西伯利亚蝗气门结构及呼吸代谢对高温胁迫的响应*

钱 雪[1**] 窦 洁[1] 王冬梅[1] 李 爽[1]
Roman Jashenko[2] 季 荣[1***]

（1. 中亚区域跨境有害生物联合控制国际研究中心，新疆特殊环境物种多样性保护与调控重点实验室，新疆师范大学生命科学学院，乌鲁木齐 830054；2. 哈萨克斯坦教育科学部动物研究所，阿拉木图 050060）

摘 要 **【目的】** 掌握西伯利亚蝗 *Gomphocerus sibiricus* 的气门结构和呼吸代谢应对高温胁迫的响应策略。**【方法】** 运用扫描电镜观察西伯利亚蝗气门超显微结构，多通道昆虫呼吸仪测定 18~42℃处理下西伯利亚蝗的 O_2 吸收率、CO_2 释放率、代谢率和呼吸商。**【结果】** 西伯利亚蝗共有 10 对气门，胸部 2 对，腹部 8 对，呈圆形或椭圆形，内侧着生有筛板，呈刺凸状，分布密集。18~42℃范围内，随温度升高，西伯利亚蝗呼吸代谢呈先上升后下降的趋势。18℃时西伯利亚蝗雌雄成虫的 O_2 吸收率、CO_2 释放率和代谢率值显著小于其他温度下的相应值（P<0.05），雌虫分别为 0.0022 mL/min、0.0019 mL/min 和 0.0210 mL/(g·min)，雄虫分别为 0.0016 mL/min、0.0016 mL/min 和 0.0236 mL/(g·min)；21~27℃范围内，西伯利亚蝗雌雄成虫的呼吸代谢变化平稳，超过 30℃呼吸代谢各指标值迅速上升，至 36℃时雌雄成虫的 O_2 吸收率和代谢率值均显著大于其他温度下的相应值（P<0.05）；雌虫分别为 0.0071 mL/min 和 0.0592 mL/(g·min)，雄虫分别为 0.0089 mL/min 和 0.1108 mL/(g·min)，39℃时 CO_2 释放率显著大于其他温度下的相应值（P<0.05），雌雄成虫分别为 0.0074 mL/min 和 0.0067 mL/min。**【结论】** 依据西伯利亚蝗呼吸代谢随温度变化特征可以判断，随气候持续变暖，西伯利亚蝗仍将是新疆高山、亚高山草原的重要致灾类群。

关键词 呼吸代谢，氧气吸收率，二氧化碳释放率，温度胁迫，呼吸底物

Stigma structure and response of respiratory metabolism of *Gomphocerus sibiricus* to high temperature stress

QIAN Xue[1**] DOU Jie[1] WANG Dong-Mei[1] LI Shuang[1] Roman Jashenko[2] JI Rong[1***]

(1. International Cooperative Research Center for Cross-border Pest Management in Central Asia, Key Laboratory of Conservation Biology and Management for Xinjiang Special Species, College of Life Sciences, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2. Ministry of Education and Science of Kazakhstan, Institute of Zoology, Almaty 050060, Kazakhstan)

Abstract **[Objectives]** To explore the stigma structure and response of the respiratory metabolism of *Gomphocerus sibiricus* to high temperature stress. [**Methods**] Stigma structure was observed via scanning electron microscope (SEM), and O_2 uptake rates, CO_2 release rates, metabolic rates, and respiratory quotients, measured with a multi-channel insect respiration apparatus (Sable Systems, USA). Respiratory measurements were made a 3℃ intervals within a temperature gradient of 18-42℃. **[Results]** *G. sibiricus* has ten pairs of circular, or near circular, shaped stigmata. Filter apparatus inside stigma were clustered. The respiratory metabolism of *G. sibiricus* first increased, then decreased, between temperatures from 18 to 42℃. O_2 uptake rates, CO_2 release rates and metabolic rates of male and female adults at 18℃ were significantly lower than those at the other temperatures (P<0.05); corresponding values for females were 0.0022 mL/min、0.0019 mL/min and 0.0210 mL/(g · min), whereas

