{1,3}, HU Ying-Ping^{1,3}, LIN Chun-Mei^{1,3}, ZHU Chao-Zhi^{2,*}

¹Juncao Research Institute, ²Jinshan College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; ³National Engineering Research Center of Juncao, Fuzhou 350002, China

Abstract: In order to verify the physiological responses and alkaline tolerance of 5 species of juncao, *Echinochloa crusgalli*, *Arundo* sp., *Pennisetum purpureum*, *Pennisetum* sp. and *Arundo donax*, the physiological indexes of juncao leaves under alkaline stress (Na₂CO₃) with different concentrations of 0, 50, 100, 125, 150 and 200 mmol·L⁻¹ for 5 d, including contents of malondialdehyde (MDA) and soluble sugar (SS), activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT), and membrane permeability, were determined respectively. After recovery test, the mortality rates of the 5 juncao species were determined. The all indexes were evaluated by using subordinate functions. The result indicated that when the concentration of Na₂CO₃ was increased, SS content and activities of SOD, POD and CAT of the 5 species of juncao were first increased and then decreased, and the relative electrical conductivity (REC) and MDA content of the 5 juncao species were increased. The half-lethal concentrations of Na₂CO₃ solution of *E. crusgalli*, *Arundo* sp., *P. purpureum*, *Pennisetum* sp. and *A. donax* were 107.0, 127.7, 68.5, 78.5 and 123.0 mmol·L⁻¹, respectively. Their average membership function values were 0.36, 0.95, 0.01, 0.14 and 0.83, respectively. The alkaline tolerance of 5 juncao species were *Arundo* sp.>*A. donax*>*E. crusgalli*>*Pennisetum* sp.>*P. purpureum*.

Key words: juncao; physiological response; alkaline stress; alkaline tolerance

菌草(juncao)是指适合作为食用菌、药用菌培养基并有综合开发利用价值的草本植物; 菌草技术是指菌草优良品种选育, 菌草栽培与加工, 菌草生物转化, 菌草综合利用的系列技术与工艺; 菌草业是指菌草技术产业化形成的新兴产业(林占熿2003)。1986年, 福建农林大学发明了菌草技术, 经过20多年的发展, 已形成了配套综合技术。菌草技术具有太阳能利用率高、资源利用率高、投资少、周期短、见效快等优点, 目前已传播到85个

国家, 已在我国31个省、市的386个县(市)应用(郑金英等2011)。利用菌草技术发展菌草业, 既能增加农民收入, 使其脱贫致富, 又能改善生态环境, 把社会、经济、生态三大效益有机结合起来, 其

收稿 2012-11-22 修定 2013-01-17

资助 国家林业公益性行业科研专项(201004019)、科技部国家中心组建项目(2011FU125X11)和福建省科技重大专项(2012NZ0002)。

* 通讯作者(E-mail: witylin@163.com; Tel: 0591-83768494)。

发展前景十分广阔,但作为新兴产业目前仍存在不少发展瓶颈,其中之一是菌草抗性(抗碱、抗盐、抗寒、抗旱等)品种的选育。

土壤碱化、盐渍化是世界性问题,是影响农业生产的重要因素,全球约 1.5×10^9 hm²土地中,盐土(saline)占23%,苏打土(sodic)占37%,约有100多个国家存在不同类型的盐碱地,我国盐碱地面积达0.99亿m²(杨劲松2008;赵可夫等1999;Tanji 1990)。前人主要对以下植物开展了碱胁迫研究:苜蓿(*Medicago sativa*) (张永峰和殷波2009)、星星草(*Puccinellia tenuiflora*) (尹尚君等2003;石德成和殷立娟1993)、冰草(*Agropyron cristatum*) (高文俊等2011)、黑麦草(*Lolium perenne*) (刘建新等2011)、碱地风毛菊(*Saussurea runcinata*) (夏方山等2010)等牧草;狗牙根(*Cynodon dactylon*) (周存宇等2009)、补血草(*Limonium gmelinii*和*L. otolepis*) (师东和张爱勤2011)、芨芨草(*Achnatherum splendens*) (纪荣花等2011)、羊草(*Leymus chinensis*) (石德成和殷立娟1992)等草坪草;小冰麦(*Triticum aestivum-Agropyron intermedium*) (杨春武等2007)、绿豆(*Vigna radiata*) (韩建明和张鹏英2010)、野生大豆(*Glycine soja*) (葛瑛等2009)、向日葵(*Helianthus annuus*) (颜宏等2005)等作物;合欢(*Albizia julibrissin*) (周建等2008)、枸杞(*Lycium barbarum*) (毛桂莲等2006)等树种。研究表明,植物在受到碱胁迫时除造成渗透胁迫、离子毒害外,还会引起高pH危害,因此碱胁迫比盐胁迫对植物的危害更为严重(杨春武等2007;Shi和Yan 2005)。前人有关莱竹、巨菌草、芦竹、象草、稗草5种菌草对碱胁迫的生理响应及抗碱性的相关研究鲜有报道。

