

## 水分胁迫寄主植物对莲草直胸跳甲生长发育的影响

付淑慧<sup>1</sup> 申洁<sup>2</sup> 原祥鹤<sup>2</sup> 郝炯<sup>2\*</sup> 马瑞燕<sup>2</sup>

(1. 山西农业大学 生命科学学院, 山西 太谷 030801;

2. 山西农业大学 农学院, 山西 太谷 030801)

**摘要** 喜旱莲子草是水陆两栖的入侵杂草,为探讨在利用其专食性天敌莲草直胸跳甲防治过程中,发现的陆生型喜旱莲子草控制效果不佳的原因,本试验从水分变化的角度,通过设置不同质量分数的聚乙二醇 6000 (PEG6000) (5%、10%、15%、20%和 25%)模拟干旱环境,对喜旱莲子草胁迫处理后,饲喂莲草直胸跳甲幼虫和成虫,记录该跳甲取食后的发育历期、虫重、幼虫死亡情况、化蛹量及羽化量,结果表明:随着水分胁迫程度的加剧,莲草直胸跳甲 1~3 龄幼虫的发育历期延长,当胁迫质量分数达到 25%时,各龄幼虫的发育历期均达到最长;而成虫的寿命随着水分胁迫程度增加而缩短,当胁迫程度为 25%时,和对照相比寿命缩短了 5.59 d;不同虫态的鲜重随着胁迫质量分数的增加均有所下降,其中 2 龄幼虫和成虫的体重在 25%时下降最显著,分别下降了 3.19 和 2.34 mg;1 龄、2 龄和 3 龄幼虫的死亡率均在胁迫质量分数为 25%时达到最大,分别为对照的 10.0 倍、6.0 倍和 4.7 倍;化蛹率和羽化率随着胁迫程度的加剧均降低,25%时化蛹率和羽化率最低,与对照相比分别降低了 33.0%和 37.5%。因此,干旱胁迫喜旱莲子草不利于莲草直胸跳甲的生长发育。

**关键词** 水分胁迫;莲草直胸跳甲;喜旱莲子草;发育;生物防治

中图分类号 S 476+.9

文章编号 1007-4333(2016)05-0091-07

文献标志码 A

## Effect of host plant under water stress on the growth and development of *Agasicles hygrophila*

FU Shu-hui<sup>1</sup>, SHEN Jie<sup>2</sup>, YUAN Xiang-he<sup>2</sup>, HAO Jiong<sup>2\*</sup>, MA Rui-yan<sup>2</sup>

(1. College of Life Science, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China;

2. College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

**Abstract** *Alternanthera philoxeroides* is an amphibious invasive weed. Its natural enemy *Agasicles hygrophila* has been used as a bio-control agent for the management of *A. philoxeroides*. However, the bio-control strategy was ineffective. In order to investigate the reasons, five different PEG-6000 mass fraction gradients (5%, 10%, 15%, 20% and 25%) were adapt to simulate to water stress conditions on *A. philoxeroides*, and the stressed plant grasses were used to feed *A. hygrophila*. Development duration, weight, motality, pupation rate and eclosion rate of flea beetle were recorded. The results showed that with the intensifying of water stress degree, 1 - 3 instar larvae stages of *A. hygrophila* were respectively extended; Under the stress mass fraction of 25%, development duration reached maximum; Adult longevity in experimental group became shorter with the water stress degree intensifying; Comparing with the control group, adult longevity is shortened by 5.59 d in the stress mass fraction of 25%; The weights of flea beetle of the different stage were decreased, and the weights of the second instars and adults in 25% significantly fall by 3.19 mg and 2.34 mg, respectively; Larval mortalities of 1 - 3 instar larvae all were maximum in 25% and in this mass fraction each larval mortality was increased by 10.0, 6.0 and 4.7 times, respectively; Pupation rate and eclosion rate are increased respectively with the stress mass fraction increased; Pupation rate and eclosion rate was reduced by

收稿日期: 2015-07-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31570436); 山西农业大学科技创新基金项目 (20132-18)

第一作者: 付淑慧, 硕士研究生, E-mail: fushuhui091@163.com

通讯作者: 郝炯, 助教, 主要从事生物防治研究, E-mail: haoj233@163.com

33.0% and 37.5% respectively compared with the control group in 25%. In conclusion, *A. philoxeroides* under water stress effects the growth and development of *A. hygrophila*.

