

食物氮含量对意大利蝗生长发育和卵巢面积的影响



陈妍¹ 董化楠¹ 季荣¹ 何岚^{1*} 张永军^{1*} 丁国蝉²

(1. 新疆师范大学生命科学学院, 中亚区域跨境有害生物联合控制国际研究中心, 塔城昆虫迁飞生物学野外科学观测研究站, 新疆特殊环境物种保护与调控生物学实验室, 乌鲁木齐 830054;
2. 玛纳斯蝗虫鼠害预测预报防治站, 新疆昌吉 832200)

摘要: 为合理预测意大利蝗 *Calliptamus italicus* 的种群动态, 分别用 1% (对照)、4% 和 7% 氮含量的食物饲喂意大利蝗 5 龄蝗蛹, 测定不同氮含量食物处理后意大利蝗 5 龄蝗蛹的生长速率, 羽化后 7 d 的体长、股节长、胫节长、翅长、翅宽、体重及羽化后 1、7、13 和 19 d 的卵巢面积。结果显示, 4% 氮含量食物处理试虫的生长速率最大, 分别较 1% 和 7% 氮含量处理的增加了 88.02% 和 109.33%; 4% 和 7% 氮含量食物处理后, 意大利蝗成虫的后翅宽和体重均显著高于对照; 羽化后 7 d, 不同氮含量食物处理的意大利蝗卵巢面积出现显著差异, 羽化后 19 d, 4% 氮含量食物处理的卵巢面积显著高于其他 2 个处理。表明中等氮含量 (4% 氮含量) 适宜意大利蝗生长。

关键词: 氮含量; 意大利蝗; 生长发育; 体型; 卵巢面积

Effects of nitrogen content in food on the growth, development, and ovarian area of Italian locust *Calliptamus italicus*

Chen Yan¹ Dong Huanan¹ Ji Rong¹ He Lan^{1*} Zhang Yongjun^{1*} Ding Guochan²

(1. Xinjiang Special Environmental Species Conservation and Regulatory Biology Laboratory, Tacheng Insect Migration Biology Field Scientific Observation Station, International Research Center for Joint Control of Transboundary Pests in Central Asia, School of Life Sciences, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China; 2. Manas Locust Pest Forecasting and Control Station, Changji 832200, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

Abstract: To reasonably predict the population dynamics of Italian locust *Calliptamus italicus*, female 5th instar nymphs were fed food containing 1% (CK), 4%, and 7% nitrogen. The growth rate of the 5th instar nymphs was measured, along with body length, femoral length, tibia length, wing length, wing width, and body weight of locusts on the 7th day post-emergence. Additionally, the ovarian area was measured on days 1, 7, 13, and 19 post-emergence following the different nitrogen treatments. Results showed that the growth rate of individuals in the 4% nitrogen group was the highest, increasing by 88.02% and 109.33% compared to the 1% and 7% nitrogen groups, respectively. The hind wing width and body weight of adult locusts in the 4% and 7% nitrogen groups were significantly higher than those in the CK group. On the 7th day post-emergence, the ovarian area of *C. italicus* differed significantly among the different nitrogen content groups. By the 19th day post-emergence, the ovarian area in the 4% nitrogen group was significantly higher than that in the other two groups. These results indicated that a moderate nitrogen content (4% nitrogen) is suitable for the growth of *C. italicus*.

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(32101263), 天山英才领军人才项目(TSYCLJ0016), 新疆师范大学青年拔尖人才项目(XJNUQB2023-12), 新疆草原有害生物普查项目(XJCYH-01)

* 通信作者 (Authors for correspondence), E-mail: 517804636@qq.com, Heie@sina.com.cn

收稿日期: 2023-12-04

Key words: nitrogen content; *Calliptamus italicus*; growth and development; body size; ovarian area

人类活动如化石燃料的大量燃烧、交通运输的快速发展、农业化肥的广泛施用等导致氮沉降总量及速率不断增加(Galloway et al., 1995; Goulding et al., 1998; 牛永杰等, 2023)。氮沉降引起植物质量、生物量和物种多样性等改变, 从而对植食性昆虫的生长发育、繁殖和寿命等核心生命过程产生影响(Nijssen et al., 2017; Nessel et al., 2021)。因此, 掌握氮沉降背景下害虫种群的发生特点对于预测预报害虫种群暴发具有重要指导意义。