福建农林大学收集有45种菌草,其中,莱竹、芦竹、巨菌草、象草、稗草等菌草被人工种植和广泛应用。莱竹从莱索托引进,莱索托位于非洲东南部,海拔高度1 400~3 482 m,是世界上平均海拔最高的国家,属大陆性亚热带气候,平均年降水量约780 mm,常年最低温度-10℃,极端最低温度可达-18℃,莱竹在莱索托全境均有分布,能正常越冬,耐旱、耐涝、耐瘠薄。芦竹为多年生草本植物,具地下茎,茎秆直立挺拔,叶片宽大鲜绿,在我国分布甚广,北起辽宁,南至广西,其适应能力很强,耐旱、耐涝、耐热、耐寒、耐贫瘠,在沼泽

地、河滩地、河岸、沙荒或旷野地上都能生长(刘洪谔和陈耀玺1981)。巨菌草原产于非洲,隶属禾本科(Poaceae)狼尾草属(*Pennisetum*),适宜在热带、亚热带、温带生长,为多年生C₄植物,直立、丛生,株高一般300~580 cm,根系发达,分蘖能力强,年产鲜草200 t·hm⁻²以上。象草茎高200~300 cm,年产鲜草106~252 t·hm⁻²,喜温暖湿润气候,在气温12~14℃时开始生长,23~35℃时生长迅速,8~10℃时生长受抑制,5℃以下时停止生长(林洁荣等2003)。稗草是高产优质的饲料作物,既耐低湿盐碱又抗高湿干旱,株高130~210 cm,产干草15 t·hm⁻²以上,籽实4.5 t·hm⁻²以上,具有较强的再生力(罗长富和闵瑾如1990)。这5种菌草生物量高,有较高的应用价值,本文通过研究其苗期对碱胁迫的生理响应及抗碱特性,旨在从中筛选出抗碱的菌草,以突破菌草业发展的瓶颈,从而满足国内外盐碱地区发展菌草业的需要。

材料与方 法

1 试验菌草

试验采用5种菌草:莱竹(*Arundo sp.*)、巨菌草(*Pennisetum sp.*)、芦竹(*Arundo donax*)、象草(*Pennisetum purpureum*)、稗草(*Echinochloa crusgalli*),其中莱竹从莱索托引进,巨菌草从南非引进,稗草为北方抗碱品种,5种菌草均种植于福建农林大学菌草研究所菌草圃。

2 试验设计

以土壤条件一致的砂质土为培养基质,以塑料营养袋作为栽培容器。由于5种菌草繁殖方式不同,莱竹和芦竹用扦插法难以成活,故采用组织培养苗移苗后栽培,稗草采用播种法育苗,巨菌草及象草采用扦插法育苗。每种菌草每个处理种植50袋,设3个重复,莱竹、芦竹、稗草每袋种植10株,巨菌草、象草每袋5株。待不同菌草植株长至20 cm高时,用不同浓度的Na₂CO₃溶液进行处理模拟碱胁迫,Na₂CO₃浓度分别为0(对照)、50、100、125、150、200 mmol·L⁻¹,共处理5 d。处理后分2组:一组随机剪取叶片,测定相应的生理生化指标;另一组在自然条件下进行恢复实验,用清水浇灌,20 d后观察生长情况并测定死亡率。

3 测定方法

相对电导率(relative electrical conductivity, REC)

测定采用电导仪法, 丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸法, 可溶性糖(soluble sugar, SS)含量测定采用蒽酮比色法, 过氧化氢酶(catalase, CAT)测定采用紫外吸收法(王学奎2006), 超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)测定采用NBT还原法, 过氧化物酶活性(peroxidase, POD)测定采用愈创木酚比色法(陈建勋和王晓峰2002)。

4 抗碱能力综合评价

根据各项生理指标的高低和变化幅度的大小, 采用隶属函数法进行综合分析。指标与抗碱能力呈正相关时采用方程: $X(\mu) = (X_{ij} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$; 指标与抗碱能力呈负相关时采用方程: $X(\mu) = 1 - (X_{ij} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 。式中, X_{ij} 为各指标的值或变化值, X_{\max} 为各种对应指标的最大值, X_{\min} 为各种对应指标的最小值, $X(\mu)$ 为隶属函数值(魏永胜等2005)。累加各品种各指标的具体隶属值, 并求出平均值后进行比较: 平均值越大, 抗碱能力越强。

5 数据统计分析

采用SPSS软件进行数据分析, 表中数值为平均值±标准差(means±SD), 用单因素方差分析处理间的差异。

实验结果

1 Na_2CO_3 胁迫对5种菌草抗氧化酶活性的影响

5种菌草的SOD活性随 Na_2CO_3 浓度的升高呈先升后降的趋势。 Na_2CO_3 浓度在125 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 稗草、莱竹、象草、巨菌草、芦竹SOD活性均显著高于对照($P < 0.05$), 其增幅分别为35.8%、82.3%、27.3%、30.9%、81.6%, 5种菌草SOD活性变化幅度及大小排序为: 莱竹>芦竹>稗草>巨菌草>