**Keywords** water stress; *Alternanthera philoxeroides*; *Agasicles Hygrophila*; development; biological control

喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*),又名空心莲子草,原产于南美洲,是一种多年生的草本植物,可在水、陆等多种生境中生长繁殖,并且随着环境条件的变化可以相互转换<sup>[1-3]</sup>。水生型喜旱莲子草可以在陆地上大量生长繁殖,发育成陆生型;同样,陆生型喜旱莲子草蔓延到水域中可逐渐变成水生型<sup>[3]</sup>。因其极强的生态适应性和繁殖能力,现已遍布美国、澳大利亚、新西兰、非洲和东南亚等地区,严重危害各国的农业生态安全和生物多样性,成为一种危害极强的世界性杂草<sup>[1,3-4]</sup>。

为了有效地控制喜旱莲子草造成的危害,引进其专食性天敌——莲草直胸跳甲(*Agasicles hygrophila*)进行生物防治,目前该跳甲对水生型喜旱莲子草形成了明显的控制作用,而对陆生型喜旱莲子草防治效果不佳<sup>[4]</sup>。为了解决该难题,科研工作人员已从不同的方面展开了研究。贾昕等<sup>[5]</sup>研究了陆生型喜旱莲子草的生长模式,发现成功控制和管理陆生种群的关键在于防治其地下部分。对莲草直胸跳甲的取食进行研究发现该跳甲对不同生态型喜旱莲子草的取食存在差异<sup>[6-7]</sup>。另外,不同生态型的喜旱莲子草对莲草直胸跳甲的化蛹能力也存在差异,对不同生态型喜旱莲子草的茎秆进行解剖,结果显示陆生型种群具有紧密的次生结构,会影响莲草直胸跳甲的化蛹能力,进而影响喜旱莲子草的防控效果<sup>[4,8]</sup>。针对不同生态型喜旱莲子草的营养成分与化蛹率的关系进行研究,发现喜旱莲子草含水量越多,莲草直胸跳甲的化蛹率越高<sup>[9]</sup>。因此,喜旱莲子草的含水量会影响莲草直胸跳甲。然而,关于水分引起喜旱莲子草的变化对莲草直胸跳甲生长发育的影响还鲜有报道。

本试验针对陆生型喜旱莲子草在响应水分胁迫时,是否对莲草直胸跳甲的生长发育产生影响,进而间接影响到陆生型喜旱莲子草的防治效果,通过设置不同质量分数的聚乙二醇 6000(PEG6000)模拟陆生型干旱环境,对喜旱莲子草进行水分胁迫,接入天敌虫源,记录莲草直胸跳甲取食后的发育历期、虫重、幼虫死亡情况、化蛹量、羽化量以及成虫死亡情况,以探讨不同处理下陆生型喜旱莲子草对莲草直胸跳甲的影响,旨在为进一步防治陆生型喜旱莲子

草提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

莲草直胸跳甲成虫于 2006 年广东省华南农业大学采集,实验室内常年饲养,已建立稳定可控的试验种群,培养条件为温度(28±1)℃,光照 L:D=14:10,相对湿度 RH≥85%。

喜旱莲子草栽培于山西农业大学农学院温室中。

### 1.2 试验处理

#### 1.2.1 喜旱莲子草的处理

喜旱莲子草处理的方法参照文献[10]的方法。试验中剪取夏季生长一致的陆生型喜旱莲子草植株(4节,苗长 12 cm),置于 Hoagland 营养液中培养,每瓶(高 17 cm,直径 13 cm)5 株幼苗。放入温度(28±1)℃,光照 L:D=14:10,相对湿度 RH≥85%的光照培养箱中培养,每隔 2 d 换 1 次培养液。待喜旱莲子草根系长达 8~10 cm 以上,选取长势基本一致的喜旱莲子草个体,分别移入 5%、10%、15%、20%和 25% 5 个不同质量分数的 PEG6000 溶液中进行根系胁迫作为处理,同时以不加 PEG6000 的营养液作为对照。

