

巨菌草对干旱胁迫的生理响应及相关性分析

谢长海^{1,2}, 王培丹^{1,2}, 刘艳玲^{1,2}, 林兴生^{1,2}, 林冬梅^{1,2}, 林占熿^{1,2}

(1. 福建农林大学 生命科学学院, 福建 福州 350002; 2. 国家菌草工程技术研究中心, 福建 福州 350002)

摘要:采用聚乙二醇(PEG-6000)模拟干旱胁迫的方法,研究了不同质量浓度 PEG-6000 胁迫后巨菌草叶片的生理特性变化,分析巨菌草的耐旱性,为巨菌草的应用和推广提供理论基础。结果表明:随着胁迫的加重,叶绿素和可溶性蛋白质含量下降,与胁迫质量浓度呈显著负相关;可溶性多糖(SS)含量升高,丙二醛(MDA)含量、过氧化物酶(POD)活性呈先升高后降低趋势,超氧化物歧化酶(SOD)活性、脯氨酸(Pro)含量先降低后升高,且 5 项指标变化均与胁迫质量浓度呈显著正相关;过氧化氢酶(CAT)活性呈先升后降趋势,与胁迫质量浓度无显著性相关。试验表明,巨菌草幼苗可忍受低于 200 g/L 的 PEG 胁迫,此浓度范围内巨菌草可以通过 3 种酶的相互协调作用和调节渗透物质(可溶性多糖(SS)和脯氨酸(Pro)的含量)来减轻干旱伤害,并维持植物体的正常生理代谢功能,具有一定的抗旱能力。但浓度达到 250 g/L 时,会对巨菌草幼苗造成严重干旱胁迫,甚至导致其死亡,250 g/L 是巨菌草幼苗抗旱的一个极限浓度。

关键词:PEG-6000;巨菌草;生理特性

中图分类号:Q 945.78 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2015)02-0129-05

菌草技术(Juncao Technology)研究始于 1986 年,经过福建农林大学菌草研究所林占熿研究员近 30 年的努力,已基本形成了配套综合技术。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、菌草生物转化及菌草综合利用的技术与工艺;菌草业是指菌草技术产业化形成的新兴产业^[1]。

巨菌草(*Pennisetum* sp.)于 2005 年福建农林大学菌草研究所与南非夸祖鲁奈塔省合作时引进,并作为高产、优质菌草推广。巨菌草隶属被子植物门单子叶植物纲禾本科狼尾草属,适宜在热带、亚热带、温带生长。巨菌草属典型的 C4 植物,植株高大直立、丛生,株高一般为 3~5 m,其根系发达,分蘖能力强,年产鲜草可达 200 t/hm² 以上^[2-4]。目前已在我国福建、浙江、宁夏、新疆、广西、海南等省,以及巴布亚新几内亚、卢旺达、莱索托等国家种植^[5]。巨菌草具有生长快、产量高、根系发

达、抗逆性强等特点,并在宁夏银川石漠化地区、西藏林芝流沙区域、内蒙古乌兰布和荒漠化地域等极端恶劣环境成功种植。目前巨菌草的抗寒、抗碱、抗盐等研究报道较多^[2-4],巨菌草的抗旱研究却鲜有报道。

该研究采用聚乙二醇(PEG-6000)模拟干旱的方法,测定在不同质量浓度 PEG-6000 干旱胁迫下巨菌草生理指标的动态变化,分析巨菌草对干旱的生理反应,旨在揭示巨菌草在干旱胁迫下的生理防御机制,丰富巨菌草逆境生理理论知识,为国内外干旱地区巨菌草的推广提供理论依据和参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试巨菌草(*Pennisetum* sp.)由南非引进,种植于福建农林大学菌草研究所菌草圃。

1.2 试验方法

以土壤条件一致的砂质土为培养基质,采用扦插法育苗,扦插后 30 d,将巨菌草从土壤中取出,避免损伤根系,并用清水冲洗净根系,移植到 1/2 Hoagland 营养液平衡培养 3 d 后,将其移入不同质量浓度的 PEG-6000 溶液中。不同质量浓度的 PEG 溶液是用 PEG 溶解于 1/2 Hoagland 营养液中配置而成,PEG 质量浓度设为 50、100、150、200、250 g/L,以 0 g/L 为对照(CK)。每个梯度 20 次重复,胁迫 72 h 后取幼苗叶片测定各项指标。