象草(表1)。

5种菌草的POD活性随 Na_2CO_3 浓度的升高呈先升后降的趋势。 Na_2CO_3 浓度在125 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 稗草、莱竹、象草、巨菌草、芦竹POD活性均显著高于对照($P < 0.05$), 其增幅分别为45.2%、105.8%、30.4%、38.5%、138.7%, 5种菌草POD活性变化幅度及大小排序为: 芦竹>莱竹>稗草>巨菌草>象草(表2)。

5种菌草的CAT活性随 Na_2CO_3 浓度的升高呈先升后降的趋势, Na_2CO_3 浓度为125 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 稗草、莱竹、象草、巨菌草、芦竹CAT活性分别比对照提高27.1%、107.9%、24.0%、20.3%、73.4%, 5种菌草CAT活性变化幅度及大小排序为: 莱竹>芦竹>稗草>象草>巨菌草(表3)。

2 Na_2CO_3 胁迫对5种菌草REC的影响

5种菌草的REC随 Na_2CO_3 浓度的升高而增大, Na_2CO_3 浓度在125 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 稗草、莱竹、巨菌草、象草、芦竹的REC均显著高于对照($P < 0.05$), 其增幅分别为197.7%、84.4%、268.4%、230.0%、140.5%, 5种菌草膜脂受损程度依次为: 象草>巨菌草>稗草>芦竹>莱竹(表4)。

3 Na_2CO_3 胁迫对5种菌草MDA含量的影响

5种菌草的MDA含量随 Na_2CO_3 浓度的升高而升高, Na_2CO_3 浓度在125 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 稗草、莱竹、象草、巨菌草、芦竹MDA含量均显著高于对照($P < 0.05$), 其增幅分别为57.1%、41.0%、83.0%、71.7%、47.7%, 5种菌草膜脂受损程度依次为: 象草>巨菌草>稗草>芦竹>莱竹(表5)。

4 Na_2CO_3 胁迫对5种菌草SS含量的影响

5种菌草的SS含量随 Na_2CO_3 浓度的升高呈先

表1 不同浓度 Na_2CO_3 胁迫下5种菌草的SOD活性

Table 1 SOD activity of 5 juncao species under the stress of Na_2CO_3 solution with different concentrations

Na_2CO_3 浓度/ $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	稗草		莱竹		象草		巨菌草		芦竹	
	SOD活性/ $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}(\text{FW})$	增幅/%	SOD活性/ $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}(\text{FW})$	增幅/%	SOD活性/ $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}(\text{FW})$	增幅/%	SOD活性/ $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}(\text{FW})$	增幅/%	SOD活性/ $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}(\text{FW})$	增幅/%
对照(0)	287.1±4.4 ^c		281.3±24.1 ^d		186.3±17.6 ^c		161.7±37.0 ^c		221.7±62.2 ^b	
50	341.3±65.0 ^b	18.9	345.8±63.0 ^c	22.9	207.5±13.2 ^b	11.4	191.7±70.2 ^b	18.6	269.6±68.1 ^b	21.6
100	401.3±88.3 ^a	39.8	407.9±32.2 ^b	45.0	251.3±68.8 ^a	34.9	220.0±4.5 ^a	36.1	312.9±64.4 ^b	41.1
125	390.0±32.3 ^c	35.8	512.9±4.0 ^b	82.3	237.1±43.1 ^b	27.3	211.6±7.3 ^a	30.9	402.5±27.5 ^a	81.6
150	—	—	603.9±7.6 ^a	114.7	—	—	—	—	467.3±7.5 ^a	110.8
200	—	—	299.8±7.1 ^{cd}	6.6	—	—	—	—	231.2±68.3 ^b	4.3

“—”表示幼苗已死亡; 同列不同的小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。表2~7同此。

表2 不同浓度Na₂CO₃胁迫下5种菌草的POD活性Table 2 POD activity of 5 juncao species under the stress of Na₂CO₃ solution with different concentrations

Na ₂ CO ₃ 浓度/ mmol·L ⁻¹	稗草		莱竹		象草		巨菌草		芦竹	
	POD活性/ U·g ⁻¹ (FW)	增幅/%	POD活性/ U·g ⁻¹ (FW)	增幅/%	POD活性/ U·g ⁻¹ (FW)	增幅/%	POD活性/ U·g ⁻¹ (FW)	增幅/%	POD活性/ U·g ⁻¹ (FW)	增幅/%
对照(0)	313.3±28.7 ^c		520.0±9.4 ^c		345.0±71.1 ^b		303.3±89.6 ^c		405.0±11.4 ^{cd}	
50	433.3±43.8 ^{bc}	38.3	736.7±13.1 ^c	41.7	440.0±45.1 ^a	27.5	393.3±56.6 ^{bc}	30.0	586.7±89.6 ^{bc}	44.9
100	476.7±32.5 ^{ab}	52.2	813.3±75.4 ^c	56.4	455.0±52.2 ^a	31.9	425.0±82.5 ^a	40.1	658.3±11.8 ^b	62.5
125	455.0±40.8 ^a	45.2	1070.0±69.7 ^b	105.8	450.0±3.0 ^b	30.4	420.0±32.0 ^{ab}	38.5	966.7±44.1 ^a	138.7
150	—	—	1121.7±72.1 ^a	115.7	—	—	—	—	1041.7±25.6 ^a	157.2
200	—	—	801.7±25.9 ^d	54.2	—	—	—	—	671.7±40.1 ^c	65.9