#### 1.2.2 莲草直胸跳甲幼虫发育历期及幼虫死亡率的测定

在培养皿(直径约为 150 mm)中接入 30 头同期孵化、生长一致的莲草直胸跳甲 1 龄幼虫,于光照培养箱中饲养,培养条件同 1.1。用不同水分胁迫处理的喜旱莲子草幼叶饲养。每个处理重复 3 次,每天更换叶片,记录莲草直胸跳甲幼虫的发育时间及存活情况,直至化蛹,以未受水分胁迫处理后的喜旱莲子草幼叶饲养的莲草直胸跳甲为对照,统计不同处理下莲草直胸跳甲 1~3 龄幼虫的发育历期和死亡率。

#### 1.2.3 莲草直胸跳甲化蛹率、羽化率

将 1.2.2 中受到不同水分胁迫后尚存活的 3 龄老熟幼虫,接入放有不同水分胁迫处理的喜旱莲子草茎秆(直径为 5 mm)的化蛹管(高 40 cm,直径 3 cm)中,让其钻入茎秆中化蛹。每个处理重复 3

次。记录幼虫化蛹的数量、蛹的发育历期以及羽化后成虫的数量,用于统计化蛹率和羽化率。

$$\text{化蛹率} = \text{钻入茎干的数目} / \text{接虫数} \times 100\%$$

$$\text{羽化率} = \text{羽化数} / \text{钻入茎干的数目} \times 100\%$$

### 1.2.4 莲草直胸跳甲成虫寿命的测定

将1.2.3中成功羽化的成虫放于养虫罐(高17 cm,直径13 cm)中,雌雄自然配对,用不同水分胁迫处理的喜旱莲子草饲养,直至成虫自然死亡,记录死亡时间。莲草直胸跳甲的死亡判定标准为将成虫放在纸片上,逐个用绘图毛笔刺激跳甲的腹部,看有无活动,若有记录为活虫,否则记录为死虫。以未受水分胁迫处理的喜旱莲子草饲养的成虫作为对照,记录成虫的寿命。

### 1.2.5 莲草直胸跳甲虫体鲜重的测定

用(1/10 000)分析天平(SI-114, DENVER INSTRUMENT)对各龄期虫体进行群体称量,称量后取平均值。

## 1.3 数据分析

数据采用Microsoft Excel软件进行绘图,采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)中的Duncan

法检测各处理间的差异显著性(SPSS 17.0)。

## 2 结果与分析

### 2.1 莲草直胸跳甲的发育历期

随着水分胁迫程度的增加,莲草直胸跳甲幼虫发育历期和蛹期明显延长,而成虫寿命缩短(表1)。胁迫质量分数为15%~25%,1龄幼虫的发育历期延长,当胁迫质量分数为25%时,1龄幼虫的发育历期最长,为3.60 d,与对照相比,延长了0.57 d。2龄幼虫在胁迫质量分数为5%~15%时,发育历期延长,但与对照相比,差异并不显著( $P > 0.05$ );质量分数在20%~25%时,2龄幼虫的发育历期与对照相比延长,差异显著( $P < 0.05$ ),在25%时发育历期最长。3龄幼虫在胁迫质量分数为15%~25%时,发育历期与对照相比延长且差异显著( $P < 0.05$ )。胁迫质量分数在20%~25%,蛹期延长。胁迫为20%~25%时,成虫的寿命与对照相比缩短且差异显著( $P < 0.05$ ),最短为39.77 d,与对照相比缩短了5.59 d。因此20%~25%的胁迫质量分数对跳甲幼虫和成虫的发育历期影响最大。