氮是昆虫维持生长和繁殖的必要营养物质之一(Southwood, 1973)。大量研究发现, 取食富含蛋白质的食物后昆虫发育更快, 存活率更高, 繁殖能力更强, 如高氮植物可使沙漠蝗 *Schistocerca gregaria* 体型更大, 发育更快, 存活率更高, 繁殖时间更短(van Huis et al., 2008); 在高氮肥稻田中, 日本稻蝗 *Oxya japonica* 生长速率与取食量显著高于在有机稻田中的(Trisnawati et al., 2015); 取食氮含量较高的食物后, 邱氏异爪蝗 *Euchorthippus cheui* 发育更快, 体型更大, 存活率更高(Zhu et al., 2023); 黄瓜中氮含量较高时有利于棉蚜 *Aphis gossypii* 的繁殖(辛苗等, 2010)。但并非所有高氮食物都会对昆虫产生积极影响, 如Zhu et al. (2019)研究表明, 适度放牧导致的氮富集不会影响素色异爪蝗 *Euchorthippus unicolor* 的生长发育; Blua & Toscano (1994)报道植物中氮含量对烟粉虱 *Bemisia tabaci* 的生长发育和温室粉虱 *Trialeurode vaporariorum* 的个体大小及若虫存活率无影响; Cease et al. (2012)报道亚洲小车蝗 *Oedaleus asiaticus* 喜食低氮植物, 高氮植物和高蛋白的人工饲料可降低其存活率, 过度放牧导致的植物蛋白含量降低会促进蝗灾的暴发; Letourneau & Fox (1989)研究显示, 在施用低氮肥的寄主上菜粉蝶 *Pieris rapae* 产卵较多; 龚佩瑜和李秀珍(1992)发现, 与饲喂中等氮含量的食物相比, 饲喂低氮、高氮食物的棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 的发育速度和产卵数量均显著降低。上述研究表明, 氮对昆虫的影响可能存在种间差异, 昆虫对植物氮含量具有特定的浓度需求, 氮含量不足或过剩都会降低其适合度(Zhu et al., 2019)。

意大利蝗 *Calliptamus italicus* 是新疆维吾尔自治区(简称新疆)荒漠草原的主要害虫(刘琼, 2017; 何岚等, 2020), 对草原植被为害极大, 可加剧草原荒

漠化(王晗等, 2010; 王冬梅等, 2014), 主要分布在北疆地区海拔800~1 300 m的荒漠、半荒漠草原(黄训兵等, 2013), 取食范围广(黄春梅, 1995; 陈永林, 2000; 薛智平等, 2010), 喜食冷蒿 *Artemisia frigida* 和黄花苜蓿 *Medicago falcata* 等(薛智平等, 2010)。冷蒿中氮含量约为1%~2%(陈慧颖等, 2014; 黄训兵, 2018), 黄花苜蓿中氮含量约为3%~5%(齐耀程等, 2016; 罗雅琴, 2023), 远低于昆虫体内的氮含量(8%~14%)(Mattson, 1980), 因此, 通过改变食物氮含量可以影响昆虫的生长发育和繁殖。在全球氮沉降背景下, 食物氮含量增加是否会影响意大利蝗生存尚不清楚。本研究拟测定取食不同氮含量食物后意大利蝗的生长速率、体型和卵巢面积等指标, 初步探讨氮含量变化对意大利蝗生长发育和繁殖功能的影响, 以期对昆虫生理生态学研究补充基础资料, 为合理预测蝗虫种群发生提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试昆虫和饲料: 于2023年6月下旬和7月上旬在新疆玛纳斯县五道崖(43°51'1" N, 86°11'7" E)采集意大利蝗5龄蝗蛹, 选择健康5龄蝗蛹置于长40 cm、宽40 cm、高40 cm的养虫笼内, 用马颗粒饲料于温度(30±2) °C、相对湿度(50±5)%的室内饲养。马颗粒饲料, 氮含量为2.4%, 由北京农大利生物技术有限公司生产。

试剂和仪器: 试剂均为国产分析纯。ME204E精密电子天平, 瑞士梅特勒-托利多公司; DHG-9070A电热恒温鼓风干燥箱, 上海齐欣科学仪器有限公司。

1.2 方法

1.2.1 不同氮含量食物的制备

参照Joern & Behmer (1997)方法制作不同氮含量的食物。以马颗粒饲料为基础物质, 通过添加不同比例的纤维素和干酪素(氮含量为13.5%)制作氮含量分别为1%、4%和7%的食物, 此外, 添加山梨酸和对羟基苯甲酸酯进行防腐。制备步骤如下: 将207.5 mL蒸馏水加入到5.56 g琼脂粉末中, 微波炉加热4 min使其充分溶解, 晾凉至65~70 °C, 将融化的琼脂加入到不同氮含量的食物组分(表1)中, 充分混匀后待其凝固, 于4 °C冰箱中冷藏保存, 备用。