表3 不同浓度Na₂CO₃胁迫下5种菌草的CAT活性Table 3 CAT activity of 5 juncao species under the stress of Na₂CO₃ solution with different concentrations

Na ₂ CO ₃ 浓度/ mmol·L ⁻¹	稗草		莱竹		象草		巨菌草		芦竹	
	CAT活性/ U·g ⁻¹ (FW)	增幅/%	CAT活性/ U·g ⁻¹ (FW)	增幅/%	CAT活性/ U·g ⁻¹ (FW)	增幅/%	CAT活性/ U·g ⁻¹ (FW)	增幅/%	CAT活性/ U·g ⁻¹ (FW)	增幅/%
对照(0)	235.0±16.5 ^{bc}		315.0±7.1 ^c		384.0±8.5 ^{cd}		370.0±23.6 ^c		351.7±7.1 ^c	
50	285.5±48.8 ^{ab}	21.5	533.3±18.9 ^b	69.3	458.3±44.8 ^{bc}	19.3	440.0±4.7 ^b	18.9	445.0±25.9 ^b	26.5
100	328.3±11.8 ^a	39.7	571.7±40.1 ^{ab}	81.5	508.0±113.1 ^a	32.3	483.3±18.4 ^a	30.6	565.0±2.4 ^c	60.6
125	298.7±35.4 ^{ab}	27.1	655.0±54.2 ^a	107.9	476.3±14.6 ^{ab}	24.0	445.0±40.1 ^b	20.3	610.0±9.4 ^{ab}	73.4
150	—	—	659.0±21.2 ^a	109.2	—	—	—	—	661.7±40.1 ^a	88.1
200	—	—	460.0±51.9 ^c	46.0	—	—	—	—	435.0±77.8 ^d	23.7

表4 不同浓度Na₂CO₃胁迫下5种菌草的RECTable 4 REC of 5 juncao species under the stress of Na₂CO₃ solution with different concentrations

Na ₂ CO ₃ 浓度/ mmol·L ⁻¹	稗草		莱竹		象草		巨菌草		芦竹	
	REC/%	增幅/%	REC/%	增幅/%	REC/%	增幅/%	REC/%	增幅/%	REC/%	增幅/%
对照(0)	22.0±5.5 ^c		22.5±4.4 ^c		19.6±7.8 ^d		20.0±7.4 ^d		23.7±2.3 ^c	
50	45.0±8.3 ^c	104.5	32.6±4.9 ^c	31.0	55.2±5.0 ^c	182.6	55.0±3.1 ^c	175.0	46.2±5.5 ^c	94.9
100	51.9±14.4 ^c	135.9	37.7±1.9 ^{bc}	67.6	61.6±2.1 ^{bc}	241.3	57.4±7.7 ^c	187.0	52.7±32.1 ^{bc}	122.4
125	69.5±15.3 ^b	197.7	41.5±7.7 ^{bc}	84.4	72.2±15.8 ^{ab}	268.4	66.0±0.6 ^b	230.0	57.0±6.6 ^{bc}	140.5
150	—	—	46.4±13.9 ^{ab}	106.2	—	—	—	—	67.7±6.2 ^{ab}	185.7
200	—	—	50.5±20.9 ^a	124.4	—	—	—	—	70.8±8.8 ^a	198.7

表5 不同浓度Na₂CO₃胁迫下5种菌草的MDA含量Table 5 MDA content of 5 juncao species under the stress of Na₂CO₃ solution with different concentrations