表1 莲草直胸跳甲取食不同水分胁迫喜旱莲子草后的发育历期

Table 1 Development duration of *A. hygrophila* under different water stress on

*A. philoxeroides* (Means±SE)

d

<i>w</i> (PEG)/% PEG mass fraction	1龄幼虫	2龄幼虫	3龄幼虫	蛹期	成虫期
	1 <sup>st</sup> instar	2 <sup>nd</sup> instar	3 <sup>rd</sup> instar	Pupe	Adult
0(CK)	3.03±0.04 c	3.08±0.04 c	2.02±0.01 d	8.34±0.03 b	45.36±0.17 a
5	3.14±0.03 c	3.26±0.04 bc	2.12±0.06 cd	8.39±0.03 b	44.84±0.15 a
10	3.16±0.03 c	3.30±0.05 bc	2.15±0.07 cd	8.40±0.03 b	44.52±0.48 a
15	3.28±0.03 b	3.32±0.11 bc	2.32±0.06 bc	8.42±0.07 b	43.71±0.81 ab
20	3.33±0.05 b	3.49±0.11 b	2.45±0.10 ab	8.68±0.04 a	41.95±1.13 bc
25	3.60±0.06 a	3.75±0.06 a	2.62±0.10 a	8.79±0.06 a	39.77±1.22 c
df	5	5	5	5	5
<i>F</i>	23.694	9.070	9.253	16.097	7.336
<i>P</i>	0.000	0.001	0.001	0.000	0.002

注:表中同列数字后英文字母相同者表示在0.05水平上差异不显著。下同。

Note: Values followed by the same letters within each column are not significantly different at 0.05 level. The same below.

### 2.2 莲草直胸跳甲虫重

莲草直胸跳甲取食不同水分胁迫程度的喜旱莲子草后,体重均有变化,并且随着水分胁迫程度

的增加,2龄、3龄幼虫及成虫的重量均下降(表2)。2龄幼虫在胁迫质量分数为5%~15%时虫体重量一直下降,在20%时,虫体的重量有所增

加,但同对照相比虫重下降,当胁迫达到 25% 时虫重最轻,仅为 1.33 mg,显著低于对照的重量( $P < 0.05$ ),下降了 3.19 mg。3 龄幼虫在胁迫为 5%、10% 和 15% 时,重量升高,但与对照相比,差异不显著( $P > 0.05$ );当质量分数为 25% 时,3 龄幼虫

出现最轻的体重为 5.19 mg,但与对照相比,差异不显著( $P > 0.05$ )。成虫随着胁迫的加剧,体重一直降低,在胁迫质量分数为 25% 时出现的最轻体重为 6.35 mg,与对照相比下降了 2.34 mg,差异显著( $P < 0.05$ )。

表 2 不同水分胁迫对莲草直胸跳甲虫重的影响

Table 2 Effect of weight of *A. hygrophila* under different water stress on *A. philoxeroides* (Means  $\pm$  SE) mg

$w(\text{PEG})/\%$ PEG mass fraction	2 龄幼虫 2 <sup>nd</sup> instar	3 龄幼虫 3 <sup>rd</sup> instar	成虫 Adult
0(CK)	4.52 $\pm$ 0.11 a	6.21 $\pm$ 0.14 ab	8.69 $\pm$ 0.09 a
5	3.49 $\pm$ 0.15 b	6.32 $\pm$ 0.16 a	8.28 $\pm$ 0.33 a
10	1.80 $\pm$ 0.08 cd	6.31 $\pm$ 0.62 a	7.16 $\pm$ 0.16 bc
15	1.44 $\pm$ 0.24 d	6.27 $\pm$ 0.12 ab	7.47 $\pm$ 0.28 b
20	2.04 $\pm$ 0.18 c	6.18 $\pm$ 0.38 ab	6.52 $\pm$ 0.02 cd
25	1.33 $\pm$ 0.06 d	5.19 $\pm$ 0.22 b	6.35 $\pm$ 0.29 d
df	5	5	5
F	74.820	1.797	17.443
P	0.000	0.188	0.000