第一作者简介:谢长海(1989-),男,硕士研究生,现主要从事菌草生态治理等研究工作。E-mail:648102181@qq.com。

责任作者:林占熿(1943-),男,研究员,博士生导师,现主要从事菌草生态治理等研究工作。

基金项目:福建省科技重大专项资助项目(2012NZ0002);科技部国家中心组建资助项目(2011FU125X11)。

收稿日期:2014-11-10

1.3 项目测定

叶绿素含量采用丙酮提取法测定^[6];丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定^[6];游离脯氨酸(Pro)含量采用茚三酮比色法测定^[6];可溶性糖(SS)含量采用蒽酮比色法测定^[6];可溶性蛋白质(SP)含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定^[6];过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法测定^[7];超氧化物歧化酶(SOD)活性采用 NBT 还原法测定^[6];过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚比色法测定^[6]。

1.4 数据分析

试验数据采用 DPS 软件进行单因素方差分析;采

表 1

PEG 胁迫下巨菌草幼期的叶绿素含量

Table 1 The contents of chlorophyll of *Pennisetum* sp. under PEG stress at seedlings stage

PEG 浓度 PEG concentration (g · L ⁻¹)	光合色素 Photosynthetic pigments/(mg · g ⁻¹)				
	叶绿素 a Chl a	叶绿素 b Chl b	叶绿素 (a+b) Chl(a+b)	叶绿素 a/叶绿素 b Chl a/Chl b	类胡萝卜素 Carotenoids
0(CK)	1.598±0.104 ^a	0.474±0.014 ^a	2.074±0.114 ^a	3.369±0.166 ^a	0.212±0.026 ^a
50	1.355±0.118 ^{ab}	0.408±0.030 ^{ab}	1.763±0.147 ^{ab}	3.314±0.044 ^a	0.203±0.013 ^a
100	1.276±0.178 ^{ab}	0.400±0.030 ^{ab}	1.676±0.208 ^{ab}	3.178±0.219 ^a	0.162±0.007 ^b
150	1.253±0.183 ^b	0.379±0.042 ^b	1.632±0.225 ^b	3.295±0.111 ^a	0.204±0.016 ^a
200	1.153±0.101 ^b	0.412±0.035 ^{ab}	1.566±0.128 ^c	2.802±0.193 ^b	0.197±0.005 ^a
250	—	—	—	—	—

注:“—”表示幼苗已死亡;同列不同字母表示处理内浓度间在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: “—” show that seedlings of *Pennisetum* sp. was dead in the PEG stress; different lowercase letters in the same column show significant difference at 0.05 level. The same below.

2.2 干旱胁迫对巨菌草 MDA 和渗透调节物质积累的影响

2.2.1 膜脂过氧化产物的变化 由表 2 可知,随着 PEG 质量浓度的增大,MDA 含量表现为先增后降的趋势。当 PEG 质量浓度为 150 g/L,MDA 含量达到最大值(3.91 mmol/g),与 CK 相比增加 32.55%。

2.2.2 渗透调节物质含量的变化 随着 PEG 质量浓度的增大,脯氨酸(Pro)含量呈现先降后增的趋势。50、100 g/L 浓度胁迫下的 Pro 含量与 CK 比较差异不显著;当胁迫浓度达到 150、200 g/L 时,Pro 含量分别比 CK 显著增加 156.45%、459.72%($P<0.05$)。随着 PEG 胁迫浓度加大,巨菌草表现出明显的脯氨酸积累现象,而且胁迫程度越强,脯氨酸的积累现象越明显。不同质

表 2

PEG 胁迫下巨菌草苗期的 MDA 和渗透物质含量

Table 2 The contents of MDA and osmotic substances of *Pennisetum* sp. under PEG stress at seedlings stage