表1 不同氮含量的食物组分

Table 1 Food components with varying nitrogen contents

氮含量 Nitrogen content/%	马颗粒饲料 Horse charge/g	纤维素 Cellulose/g	山梨酸 Ascorbic acid/g	对羟基苯甲酸酯 Methyl-paraben/g	干酪素 Casein/g
1	21.62	23.88	0.44	0.38	0.00
4	21.62	12.35	0.44	0.38	11.53
7	21.62	0.82	0.44	0.38	23.06

1.2.2 食物氮含量对意大利蝗生长速率影响的测定

取30头同日龄、大小一致的意大利蝗5龄蝗蛹,于65℃烘干72h至恒重,称量干重,以30头试虫干重的平均数作为处理前试虫干重。取1头饥饿12h的意大利蝗5龄蝗蛹置于直径7cm、高6.5cm的养虫盒内饲养,每日称取1%(对照)、4%和7%氮含量食物各2.5g进行饲喂,1%、4%和7%氮含量处理组分别测定22、20和20头试虫。饲喂7d后取出存活试虫,于液氮中速冻,去足,于65℃烘干72h至恒重,称量干重,计算每头试虫7d的生长速率。生长速率=(处理后试虫干重-处理前试虫干重)/发育时间。

1.2.3 食物氮含量对意大利蝗体型影响的测定

取同日龄、大小一致的意大利蝗5龄蝗蛹,分成3组,每组20头,每日每组分别投喂氮含量为1%、4%和7%的食物,待羽化时,各处理取同天羽化的3头试虫置于直径7cm、高6.5cm的养虫盒内饲养,7d后取出存活试虫,于液氮中速冻;测量意大利蝗的体长(从头部最前端到腹部最后1节的后部,触角和尾须除外)、股节长、胫节长、前翅长(基部到端部的最大长度)和后翅宽(展开后最大宽度);测量完于65℃烘干72h至恒重,称量干重,即试虫体重。1%、4%和7%氮含量处理组分别测定19、13和18头试虫。

1.2.4 食物氮含量对意大利蝗卵巢面积影响的测定

取同日龄、大小一致的意大利蝗5龄蝗蛹,分成3组,每日每组分别投喂氮含量为1%、4%和7%的食物,待羽化时,将当天羽化的蝗虫与5龄蝗蛹分开饲养,记录羽化天数,羽化后1、7、13和19d取存活试虫,参考陈伟等(2005)方法进行解剖,取出卵巢,置于载玻片上,用生理盐水冲洗,测量卵巢的长(附腺前端到中输卵管末端的长度)和宽(卵巢最大宽度)。参照任金龙等(2014)方法计算卵巢面积。1%、4%和7%氮处理组羽化后1d的试虫数量为4、5和5头,各处理组羽化后7d的试虫数量均为10头,羽化后13d和19d的试虫数量均为20头。

1.3 数据分析

使用SPSS 26.0软件进行数据统计分析。首先

对数据进行方差齐性检验和平均相等性稳健检验。因试虫的生长速率数据不具有方差齐性,采用塔姆黑尼法进行差异显著性检验;其他数据均采用LSD法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 食物氮含量对意大利蝗生长速率的影响

1%、4%和7%氮含量食物处理后7d,意大利蝗5龄蝗蛹的生长速率分别为1.67、3.14和1.46 mg/d,三者之间差异不显著,但4%氮含量食物处理后7d,意大利蝗5龄蝗蛹的生长速率最大,分别较其他2个处理增加了88.02%和109.33%(图1)。

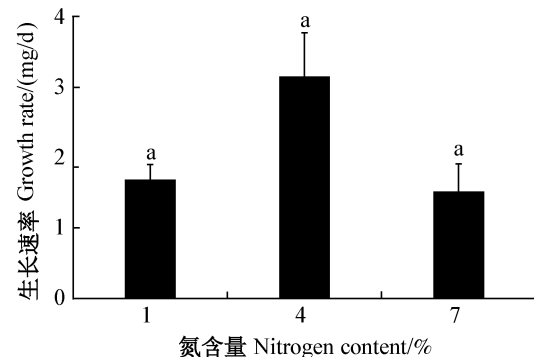


图1 食物氮含量对意大利蝗生长速率的影响

Fig. 1 Effects of nitrogen contents in food on the growth rate of *Calliptamus italicus*

图中数据为平均数±标准误。不同小写字母表示经塔姆黑尼法检验差异显著($P<0.05$)。Data are mean±SE. Different lowercase letters indicate significant difference by Tamhane's T2 test ($P<0.05$).