### 2.3 莲草直胸跳甲幼虫死亡率

取食受水分胁迫的喜旱莲子草叶片后,莲草直胸跳甲幼虫的死亡率升高,并且随着水分胁迫程度的增加,莲草直胸跳甲幼虫的死亡率增加(图 1)。1 龄幼虫在胁迫质量分数为 5% 时死亡速率迅速增加,随着胁迫浓度的增加,死亡率增加,在 25% 时死亡率达到最大值,为 22.2%,是对照的 10.0 倍。2 龄幼虫在各胁迫质量分数下的死亡率随着浓度的

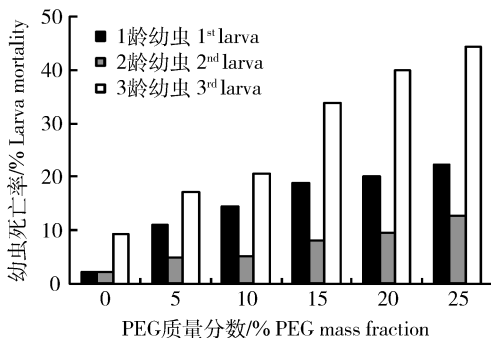


图 1 不同水分胁迫对莲草直胸跳甲死亡率的影响

Fig. 1 Mortality of *A. hygrophila* larva under different water stress treatments

增加而平稳增加,在 25% 时出现最大死亡率为 12.8%,是对照的 6.0 倍。3 龄幼虫在 15% 时死亡率迅速增加,达到 33.8%,随着胁迫程度加剧,死亡率继续增加,在 25% 时最大死亡率为 44.3%,是对照的 4.7 倍。因此,随着胁迫的增加,3 龄幼虫的死亡率最大,1 龄幼虫次之,2 龄幼虫最小。

### 2.4 莲草直胸跳甲的化蛹率和羽化率

莲草直胸跳甲取食受水分胁迫后的喜旱莲子草后,其化蛹率和羽化率均降低,而且随着水分胁迫程度的增加,化蛹率和羽化率均逐渐降低(图 2 和图 3)。对化蛹率与不同质量分数的 PEG6000 进行简单相关分析(图 2)。结果表明,化蛹率与胁迫质量分数的相关程度很高,达到了置信度为 99% 的显著相关。且两参数之间的关系为线性负相关,胁迫程度越高,莲草直胸跳甲的化蛹率越低。当胁迫质量分数为 10%~25%,莲草直胸跳甲的化蛹率与对照相比差异显著( $P < 0.05$ ),胁迫质量分数为 25% 时,化蛹率最低,为 57.7%,与对照相比降低了 33.0%。因此,在胁迫质量分数为 10%~25% 时,跳甲的化蛹率降低。

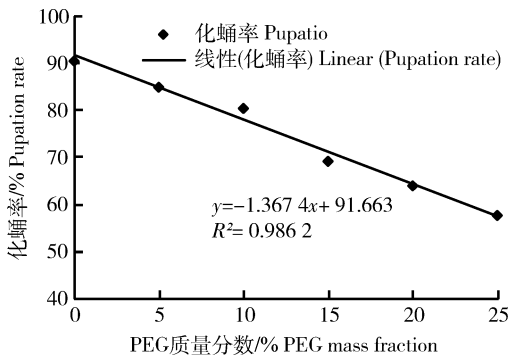


图2 不同水分胁迫对莲草直胸跳甲化蛹率的影响

Fig. 2 Effect of *A. philoxeroides* under different water stress on the pupation rate of *A. hygrophila*

同样,对羽化率与不同质量分数的PEG6000进行简单相关分析(图3)。结果表明,羽化率与胁迫质量分数的相关程度很高,达到了置信度为99%的显著相关。且两参数之间的关系为线性负相关,胁迫程度越高,莲草直胸跳甲的羽化率越低。羽化率在胁迫为5%时开始下降,然后随着胁迫程度的加剧,羽化率逐渐降低,25%时羽化率最低为56.1%,与对照相比降低了37.5%,差异显著( $P < 0.05$ )。所以,在胁迫质量分数为10%~25%时,跳甲的羽化率降低。