PEG 浓度 PEG concentration (g · L ⁻¹)	丙二醛 MDA		脯氨酸 Free proline		可溶性多糖 Soluble carbohydrate		可溶性蛋白质 Soluble protein	
	含量 Content (mmol · g ⁻¹)	增幅 Amplification /%	含量 Content (μg · g ⁻¹)	增幅 Amplification /%	含量 Content (mg · g ⁻¹)	增幅 Amplification /%	含量 Content (mg · g ⁻¹)	增幅 Amplification /%
0(CK)	2.95±0.11 ^d	—	5.81±0.44 ^{cd}	—	10.38±0.28 ^d	—	3.12±0.25 ^a	—
50	3.30±0.09 ^c	11.93	5.02±0.08 ^d	-13.60	11.59±0.53 ^c	11.67	3.00±0.20 ^a	-3.93
100	3.63±0.12 ^b	22.95	6.81±0.28 ^c	17.24	15.99±0.78 ^a	54.06	2.50±0.15 ^b	-19.94
150	3.91±0.17 ^a	32.55	14.90±0.66 ^b	156.45	13.49±0.31 ^b	29.97	2.32±0.19 ^b	-25.84
200	3.49±0.09 ^{bc}	18.49	32.52±1.09 ^a	459.72	15.54±0.49 ^a	49.71	1.59±0.18 ^c	-49.04
250	—	—	—	—	—	—	—	—

2.3 干旱胁迫对巨菌草保护酶活性的影响

由表 3 可知,巨菌草 SOD 活性随 PEG 质量浓度升

用 SPSS 统计软件进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对巨菌草光合色素含量的影响

由表 1 可知,随着 PEG 质量浓度的增大,叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量总体呈下降趋势,其中胁迫浓度较低时(50、100 g/L)三者均与 CK 无显著差异,当胁迫浓度达到 150 g/L 时,与 CK 相比分别显著降低 21.59%、20.04%、21.31%($P<0.05$);Chl a/Chl b 在胁迫浓度为 50~150 g/L 与 CK 差异不显著,胁迫浓度达到 200 g/L 显著降低 16.83%($P<0.05$)。

量浓度 PEG 胁迫下,可溶性多糖含量呈现先升后降的趋势,当胁迫浓度为 200 g/L 时,可溶性多糖含量达到最大值,与 CK 相比显著增加 49.71%($P<0.05$)。由此可见,PEG 胁迫对巨菌草的可溶性多糖含量影响较大,可溶性多糖在其抵御干旱逆境时起到了重要的调节作用。由表 2 可知,巨菌草可溶性蛋白质含量随着 PEG 胁迫程度的加剧而逐渐下降。当胁迫浓度较低(50 g/L)时,与 CK 相比没有显著差异;随着胁迫程度的逐步加剧,可溶性蛋白质含量显著降低,当胁迫浓度达到 200 g/L 时,与 CK 相比显著降低 49.04%($P<0.05$)。结果表明,可溶性蛋白质在巨菌草幼苗抵御干旱逆境时可能没有起重要调节作用。

高呈先降后升趋势,当胁迫浓度达到 200 g/L 时,SOD 活性与 CK 相比显著提高($P<0.05$);POD 活性的变化

趋势与 SOD 活性不同,随着胁迫浓度的增加则表现出先升后降的趋势。胁迫浓度在 50~150 g/L 时,POD 活性分别比 CK 显著增高 14.47%、15.99%、30.61% ($P<0.05$);随着 PEG 胁迫浓度增加,CAT 活性表现出先升后降的趋势,并在胁迫浓度为 100 g/L 时达到最大值 $472.23 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

当 PEG 浓度达到 200 g/L 时,巨菌草的抗氧化能力

表 3 PEG 胁迫下巨菌草苗期的保护酶活性

Table 3 The activities of protective enzyme of *Pennisetum* sp. under PEG stress at seedlings stage

PEG 浓度 PEG concentration /(g · L ⁻¹)	超氧化物歧化酶 SOD		过氧化物酶 POD		过氧化氢酶 CAT	
	活性	增幅	活性	增幅	活性	增幅
	Activity /(U · g ⁻¹)	Amplification /%	Activity /(U · g ⁻¹ · min ⁻¹)	Amplification /%	Activity /(U · g ⁻¹ · min ⁻¹)	Amplification /%
CK	728.50±10.67 ^b		2 257.78±29.86 ^c		369.03±10.89 ^d	
50	647.34±32.31 ^c	-11.14	2 584.44±44.91 ^b	14.47	435.33±10.34 ^b	17.97
100	689.86±22.82 ^{bc}	-5.31	2 618.89±25.14 ^b	15.99	472.23±8.29 ^a	27.90
150	683.09±18.38 ^{bc}	-6.23	2 948.89±88.54 ^a	30.61	445.46±8.98 ^b	20.59
200	818.36±10.93 ^a	12.33	2 612.22±20.06 ^b	15.70	399.19±12.33 ^c	8.17
250	—	—	—	—	—	—