Na ₂ CO ₃ 浓度/ mmol·L ⁻¹	稗草		莱竹		象草		巨菌草		芦竹	
	MDA含量/ mmol·g ⁻¹ (FW)	增幅/%	MDA含量/ mmol·g ⁻¹ (FW)	增幅/%	MDA含量/ mmol·g ⁻¹ (FW)	增幅/%	MDA含量/ mmol·g ⁻¹ (FW)	增幅/%	MDA含量/ mmol·g ⁻¹ (FW)	增幅/%
对照(0)	4.9±0.4 ^d		3.9±0.4 ^{bc}		8.8±0.5 ^d		9.2±0.3 ^d		4.4±1.6 ^{cd}	
50	6.1±0.3 ^{bc}	24.5	4.1±0.6 ^{bc}	5.1	9.1±0.7 ^d	3.4	9.5±0.6 ^d	3.3	4.4±0.1 ^{cd}	0
100	6.9±0.7 ^{ab}	40.8	4.8±0.4 ^b	23.1	13.9±0.1 ^a	58.0	13.9±0.2 ^a	51.1	5.6±0.1 ^c	27.3
125	7.7±0.2 ^a	57.1	5.5±1.0 ^a	41.0	16.1±0.1 ^{ab}	83.0	15.8±0.1 ^b	71.7	6.5±0.2 ^b	47.7
150	—	—	5.8±1.0 ^a	48.7	—	—	—	—	7.0±0.6 ^a	54.5
200	—	—	6.7±0.3 ^b	71.8	—	—	—	—	7.8±0.1 ^c	77.3

升后降的趋势, 莱竹增幅最大, Na_2CO_3 浓度在125 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 稗草、莱竹、象草、巨菌草、芦竹的SS含量均显著高于对照($P<0.05$), 其增幅分别为

28.1%、55.9%、15.2%、25.0%、38.1%, 5种菌草积累SS、通过渗透调节以抵御逆境胁迫的能力依次为: 莱竹>芦竹>稗草>巨菌草>象草(表6)。

表6 不同浓度 Na_2CO_3 胁迫下5种菌草的SS含量Table 6 SS content of 5 species juncao under the stress of Na_2CO_3 solution with different concentrations

Na_2CO_3 浓度/ $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	稗草		莱竹		象草		巨菌草		芦竹	
	SS含量/ $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ (FW)	增幅/%	SS含量/ $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ (FW)	增幅/%	SS含量/ $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ (FW)	增幅/%	SS含量/ $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ (FW)	增幅/%	SS含量/ $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ (FW)	增幅/%
对照(0)	5.7±0.1 ^d	—	5.9±0.6 ^c	—	7.9±1.6 ^a	—	7.6±1.2 ^b	—	6.3±0.6 ^{bc}	—
50	6.6±0.2 ^e	15.8	7.3±0.1 ^c	23.7	9.0±0.3 ^b	13.9	8.8±1.1 ^a	15.6	7.5±0.1 ^b	19.0
100	7.5±0.6 ^a	31.6	8.8±0 ^b	49.2	9.4±0 ^a	19.0	9.7±0.4 ^a	27.6	8.5±0.1 ^b	34.9
125	7.3±0.3 ^b	28.1	9.2±3.6 ^b	55.9	9.1±0.3 ^b	15.2	9.5±0.5 ^a	25.0	8.7±0.6 ^b	38.1
150	—	—	12.5±5.6 ^a	111.9	—	—	—	—	12.0±0.4 ^a	90.5
200	—	—	9.4±0.2 ^b	59.3	—	—	—	—	7.7±0.2 ^c	22.2

5 Na_2CO_3 胁迫对5种菌草苗期植株死亡率的影响

5种菌草苗期植株的死亡率随 Na_2CO_3 浓度的升高呈升高的趋势。 Na_2CO_3 浓度为50 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时对5种菌草生长均没有影响; 浓度在100 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 莱竹的死亡率最低, 为14.0%, 芦竹其次, 为17.0%, 与其他菌草差异显著; 浓度在125 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 莱竹、芦竹的死亡率差异不显著, 分别为28.0%、31.0%, 稗草的死亡率为63.0%, 与其他菌草差异显著, 巨菌草和象草的死亡率差异不显著, 分别为90.0%和94.0%; 浓度在150 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 莱竹的死亡率最低, 为78.0%, 芦竹其次, 为82.0%, 与其他菌草差异显著, 稗草、象草、巨菌草均不能成活; 浓度在200 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 莱竹和芦竹的死亡率差异不显著, 分别为92.0%和97.0% (表7)。

对菌草苗期植株死亡率与 Na_2CO_3 胁迫浓度进

表7 不同浓度 Na_2CO_3 胁迫下5种菌草苗期植株的死亡率Table 7 Mortality rates of 5 juncao species under the stress of Na_2CO_3 solution with different concentrations

菌草	Na_2CO_3 浓度/ $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$					
	0	50	100	125	150	200
稗草	0	0	25.0±1.2 ^b	63.0±1.8 ^b	100.0±0 ^a	100.0±0 ^a
莱竹	0	0	14.0±2.4 ^c	28.0±4.2 ^c	78.0±1.8 ^b	92.0±2.4 ^b
象草	0	0	66.0±1.8 ^a	94.0±1.2 ^a	100.0±0 ^a	100.0±0 ^a
巨菌草	0	0	59.0±3.6 ^a	90.0±2.4 ^a	100.0±0 ^a	100.0±0 ^a
芦竹	0	0	17.0±2.4 ^c	31.0±0.6 ^c	82.0±1.2 ^b	97.0±1.2 ^b