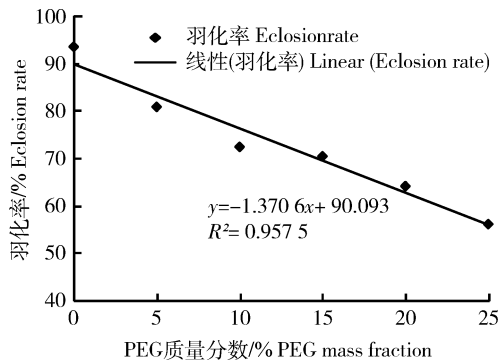


图3 不同水分胁迫对莲草直胸跳甲羽化率的影响

Fig. 3 Effect of *A. philoxeroides* under different water stress on the eclosion rate of *A. hygrophila*

### 3 讨论

1)水分是昆虫的营养成分之一,植食性昆虫体内的水分除极少数从空气中获得外,主要是从寄主植物中获得的<sup>[11-12]</sup>。研究表明受到水分胁迫的植物,昆虫取食后常导致发育历期延长<sup>[13]</sup>。究其原因,有研究表明许多昆虫通过延长发育时间,来提高

对质量较差寄主植物的利用率<sup>[14]</sup>。在本试验中,跳甲幼虫取食经水分胁迫处理的喜旱莲子草叶片后,随着PEG质量分数的增加,喜旱莲子草受胁迫越重,可能由于食物质量受到影响,故跳甲幼虫期和蛹期的发育历期有所延长。

2)试验中,水分胁迫寄主植物会影响昆虫的体重。一方面,植物体内的含水量会间接影响昆虫的体重。昆虫在取食时对叶片的含水量有灵敏的反应,寄主植物在水分短缺的情况下,昆虫对其的取食减少,摄入的水分减少,进而间接影响昆虫的个体生长发育<sup>[11,15-17]</sup>。当喜旱莲子草受到干旱胁迫时,跳甲能够摄入的水分减少,间接导致其体重的下降。已有研究表明取食含水量较高的玉米叶的粘虫体重增加较多,并且粘虫倾向于取食含水量较多的食物,取食含水量较多食物的现象也普遍存在于其他植食性昆虫<sup>[11]</sup>。另一方面,水分短缺会影响植物体内有机物的合成<sup>[18-19]</sup>,昆虫摄入的有机物降低。喜旱莲子草在较高的PEG胁迫下,细胞严重缺水,体内的叶绿素a和叶绿素b会持续下降,损害叶绿体生物膜,导致光合能力的不可逆下降<sup>[10]</sup>,体内合成的有机物降低,从而影响跳甲摄入的营养物质,使体重下降。另有研究表明喜旱莲子草在低水低肥的环境中,生物量会降低<sup>[20]</sup>。因此,植物体内水分的缺失、光合产物以及生物量的降低影响昆虫的体重。

3)水分胁迫寄主植物对昆虫死亡率的影响不同。斜纹夜蛾幼虫取食淹水处理过的叶片,死亡率上升,而取食干旱胁迫的叶片,死亡率下降<sup>[21]</sup>。甜菜夜蛾取食受到干旱胁迫的棉叶时,死亡率上升<sup>[22]</sup>。取食水分胁迫的寄主植物后,不同的昆虫所受到的影响不同。本研究中,1、2以及3龄幼虫随着水分胁迫喜旱莲子草程度的加剧死亡率逐渐增加,从而进一步证明了水分胁迫寄主植物间接影响了天敌莲草直胸跳甲的存活状况,陆生型的喜旱莲子草不利于跳甲的存活。

4)化蛹是莲草直胸跳甲防治喜旱莲子草的关键环节,干旱导致喜旱莲子草内部结构的变化,影响莲草直胸跳甲的化蛹能力<sup>[8]</sup>。本试验中随着水分胁迫程度的加剧,莲草直胸跳甲的化蛹率也降低,进一步说明了干旱不利于莲草直胸跳甲对喜旱莲子草的防控。羽化是莲草直胸跳甲完成生活史以及后代繁殖必不可少的环节。水分胁迫对莲草直胸跳甲的羽化率具有明显的负面效应,结果可能会造成莲草直胸跳甲种群的减少,不利于种群的持续发展。随着气