* 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：qianxuexj@163.com

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

收稿日期 Received：2016-01-13，接受日期 Accepted：2016-03-17

those for males were 0.0016 mL/min、0.0016 mL/min and 0.0236 mL/(g · min). The respiratory metabolism of male and female adults underwent little change between 21 and 27℃, but respiration increased rapidly at temperatures over 30℃. Metabolic rates and O_2 uptake rates of male and female adults at 36℃ were significantly higher than those at other temperatures (P<0.05); corresponding values for females were 0.0592 mL/(g · min) and 0.0071 mL/min, and for males were 0.1108 mL/(g · min) and 0.0089 mL/min. However, CO_2 release rates of male and female adults were 0.0074 mL/min and 0.0067 mL/min, respectively, at 39℃; significantly higher than at other temperatures (P<0.05). **[Conclusion]** *G. sibiricus* is likely to remain an important pest in Xinjiang alpine and subalpine grasslands despite global warming.

Key words respiratory metabolism, oxygen uptake rate, carbon dioxide release rate, temperature stress, substrate of respiration.

呼吸代谢是昆虫重要的生理生态特征之一（戈峰，1991），主要由呼吸系统完成（甘雅玲和郭中伟，2005）。气门（Stigma）是外界空气进入虫体内的第一通道（张克斌和谭六谦，1989；彩万志等，2004），掌握气门形态结构有助于分析昆虫与其生存环境之间的适应关系（宋月芹等，2007）。温度是影响昆虫呼吸代谢的主要因子（陈爱端等，2011），通过测定昆虫呼吸代谢变化规律可以掌握昆虫对营养物质的利用与分配、分析种群能量动态及其对环境的适应机制（庞雄飞，1963；戈峰，1991；陈瑜和马春森，2010）。

西伯利亚蝗 *Gomphocerus sibiricus* 隶属直翅目（Orthoptera），槌角蝗科（Gomphoceridae），是新疆高山、亚高山草原的优势危害种类，每年造成严重损失（龚建宁，2001）。前期研究表明，新疆草原蝗虫严重发生与同期气温升高有显著相关度（杨洪升等，2007，2008），但有关西伯利亚蝗呼吸代谢对气候变暖的响应策略还未见报道。本研究在掌握气门结构的基础上，探讨温度胁迫下西伯利亚蝗呼吸代谢的响应变化特征，以期揭示气候变暖背景下，西伯利亚蝗适应高温胁迫的呼吸代谢机理，为阐明新疆草原蝗虫灾害持续暴发机制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫采集

西伯利亚蝗成虫于 2015 年 6 月采自新疆维吾尔自治区哈密地区巴里坤县高山亚高山蝗区（43°24′ N，93°31′ E，海拔 2 220 m）。

1.2 试虫处理

1.2.1 西伯利亚蝗气门的超显微结构 挑选健康的西伯利亚蝗雌雄成虫各 5 头，迅速放入水中使其窒息死亡以获得气门张开的供试虫体，在超景深立体显微镜下解剖（CASO-66，英国卡索），获得着生有气门的体壁后用 0.2 mol/L 磷酸盐缓冲液冲洗，再将体壁内侧用软毛笔抹刷，至气门清晰可见；再用 0.2 mol/L 磷酸盐缓冲液冲洗后用 5%戊二醛在 4℃下固定 2 h，1%锇酸固定 1 h，经乙醇梯度脱水后用叔丁醇置换，HCP-2 型临界干燥仪干燥，喷金镀膜，在 JSM-6360LV 型扫描电子显微镜下观察结构并照相。