2.4 干旱胁迫下巨菌草生理指标的相关性

由表 4 可知,PEG 胁迫质量浓度与 SOD 活性呈显著正相关($P<0.05$);与 MDA 含量、脯氨酸含量、可溶性多糖含量及 POD 活性呈极显著正相关($P<0.01$);与叶绿素总量、可溶性蛋白质含量呈极显著负相关,与 CAT 活性不相关;结果表明随干旱胁迫的增强,MDA 含量急

逐渐衰退,但是 SOD、POD、CAT 活性能维持在较高水平,三者与 CK 相比分别显著提高 12.33%、15.70%、8.17% ($P<0.05$)。该结果表明,巨菌草幼苗受到 200 g/L PEG 胁迫时,3 种抗氧化酶仍能保持较强的清除效应,从而将活性氧的伤害控制在一定的范围内,抵御干旱逆境对其造成的伤害。

剧增加、叶绿素受到破坏含量下降、可溶性蛋白质含量持续降低,巨菌草受到的干旱害程度加深;同时,巨菌草通过快速增加脯氨酸和可溶性多糖含量,来维持细胞正常渗透压,并通过增强 POD、SOD、CAT 活性来清除活性氧等有害物质,从而抵御干旱逆境对其造成的伤害。

表 4 PEG 胁迫下巨菌草生理指标的相关性分析

Table 4 The correlation analysis of *Pennisetum* sp. physiological indexes to PEG stress

生理指标 Physiological index	PEG 浓度 PEG concentration	MDA 含量 MDA content	叶绿素总量 Chlorophyll content	脯氨酸含量 Freeproline content	可溶性蛋白质含量 Soluble protein content	可溶性多糖含量 Soluble sugar content	POD 活性 POD activity	SOD 活性 SOD activity	CAT 活性 CAT activity
PEG 浓度	1								
MDA 含量	0.700 **	1							
叶绿素总量	-0.658 **	-0.585 *	1						
脯氨酸含量	0.861 **	0.317	-0.451 *	1					
可溶性蛋白质含量	-0.910 **	-0.484 *	0.651 **	-0.878 **	1				
可溶性多糖含量	0.773 **	0.600 **	-0.494 *	0.533 *	-0.734 **	1			
POD 活性	0.677 **	0.903 **	-0.504 *	0.291	-0.445 *	0.446 *	1		
SOD 活性	0.492 *	-0.155	-0.030	0.792 **	-0.598 **	0.378	-0.211	1	
CAT 活性	0.262	0.609 **	-0.423	-0.233	-0.121	0.523 *	0.619 **	-0.503 *	1

注:**表示指标在 0.01 水平显著相关;*表示指标在 0.05 水平显著相关。
Note:** show significant difference at 0.01 level;* show significant difference at 0.05 level.

3 讨论与结论

植物在逆境条件下,细胞体内活性氧不断积累,进而加速质膜过氧化的反应,引起丙二醛等有害物质的积累,严重损伤生物膜,导致细胞膜透性的增大和胞间物质的外渗,因此丙二醛含量多少是判断细胞遭受胁迫程度大小的重要指标^[8-10]。该研究中 MDA 含量随胁迫浓度的升高呈先升高后下降的趋势,表明随胁迫浓度的升高,膜脂过氧化作用逐渐加强,大量离子外渗从而导致 MDA 含量升高,MDA 随着胁迫加强而出现降低则可能是代谢紊乱的结果^[11-12]。焦树英等^[13]报道了芒草在 PEG 胁迫时 MDA 也呈先升后降趋势。