候的变化,环境的污染,水质的变差,喜旱莲子草受水分胁迫的机率增加,间接影响到莲草直胸跳甲的生防效果。总之,本试验从水分变化的角度说明,干旱胁迫不利于莲草直胸跳甲的生长发育,在陆生环境中利用该跳甲对陆生喜旱莲子草进行防治有一定的局限。

## 参 考 文 献

- [1] Julien M H, Skarratt B, Maywald G F. Potential geographical distribution of alligator weed and its biological control by *Agasicles hygrophila* [J]. *Journal of Aquatic Plant Management*, 1995, 33: 55-60
- [2] Garbari F, Pedulla M L. *Alternanthera philoxeroides* (Mart) Griseb (Amarantaceae), a new species for the exotic flora of Italy[J]. *Webia*, 2001, 56: 139-143
- [3] 马瑞燕, 王韧. 喜旱莲子草在中国的入侵机理及其生物防治[J]. 应用与环境生物学报, 2005, 11(2): 246-250  
Ma R Y, Wang R. Invasive mechanism and biological control of Alligatorweed, *Alternanthera philoxeroides* (Amaranthaceae), in China[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2005, 11(2): 246-250 (in Chinese)
- [4] 马瑞燕, 王韧. 不同生态型的喜旱莲子草对莲草直胸跳甲化蛹能力的影响[J]. 植物生态学报, 2004, 28(1): 24-30  
Ma R Y, Wang R. Effect of morphological and physiological variations in the ecotypes of Alligatorweed, *Alternanthera philoxeroides* on the pupation rate of its biocontrol agent *Agasicles hygrophila*[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2004, 28(1): 24-30 (in Chinese)
- [5] 贾昕, 傅东静, 潘晓云, 李博, 陈家宽. 陆生环境中喜旱莲子草的生长模式[J]. 生物多样性, 2007, 15(3): 241-246  
Jia X, Fu D J, Pan X Y, Li B, Chen J K. Growth pattern of alligator weed (*Alternanthera philoxeroides*) in terrestrial habitats[J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(3): 241-246 (in Chinese)
- [6] 傅东静, 贾昕, 杨兴中, 李博, 陈家宽, 潘晓云. 莲草直胸跳甲对不同生态型喜旱莲子草的取食喜好及生长适应性研究[J]. 陕西林业科技, 2007(2): 21-25, 65  
Fu D J, Jia X, Yang X Z, Li B, Chen J K, Pan X Y. Feeding preference and growth adaptation of Alligatorweed flea beetle (*Agasicles hygrophila*) in different ecotypes of Alligator weed (*Alternanthera philoxeroides*) [J]. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 2007(2): 21-25, 65 (in Chinese)
- [7] Sosa A J, Julien M H, Cordo H A. New research on *Alternanthera philoxeroides* (alligator weed) in its South American native range [C]//In: Cullen J M, Briese D T, Kriticos D J, Lonsdale W M, Morin L, Scott J K. Proceedings of the XI International Symposium on Biological Control of Weeds. Canberra, CSIRO Entomology, 2004: 180-185
- [8] 马瑞燕, 丁建清, 李佰铜, 吴珍泉, 王韧. 莲草直胸跳甲在不同生态型空心莲子草上的化蛹适应性[J]. 中国生物防治, 2003, 19(4): 54-58  
Ma R Y, Ding J Q, Li B T, Wu Z Q, Wang R. The pupation adaptability of *Agasicles hygrophila* on different ecotypes alligator weed [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2003, 19(4): 54-58 (in Chinese)
- [9] 郝炯, 刘艳红, 张萍萍, 王慧, 马瑞燕. 喜旱莲子草的营养累积及对莲草直胸跳甲化蛹能力的影响[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(4): 48-51  
Hao J, Liu Y H, Zhang P P, Wang H, Ma R Y. Effects of nutritional ingredients of *Alternanthera philoxeroides* on pupation rate of *Agasicles hygrophila* [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(4): 48-51 (in Chinese)
- [10] 许凯扬, 叶万辉, 段学武, 苏新国, 徐志防. PEG 诱导水分胁迫下喜旱莲子草的生理适应性[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2004, 30(3): 271-277  
Xu K Y, Ye W H, Duan X W, Su X G, Xu Z F. Physiological adaptation of *Alternanthera philoxeroides* under water stress condition induced by polyethylene glycol [J]. *Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences*, 2004, 30(3): 271-277 (in Chinese)
- [11] 钦俊德. 粘虫营养的研究: 食物中和环境中水分对于幼虫生长的影响[J]. 昆虫学报, 1964, 13(5): 654-669  
Qin J D. Studies on the nutrition of the armyworm: The influence of dietary and environmental water on larval growth [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 1964, 13(5): 654-669 (in Chinese)
- [12] Kolehmainen J, Julkunen-Tiitto R, Roininen H, Tahvanainen J. Phenolic glucosides as feeding cues for willow-feeding leaf beetles[J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 1995, 74(3): 235-243
- [13] Connor E F. Plant water deficits and insect responses: the preference of *Corythucha arcuata* (Heteroptera: Tingidae) for the foliage of white oak, *Quercus alba* [J]. *Ecological Entomology*, 1988, 13(4): 375-381
- [14] Mattson W J. Herbivory in relation to plant nitrogen content [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1980, 11: 119-161
- [15] Huberty A F, Denno R F. Plant water stress and its consequences for herbivorous insects: a new synthesis [J]. *Ecology*, 2004, 85(5): 1383-1398
- [16] 党志浩, 陈法军. 昆虫对降雨和干旱的响应与适应[J]. 应用昆虫学报, 2011, 48(5): 1161-1169  
Dang Z H, Chen F J. Responses of insects to rainfall and drought [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2011, 48(5): 1161-1169 (in Chinese)
- [17] Rani P U, Prasannalaxmi K. Water stress induced physiological and biochemical changes in *Piper betle* L and *Ricinus communis* L plants and their effects on *Spodoptera litura* [J]. *Allelopathy Journal*, 2014, 33(1): 25-41

