

模拟气候变暖对不同纬度带麦长管蚜和禾谷缢管蚜种群动态的影响

韩宗礼 谭晓玲 范佳 孙京瑞 陈巨莲*

(中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193)

摘要:为明确气候变暖对不同纬度带麦田麦长管蚜 *Sitobion avenae* 和禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi* 种群动态的影响, 在高纬度的河北省廊坊市(39°30'N, 116°36'E)和相对低纬度的河南省原阳县(34°55'N, 114°15'E)开展红外线辐射增温试验, 调查廊坊市(+2.00℃)和原阳县(+1.18℃)2个试验点的增温处理小区和对照小区麦长管蚜和禾谷缢管蚜的种群动态, 并计算其盛期发生比值。结果表明, 增温使廊坊市试验点的麦长管蚜始见期、峰期分别提前21、7 d, 使原阳县试验点的麦长管蚜始见期、峰期分别提前14、14 d; 而禾谷缢管蚜的始见期和峰期仅在原阳县试验点提前31 d和7 d。增温使廊坊市试验点的麦长管蚜盛期蚜量、峰期蚜量分别显著增加了139.21%和77.83%, 禾谷缢管蚜盛期蚜量和峰期蚜量分别显著增加了157.31%和130.16%; 增温使原阳县试验点的麦长管蚜盛期蚜量、峰期蚜量分别显著增加了149.62%和176.52%, 禾谷缢管蚜/麦长管蚜的盛期蚜量比值显著降低了43.21%。表明增温有利于高纬度地区(廊坊市)麦长管蚜和禾谷缢管蚜种群增长, 而在低纬度地区(原阳县)仅有利于麦长管蚜种群增长。

关键词: 气候变暖; 麦长管蚜; 禾谷缢管蚜; 发生期; 种群动态

Impact of simulated warming on the population dynamics of grain aphid *Sitobion avenae* and bird cherry-oat aphid *Rhopalosiphum padi* across latitudes

Han Zongli Tan Xiaoling Fan Jia Sun Jingrui Chen Julian*

(State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: In order to understand the impact of global warming on the population dynamics of the wheat aphids, *Sitobion avenae* and *Rhopalosiphum padi*, in wheat fields across different latitudes, the field experiments of temperature-elevation (Te) with infrared radiator heating device were conducted at two latitudes: Langfang City (39°30'N, 116°36'E), Hebei Province and Yuanyang County (34°55'N, 114°15'E), Henan Province. The population dynamics of *S. avenae* and *R. padi* were investigated in the two tested areas with Te treatment (+2.00℃) and control in Langfang, and Te treatment (+1.18℃) and control in Yuanyang, and the ratio value of two aphid populations was calculated during the peak stage. The results showed that, for *S. avenae*, warming advanced the initial appearance and peak period by 21 d, 7 d in Langfang, and 14 d, 14 d in Yuanyang, respectively, but for *R. padi*, the advancement (by 31 d, 7 d) only occurred in Yuanyang. Warming significantly increased the abundance of *S. avenae* at peak stage and the peak values were increased by 139.21%, 77.83% in Langfang and 149.62%, 176.52% in Yuanyang, respectively; *R. padi* increased by 157.31%, 130.16% only in Langfang, but the ratio value of *R.*

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD03007), 政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0131000)

* 通信作者 (Author for correspondence), E-mail: jlchen@ippcaas.cn

收稿日期: 2017-03-31

padi to *S. avenae* was significantly decreased by 43.21% in Yuanyang. The results indicated that warming benefited both aphid populations at the relative higher latitude like Langfang, but only benefited *S. avenae* population at the relative lower latitude like Yuanyang.

Key words: global warming; *Sitobion avenae*; *Rhopalosiphum padi*; occurrence period; population dynamic

由于温室气体的排放以及人类活动的影响,全球气候不断变暖。据IPCC(2013)预测,至21世纪末全球平均气温将升高2~6℃。由于城市化进程及工业发展造成CO₂等温室气体浓度持续升高,我国从1980年以来,每10年最高温度和最低温度平均升高0.352℃和0.548℃(Zhou et al., 2004)。全球变暖不但会对自然物候条件造成显著影响,同时也会直接影响生态系统,特别是对农业生态系统的稳定性与群落动态结构特征造成影响,从而导致害虫非预测性暴发等潜在问题(Lin et al., 2010; 张花龙等, 2015)。近年来,气候变暖对昆虫种群动态和生命参数等的影响已成为领域内的研究热点。

