

意大利蝗和西伯利亚蝗高温耐受能力及酶活性比较研究*

李 爽** 蔡梦婷 马婉颖 季 荣***

(新疆师范大学生命科学学院; 新疆特殊环境物种保护与调控生物学实验室; 中亚区域跨境有害生物联合控制国际研究中心, 乌鲁木齐 830054)

摘 要 【目的】阐明意大利蝗 *Calliptamus italicus* 和西伯利亚蝗 *Gomphocerus sibiricus* 高温耐受能力及酶活性差异。【方法】以 3℃ 为间隔, 将意大利蝗和西伯利亚蝗成虫分别在 27~48℃、24~42℃ 下处理 4 h 后测定死亡率及 POD、SOD 和 CAT 活性值。【结果】27~42℃ 处理下, 意大利蝗存活率显著大于西伯利亚蝗 ($P<0.05$)。雌性意大利蝗的 LT_{50} 、 LT_{90} 分别为 48.76℃ 和 50.67℃, 雄虫则分别为 47.90℃ 和 50.53℃; 雌性西伯利亚蝗的 LT_{50} 、 LT_{90} 分别为 39.21℃ 和 42.10℃, 雄虫则分别为 36.11℃ 和 41.43℃。随着温度升高, 雄性意大利蝗和雌、雄西伯利亚蝗体内 POD、SOD、CAT 活性先升高后降低, 雌性意大利蝗体内 POD 活性则先降低后升高。27~42℃ 范围内, 西伯利亚蝗体内 POD 和 SOD 活性值增幅较大, 分别达到 54.69%、23.54%; 意大利蝗体内则以 CAT 活性值增幅最大, 为 27.02%。【结论】两种蝗虫耐高温能力存在差异, 意大利蝗具有更强的耐热能力。

关键词 雌雄耐热差异, 保护酶, 空间分布, 意大利蝗, 西伯利亚蝗

Difference in heat tolerance and enzyme activity between *Calliptamus italicus* (Orthoptera:Acrididae) and *Gomphocerus sibiricus* (Orthoptera:Acrididae)

LI Shuang** CAI Meng-Ting MA Wan-Ying JI Rong***

(College of Life Sciences, Xinjiang Normal University; Key Laboratory of Conservation Biology and Management for Xinjiang Special Species; International Research Center for Cross-border Pest Management in Central Asia, Urumqi 830054, China)

Abstract 【Objectives】To clarify difference in heat tolerance and enzyme activity between *Calliptamus italicus* and *Gomphocerus sibiricus*. 【Methods】The mortality and POD, SOD, and CAT, enzyme activity of *C. italicus* and *G. sibiricus* were measured by placing adults in a climate cabinet and subjecting them to 3℃ temperature increments for 4 h. The temperature ranges to which insects were exposed were 27–48℃ for *C. italicus* and 24–42℃ for *G. sibiricus*. 【Results】The mortalities of *C. italicus* and *G. sibiricus* were significantly different ($P<0.05$). The LT_{50} and LT_{90} of *C. italicus* were 48.76℃ and 50.67℃, respectively, for females, and 47.90℃ and 50.53℃ for males. The LT_{50} and LT_{90} of *G. sibiricus* were 39.21℃ and 42.10℃, respectively, for females, and 36.11℃ and 41.43℃ for males. POD, SOD, and CAT, activities of *C. italicus* and *G. sibiricus* males first increased, then decreased, whereas the POD activity of *C. italicus* females first decreased, then increased, with temperature. Within the temperature range of 27℃ to 42℃, POD and SOD activity rapidly rose to 54.69% and 23.54%, respectively, in *G. sibiricus*. CAT activity rose to 27.02% in *C. italicus*. 【Conclusion】*C. italicus* is more heat tolerant than *G. sibiricus*.