- [18] 安玉艳, 梁宗锁. 植物应对干旱胁迫的阶段性策略[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2907-2915  
An Y Y, Liang Z S. Staged strategy of plants in response to drought stress [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(10): 2907-2915 (in Chinese)
- [19] 纪瑞鹏, 车宇胜, 朱永宁, 梁涛, 冯锐, 于文颖, 张玉书. 干旱对东北春玉米生长发育和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(11): 3021-3026  
Ji R P, Che Y S, Zhu Y N, Liang T, Feng R, Yu W Y, Zhang Y S. Impacts of drought stress on the growth and grain yield of spring maize in Northeast China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(11): 3021-3026 (in Chinese)
- [20] 王坤, 杨继, 陈家宽. 不同土壤水分和养分条件下喜旱莲子草与同属种生长状况的比较研究[J]. 生物多样性, 2010, 18(6): 615-621  
Wang K, Yang J, Chen J K. Comparison of morphological traits between alligator weed and two congeners under different water and nutrient conditions [J]. *Biodiversity Science*, 2010, 18(6): 615-621 (in Chinese)
- [21] 杨海燕. 水分胁迫和营养对斜纹夜蛾的影响及其机制初探 [D]. 扬州: 扬州大学, 2008  
Yang H Y. Studies on the effect of soil water stress and fertilization on *Spodoptera litura* (Fabricius) and its potential mechanism [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2008 (in Chinese)
- [22] Showler A T, Moran P J. Effects of drought stressed cotton, *Gossypium hirsutum* L., on beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Hübner) oviposition, and larval feeding preference and growth [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2003, 29(9): 1997-2011

责任编辑: 苏燕