麦蚜是我国乃至世界范围内小麦上的重要害虫(Blackman & Eastop, 2000),不仅可以直接取食为害小麦,还可以作为麦类作物病毒病的重要介体导致小麦病毒病流行。我国常见麦蚜种类有麦长管蚜 *Sitobion avenae*、禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi*、麦二叉蚜 *Schizaphis graminum* 和麦无网长管蚜 *Metopolophium dirhodum* 四种;在黄淮海麦区以麦长管蚜、禾谷缢管蚜为优势种。麦蚜为变温昆虫,个体小,繁殖周期短,发生量大,极易受到温度变化的影响(陈巨莲, 2014; Zhao et al., 2014)。国内外研究气候变暖对昆虫的影响主要通过对历史资料的分析及增温试验等方法完成(陈瑜和马春森, 2010),而温度升高对蚜虫影响的研究主要集中在室内(人工气候箱)。如通过室内人工设定的温度梯度研究了麦长管蚜、禾谷缢管蚜和麦二叉蚜在小麦上栖息、爬行和取食的躲避临界高温,发现3种蚜虫中禾谷缢管蚜较耐高温(马罡和马春森, 2007);许乐园等(2014)采用生命表法研究了温度变化对麦蚜的龄期、内禀增长率、净增殖率等生命参数的影响。气候变暖不仅可以直接影响昆虫的生命参数,还可以影响昆虫种间关系,如冯丽凯等(2015)通过室内不同恒温条件下棉蚜、棉长管蚜种间关系的影响研究发现,在适温范围内,棉蚜比棉长管蚜具有更强的内在竞争能力,温度对棉长管蚜上下位置关系的选择有一定作用,种间竞争会加速棉蚜有翅蚜的发生。目前,自然条件下的增温试验越来越受到关注,如 Dong et al.

(2013)在田间红外辐射增温条件下的研究发现,增温处理能显著增加麦长管蚜盛期蚜量,而降低了禾谷缢管蚜蚜量;Ma et al. (2015)利用开顶箱在田间实施增温处理,发现麦长管蚜和禾谷缢管蚜对升温的响应不同,在较高的极端温度频率下,禾谷缢管蚜数量显著增加而麦长管蚜数量无显著变化。

在不同地理区域物候条件下,气候变暖对同种农业生态系统寄主作物与关关节肢动物群落的影响存在差异。虽然不同区域间由于纬度梯度差异导致的温差可以用来研究群落对气候变暖的响应(de Frenne et al., 2013),但是这种方法往往需要综合考虑不同纬度梯度的生境相似度以及对各种因素的控制(Baldwin et al., 2014)。结合不同地理区域调查与田间增温模拟气候变暖试验研究已得到一些结果,如以一种杂草与其天敌昆虫为研究对象,发现气候变暖通过偏移植物与植食者互作关系,从而影响生物入侵(Lu et al., 2013)。然而田间增温模拟气候变暖对不同地理区域麦田系统中麦长管蚜和禾谷缢管蚜种群动态的影响鲜有报道。因此,本研究选择我国冬小麦主产区河南省原阳县和河北省廊坊市2个试验点,在麦田自然环境下利用红外辐射装置增温模拟气候变暖,系统调查试验点麦蚜优势种麦长管蚜和禾谷缢管蚜的种群消长动态以及二者对气候变暖响应的异同,探究气候变暖对麦蚜不同优势种之间生态作用的差异,以期针对麦蚜不同优势种演变的测报及防控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试样地:试验在位于河北省廊坊市的中国农业科学院植物保护研究所廊坊试验基地(39°30'N, 116°36'E)及位于河南省原阳县的河南省农业科学院现代农业科技试验示范基地(34°55'N, 114°15'E)同步开展。廊坊市气候属暖温带大陆性季风气候,年平均气温为11.9℃,年平均降水量为554.9 mm,年平均日照时数约2 660 h;原阳县气候属大陆性暖温带季风型气候,年平均气温为14.4℃,年平均降水量为549.9 mm,年平均日照时数约2 400 h(<http://>