2.2 食物氮含量对意大利蝗体型的影响

1%、4%和7%氮含量食物处理后,羽化7d的意大利蝗体长分别为29.37、29.02和29.30 mm,股节长分别为16.52、16.41和16.39 mm,胫节长分别为13.85、13.74和13.85 mm,前翅长分别为25.65、25.67和25.32 mm,三者之间均无显著差异;后翅宽分别为11.21、12.07和12.01 mm,前者显著低于后两者($P<0.05$,表2)。1%、4%和7%氮含量食物处理后,意大利蝗体重分别为120.94、143.85和140.58 mg,

前者显著低于后两者($P<0.05$,表2)。

表2 食物氮含量对意大利蝗体型和体重的影响

Table 2 Effects of nitrogen contents in food on the body weight and size of *Calliptamus italicus*

氮含量 Nitrogen content/%	体长 Length/mm	股节 Femur/mm	胫节 Tibia/mm	前翅长 Elytron length/mm	后翅宽 Hindwing width/mm	体重 Width/g
1	29.37±0.61 a	16.52±0.14 a	13.85±0.15 a	25.65±0.36 a	11.21±0.23 a	120.94±6.90 a
4	29.02±0.71 a	16.41±0.15 a	13.74±0.17 a	25.67±0.35 a	12.07±0.24 b	143.85±7.91 b
7	29.30±0.45 a	16.39±0.12 a	13.85±0.12 a	25.32±0.25 a	12.01±0.16 b	140.58±6.24 b

表中数据为平均数±标准误。同列不同小写字母表示经LSD法检验差异显著($P<0.05$)。Data are mean±SE. Different lowercase letters in the same column indicate significant difference by LSD test ($P<0.05$).

2.3 食物氮含量对意大利蝗卵巢面积的影响

1%、4%和7%氮含量食物处理后至羽化第1天,意大利蝗的卵巢面积分别为17.03、12.27和13.50 mm²,三者之间差异不显著;4%、1%和7%氮含量食物处理后至羽化第7天,意大利蝗的卵巢面积分别为20.02、16.51和15.57 mm²,除4%氮含量食物处理的卵巢面积显著大于7%氮含量食物处理的卵巢面积外($P<0.05$),其他处理之间差异不显著;4%、1%和7%氮含量食物处理后至羽化第13天,意大利蝗的卵巢面积分别为25.17、20.13和22.69 mm²,除4%氮含量食物处理的卵巢面积显著大于对照外($P<0.05$),其他处理之间差异不显著;4%、1%和7%氮含量食物处理后至羽化第19天,意大利蝗的卵巢面积分别为50.48、32.22和38.17 mm²,前者显著大于后两者($P<0.05$,图2)。

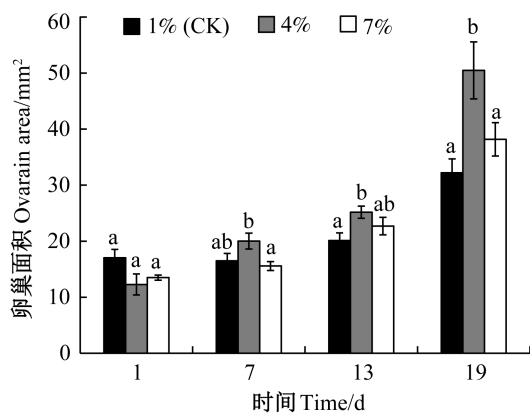


图2 食物氮含量对意大利蝗卵巢面积的影响

Fig. 2 Effects of nitrogen contents in food on the ovarian area of *Calliptamus italicus*

图中数据为平均数±标准误。同时间不同小写字母表示经LSD法检验差异显著($P<0.05$)。Data are mean±SE. Different lowercase letters indicate significant difference for the same time by LSD test ($P<0.05$).