Key words heat-resistant difference, protection enzymes, the spatial distribution, *Calliptamus italicus*, *Gomphocerus sibiricus*

*资助项目 Supported projects: 国际科技合作专项 (2015DFR30290); 国家自然科学基金 (U1120301); 本研究得到自治区教育厅普通本科高等学校重点实验室资助

**第一作者 First author, E-mail: float1990@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: jirong@xjnu.edu.cn

收稿日期 Received: 2015-12-29, 接受日期 Accepted: 2016-06-29

高温胁迫是限制昆虫分布、生存繁殖的关键因子 (Stanley *et al.*, 1980)。高温导致虫体内的超氧阴离子自由基 ($O_2^{\cdot-}$)、过氧化氢 (H_2O_2) 和羟基自由基 (OH) 等氧毒害物质增加, 并对虫体造成生物氧毒害损伤。在长期进化过程中, 昆虫形成了一系列适应高温胁迫的保护机制, 其中保护酶的应激变化是虫体响应高温胁迫的重要策略之一 (Liochev and Fridovich, 2007)。研究表明, 高温下虫体内的过氧化物酶 (POD)、超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化氢酶 (CAT) 构成的保护酶系统可清除体内产生的氧毒害物质, SOD 可通过歧化反应清除生物细胞中的 $O_2^{\cdot-}$, 形成 H_2O_2 , CAT 和 POD 则具有分解 H_2O_2 的作用。因此, 虫体内的酶调控机制在一定程度上可以帮助昆虫度过阶段性高温。

一定温度范围内, 昆虫的耐高温能力随酶活性增加而增强 (Rajarapu *et al.*, 2011; 卢芙蓉等, 2012; 曹雪, 2014), 从而维持机体正常的生理功能 (An and Choi, 2010; 李志明等, 2010; 乔利等, 2015)。因此, 研究害虫高温耐受能力及酶应激响应变化有助于掌握害虫耐高温的生理生化机制, 为阐明气候变暖条件下害虫持续暴发机制、发生趋势和预测预报提供科学依据。

意大利蝗 *Calliptamus italicus* L. 和西伯利亚蝗 *Gomphocerus sibiricus* L. 是新疆草原的优势危害种类, 分别属于中生型和早生型种类, 每年给新疆造成严重的经济、社会和生态损失。研究报道, 高温胁迫下意大利蝗和西伯利亚蝗体内的抗逆保护物质和呼吸代谢都发生相应的变化以提高自身的高温耐受能力 (李娟等, 2014; 王冬梅等, 2014; 李爽等, 2015), 但两种蝗虫高温耐受能力差异及酶活性应激响应还未见报道。

本研究通过测定和分析不同温度下两种蝗虫的死亡率及体内保护酶活性的变化, 旨在阐明两种蝗虫耐高温能力及酶响应差异, 为阐明气候变暖条件两种蝗虫持续严重发生机制、迁移扩散趋势和预测预报提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫采集

意大利蝗和西伯利亚蝗成虫分别采自于新

疆维吾尔自治区伊宁市察布查尔县蝗区 (81°15'E, 43°33'N) 和哈密市巴里坤县蝗区 (93°31'E, 43°24'N)。带回实验室后于室外自然条件下饲养于养虫笼内, 每天用新鲜的玉米苗和小麦苗饲喂。

1.2 温度设置与试虫处理

根据实验室前期研究和预试验结果, 挑选健康的意大利蝗和西伯利亚蝗个体分别于 27~51°C (9 个温度梯度)、24~45°C (8 个温度梯度) 温度范围内处理, 均以 3°C 为间隔。每个温度下试虫于光照培养箱 (GXZ-436B、宁波江南仪器厂) 处理 4 h 后室温下恢复 1 h, 统计死亡率后迅速放入液氮中冷冻处死后放入 -80°C 冰箱冻存备用。每个温度处理 100 头蝗虫 (♀:♂=1:1), 重复 3 次。

1.3 酶活性和蛋白质浓度测定

温度处理后取 6 头试虫去除足、翅称重 (±0.001 g), 按重量体积比 1:9 加入预冷的 0.9% 生理盐水在冰浴中用玻璃匀浆器匀浆, 制备 10% 组织匀浆于 4°C 离心机中 10 000 r/min 离心 10 min, 取上清液测定 POD、SOD 和 CAT, 采用考马斯亮蓝 G-250 法测定蛋白质含量。每组至少重复 3 次。意大利蝗、西伯利亚蝗分别在 51°C 和 45°C 处理下的死亡率接近 100%, 存活数量不足以测定酶活性。