可溶性蛋白质具有较强的亲水胶体性,影响细胞的保水力,植物通过可溶性蛋白质的主动积累来降低渗透势,进行渗透调节。有研究表明,由于干旱胁迫的加重,蛋白酶的活性升高,且 RNA 转录和翻译受到抑制,导致可溶性蛋白质含量降低^[14]。该研究中可溶性蛋白质含量随着 PEG 胁迫浓度的升高呈下降趋势,并与胁迫浓度呈极显著负相关,说明干旱抑制蛋白质的合成并诱导蛋白质的降解,从而使植株体内的可溶性蛋白质含量降低。葛体达等^[15]研究水分胁迫夏玉米、魏良民等^[16]研究沙拐枣幼苗抗旱性等相关报道得出相似的结论。

植物受到渗透胁迫时,脯氨酸在植物体内大量累

积,并起着渗透调节的作用。脯氨酸积累量的大小影响着渗透调节能力,而渗透调节能力大小与抗旱性能密切相关,因此脯氨酸含量多少可以衡量出植物的抗旱性能^[17-19]。可溶性多糖作为植物叶片细胞内的另一种渗透调节物质,植物通过可溶性多糖的主动积累,参与调节植物体内渗透势,并利于植物在干旱逆境下维持植物体正常生长所需水分,提高抗逆性^[20]。该研究中,随着PEG渗透胁迫程度的加重,巨菌草叶片中游离脯氨酸和可溶性多糖含量均随之增加,渗透调节能力随之增强,进而提高其抗旱能力。关于脯氨酸含量在逆境下产生积累的生理效应观点不一^[21-22],试验结果分析表明,巨菌草脯氨酸含量的变化与PEG胁迫强度极显著相关,因此将脯氨酸作为渗透胁迫下的一种渗透调节物质比较合理,与范苏鲁等^[23]的结论基本一致。

细胞中生物活性氧的积累是造成细胞伤害乃至死亡的主要原因,而细胞中清除活性氧的保护酶系统的存在及活性增强,是细胞免于伤害或抗性增强的主要原因之一^[24]。过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)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,此类保护酶实际上是一个抗氧化的膜保护系统,能够清除植物体内多余的自由基^[25]。该研究中SOD活性呈现先降后升趋势,POD和CAT则表现为先升后降的不同趋势,表明这3种酶对PEG胁迫和活性氧的响应可能存在一定的差异,表现为相互协调的作用。

PEG干旱胁迫条件下,巨菌草幼苗MDA升高、光合色素含量下降,膜脂质过氧化程度在逐步加深,光合作用受到抑制。同时,巨菌草幼苗通过增加SOD、POD、CAT活性以及脯氨酸、可溶性多糖的含量,共同抵抗氧化胁迫所造成的伤害。当浓度达到250 g/L时,超过了巨菌草幼苗的承受极限,巨菌草幼苗出现死亡,250 g/L是巨菌草幼苗抗旱的一个极限浓度。植物抗旱性是一个较为复杂的综合性状,不仅与干旱胁迫程度相关,同时与干旱胁迫时间和植物生育期有关。该研究揭示了苗期的巨菌草对干旱胁迫的生理响应,而不同生育期(幼苗期、分蘖期、拔节期、成熟期)的巨菌草对干旱胁迫的抵抗能力有待于进一步的研究。

参考文献

- [1] 林占熿. 菌草学[M]. 3版. 北京: 国家行政学院出版社, 2013.
- [2] 林兴生, 林占熿, 林辉, 等. 五种菌草苗期对碱胁迫的生理响应及抗

碱性评价[J]. 植物生理学报, 2013(2): 167-174.