3 讨论

昆虫利用植物中氮以满足自身生长发育的需求(郭文卿,2012),生长发育是反映昆虫对食物适应性的重要指标。一般认为,由于植物中氮元素含量远低于动物组织中氮元素的含量,昆虫可以选择取食氮含量高的食物来维持自身的氮含量(张寅至等,2014)。因此,高氮食物对一些昆虫而言是有利的,如van Huis et al.(2008)研究结果显示,用施氮(平均氮含量约为3.9%)和不施氮(平均氮含量约为1.4%,对照)的御谷 *Pennisetum typhoideum* 叶片饲喂沙漠蝗蝗蝻后,饲喂高氮食物的沙漠蝗的发育历期较对照缩短;Coley et al.(2006)研究发现,当叶片氮含量在1%~5%之间时,毛虫生长发育速率随着叶片氮含量的升高而升高;王艳辉等(2022)研究发现,CO₂浓度升高会导致水稻中氮类化合物含量降低,从而显著缩短褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 的卵发育历期,5龄若虫发育历期、若虫总发育历期和成虫寿命。上述研究表明食物氮含量改变会影响昆虫生长发育,但由于不同种类昆虫生长发育所需的氮含量不同,因此不同氮含量的食物对昆虫的核心生命过程产生的影响也不同。喜食高氮食物的昆虫可能会表现出随着食物氮含量的升高,生长速率加快,生长发育历期缩短等,反之亦然。本研究发现,中等氮含量食物处理后,意大利蝗的生长发育速率最高,而高氮含量食物处理后其生长发育速率与对照相当,表明适当的氮添加可促进意大利蝗的生长发育,但过高含量的氮不利于意大利蝗发育。

体型是影响迁飞性昆虫迁移、扩散的重要特征之一,明确食物质量改变对昆虫体型的影响有利于掌握其迁移分布(徐瑞斌,2023)。昆虫对氮的需求可能取决于自身特定的发育阶段、性别和生理状态等多种因素,因此不同物种对食物氮的响应存在差

异。如 van Huis et al. (2008) 研究发现, 高氮处理后沙漠蝗体长、头宽和前翅长均较氮处理显著增加; 史长光等 (2017) 研究发现, 施氮植物增加了若尔盖毛虫 *Gynaephora ruoergensis* 的取食速率, 并显著增加了其体长和体重, 进而加重了对植物的破坏; Facknath & Lalljee (2005) 发现, 取食施氮马铃薯 *Solanum tuberosum* 叶片后, 蛇纹潜叶蝇 *Liriomyza trifolii* 成虫的体重和体长显著增加; 施氮肥植株上蚜虫体型明显比未施氮肥植株上的大 (Nevo & Coll, 2001); 郭文卿 (2012) 研究发现, 稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 5 龄幼虫取食氮含量为 0.92%、1.46% 和 1.57% 食物后, 氮含量为 0.92% 处理组的蛹重显著高于其他 2 个处理。本研究结果显示, 不同氮含量食物处理后, 意大利蝗的体长、股节长、胫节长和前翅长无显著差异, 但取食中、高氮食物后意大利蝗的体重和后翅宽显著高于取食低氮食物后, 而翅宽与昆虫的迁飞能力密切相关 (袁曦, 2010)。食物氮含量的增加是否会导致意大利蝗种群迁移范围扩大, 有待进一步深入研究。

食物质量会影响卵巢发育, 而卵巢发育直接影响昆虫的繁殖能力 (张万娜, 2013)。Hoover et al. (2006) 研究发现, 西方蜜蜂 *Apis mellifera* 幼虫期及成虫期食物中蛋白含量影响工蜂卵巢发育, 其中成虫期取食高蛋白含量的食物对卵巢发育的影响更大; Human et al. (2007) 研究发现, 取食较高氮含量 (蛋白质含量 31%) 芦荟 *Aloe vera* 花粉的工蜂卵巢较取食氮含量较低的向日葵 *Helianthus annuus* 花粉 (蛋白质含量 15%) 的发育更快。与之相反, Goverde et al. (2002) 研究发现, 当 CO₂ 浓度越高时, 植物中氮比例会越低, 潘非珍眼蝶 *Coenonympha pamphilus* 卵巢中成熟的卵粒则越多。本研究结果显示, 不同氮含量食物处理后 1 d, 意大利蝗卵巢面积无显著差异, 处理后 7 d, 4% 氮含量食物处理的卵巢面积开始显著增加, 处理后 13 d, 由于用于卵巢发育的能量更多, 卵巢面积明显增加。任金龙等 (2014) 研究发现意大利蝗卵巢面积呈幂指数型增长, 卵巢发育主要集中于中后期, 与本研究结果一致。

本研究初步探讨了食物氮含量增加对意大利蝗生长发育和卵巢发育的影响, 表明中等氮含量的食物对意大利蝗的繁殖力和生长发育有积极影响。本试验仅设置了 3 个氮浓度梯度, 下一步可增加氮浓度梯度。另外, 卵巢长、宽、面积和发育级别有一定的相关性 (任金龙等, 2014), 但是卵巢发育级别需要

结合卵的形态和数量进行判定, 本试验并未记录这些信息, 未能对卵巢发育进行级别划分。本研究仅探讨了单一食物氮含量改变对意大利蝗的影响, 在自然生境中, 环境中氮含量的变化如何影响植物从而影响意大利蝗有待进一步研究。

参 考 文 献 (References)