1.4 数据处理

根据死亡率数据, 运用 Weibull 函数结合麦夸特法拟合模型, 分别计算两种蝗虫半致死温度 LT_{50} 和致死温度 LT_{90} ; 不同温度两种蝗虫的酶活性数据处理采用单因素方差分析 (One-way ANOVA), 结合最小显著差数法 (LSD) 和多范围检验 (Duncan's 检验), 分析差异显著性 ($P<0.05$); 同一温度雌雄之间的酶活性差异采用 *t*-检验法 ($P<0.05$)。数据分析采用 SPSS17.0 和 DPS2006。

2 结果与分析

2.1 意大利蝗和西伯利亚蝗高温耐受能力比较

图 1 (A, B) 可以看出, 相同温度处理下

(27~42℃), 意大利蝗死亡率显著小于西伯利亚蝗 ($P<0.05$)。雌、雄意大利蝗的 LT_{50} 分别为 48.75℃ 和 47.90℃, LT_{90} 分别为 50.67℃ 和 50.53℃; 雌、雄西伯利亚蝗的 LT_{50} 分别为 39.21℃ 和 36.11℃, LT_{90} 分别为 42.10℃ 和 41.43℃ (表 1)。表明意大利蝗具有更强的高温耐受能力。

同一种蝗虫不同性别对高温耐受能力亦有差异, 雌性具有较强的耐高温能力。不超过 30℃ 时, 雌、雄意大利蝗的死亡率均为零, 超过 33℃ 后, 除 36℃, 雌虫死亡率均小于雄虫, 且在 45℃

和 48℃ 时, 雌虫死亡率显著小于雄虫 ($P<0.05$) (图 1: C)。由图 1 (D) 看出, 雌性西伯利亚蝗的死亡率显著小于雄性 ($P<0.05$)。雌、雄蝗虫的 LT_{50} 和 LT_{90} 表明, 雌虫具有较强的耐高温耐受能力 (表 1)。