www.cma.gov.cn/。

供试植物:小麦品种为衡观35,由河北农业科学院旱作农业研究所提供,是适应范围最广、南北跨区最大的抗旱节水高产品种。

仪器:MSR-2420红外辐射灯,美国伯利恒 Kalglo 电子公司;JL-17室外空气温湿度记录仪,河南清胜电子有限公司。

1.2 方法

在廊坊市和原阳县两地选定试验区域内长29 m、宽21 m的地块开展田间增温试验(图1)。采用随机重复设计,共12小区,包括6个增温小区,6个对照小区,每个小区2 m×2 m,增温小区与对照小区相间分布,小区与小区之间的间隔大于5 m。在每个处理小区上方1.8 m处悬挂1个165 cm×15 cm红外辐射灯,对照为同规格不带灯芯,有效控制面积为4 m²,处理与对照之间相隔5 m,不同处理之间不会产生影响。增温时间从2015年12月初至2016年6月初,24 h持续增温。处理小区和对照小区各安置一套室外空气温湿度记录仪,记录小区地上80 cm

处的空气温度和空气相对湿度。

小区内调查采用Z字型5点系统取样,调查记录麦长管蚜和禾谷缢管蚜发生量,每点调查10株小麦,共50株。计算小麦扬花-灌浆期麦长管蚜以及禾谷缢管蚜平均发生量,以及期间禾谷缢管蚜/麦长管蚜的蚜量比值,该比值代表了禾谷缢管蚜的相对发生量。在廊坊市的调查时间为2016年3月18日至6月3日,每6 d调查1次,共13次;在原阳县的调查时间为2016年3月16日至5月22日,每7 d调查1次,共10次。

1.3 数据分析

采用统计软件SAS 9.4对2015年12月—2016年6月初的增温区与对照区温度进行 t 测验;对廊坊市和原阳县试验点增温区与对照区麦长管蚜和禾谷缢管蚜的盛期(小麦扬花-灌浆期)平均蚜量以及相同处理下禾谷缢管蚜与麦长管蚜比值进行 t 测验;禾谷缢管蚜和麦长管蚜的盛期蚜量进行 $\log_{10}(x+1)$ 的对数转换,其比值以反正弦平方根进行数据转换,使其符合正态分布。

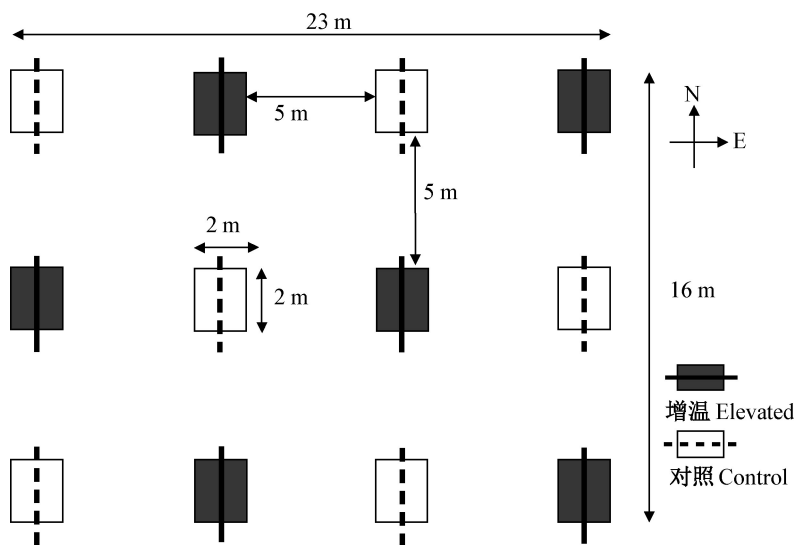


图1 高纬度地区廊坊市和低纬度地区原阳县试验点田间增温试验设计平面图

Fig. 1 Layout of wheat field experiments with infrared radiator heating device at Langfang and Yuanyang experimental stations

2 结果与分析

2.1 增温对麦田试验小区微环境的影响

2015年12月—2016年6月初,廊坊市试验点增温小区平均气温(9.20℃)较对照小区(7.20℃)显著升高2.00℃($t_{3.971.8}=6.04, P<0.01$),而空气相对湿度(52.34%)较对照小区(59.24%)降低11.65%;原阳县试验点增温小区平均气温(10.08℃)较对照小区(8.90℃)显著升高1.18℃($t_{4.294.5}=4.10, P<0.01$),而空