1.2.2 西伯利亚蝗呼吸代谢对温度胁迫的响应变化 选取健康、个体大小相近的西伯利亚蝗雌雄成虫放入多通道昆虫呼吸仪（Sable System International Inc，英国卡索）的呼吸室内，用恒温水浴槽（HH-S2，金坛市医疗仪器厂）调节所需的温度条件。根据蝗虫个体大小调整进气流速为 110 mL/min，将试虫静置于呼吸室至少 30 min 直至 CO_2 释放曲线平稳后开始测定；每 90 s 记录一次数据，每个呼吸室内试虫测试 30 min，数据自动记录到 ExpeData 程序软件中。采用 $CaSO_4$ 干燥剂除去从空气中进入到多通道昆虫呼吸仪的水份。

根据研究报道（乌麻尔别克和熊玲，2007），西伯利亚蝗发育起始温度为 18.8℃，故试验设置了 18、21、24、27、30、33、36、39、42℃共 9 个温度梯度，每个温度下处理 18 头试虫（♀：♂= 1∶1），重复 3 次。测试完毕后迅速处死试虫，置于 60℃恒温干燥箱内 72 h 至恒重，称量干重，计算代谢率。

1.3 数据处理

不同温度雌雄蝗虫的呼吸代谢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差异采用 *t*-检验（$P<0.05$）。数据分析采用 SPSS17.0。

2　结果与分析

2.1　西伯利亚蝗气门超显微结构

西伯利亚蝗为多气门型，共有 10 对气门，中、后胸体节各 1 对，腹部第 1~8 体节各 1 对。胸部的气门直径较腹部气门大，气门外面观呈圆形或椭圆形（图 1：A）。气门开闭结构由 1 对基部相连的唇形活瓣（Valve），垂叶（Sclerotized pad）和垂叶上着生的闭肌（Closer muscle）组成。

筛板（Filter apparatus）属于气门的过滤结构，1 500 倍下观察，西伯利亚蝗气门筛板呈刺凸状，分布密集，遍布整个气门内侧（图 1：C），10 000 倍下观察，筛板呈指状，单生不分枝（图 1：D~F）。西伯利亚蝗不同体节气门的筛板数量不同，胸部气门内的筛板数量多于腹部气门，腹部前端体节气门内的筛板数量多于腹部末端体节气门。

2.2　西伯利亚蝗呼吸代谢应对高温胁迫的响应变化

2.2.1　西伯利亚蝗 O_2 吸收率应对高温胁迫的响应变化　O_2 吸收率是衡量昆虫个体呼吸强弱的参数。图 2 表明，随着温度升高，西伯利亚蝗雌雄成虫的 O_2 吸收率总体呈先上升后下降的趋势。18℃时西伯利亚蝗雌雄成虫的 O_2 吸收率均最低，分别为 0.0022 mL/min 和 0.0016 mL/min，显著低于其他温度条件下的相应值（$P<0.05$），至 36℃时最大，分别为 0.0071 mL/min 和 0.0089 mL/min，显著大于其他温度条件下的相应值（$P<0.05$），温度持续升高，各项值开始下降。雌雄虫 O_2 吸收率在 21℃、24℃与 27℃差异不显著（$P>0.05$），30℃与 42℃差异不显著，其它温度下差异显著（$P<0.05$）。42℃时，雌雄虫之间 O_2 吸收率差异显著（$P<0.05$），其他温度下差异不显著（$P>0.05$）。