2.2 不同温度处理下两种蝗虫体内酶活性变化比较

如表 2 所示, 27~42℃ 温度范围内, 西伯利亚蝗体内的 POD 活性值均大于意大利蝗的相应

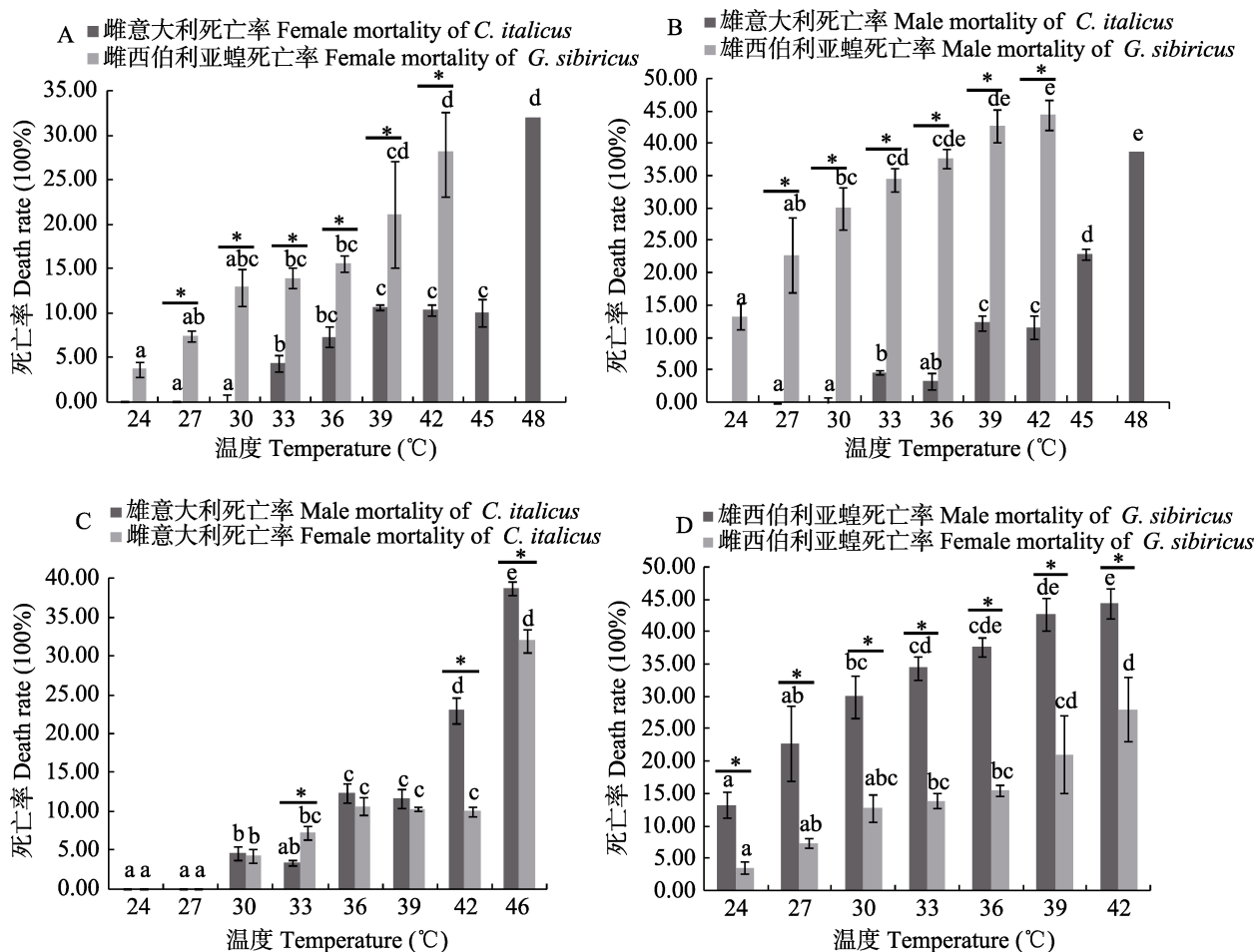


图 1 不同温度下意大利蝗和西伯利亚蝗死亡率比较

Fig. 1 Adult mortality of *Calliptamus italicus* and *Gomphocerus sibiricus* at different temperatures

图中数据为平均值±标准误, 同一组数据上方标有不同字母表示温度间存在显著差异 (最小显著差数法 LSD 和 Duncan's 检验, $P<0.05$), *表示同一温度下同种蝗虫雌雄之间或同种性别不同蝗虫之间存在显著差异 (独立样本 t -检验, $P<0.05$)。

Data are presented as mean±SE, and followed by different small letters indicate significant difference between different temperatures at the 0.05 level (LSD and Duncan's multiple range test, $P<0.05$), * indicate significantly different at 0.05 level between females and males exposed to same temperatures in the same grasshopper or between *C. italicus* and *G. sibiricus* exposed to same temperatures in the same sex.

表 1 意大利蝗和西伯利亚蝗处理温度与死亡率之间的回归方程估计
Table 1 Regression equations between temperature and survival rate of *Calliptamus italicus* and *Gomphocerus sibiricus*

种类 Species	性别 Sex	回归方程 Regression equation	R^2	LT ₅₀	LT ₉₀
意大利蝗 <i>Calliptamus italicus</i>	♀	$X_2=3\ 311.4634/(1+\text{EXP}(23.7927-0.307548X_1))$	0.9986	48.76	50.67
	♂	$X_2=3\ 975.8033/(1+\text{EXP}(19.6722-0.2231971X_1))$	0.9958	47.90	50.53
西伯利亚蝗 <i>Gomphocerus sibiricus</i>	♀	$X_2=2\ 209.8523/(1+\text{EXP}(16.3886-0.203891X_1))$	0.9908	39.21	42.10
	♂	$X_2=1.0775/(1+\text{EXP}(12.1479-0.332422X_1))$	0.9844	36.11	41.43

值。27~39℃范围内,两种蝗虫雌性之间 POD 活性值差异显著 ($P<0.05$),27~42℃范围内两种蝗虫雄性之间酶活性值差异显著 ($P<0.05$)。

27~39℃时,雌性西伯利亚蝗体内的 SOD 活性值均大于雌性意大利蝗的相应值,超过 39℃后则小于雌性意大利蝗;除 30℃,雄性西伯利亚蝗体内的 SOD 活性值均大于雄性意大利蝗的相应值。27~39℃范围内,两种蝗虫雌性之间 SOD 活性值差异显著 ($P<0.05$),雄性则在 33℃和 36℃时酶活性值差异显著 ($P<0.05$)。