- [3] 林兴生, 林占熿, 林冬梅, 等. 低温胁迫5种菌草的抗寒性评价[J]. 草业学报, 2013(2): 227-234.
- [4] 林兴生, 林占熿, 林冬梅, 等. 5种菌草苗期抗盐性的评价[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2013(2): 95-201.
- [5] 林兴生, 林占熿, 林冬梅, 等. 不同种植年限的巨菌草对植物和昆虫多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2012(10): 849-854.
- [6] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社出版, 2001: 164-263.
- [7] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社出版, 2006: 10-130.
- [8] 肖用森, 王正直, 郭绍川. 渗透胁迫下稻苗中游离脯氨酸累积与膜脂过氧化化的关系[J]. 武汉植物学研究, 1996(4): 34-340.
- [9] 杨帆, 苗灵凤, 胥晓, 等. 植物对干旱胁迫的响应研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2007(4): 586-591.
- [10] 韩永华. 水分胁迫对大豆幼苗叶片细胞质膜的影响[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 1999(4): 85-87.
- [11] 张远兵, 刘爱荣, 方蓉. 外源一氧化氮对镉胁迫下黑麦草生长和抗氧化酶活性的影响[J]. 草业学报, 2008(4): 57-64.
- [12] 王罗霞, 赵志光, 王锁民. 一氧化氮对水分胁迫下小麦叶片活性氧代谢及膜脂过氧化化的影响[J]. 草业学报, 2006(4): 104-108.
- [13] 焦树英, 徐家林, 李红利, 等. 芒草对NaCl和PEG胁迫的生理响应及相关性分析[J]. 中国草地学报, 2010(5): 21-26.
- [14] 谢志玉, 张文辉, 刘新成. 干旱胁迫对文冠果幼苗生长和生理生化特征的影响[J]. 西北植物学报, 2010(5): 948-954.
- [15] 葛体达, 隋方功, 白莉萍, 等. 水分胁迫下夏玉米根叶保护酶活性变化及其对膜脂过氧化作用的影响[J]. 中国农业科学, 2005(5): 922-928.
- [16] 魏良民, 李康. 沙拐枣幼苗生长规律及与其抗旱性关系研究[J]. 干旱区研究, 1994(3): 47-51.
- [17] 李予霞, 崔百明, 刘升学, 等. 聚乙二醇引起的水分胁迫下葡萄试管苗的生长和形态变化[J]. 植物生理学通讯, 2004(3): 305-308.
- [18] 武勇, 陈存及, 刘宝, 等. 干旱胁迫下柚木叶片生理指标的变化[J]. 福建林学院学报, 2006(2): 103-106.
- [19] 余玲, 王彦荣, Trevor G, 等. 紫花苜蓿不同品种对干旱胁迫的生理响应[J]. 草业学报, 2006(3): 75-85.
- [20] 贺鸿雁, 孙存华, 杜伟, 等. PEG 6000胁迫对花生幼苗渗透调节物质的影响[J]. 中国油料作物学报, 2006(1): 76-78, 82.
- [21] 卢少云, 陈斯平, 陈斯曼, 等. 三种暖季型草坪草在干旱条件下脯氨酸含量和抗氧化酶活性的变化[J]. 园艺学报, 2003(3): 303-306.
- [22] 马国良, 李军乔, 李炳发. 干旱胁迫对克隆植物蕨麻游离脯氨酸含量的影响[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 2005(3): 76-77.
- [23] 范苏鲁, 苑兆和, 冯立娟, 等. 干旱胁迫对大丽花生理生化指标的影响[J]. 应用生态学报, 2011(3): 651-657.
- [24] 许桂芳. PEG胁迫对2种过路黄抗性生理生化指标的影响[J]. 草业学报, 2008(1): 66-70.
- [25] 张卫华, 张方秋, 张守攻, 等. 马占相思抗旱性生理指标的选择研究[J]. 中南林学院学报, 2005(6): 56-59.

Correlation Analysis and Physiological Characteristics of *Pennisetum* sp. Under Drought Stress

XIE Chang-hai^{1,2}, WANG Pei-dan^{1,2}, LIU Yan-ling^{1,2}, LIN Xing-sheng^{1,2}, LIN Dong-mei^{1,2}, LIN Zhan-xi^{1,2}

(1. School of Life Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002; 2. China National Engineering Research Center of Juncao Technology, Fuzhou, Fujian 350002)

不同产地商业香菇品种中有机酸含量差异分析

于海龙¹, 陈万超^{1,2}, 李文¹, 谭琦¹, 尚晓冬¹, 杨焱¹

(1. 上海市农业科学院 食用菌研究所, 农业部南方食用菌资源利用重点实验室, 国家食用菌工程技术研究中心, 国家食用菌加工技术研发分中心, 上海市农业遗传育种重点开放实验室, 上海 201403; 2. 上海海洋大学 食品学院, 上海 201306)