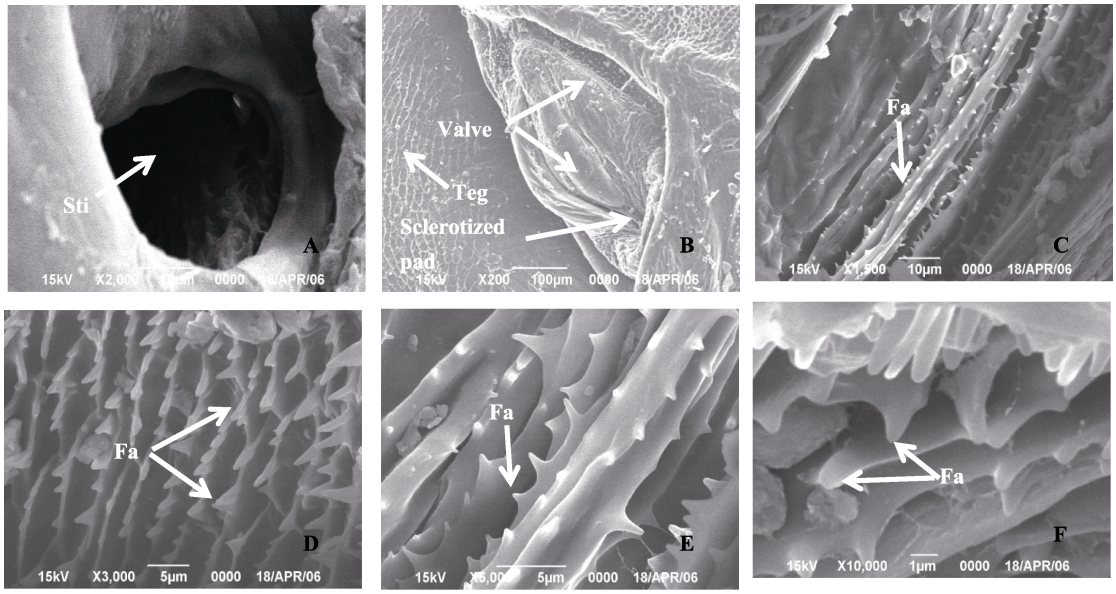

图 **1**　西伯利亚蝗气门超显微结构

Fig. 1　Scanning electron microscopic observation on stigma structure of *Gomphocerus sibiricus*

A. 西伯利亚蝗腹部气门外面观（×2 000）；B. 胸部气门外面观（×2 000）；C~F. 筛板（C.×1 500，D.×3 000，E.×5 000，F.×10 000）

Sti: 气门；Teg: 体壁；Fa: 筛板；Valve: 唇形活瓣；Sclerotized pad: 垂叶

A. The outside view of abdomen spiracle (×2 000); B. The outside view of thorax spiracle (×200); C-F. Filter apparatus (C.×1 500, D.×3 000, E.×5 000, F.×10 000).

Sti: Stigma; Teg: Intigument; Fa: Filter apparatus.

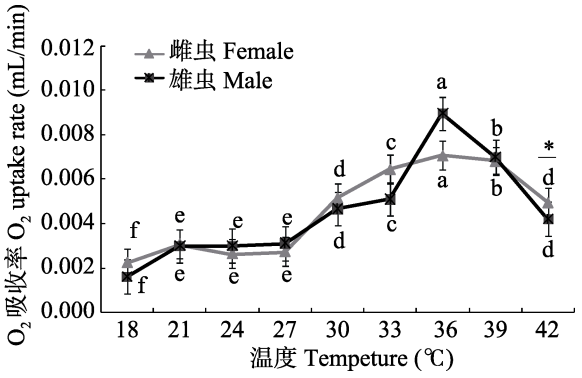

图 2　随温度升高西伯利亚蝗雌雄成虫 O_2 吸收率变化

Fig. 2　Changes of O_2 uptake rate of *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，$P<0.05$），*表示同一温度下雌雄之间存在显著差异（独立样本 *t*-检验，$P<0.05$）。下图同。

Data are presented as mean±SE, and followed by different letters indicate significant difference between different temperatures at the 0.05 level (LSD and Duncan's multiple range test, $P<0.05$). *indicates significantly difference at 0.05 level between females and males exposed to same temperatures in *G. sibiricus* (independent-sample *t*- test, $P<0.05$). The same below.