27~42℃温度范围内,意大利蝗体内的 CAT 活性值均大于西伯利亚蝗的相应值,且两种蝗虫雌性之间 CAT 活性值差异显著 ($P<0.05$),雄性之间差异不显著 ($P>0.05$)。

2.3 不同温度处理下两种蝗体内酶活性值增减率比较

酶活性值增减率可用来说明应对外界条件胁迫酶应激响应速度的快慢。表 3 可以看出,由 27℃上升至 30℃时,除雌虫体内 POD,均以意大利蝗体内 3 种酶活性的增幅率较快。

不同性别蝗虫体内 3 种酶的增减速率亦有不同。雌性意大利蝗的 POD 和 SOD 活性增幅快,CAT 活性增幅缓慢;雄性意大利蝗的 POD 和 CAT 活性增幅快,SOD 活性增幅缓慢。雌性西伯利亚蝗 POD 和 CAT 活性增幅快,SOD 活性增幅缓慢;雄性西伯利亚蝗的 POD 活性增幅快,SOD 和 CAT 活性增幅缓慢。

3 讨论

本研究结果表明,随高温胁迫强度增加,意大利蝗和西伯利亚蝗体内多数抗氧化酶活性值

上升,对高温胁迫的抗性增强,这是虫体受到外界不良因素干扰达到一定程度时所表现出来的一种应激反应;随温度继续升高酶活性值下降,蝗虫死亡率增加,虫体内增加的活性氧等有毒物质超过了其体内酶正常的歧化能力范围,生理代谢紊乱,导致酶活性受到抑制而下降。但雌性意大利蝗体内 POD 则是先下降至 36℃开始增加,分析这与其发挥催化作用的条件有关。POD 在低浓度 H_2O_2 和足量的供电子体 (AH_2) 存在时才可正常发挥作用 (Claravon-Mathews *et al.*, 1997),SOD 具有清除 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 的能力,所以 SOD 活性下降是确保虫体内维持低浓度 H_2O_2 的前提条件 (Mccord and Fridovich, 1969)。本研究亦验证了这一关系,雌性意大利蝗体内 SOD 活性值从 36℃时开始下降,这刚好为 POD 催化作用提供了低浓度的 H_2O_2 ,这也是导致雌性意大利蝗体内 POD 活性从 36℃开始增加的原因。

研究得出意大利蝗较西伯利亚蝗有更强的高温耐受能力。一方面与两者体内酶活性应激响应快慢有关。CAT 是昆虫体内保护酶系统中唯一的 H_2O_2 代谢酶,当细胞内 H_2O_2 浓度较高时,CAT 才可高效发挥催化作用 (Ahmad and Pardini, 1990)。本研究发现,随温度升高,西伯利亚蝗体内 SOD 活性增幅较 CAT 快,SOD 在清除 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 时逐渐积累 H_2O_2 ,但此时虫体内较少的 CAT 不能够及时有效地清除体内高浓度的 H_2O_2 ,而 POD 在高浓度 H_2O_2 条件下又丧失分解能力 (Claravon-Mathews *et al.*, 1997),导致西伯利亚蝗受到的氧化损伤较意大利蝗严重,死亡率大于意大利蝗。另一方面,意大利蝗属于中生型种类,栖息于新疆北部海拔 1 000~2 000 m 的荒漠、半荒漠草原 (陈永林, 1981),发生季节

表 2 不同温度下意大利蝗和西伯利亚蝗体内 3 种酶活性的比较
Table 2 Enzyme activities of *Calliptamus italicus* and *Gomphocerus sibiricus* at different temperatures