行回归分析, 结果显示, 稗草、莱竹、象草、巨菌草、芦竹的 Na_2CO_3 胁迫半致死浓度分别为107.0、127.7、68.5、78.5、123.0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 极限浓度分别为178.4、208.1、165.1、167.6、200.5 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (表8)。可见, 不同菌草的抗碱能力强弱依次为: 莱竹>芦竹>稗草>巨菌草>象草。

6 五种菌草抗碱性综合评价

通过各种生理指标的隶属函数分析可知, 莱竹的隶属函数平均值最高, 达0.95, 其次是芦竹、稗草、巨菌草, 分别为0.83、0.36、0.14, 象草最低, 为0.01 (表9)。因此, 5种菌草抗碱能力强弱为: 莱竹>芦竹>稗草>巨菌草>象草。

讨 论

植物抗碱性在种间、品种(系)间及不同个体间都存在差异(周存宇等2009), 同一种植物对不同环境或不同植物对同一环境条件的反应不同, 主要是受自身遗传特性的影响, 如与抗碱性相关的基因对不同碱浓度的反应不同(师东和张爱勤2011)。莫纪波等(2011)认为, 植物在生长发育过程中总是受到非生物和生物因子胁迫的影响。为了生存, 植物进化形成一个复杂、有效的信号转导网络, 以获知环境中的变化, 并通过控制下游相关基因的表达来精确地调控应答反应。冯军和郑彩霞(2011)报道, 植物对外界刺激的反应与转录因子DREB (dehydration responsive element binding)的

表8 五种菌草苗期植株死亡率与 Na_2CO_3 胁迫浓度的回归分析Table 8 Regress analysis of the mortality rates of 5 juncao species and the concentrations of Na_2CO_3 solution

菌草	相关指数(R^2)	回归方程	半致死浓度/ $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	极限浓度/ $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$
稗草	0.813	$y=35.643+142.758x$	107.0	178.4
莱竹	0.828	$y=47.383+160.708x$	127.7	208.1
象草	0.867	$y=22.127+32.769x+106.975x^2$	68.5	165.1
巨菌草	0.876	$y=25.574+69.726x+72.262x^2$	78.5	167.6
芦竹	0.828	$y=45.537+154.968x$	123.0	200.5

y 为死亡率, x 为 Na_2CO_3 浓度。

表9 五种菌草抗碱能力的综合评价

Table 9 Comprehensive evaluation of the alkaline-tolerance of the 5 juncao species

菌草	各指标的隶属函数值						隶属平均值	抗碱能力排序
	电导率	MDA含量	SS含量	SOD活性	POD活性	CAT活性		
稗草	0.83	0.62	0.32	0.15	0.14	0.08	0.36	3
莱竹	1.00	1.00	1.00	1.00	0.70	1.00	0.95	1
象草	0	0	0	0	0	0.04	0.01	5
巨菌草	0.16	0.27	0.24	0.07	0.07	0	0.14	4
芦竹	0.99	0.84	0.56	0.99	1.00	0.61	0.83	2

作用密切相关, DREB可调控逆境响应基因的表达, 并在整体上提高植物的抗逆性, 目前已从黑麦草、苜蓿、狼尾草等植株中分离并鉴定出调控非生物胁迫耐受性的DREB基因。5种菌草抗碱性差异主要与其遗传特性有关, 其遗传差异有待深入研究。

CAT、POD、SOD均是植物对膜脂过氧化的酶促防御系统的保护酶, 逆境条件下, 这些酶能清除体内多余的自由基(张新虎等2008)。REC反映植物细胞膜在逆境条件下透性变化和受损程度, REC提高, 表明膜受损程度加重(Fridovich 1976; 刘晓静和柳小妮2006)。MDA通过与膜结构上的蛋白质和酶结合、交联而使其失去活性, 是细胞毒性物质, 会破坏膜结构, 其含量的多少可反映逆境胁迫对植物造成氧化损害的程度(张赛娜等2008)。SS可提高细胞液的浓度, 增加细胞保水力, 从而提高植物的抗逆性, 是植物体内的渗透保护物质(Sasaki等1998)。刘建新等(2011)报道, 随着 NaHCO_3 胁迫浓度的增加, 黑麦草的SS含量、CAT和POD活性先升后降, 但SOD活性显著下降; 周存宇等(2009)报道, 干旱和碱双重胁迫不同狗牙根品种时, SOD活性先降低后升高再降低; 本实验得出相同