2.2.2　西伯利亚蝗 **CO_2 释放率应对高温胁迫的响应变化**　CO_2 释放率是指单位时间内昆虫个体的 CO_2 释放量，是衡量昆虫个体呼吸强弱的重要指标。图 3 结果表明，随着温度升高，西伯利亚蝗雌雄成虫的 CO_2 释放率呈先上升后下降的趋势。18℃时，雌雄成虫的 CO_2 释放率最低，分别为 0.0019 mL/min 和 0.0016 mL/min，显著低于其他温度下的相应值（$P<0.05$），至 39℃时达到最大，分别为 0.0074 mL/min 和 0.0067 mL/min，显著大于其它温度下的相应值（$P<0.05$），随后开始下降。雌雄虫 CO_2 释放率在 21℃、24℃与 27℃差异不显著（$P>0.05$），30℃与 42℃差异不显著（$P>0.05$），其他温度下差异显著（$P<0.05$）。42℃时，雌雄虫之间 CO_2 释放率差异显著（$P<0.05$），其他温度下差异不显著（$P>0.05$）。

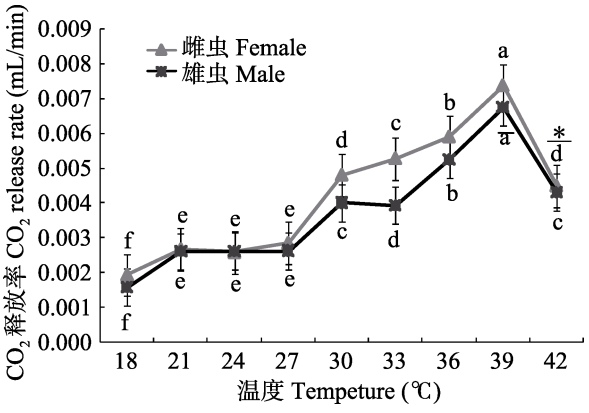

图 3　随温度升高西伯利亚蝗雌雄成虫 CO_2 释放率变化

Fig. 3　Changes of CO_2 release rate of *Gomphocerus sibiricus* at different temperatures

2.2.3　西伯利亚蝗代谢率应对高温胁迫的响应变化　代谢率是指单位体重虫体的呼吸耗氧量。图 4 结果表明，随着温度升高，西伯利亚蝗雌雄成虫的代谢率先上升后下降。18℃时西伯利亚蝗雌雄成虫的代谢率最小，分别为 0.0210 mL/(g·min)和 0.0236 mL/(g·min)，显著低于其他温度下的相应值（$P<0.05$），39℃时，雌虫代谢率最高，为 0.0592 mL/(g·min)，36℃时雄成虫的代谢率最高，为 0.1108 mL/(g·min)，且分别显著高于其他温度下的相应值（$P<0.05$），随后开始下降。雌雄虫代谢率在 21℃、24℃与 27℃差异不显著（$P>0.05$），30℃与 42℃差异不显著（$P>0.05$），其它温度下差异显著（$P<0.05$）。42℃时，雌雄虫之间 CO_2 释放率差异显著（$P<0.05$），其他温度下差异不显著（$P>0.05$）。

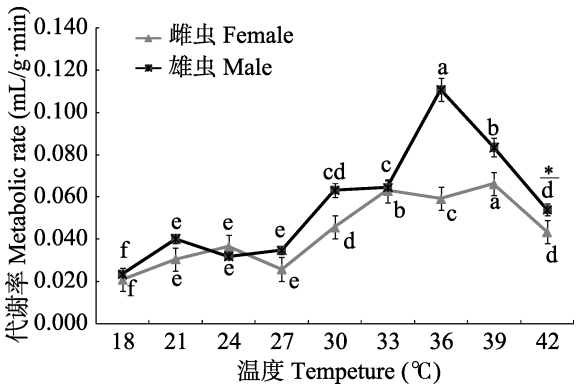

图 4　随温度升高西伯利亚蝗代谢率变化

Fig. 4　Changes of metabolic rate of *Gomphocerus sibiricus* at different temperatures