温度 (°C) Temperature	意大利蝗 <i>Calliptamus italicus</i>						西伯利亚蝗 <i>Gomphocerus sibiricus</i>					
	♀			♂			♀			♂		
	POD	SOD	CAT	POD	SOD	CAT	POD	SOD	CAT	POD	SOD	CAT
24	-	-	-	-	-	-	1.58±0.13ab	21.26±0.13ab	4.43±0.13ab	1.77±0.05cd	27.69±0.05a	4.49±0.05ab
27	1.07±0.06Abc	21.47±2.74Aa	9.54±0.53Aa*	0.90±0.06Aabc	27.41±0.13Aa	5.07±0.98Aa*	1.43±0.08Ba	27.42±0.08Babc	4.40±0.08Bab	1.49±0.05Bb	29.19±0.05Aa	4.00±0.05Aab
30	1.09±0.02Abc	30.17±2.28Abc	11.29±1.38Aa*	1.31±0.16Aabc	32.49±1.57Ab	6.88±0.49Ac*	2.37±0.06Bc*	37.20±0.06Bcd	4.04±0.06Ba	1.73±0.11Bcde*	32.28±0.11Aa	4.77±0.11Aab
33	0.84±0.06Aab	32.20±3.69Ac	13.20±1.27Aa*	1.08±0.06Abc	24.86±1.54Aac	6.91±0.30Ac*	1.90±0.19Bbd	41.10±0.19Bd	6.67±0.19Bb	1.10±0.15Bd	35.57±0.15Ba	5.48±0.15Aa
36	0.70±0.02Aa*	26.43±0.63Aabc*	9.40±1.05Aa	1.15±0.07Ab*	22.35±1.09Ac*	5.13±0.52Aabc	1.98±0.11Bcd*	31.20±0.11Bbcd	5.30±0.11Bab	1.58±0.01Bbc*	39.63±0.01Ba	4.69±0.01Aab
39	0.98±0.05Aabc	22.37±0.21Aa	10.06±0.85Aa	0.99±0.13Aab	24.56±1.28Aac	5.95±1.76Acd	1.95±0.18Bbd	34.26±0.18Bcd	5.04±0.18Bab*	1.57±0.06Bbc	26.44±0.06Aa	2.30±0.06Ab*
42	1.19±0.07Ac*	25.94±0.26Aab	9.57±1.81Aa	0.81±0.10Aac*	23.32±2.53Aac	4.91±0.81Aabc	1.35±0.09Aa	20.06±0.09Aa	5.07±0.09Bab	1.16±0.06Ba	28.40±0.06Aa	3.34±0.06Aab
45	1.17±0.21c	24.51±1.62ab	9.74±1.85a	0.86±0.04a	23.29±1.95ac	5.07±1.19abc	-	-	-	-	-	-
48	1.10±0.09bc*	24.99±1.18ab	9.16±1.63a	0.92±0.07a*	23.42±2.14ac	5.12±0.73ab	-	-	-	-	-	-

同一行数据后标有不同大写字母表示不同蝗虫相同性别间温度间存在显著差异 (独立样本 t -检验, $P<0.05$), 同一列数据后标有不同小写字母表示不同温度间同种蝗虫同种性别间酶活性显著差异 (最小显著差数法 LSD 和 Duncan's 检验, $P<0.05$), *表示同种蝗虫雌、雄之间酶活性差异显著 (独立样本 t -检验, $P<0.05$)。
Data followed by different capital letters in the same row indicate significant difference at the 0.05 level between *C. italicus* and *G. sibiricus* for the same sex at the same temperature (independent-sample t -test, $P<0.05$), followed by different small letters in the same column indicate significant difference at the 0.05 level between the same grasshopper and the same sex at the different temperature (LSD and Duncan's test, $P<0.05$), and followed by * indicate significant difference at the 0.05 level between females and males (independent-sample t -test, $P<0.05$).

表 3 不同温度下意大利蝗和西伯利亚蝗体内 3 种酶活性增减率

Table 3 Increase rate of three enzymes in females and males of *Calliptamus italicus* and *Gomphocerus sibiricus* exposed to different temperatures

温度 (°C) Temperature	酶活性增/减率 Increase/Decrease rate of enzymes (%)											
	意大利蝗 <i>Calliptamus italicus</i>						西伯利亚蝗 <i>Gomphocerus sibiricus</i>					
	POD		SOD		CAT		POD		SOD		CAT	
	♀	♂	♀	♂	♀	♂	♀	♂	♀	♂	♀	♂
24-27							- 9.49	15.82	28.97	5.42	- 0.68	- 10.91
27-30	1.87	45.56	40.52	18.53	18.34	35.70	65.73	- 16.11	35.67	- 10.59	- 8.18	19.25
30-33	- 22.94	- 17.56	6.73	- 23.48	16.92	0.44	- 19.83	- 36.42	10.48	10.19	65.10	14.88
33-36	- 16.67	6.48	- 17.92	- 10.10	- 28.79	- 25.76	- 4.21	43.64	- 24.09	11.41	- 20.54	- 14.42
36-39	40.00	- 13.91	- 15.36	9.89	7.02	15.98	- 1.51	- 0.63	9.81	- 33.28	- 4.91	- 50.96
39-42	- 21.43	- 18.18	15.96	- 5.05	- 4.87	- 17.48	- 30.77	- 26.11	- 41.45	7.41	0.60	45.22
42-45	- 1.68	6.17	- 5.51	- 0.13	1.78	3.26	-	-	-	-	-	-
45-48	- 5.98	6.98	1.96	0.56	- 5.95	0.99	-	-	-	-	-	-