的结果。尹尚军等(2003)报道, $0\sim 200\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Na_2CO_3 浓度胁迫星星草时, 随胁迫浓度的增加, 电解质外渗率上升; 石德成和殷立娟(1993)对碱胁迫星星草和羊草的研究中也得到了同样的结果。高文俊等(2011)报道, 随 Na_2CO_3 胁迫浓度升高, 冰草的MDA含量显著增长, 表明冰草受到了严重的胁迫伤害; 刘建新等(2011)报道, 随着 NaHCO_3 胁迫浓度的增加, 黑麦草MDA含量明显上升; 与本实验结果一致。本实验表明, 不同菌草对碱胁迫响应存在较大差异, 这与其可溶性渗透物质调节能力有关。不同菌草对碱胁迫的SS含量, REC, MDA含量, SOD、POD、CAT活性等生理指标响应不同, 它们可作为衡量莱竹、芦竹、巨菌草、象草、稗草5种菌草膜系统的损伤程度及抗碱能力强弱的重要指标, 结合恢复试验死亡率, 5种菌草的抗碱能力为: 莱竹>芦竹>稗草>巨菌草>象草。

不同种植物在形态、结构和功能上的差异, 也显示出它们在不同生态环境条件下对进化结果的适应(高永生等2003)。在植物的器官中, 植物的根系对碱胁迫更为敏感(吴成龙等2008), 莱竹和芦竹均具发达的地下茎(即鞭根), 可能是其具有较强抗碱能力的原因。恢复试验20 d后, 不同菌草的外

部形态特征变化差异可印证这一现象。50 mmol·L⁻¹浓度Na₂CO₃胁迫下, 莱竹、芦竹、稗草生长正常, 未出现受害特征, 巨菌草、象草少数植株叶片出现轻微的失绿症状; 100 mmol·L⁻¹浓度胁迫下, 莱竹、芦竹叶片出现失绿症状, 大部分根系仅出现轻微受害状, 稗草、巨菌草、象草叶片发黄, 绿色叶片少, 植株根系出现明显的受害症状; 125 mmol·L⁻¹浓度胁迫下, 莱竹、芦竹叶片发黄, 根系出现受害症状, 稗草叶片枯黄, 地上部分、根系受害症状加重, 巨菌草、象草叶片枯黄, 根系出现严重受害症状, 失去弹性, 色泽暗, 多数植株死亡; 150 mmol·L⁻¹浓度胁迫下, 莱竹和芦竹茎、叶枯黄, 根系出现明显受害症状, 稗草、巨菌草、象草均已死亡; 200 mmol·L⁻¹浓度胁迫下, 除莱竹、芦竹极少数植株成活外, 其余菌草均死亡。

张国新等(2011)采用隶属函数法鉴定水稻品种耐盐性, 认为隶属函数分析提供了一条在多指标测定基础上对材料特性进行综合评价的途径, 将其应用于水稻耐盐育种的研究, 可大大提高水稻耐盐性筛选的可靠性。魏永胜等(2005)利用隶属函数值法评价苜蓿抗旱性, 认为隶属函数分析虽然不是绝对的抗旱分析方法, 但通过多个指标进行综合评价, 可克服仅利用少数指标对品种进行评价的不足, 更能揭示不同植物或同种植物不同品种间差异的实质, 从而提高抗旱鉴定的准确性。本实验中, 可能因为菌草品种不同, 对碱胁迫的反应不同, 不同生理指标的变化有差异, 因此, 用单一指标难以区分不同菌草的抗碱能力。通过隶属函数综合评价不同菌草的抗碱能力, 其结果与恢复实验一致, 提高了抗碱品种筛选的准确性。

植物生长受环境、气候等影响, 其抗碱能力也受到综合因素的影响, 只有通过适应性及在各种环境条件下进行栽培, 才能更准确地反映其真实的抗碱能力, 因此, 5种菌草将在多点、多地的实际推广和应用中进一步验证其实际的抗碱能力。

参考文献

陈建勋, 王晓峰(2002). 植物生理实验指导. 广州: 华南理工大学出版社, 6~93
 冯军, 郑彩霞(2011). DREB转录因子在植物非生物胁迫中的作用及应用研究. 植物生理学报, 47 (5): 437~442
 高文俊, 徐静, 谢开云, 董宽虎(2011). Na₂CO₃和NaHCO₃胁迫下冰