2.2.4　西伯利亚蝗成虫呼吸商应对高温胁迫的响应变化　呼吸商（Respiratory quotient，RQ）指能源物质氧化时 CO_2 与 O_2 的比值，能够反映出昆虫在当时环境下的呼吸底物。由表 1 看出，

表 1　不同温度下雌雄西伯利亚蝗成虫呼吸商变化

Table 1　Changes of respiratory quotient of *Gomphocerus sibiricus* at different temperatures

组别 Group	18℃	21℃	24℃	27℃	30℃	33℃	36℃	39℃	42℃
雌虫 Female	0.9301± 0.044a	0.9096± 0.041a	0.9865± 0.025a	0.9961± 0.028a	0.9634± 0.038a	0.9244± 0.029a	0.9389± 0.032a	0.9806± 0.024a	0.9347± 0.020a
雄虫 Male	0.9838± 0.041a	0.9039± 0.036a	0.9319± 0.044a	0.9189± 0.026a	0.9936± 0.031a	0.9270± 0.023a	0.9207± 0.026a	0.9247± 0.061a	1.0435± 0.029a

表中数据为平均值±标准误，数据后标有相同字母表示数据无显著差异（独立样本 *t*-检验，$P<0.05$）。

Data in the table are mean ± SE, and followed by the same letters are no significant difference at the 0.05 level (independent-sample *t*- test, $P<0.05$).

随着温度升高，西伯利亚蝗雌雄虫间、同一性别间的呼吸商差异均不显著（$P>0.05$）。雌雄成虫的呼吸商分别介于 0.9096~0.9961 和 0.9039~1.0435 之间，平均值分别为 0.9515 和 0.9497。由此判断，不同温度下雌雄西伯利亚蝗成虫均以糖类物质作为呼吸消耗的底物。

3　讨论

3.1　西伯利亚蝗气门结构对环境的适应性

气门不仅是虫体与外界进行气体交换的通道，而且可以帮助虫体有效阻挡尘粒、水分和农药等(宋月芹等,2009a)。银纹夜蛾 *Argyrogramma agnata* 幼虫的气门内侧由密生的簇生分枝结构组成，又称为筛板，其分枝顶端钝圆或平截状的结构特点可以黏附或阻挡微尘和病菌（宋月芹等，2007），对烟青虫 *Heliothis assulta* 气门的研究也得出相似结论（宋月芹等，2009b)。本研究发现，西伯利亚蝗气门的筛板遍布整个气门内侧，分布密集，且不同体节气门的筛板数量不同，这是否与不同体节气门的呼吸代谢强度不同有关还需要深入研究。

3.2　温度胁迫对雌雄西伯利亚蝗成虫呼吸代谢的影响

昆虫在适宜的温度范围内，其呼吸代谢变化幅度小或不发生变化（戈峰，1991)。对沟金针虫 *Pleonomus canaliculatus* O_2 吸收率的研究发现，10~20℃是其生长和活动的适宜范围（陈爱端等,2011）通过对龟纹瓢虫 *Propylaea japonica* 的 O_2 吸收率和代谢率测定，确定了其最适生长温度为 25℃（高峰等，2007）；王冬梅等（2014）通过对呼吸代谢各项指标测定与分析，确定了意大利蝗 *Calliptamus italicus* 适宜生长温度范围为 20~30℃。本研究结果表明，21~27℃为西伯利亚蝗成虫生长发育的适宜温度范围，这与李娟等（2014）的研究结论一致。