正负分别表示相对于前一处理温度酶活性值的增幅或减幅。

The negative and positive values indicate decrease and increase, respectively.

气候干燥炎热, 地表温度超过 50℃ (任珺和陶玲, 2005); 西伯利亚蝗属于旱生型种类, 主要分布于海拔 2 000 m 以上的高山、亚高山草原(陈永林, 1981), 发生季节气温较凉爽, 最高平均温度 31.1℃ (张正勇等, 2012), 因此, 意大利蝗和西伯利亚蝗对高温的耐受能力差异亦是长期适应进化的结果。

根据研究结果可以判断, 在持续变暖条件下, 意大利蝗和西伯利亚蝗在空间分布格局上将产生较大差异。西伯利亚蝗是高山草原和亚高山草原的指示物种, 适宜凉爽的气候条件, 随温度升高, 尤其新疆山区升温更为明显条件下 (李奇虎, 2012), 其将向高海拔区域迁移, 局部发生有加重趋势。意大利蝗是新疆荒漠、半荒漠草原的广布种, 适应能力强 (王冬梅等, 2014; 李爽等, 2015), 随温度升高, 意大利蝗通过迁移扩散将继续扩大其空间分布范围, 危害进一步加重; 同时, 意大利蝗具有长距离迁飞习性, 借助适宜的气象条件, 意大利蝗将迁飞扩散危害, 给迁入区造成毁灭性灾害。因此, 新疆本地蝗区和中哈边境相邻蝗区都存在意大利蝗灾害加重的趋势, 这也将对当前监测预警的时空范围与防控决策产生重大影响。

致谢: 感谢新疆维吾尔自治区哈密地区巴里坤县治蝗站李占武高级畜牧师和伊犁哈萨克自治州察布查尔县草原站樊泰山高级兽医师在野外工作中提供的支持和帮助。

参考文献 (References)

- An MI, Choi CY, 2010. Activity of antioxidant enzymes and physiological responses in ark shell, *Scapharca broughtonii*, exposed to thermal and osmotic stress: effects on hemolymph and biochemical parameters. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part B*, 155(1): 34-42.
- Ahmad S, Pardini RS, 1990. Mechanisms for regulation oxygen toxicity in phytophagous insects. *Free Radical Biology and Medicine*, 8(4): 401-413.
- Cao X, 2014. Effect of different temperature on the activity of protective enzymes of *Agasicles hygophila* Selman and Vogt (Coleoptera:Chrysomelidae). Master dissertation. Shanxi: Shanxi Agricultural University. [曹雪, 2014. 温度对莲草直胸跳甲保护酶系统活性的影响. 硕士毕业论文. 晋中: 山西农业大学.]
- Chen YL, 1981. Studies on the acridoids of Xinjiang Uighur Autonomous Region: Distribution of acridoids II. *Acta Entomologica Sinica*, 24(2): 166-174. [陈永林, 1981. 新疆维吾尔自治区的蝗虫研究蝗虫的分布(续). 昆虫学报, 24(2): 166-174.]