摘要:以国内香菇主产区市售 4 种香菇干品为试材, 利用反相高效液相色谱法对其有机酸含量进行了测定, 拟从有机酸角度分析不同地区同类香菇风味差异。结果表明: 苹果酸、乙酸、柠檬酸、富马酸、琥珀酸 5 种有机酸在不同产地同类香菇中都可检出, 酒石酸及抗坏血酸都在检出限以下。不同产地香菇干品中 5 种有机酸含量存在显著差异, 含量由大到小依次为琥珀酸 > 柠檬酸 > 苹果酸 > 乙酸 > 富马酸。其中湖北随州冬菇中苹果酸含量最高, 达到了 $(34.66 \pm 0.49) \text{mg/g}$; 福建尤溪金钱菇中乙酸、柠檬酸和琥珀酸的含量最高, 分别达到了 $(35.48 \pm 0.11) \text{mg/g}$ 、 $(47.42 \pm 0.16) \text{mg/g}$ 和 $(222.07 \pm 0.20) \text{mg/g}$; 浙江庆元花菇中富马酸含量最高, 达到 $(5.53 \pm 0.08) \text{mg/g}$ 。不同产地干香菇中有机酸含量的差异可以为其风味差异提供切实的理论基础, 便于进一步的加工或者消费选择。

关键词:香菇; 主产区; 品种; 有机酸

中图分类号:S 646 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2015)02-0133-03

香菇 [*Lentinus edodes* (Berk.) sing] 属担子菌纲 (Basidiomycetes)、伞菌目 (Agaricales)、口蘑科 (Tricholomataceae)、香菇属 (*Lentinus*), 又称花菇、冬菇、香信等, 在我国具有悠久的栽培历史, 是我国久负盛名的珍贵食用菌^[1]。目前, 市场上的香菇产品种类繁多, 根据外观特征其商品被划分为花菇、冬菇、金钱菇、

黑面菇等^[2]。

有机酸广泛存在于各种农产品中, 其种类和含量直接影响农产品口感、风味和色泽, 也是农产品成熟度、加工性以及耐储藏性的重要依据^[3]。有机酸是食用菌风味的重要组成部分, 与合成酚类、氨基酸、酯类和芳香物质的代谢过程密切相关, 其种类和含量的不同在一定程度上影响着独特风味的形成^[4], 吉田博等^[5]研究认为香菇微妙的呈味效果与有机酸有关。目前市售香菇中并没有香菇品种以及栽培配方的标注, 但不同商品种类香菇其口感风味却有很大差异。该研究以谷镇等^[6]、杨焱等^[7]的研究为基础选取了食用菌风味分析中常用的几

第一作者简介:于海龙(1982-), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向为食用菌育种及栽培。E-mail: yuhailong_01@126.com.

责任作者:杨焱(1970-), 女, 博士, 研究员, 现主要从事食药菌深加工技术等研究工作。E-mail: yangyan@saas.sh.cn.

收稿日期:2014-11-06

Abstract: To provide the academic basis of *Pennisetum* sp. application and popularization, and to analyzing drought resistance, physiological characteristics of *Pennisetum* sp. were studied under drought stress simulated by different concentration of PEG 6000. The results showed that, by the increase of stress level, the contents of soluble protein and chlorophyll decreased continuously, showing an obvious negative correlation with PEG stress; the content of soluble polysaccharide increased gradually; while the content of MDA or POD activity increased firstly and then decreased, the contents of proline and SOD activity decreased at beginning and then increased. Data of these five characters showed a significant positive correlation with PEG stress; the CAT activity increased firstly and then decreased, showing an insignificant positive correlation with PEG stress. These results indicate that *Pennisetum* sp. seedlings could stand less than the concentration of 200 g/L PEG and had a certain degree of drought tolerance. The interaction of three kinds of enzyme and osmotic adjustment substance (water soluble polysaccharide and proline) could be automatically managed to avoid the damage from water drought, which may induce potential ability of *Pennisetum* sp. against drought conditions. More than the concentration of 200 g/L PEG could bring *Pennisetum* sp. seedlings severe drought stress and even death.

Keywords: PEG-6000; *Pennisetum* sp.; physiological characteristic