气相对湿度(61.89%)较对照小区(67.32%)降低8.07%(图2)。

2.2 增温对田间麦蚜种群动态的影响

在廊坊市试验点,增温小区中麦长管蚜的始见期为3月18日,比对照小区(4月11日)提前约21 d;峰期为5月13日,比对照小区(5月20日)提前7 d(图3-a);增温小区禾谷缢管蚜的始见期和峰期与对照小区相同(图3-b);增温小区麦长管蚜的峰期较禾谷缢管蚜提前7 d,而对照小区2种麦蚜峰期为

同一天(图 3-a~b)。在原阳市试验点,增温小区中麦长管蚜的始见期为3月16日,比对照小区(3月30日)提前约 14 d,峰期为4月17日,比对照小区(5月1日)提前约 14 d(图 3-c);增温小区禾谷缢管蚜的

始见期(3月16日)比对照小区(4月17日)提前约 31 d,峰期为5月1日,比对照小区(5月8日)提前约 7 d(图 3-d);增温使麦长管蚜的峰期比禾谷缢管蚜早 14 d,而对照小区仅提前 7 d(图 3-c~d)。

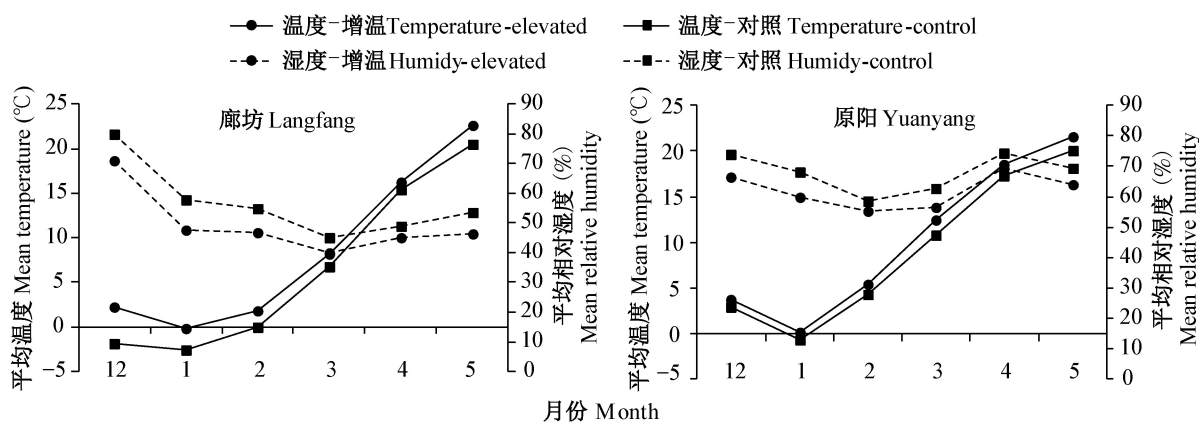


图 2 高纬度地区廊坊市和低纬度地区原阳县试验点增温小区与对照小区的温湿度动态图

Fig. 2 Dynamics of mean temperature and average relative humidity at Langfang and Yuanyang experimental stations