- Claravon-Mathews M, Summer CB, Felton GW, 1997. Ascorbate peroxidase: a novel antioxidant enzyme in insects. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 34(1): 57–68.
- Li J, Li S, Wang DM, Ji R, 2014. Changes in contents of stress resistant substances in *Gomphocerus sibiricus* (Orthoptera: Acrididae) under high temperature stress. *Acta Entomologica Sinica*, 57(10): 1155–1161. [李娟, 李爽, 王冬梅, 季荣, 2014. 高温胁迫下西伯利亚蝗体内抗逆物质含量变化. *昆虫学报*, 57(10): 1155–1161.]
- Li QH, 2012. Climate change spatiotemporal features and impact on hydrological process in Northwest Arid of China. Doctoral dissertation. Shanghai: East China Normal University. [李奇虎, 2012. 西北干旱区气候变化及其水文过程的影响. 博士学位论文. 上海: 华东师范大学.]
- Li S, Wang DM, Li J, Hu HX, Ji R, 2015. Differences in heat tolerance and physio-biochemical mechanisms between adult female and male *Calliptamus italicus* (Orthoptera: Acrididae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 52(4): 960–967. [李爽, 王冬梅, 李娟, 扈鸿霞, 季荣, 2015. 雌雄意大利蝗耐高温差异及其生理生化响应对策. *应用昆虫学报*, 52(4): 960–967.]
- Liochev SI, Fridovich I, 2007. The effects of superoxide dismutase on H_2O_2 formation. *Free Radical Biology and Medicine*, 42(10): 1465–1469.
- Li ZM, Chen Q, Jin QA, Tang C, Wen HB, Peng ZQ, 2010. Effect of high temperature on the protective enzymes of *Tetrastichus brontispae*. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 31(6): 994–998. [李志明, 陈青, 金启安, 唐超, 温海波, 彭正强, 2010. 高温对椰心叶甲啮小蜂保护酶系活性的影响. *热带作物学报*, 31(6): 994–998.]
- Lu FP, Fu YG, Guo RQ, Cai Y, Jing FL, Xu XL, Lu H, Chen Q, 2012. Effect of extreme high temperature on the enzymes of cassava green mite *Mononychellus tanajioa* (Acari: Tetranychidae). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 28(18): 223–230. [卢芙萍, 符悦冠, 郭容琦, 蔡源, 经福林, 徐雪莲, 卢辉, 陈青, 2012. 极端高温对木薯单爪螨保护酶活性的影响研究. *中国农学通报*, 28(18): 223–230.]
- Mccord JM, Fridovich I, 1969. Superoxide dismutase an enzymic function for erthrocuprein (hemocuprein). *Journal of Biological Chemistry*, 244(22): 6049–6055.
- Qiao L, Qin DZ, Lu ZC, Liu ZC, Lv LZ, Wu JX, 2015. Effects of temperature on survival rate and protection enzymes of *Empoasca onukii* Matsuda. *Journal of Plant Protection*, 42(2): 223–228. [乔利, 秦道正, 卢兆成, 刘祥臣, 吕立哲, 仵均祥, 2015. 温度对茶小绿叶蝉成虫存活率及保护酶系的影响. *植物保护学报*, 42(2): 223–228.]
- Rajarapu SP, Mamidala P, Herms DA, Bonello P, Mittapalli O, 2011. Antioxidant genes of the emerald ash borer (*Agrilus planipennis*): Gene characterization and expression profiles. *Journal of Insect Physiology*, 57(6): 819–824.
- Ren J, Tao L, 2005. Multivariate characterization of vegetation in Junnger Basin. *Acta Agrestia Sinica*, 13(2): 134–139. [任珺, 陶玲, 2005. 准噶尔盆地沙漠植被多元特征分析. *草地学报*, 13(2): 134–139.]
- Stanley SM, Parsons PA, Spence GE, Weber L, 1980. Resistance of species of the *Drosophila melanogaster* subgroup to environmental extremes. *Australia Journal of Zoology*, (28): 413–421.
- Wang DM, Li J, Li S, Hu HX, Ji R, 2014. Effects of temperature on the respiratory metabolism of *Calliptamus italicus* (Orthoptera: Acrididae). *Acta Entomologica Sinica*, 57(3): 373–378. [王冬梅, 李娟, 李爽, 扈鸿霞, 季荣, 2014. 温度对意大利蝗呼吸代谢的影响. *昆虫学报*, 57(3): 373–378.]
- Zhang ZY, Liu L, Tang XL, 2012. The regional difference and abrupt events of climatic change in Tianshan Mountains during 1960–2010. *Progress in Geography*, 31(11): 1475–1484. [张正勇, 刘琳, 唐湘玲, 2012. 1960–2010 年中国天山山区气候变化区域差异及突变特征. *地理科学进展*, 31(11): 1475–1484.]