- Blua MJ, Toscano NC. 1994. *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) development and honeydew production as a function of cotton nitrogen status. *Environmental Entomology*, 23(2): 316–321
- Cease AJ, Elser JJ, Ford CF, Hao SG, Kang L, Harrison JF. 2012. Heavy livestock grazing promotes locust outbreaks by lowering plant nitrogen content. *Science*, 335(6067): 467–469
- Chen HY, Zhang JH, Huang YM, Gong JR. 2014. Traits related to carbon sequestration of common plant species in a *Stipa grandis* steppe in Nei Mongol under different land-uses. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38(8): 821–832 (in Chinese) [陈慧颖, 张景慧, 黄永梅, 龚吉蕊. 2014. 内蒙古大针茅草原常见植物在不同土地利用方式下的固碳相关属性. *植物生态学报*, 38(8): 821–832]
- Chen W, Chen WZ, Wu WJ. 2005. Grading ovarian developments of *Fruhstorferiola tonkinensis*. *China Plant Protection*, 25(5): 5–6 (in Chinese) [陈伟, 陈伟洲, 吴伟坚. 2005. 越北腹露蝗卵巢发育程度的分级研究. *中国植保导刊*, 25(5): 5–6]
- Chen YL. 2000. Control and ecological management of locust infestation again. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 15(5): 341–345 (in Chinese) [陈永林. 2000. 蝗虫再猖獗的控制与生态学治理. *中国科学院院刊*, 15(5): 341–345]
- Coley PD, Bateman ML, Kursar TA. 2006. The effects of plant quality on caterpillar growth and defense against natural enemies. *Oikos*, 115(2): 219–228
- Facknath S, Lalljee B. 2005. Effect of soil-applied complex fertiliser on an insect-host plant relationship: *Liriomyza trifolii* on *Solanum tuberosum*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 115(1): 67–77
- Galloway JN, Schlesinger WH, Levy H II, Michaels A, Schnoor JL. 1995. Nitrogen fixation: anthropogenic enhancement environmental response. *Global Biogeochemical Cycles*, 9(2): 235–252
- Gong PY, Li XZ. 1992. Effects of dietary nitrogen on development and fecundity of the cotton bollworm, *Heliothis armigera* (Hübner). *Acta Entomologica Sinica*, 35(1): 40–46 (in Chinese) [龚佩瑜, 李秀珍. 1992. 饲料含氮量对棉铃虫发育和繁殖的影响. *昆虫学报*, 35(1): 40–46]
- Goulding KWT, Bailey NJ, Bradbury NJ, Hargreaves P, Howe M, Murphy DV, Poulton PR, Willison TW. 1998. Nitrogen deposition and its contribution to nitrogen cycling and associated soil processes. *New Phytologist*, 139(1): 49–58
- Goverde M, Erhardt A, Niklaus PA. 2002. *In situ* development of a satyrid butterfly on calcareous grassland exposed to elevated car-