昆虫呼吸代谢的能源物质主要为糖类、脂肪和蛋白质，根据能源物质氧化时 CO_2 与 O_2 的比值（呼吸商），可以推断出昆虫在当时环境下的呼吸底物（王满囷等，2001)。王彦文等（1997）对天蚕 *Anrhearea yamamai 5* 龄期幼虫的研究发现其主要以糖类作为呼吸代谢底物，王满囷等（2001）对鞭角华扁叶蜂 *Chinolyda flagellicornis* 的研究发现其预蛹期以脂类为呼吸代谢底物，而幼虫期则改为糖类，王冬梅等（2014）研究发现意大利蝗 *C. italicus* 成虫以糖类作为呼吸代谢底物。本研究得出，18~42℃范围内雌雄西伯利亚蝗成虫均以糖类作为呼吸代谢消耗的底物，但不同温度处理下西伯利亚蝗体内呼吸底物糖类及其关键代谢酶的动态变化及其它能源物质如蛋白质、脂肪的消耗仍需进一步研究。根据西伯利亚蝗在高温胁迫下呼吸代谢变化特征可以判断，随气候持续变暖，西伯利亚蝗仍将是新疆高山、亚高山草原的重要致灾类群。

致谢：感谢新疆维吾尔自治区哈密地区巴里坤哈萨克自治县草原站李占武高级畜牧师及全体工作人员对此研究野外工作的支持和帮助。

参考文献 (References)

Cai WZ, Pang XF, Hua BZ, Liang GW, Song DL, 2004. General

Entomology. Beijing: China Agricultural University Press. 95–103. [彩万志, 庞雄飞, 花保祯, 梁广文, 宋敦伦, 2004. 普通昆虫学. 北京: 中国农业大学出版社. 95-103.]

Chen AD, Li KB, Yin J, CAO YZ, 2011. Effects of environmental factors on the respiratory metabolism in larvae of *Pleonomus canaliculatus*(Coleoptera: Elateridae). *Acta Entomologica Sinica*, 54(4): 397-403. [陈爱端, 李克斌, 尹娇, 曹雅忠, 2011. 环境因子对沟金针虫呼吸代谢的影响. 昆虫学报, 54(4): 397-403.]

Chen Y, Ma CC, 2010. Effect of global warming on insect: a literature review. *Acta Ecologica Sinica*, 30(8): 2159-2172. [陈瑜, 马春森, 2010. 气候变暖对昆虫影响研究进展. 生态学报, 30(8): 2159-2172.]

Du Y, Ma CS, Zhao QH, Ma G, Yang HP, 2007. Effects of heat stress on physiological and biochemical mechanisms of insects: a literature review. *Acta Ecologica Sinica*, 27(4): 1565-1572. [杜尧, 马春森, 赵清华, 马罡, 杨和平, 2007. 高温对昆虫影响的生理生化作用机理研究进展. 生态学报, 27(4): 1565-1572.]

Gao F, Su JW, Ge F, Wu G, Liu XH, 2007. Effect of temperature on the respiration and metabolism of ladybeetles, *Propylaea japonica*. *Hubei Agricultural Sciences*, 46 (4): 562–564. [高峰, 苏建伟, 戈峰, 吴刚, 刘向辉, 2007. 温度对龟纹瓢虫呼吸代谢的影响. 湖北农业科学, 46(4): 562-564.]

Gan YL, Guo ZW, 2005. Scanning electron microscopic observation on stigma structure of some insects. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 24(4): 425-425. [甘雅玲, 郭中伟, 2005. 几种昆虫气管系统的扫描电镜观察. 电子显微学报 24(4): 425-425.]

Ge F, 1991. Factors affecting the insect respiratory metabolism. *Chinese Bulletin of Entomology*, 28(5): 319-321. [戈峰, 1991. 影响昆虫呼吸代谢的因素. 昆虫知识, 28(5): 319-321.]

Gong JN, 2001. Grasshoppers and pest rat hazard in grassland of Xinjiang and their controlling strategy. *Journal of Catastrophology*, 16(2): 65-69. [龚建宁, 2001. 新疆草原蝗、鼠灾害与控制对策. 灾害学, 16(2): 65-69.]