草的生长及生理响应. 草业学报, 20 (4): 299~304
 高永生, 王锁民, 张承烈(2003). 植物盐适应性调节机制的研究进展. 草业学报, 12 (2): 1~6
 葛瑛, 朱延明, 吕德康, 董婷婷, 王维世, 谭上进, 刘彩虹, 邹平(2009). 野生大豆碱胁迫反应的研究. 草业科学, 26 (2): 47~52
 韩建明, 张鹏英(2010). 模拟碱胁迫对绿豆种子萌发与幼苗生长发育的影响. 草业科学, 27 (8): 84~87
 纪荣花, 于磊, 鲁为华, 艾尼瓦尔·艾合买提(2011). 盐碱胁迫对芨芨草种子萌发的影响. 草业科学, 28 (2): 245~250
 林洁荣, 刘建昌, 苏水金(2003). 福建南亚热带狼尾草属牧草品种比选. 福建农林大学学报(自然科学版), 32 (1): 111~113
 林占熿(2003). 菌草学. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1~45
 刘洪涛, 陈耀玺(1981). 芦竹的生产和利用. 中国造纸通讯, (6): 34~40
 刘建新, 王鑫, 王瑞娟, 李东波(2011). 碱胁迫对黑麦草幼苗根系活性氧代谢和渗透溶质积累的影响. 植物研究, 31 (6): 674~679
 刘晓静, 柳小妮(2006). 多效唑和烯效唑对草地早熟禾一些生化指标及其抗性的影响. 草业学报, 15 (2): 48~53
 罗长富, 闵瑾如(1990). 栽培稗草的起源及其生物学特性. 草业科学, 7 (5): 21~29
 毛桂莲, 郑国琦, 戴珍珍(2006). NaCl和Na₂CO₃胁迫对枸杞愈伤组织生理效应的影响. 西北农业学报, 15 (6): 153~157
 莫纪波, 李大勇, 张慧娟, 宋凤鸣(2011). ERF转录因子在植物对生物和非生物胁迫反应中的作用. 植物生理学报, 47 (12): 1145~1154
 师东, 张爱勤(2011). 盐碱胁迫对两种补血草种子萌发的影响. 草业科学, 28 (8): 1445~1450
 石德成, 殷立娟(1992). Na₂CO₃胁迫下羊草苗的胁迫反应及其数学分析. 植物学报, 34 (5): 386~393
 石德成, 殷立娟(1993). 盐(NaCl)与碱(Na₂CO₃)对星星草胁迫作用的差异. 植物学报, 35 (2): 144~149
 王学奎(2006). 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 10~130
 魏永胜, 梁宗锁, 山仑, 张辰露(2005). 利用隶属函数值法评价苜蓿抗旱性. 草业科学, 22 (6): 33~36
 吴成龙, 周春霖, 尹金来, 刘兆普, 徐阳春, 沈其荣(2008). 碱胁迫对不同品种菊芋幼苗生物量分配和可溶性渗透物质含量的影响. 中国农业科学, 41 (3): 901~909
 夏方山, 董秋丽, 董宽虎(2010). 碱胁迫对碱地风毛菊生理特性的影响. 中国农学通报, 26 (21): 152~155
 颜宏, 赵伟, 盛艳敏, 石德成, 周道玮(2005). 碱胁迫对羊草和向日葵的影响. 应用生态学报, 16 (8): 1497~1501
 杨春武, 李长有, 尹红娟, 鞠淼, 石德成(2007). 小冰麦(*Triticum aestivum*-*Agropyron intermedium*)对盐胁迫和碱胁迫的生理响应. 作物学报, 33 (8): 1255~1261
 杨劲松(2008). 中国盐渍土研究的发展历程与展望. 土壤学报, 45 (5): 837~845
 尹尚军, 石德成, 颜宏(2003). 碱胁迫下星星草的主要胁迫反应. 草业学报, 12 (4): 51~57
 张国新, 王秀萍, 鲁雪林, 刘雅辉(2011). 隶属函数法鉴定水稻品种

- 耐盐性. 安徽农学通报, 17 (1): 36~37
- 张赛娜, 马旭君, 李科文, 刘军梅, 杨颖丽(2008). 补血草愈伤组织中渗透调节物对NaCl胁迫的响应. 西北植物学报, 28 (7): 1343~1348
- 张新虎, 何静, 沈惠敏(2008). 苍耳提取物对番茄灰霉病菌的抑制作用及抑菌机理初探. 草业学报, 17 (6): 99~104
- 张永峰, 殷波(2009). 混合盐碱胁迫对苗期紫花苜蓿抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响. 草业学报, 18 (1): 46~50
- 赵可夫, 李法增, 樊守金, 冯立田(1999). 中国的盐生植物. 植物学通报, 16 (3): 201~207
- 郑金英, 陈丽凤, 林占熿(2011). 菌草产业成长及其多功能性探析. 中国农学通报, 27 (1): 304~308
- 周存宇, 费永俊, 廖启荣(2009). 干旱和碱胁迫对不同狗牙根品种生理指标的影响. 湖北民族学院学报(自然科学版), 27 (2): 126~129
- 周建, 杨立峰, 张琳, 袁德义, 尤扬(2008). 碱胁迫对合欢种子萌发及幼苗生理指标的影响. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 34 (4): 401~408
- Fridovich I (1976). *Free Radical in Biology*. New York: New York Academic Press, 239~277
- Sasaki H, Ichimura K, Okada K, Oda M (1998). Freezing tolerance and soluble sugar contents affected by water stress during cold-acclimation and de-acclimation in cabbage seedlings. *Sci Hort*, 76 (3): 161~169
- Shi DC, Yan MS (2005). Effect of various salt-alkaline mixed stress conditions on sunflower seedlings and analysis of their stress factors. *Environ Exp Bot*, 54: 8~21
- Tanji KK (1990). Nature and extent of agricultural salinity. In: Tanji KK (ed). *Agricultural Salinity Assessment and Management*. New York: American Society of Civil Engineers, 1~18