- bon dioxide. *Ecology*, 83(5): 1399
- Guo WQ. 2012. Nutritional requirements of *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee (Lepidoptera: Pyralidae) larvae for nitrogen and sugar in artificial diets. Master thesis. Nanjing: Nanjing Agricultural University (in Chinese) [郭文卿. 2012. 稻纵卷叶螟幼虫对氮和糖营养的需要. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学]
- He L, Zhang YJ, Ye XF, Ji R. 2020. A preliminary study on egg cold resistance of *Calliptamus italicus*. *Journal of Environmental Entomology*, 42(3): 553–558 (in Chinese) [何岚, 张永军, 叶小芳, 季荣. 2020. 意大利蝗越冬卵抗寒性初步研究. *环境昆虫学报*, 42(3): 553–558]
- Hoover SER, Higo HA, Winston ML. 2006. Worker honey bee ovary development: seasonal variation and the influence of larval and adult nutrition. *Journal of Comparative Physiology B: Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology*, 176(1): 55–63
- Huang CM. 1995. Feeding habits and subfamily systematics of Acrididae in barkol grassland of Xinjiang. *Entomotaxonomia*, 17(S1): 128–134 (in Chinese) [黄春梅. 1995. 新疆巴里坤草原优势种蝗虫食性与蝗科中亚科分类系统关系的研究. *昆虫分类学报*, 17(S1): 128–134]
- Huang XB. 2018. Adaptive mechanisms of *Oedaleus asiaticus* Bey-Bienko (Orthoptera: Acrididae) to food plants. PhD thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences (in Chinese) [黄训兵. 2018. 亚洲小车蝗食物适应机制研究. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院]
- Huang XB, Zhang Y, Cao GC, Tu XB, Wu LN, Zhu MM. 2013. Effect on growth and fecundity in *Calliptamus italicus* by *Medicago sativa* and *Artemisia frigida* Willd. sp. Pl. *Journal of Environmental Entomology*, 35(5): 617–622 (in Chinese) [黄训兵, 张洋, 曹广春, 涂雄兵, 吴乐年, 朱猛蒙. 2013. 冷蒿和苜蓿对意大利蝗生长及生殖力的影响. *环境昆虫学报*, 35(5): 617–622]
- Human H, Nicolson SW, Strauss K, Pirk CWW, Dietemann V. 2007. Influence of pollen quality on ovarian development in honeybee workers (*Apis mellifera scutellata*). *Journal of Insect Physiology*, 53(7): 649–655
- Joern A, Behmer ST. 1997. Importance of dietary nitrogen and carbohydrates to survival, growth, and reproduction in adults of the grasshopper *Ageneotettix deorum* (Orthoptera: Acrididae). *Oecologia*, 112(2): 201–208
- Letourneau DK, Fox LR. 1989. Effects of experimental design and nitrogen on cabbage butterfly oviposition. *Oecologia*, 80(2): 211–214
- Liu Q. 2017. Ecological characteristic difference in adjacent area in the Sino-Kazakh border and *Calliptamus italicus* flight ability. Master thesis. Urumqi: Xinjiang Normal University (in Chinese) [刘琼. 2017. 中哈边境毗邻邻区生态特征差异及意大利蝗飞行能力研究. 硕士学位论文. 乌鲁木齐: 新疆师范大学]
- Luo YQ. 2023. Changes in functional traits of grassland plants and their effects on the rate of soil carbon mineralization. Master thesis. Hohhot: Inner Mongolia University (in Chinese) [罗雅琴. 2023. 草原植物功能性状变化及其对土壤碳矿化速率的影响. 硕士学位论文. 呼和浩特: 内蒙古大学]
- Mattson WJ Jr. 1980. Herbivory in relation to plant nitrogen content. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 11: 119–161
- Nessel MP, Konnovitch T, Romero GQ, González AL. 2021. Nitrogen and phosphorus enrichment cause declines in invertebrate populations: a global meta-analysis. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 96(6): 2617–2637
- Nevo E, Coll M. 2001. Effect of nitrogen fertilization on *Aphis gossypii* (Homoptera: Aphididae): variation in size, color, and reproduction. *Journal of Economic Entomology*, 94(1): 27–32
- Nijssen ME, WallisDeVries MF, Siepel H. 2017. Pathways for the effects of increased nitrogen deposition on fauna. *Biological Conservation*, 212: 423–431
- Niu YJ, Ma QH, Zhu Y, Liu HR, Lü J, Zou YC, Jiang M. 2023. Research progress on the impact of nitrogen deposition on grassland insect diversity. *Biodiversity Science*, 31(9): 147–158 (in Chinese) [牛永杰, 马全会, 朱玉, 刘海荣, 吕佳乐, 邹元春, 姜明. 2023. 氮沉降对草地昆虫多样性影响的研究进展. *生物多样性*, 31(9): 147–158]
- Qi YC, Cui QR, Zhou BG, Gao ZL. 2016. Effects of different winter-planning green manures on yield and quality of flue-cured tobacco in South Anhui tobacco areas. *Chinese Tobacco Science*, 37(6): 32–36 (in Chinese) [齐耀程, 崔权仁, 周本国, 高正良. 2016. 不同冬种绿肥对皖南烟区烤烟产质量的影响. *中国烟草科学*, 37(6): 32–36]
- Ren JL, Zhao L, Ge J. 2014. Ovarian development in *Calliptamus italicus* (L.) (Orthoptera: Catantopidae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(5): 1280–1288 (in Chinese) [任金龙, 赵莉, 葛婧. 2014. 意大利蝗 *Calliptamus italicus* (L.) 卵巢发育的研究. *应用昆虫学报*, 51(5): 1280–1288]
- Shi CG, Xi XQ, Lei YB, Zhou S, Dao LG, Zhang HX, Liu F. 2017. Effects of warming and nitrogen deposition on the growth and development of *Gynaephora ruoergensis* on the Tibetan Plateau. *Journal of Grassland and Forage Science*, (6): 27–33 (in Chinese) [史长光, 习新强, 类延宝, 周俗, 道里刚, 张洪轩, 刘芳. 2017. 模拟增温与氮沉降对草原毛虫生长发育特征的影响. *草学*, (6): 27–33]
- Southwood TRE. 1973. The insect/plant relationship: an evolutionary perspective. *Symposia of the Royal Entomological Society of London*, (6): 3–30
- Trisnawati DW, Tsukamoto T, Yasuda H. 2015. Indirect effects of nutrients in organic and conventional paddy field soils on the rice grasshopper, *Oxya japonica* (Orthoptera: Acrididae), mediated by rice plant nutrients. *Applied Entomology and Zoology*, 50(1): 99–107
- van Huis A, Woldewahid G, Toleubayev K, van Der Werf W. 2008. Relationships between food quality and fitness in the desert locust, *Schistocerca gregaria*, and its distribution over habitats on the Red Sea coastal plain of Sudan. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 127(2): 144–156
- 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 (in Chinese)