Li J, Li S, Wang DM, Ji R, 2014. Changes in the 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.]

Pang XF, 1963. Effect of temperature on oxygen uptake of several insects. *Chinese Bulletin of Entomology*, 8(2): 56–60. [庞雄飞, 1963. 温度对几种昆虫吸氧量的影响. 昆虫知识, 8(2): 56-60.]

Song YQ, Wu ZX, Sun HZ, Cheng WN, 2007. Scanning electron microscopic observation on larval stigma structure of *Argyrogramma agnata*. *Chinese Bulletin of Entomology*, 44 (6): 840-843. [宋月芹, 仵均祥, 孙会忠, 成卫宁, 2007. 银纹夜蛾幼虫气门形态特征的扫描电镜观察. 昆虫知识, 44(6): 840–843.]

Song YQ, Dong JF, Zhang RM, 2009a. Spiracle morphological characteristics of *Helicoverpa armigrea* larvae. *Guizhou Agricultural Sciences*, 37(9): 86-88. [宋月芹, 董钧锋, 张瑞敏, 2009a. 棉铃虫幼虫气门的形态特征观察. 贵州农业科学, 37(9): 86-88.]

Song YQ, Zhang H, Li T, Guan X, 2009b. Observation on the spiracle characteristics of mature *Helicoverpa assulta* larvae. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 37(24): 11610-11611. [宋月芹, 张华, 李涛, 关侠, 2009b. 烟青虫老熟幼虫气门特征观察. 安徽农业科学, 37(24): 11610-11611.]

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.]

Wang MQ, Pang H, Li ZZ, 2001. Characteristics of the respiratory metabolism of *Chinolyda flagellicornis* prepupa. *Forest Research*, 14(6): 616-620. [王满囷, 庞辉, 李周直, 2001. 鞭角华扁叶蜂预蛹呼吸代谢的特点. 林业科学研究, 14(6): 616-620.]

Wang YW, Cui WZ, Zhang YY, Mu ZM, Zhang ZY, 1997. The respiratory metabolism of *Anrhearea yamamai* Guerin. *Chinese Bulletin of Entomology*, 37(1): 30-32. [王彦文, 崔为正, 张友英, 牟志美, 张正印, 1997. 天蚕的呼吸代谢. 昆虫知识, 37(1): 30-32.]

Wu MR，Xiong L, 2007. Determination of developmental threshold temperature and effective accumulated temperature on *Oedaleus decorus decorus* (Germar), *Calliptamus italicus* L. and *Gomphocerus sibiricus* L．*Xinjiang Husbandry*, (Suppl.): 30-31. [乌麻尔别克, 熊玲, 2007. 黑条小车蝗、意大利蝗和西伯利亚蝗发育起点温度及有效积温测定. 新疆畜牧业, (增刊): 30-31.]

Yang HS, Ji R, Xiong L, Yuan H, 2007. Effect of meteorological factors on locust occurrence in the North of Mt. Tianshan in Xinjiang. *Chinese Bulletin of Entomology*, 44(4): 517-520. [杨洪升, 季荣, 熊玲, 原惠, 2007. 气象因子对北疆地区蝗虫发生的影响. 昆虫知识, 44(4): 517-520.]

Yang HS, Ji R, Wang T, 2008. Atmospheric circulation background and long-term prediction of grasshopper occurrence in Xinjiang. *Chinese Journal of Ecology*, 27(2): 218-222. [杨洪升, 季荣, 王婷, 2008. 新疆蝗虫发生的大气环流背景及长期预测. 生态学杂志, 27(2): 218-222.]

Zhang KB, Tan LQ, 1989. Insect Physiology. Xian: Shanxi Science and Technology Press. 31-42. [张克斌, 谭六谦, 1989. 昆虫生理. 西安: 陕西科学技术出版社. 31-42.]