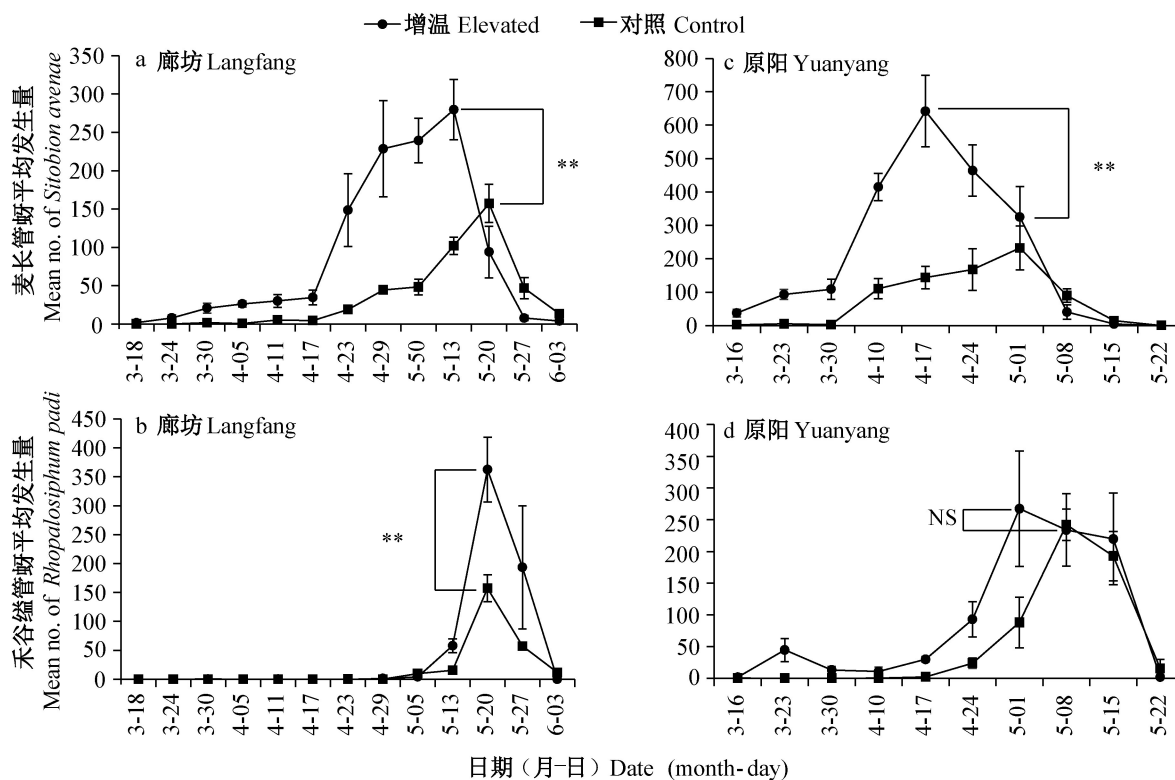


图 3 增温对高纬度地区廊坊市和低纬度地区原阳市试验点麦长管蚜和禾谷缢管蚜种群动态的影响

Fig. 3 Population dynamics of wheat aphids at Langfang and Yuanyang experimental stations

图中数据为平均数 $\pm$ 标准误。**表示增温小区与对照小区峰期蚜量经 t 测验法检验在 $P<0.01$ 水平差异显著, NS 表示无显著差异。Data are mean $\pm$ SE. ** indicates significant difference of summit aphid between elevated and control plots at $P<0.01$ level by t test, NS indicates no significant difference.

2.3 增温对田间麦蚜发生量的影响

在廊坊市试验点,增温小区中麦长管蚜盛期平

均蚜量和峰期蚜量分别显著增加了 139.21% ($t_{10}=4.39$, $P<0.01$) 和 77.83% ($t_{10}=2.96$, $P=0.01$) (图 3-a, 图 4-a),

禾谷缢管蚜盛期平均蚜量和峰期蚜量分别显著增加了157.31%($t_{10}=4.23, P<0.01$)和130.16%($t_{10}=3.47, P=0.01$)(图3-b,图4-a)。在原阳县试验点,增温小区中麦长管蚜盛期平均蚜量和峰期蚜量分别显著增加

了149.62%($t_{10}=4.66, P<0.01$)和176.52%($t_{10}=2.95, P=0.01$)(图3-c,图4-b),而增温对禾谷缢管蚜的盛期平均蚜量和峰期蚜量均无显著影响($t_{10}=1.74, P=0.11; t_{10}=0.20, P=0.84$)(图3-d,图4-b)。

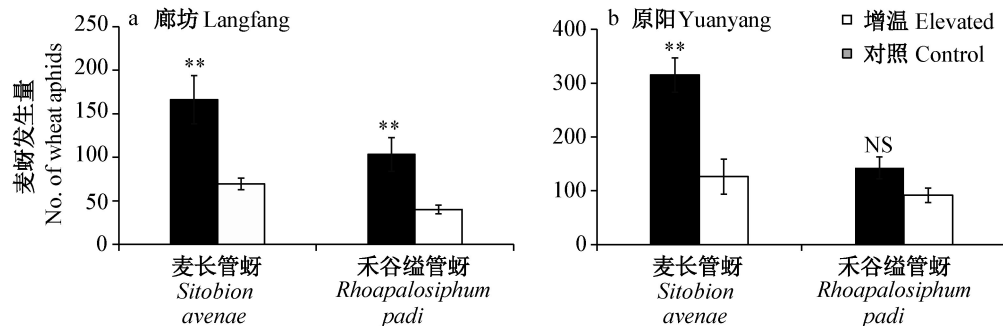


图4 增温对高纬度地区廊坊市和低纬度地区原阳县试验点麦长管蚜和禾谷缢管蚜盛期平均蚜量的影响

Fig. 4 Effects of warming on mean no. of *Sitobion avenae* and *Rhopalosiphum padi* at Langfang and Yuanyang experimental stations
图中数据为平均数±标准误。**表示增温小区与对照小区峰期蚜量经 t 测验法检验在 $P<0.01$ 水平差异显著,NS表示无显著差异。Data are mean±SE. ** indicates significant difference of summit aphid between elevated and control plots at $P<0.01$ level by t test, NS indicates no significant difference.