- [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 H, He XQ, Ji R. 2010. Selection mechanisms of *Calliptamus italicus* on four different host plants. Chinese Journal of Ecology, 29(12): 2401-2407 (in Chinese) [王晗, 何雪青, 季荣. 2010. 意大利蝗对四种寄主植物的选择机制. 生态学杂志, 29(12): 2401-2407]
- Wang YH, Wang XH, Liu XW, Liu H, Chen FJ. 2022. Effects of elevated CO₂ on the nutrients and insect-resistant substances of rice and the cascading effects on the growth, development and reproduction of the brown planthopper *Nilaparvata lugens*. Journal of Plant Protection, 49(3): 767-774 (in Chinese) [王艳辉, 王晓辉, 刘晓微, 刘辉, 陈法军. 2022. 大气CO₂浓度升高条件下水稻营养成分和抗虫物质的变化及其对褐飞虱生长发育与繁殖的影响. 植物保护学报, 49(3): 767-774]
- Xin M, Du XG, Zhu XQ. 2010. Influence of variable nitrogen fertilization on growth and development of aphid *Aphis gossypii*. Journal of Plant Protection, 37(5): 408-412 (in Chinese) [辛苗, 杜相革, 朱晓清. 2010. 不同氮水平对黄瓜蚜虫生长发育的影响. 植物保护学报, 37(5): 408-412]
- Xu RB. 2023. Seasonal characteristics of migratory biology in oriental armworm, *Mythimna separata* Walker. PhD thesis. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University (in Chinese) [徐瑞斌. 2023. 东方黏虫 *Mythimna separata* 迁飞生物学的季节性特征. 博士学位论文. 福州: 福建农林大学]
- Xue ZP, Zhang Q, Shali Y, Wang GJ, Yimamu A, Xiao HW. 2010. Food selection of *Calliptamus italicus* and loss assessment for the grassland. Plant Protection, 36(1): 95-98 (in Chinese) [薛智平, 张泉, 牙森·沙力, 王广君, 阿不都外力·伊玛木, 肖宏伟. 2010. 意大利蝗取食特性及损失估计研究. 植物保护, 36(1): 95-98]
- Yuan X. 2010. Studies on differentiation comparison of different geographical populations in *Chrysomya megacephala* (Fabricius). Master thesis. Wuhan: Huazhong Agricultural University (in Chinese) [袁曦. 2010. 大头金蝇不同地理种群差异比较研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学]
- Zhang WN. 2013. The ovarian development and the expression changes of vitellogenin gene of *Helicoverpa armigera* resistance to Cry1Ac. Master thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences (in Chinese) [张万娜. 2013. 抗Cry1Ac棉铃虫的卵巢发育与卵黄原蛋白基因的表达动态. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院]
- Zhang YZ, Ge GF, Wang RF, Hao SG. 2014. Effect of nitrogen content in *Leymus chinensis* and *Stippa capillata* on feeding choice of *Oedaleus asiaticus*. Journal of Anhui Agricultural University, 41(1): 76-81 (in Chinese) [张寅至, 葛高飞, 王荣富, 郝树广. 2014. 羊草与克氏针茅氮元素含量对亚洲小车蝗取食选择的影响. 安徽农业大学学报, 41(1): 76-81]
- Zhu Y, Ma QH, Zhong ZW, Jiang M, Bakker ES, Harvey JA, Ciska Vein GF, Chen C, Wang DL. 2023. Contrasting effects of nitrogen fertiliser application on the performance of closely related grasshoppers through changes in plant nutrient concentrations. Ecological Entomology, 48(3): 347-357
- Zhu Y, Zhong ZW, Pagès JF, Finke D, Wang DL, Ma QH, Hassan N, Zhu H, Wang L. 2019. Negative effects of vertebrate on invertebrate herbivores mediated by enhanced plant nitrogen content. Journal of Ecology, 107(2): 901-912

(责任编辑: 张俊芳)