2.4 增温对2种麦蚜种群数量比值的影响

高纬度(廊坊市)试验点的增温小区中禾谷缢管蚜和麦长管蚜盛期蚜量比值(0.59)与对照小区(0.62)相比无显著差异($t_4=-0.31, P=0.77$)。低纬度(原阳县)试验点增温显著降低了禾谷缢管蚜/麦长管蚜盛期蚜量比值($t_4=-4.02, P=0.02$),增温小区中为0.46,而对照小区中为0.81,降低了43.21%(图5)。

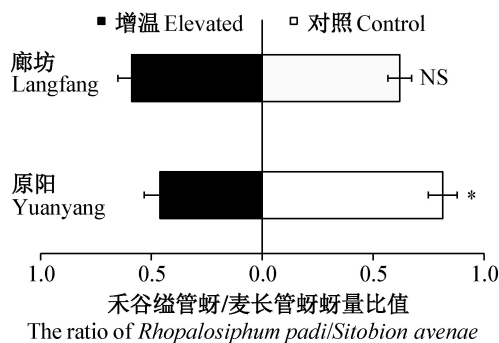


图5 增温对高纬度地区廊坊市和低纬度地区原阳市试验点禾谷缢管蚜和麦长管蚜盛期蚜量比值的影响

Fig. 5 The impacts of elevated temperature on the ratios of *Rhopalosiphum padi*/*Sitobion avenae* at Langfang and Yuanyang experimental stations

图中数据为平均数±标准误。**表示增温小区与对照小区峰期蚜量经 t 测验法检验在 $P<0.01$ 水平差异显著,NS表示无显著差异。Data are mean±SE. ** indicates significant difference of summit aphid between elevated and control plots at $P<0.01$ level by t test, NS indicates no significant difference.

3 讨论

在麦田生态系统中,麦蚜种群动态受田间小气候、天敌、寄主作物栽培管理等多种因素的交互作用以及蚜虫自身生物学特性的影响(Chongrattanameetee et al., 1991; 胡冠芳等, 1994),但温度对不同纬度带田间麦长管蚜和禾谷缢管蚜消长动态的影响尚未见报道。本研究针对我国河南省和河北省冬小麦种植区,通过自然条件下设置跨区域田间红外辐射增温设施,人为增温模拟气候变暖,初步揭示了温度升高对麦田群落中麦长管蚜、禾谷缢管蚜种群动态及消长趋势的影响。

气候变暖可以增加作物生长季节的有效积温,从而导致麦蚜的始见期、迁飞期、盛期、峰期等关键物候发生期提前(Zhou et al., 2010; 马春森等, 2014)。在本研究中,增温处理下河南省原阳市2种麦蚜的始见期和峰期均提前,而在廊坊市仅麦长管蚜的发生期提前,并且增温处理使原阳县和廊坊市2种蚜虫发生峰值的错峰期延长,说明不同纬度带麦长管蚜和禾谷缢管蚜的发生期对增温的响应不同。增温使麦长管蚜发生盛期提前,有利于发生盛期相对滞后的禾谷缢管蚜的发生,尤其是在高纬度地区,这也在一定程度上解释了禾谷缢管蚜生态位不断上升的现象(王冬燕等, 2006)。

麦长管蚜和禾谷缢管蚜在小麦植株上的取食部

位不同,麦长管蚜喜食麦穗和上部的叶片,而禾谷缢管蚜喜食茎部和下部的叶片(Watt, 1979; Qureshi & Michaud, 2005)。尽管麦长管蚜和禾谷缢管蚜的生态位有所不同,但一些研究表明这2种蚜虫同样存在种间竞争,如温度升高可使小麦提前抽穗,有利于麦长管蚜的生长繁殖,从而降低禾谷缢管蚜的种群密度(Dong et al., 2013);当麦长管蚜和禾谷缢管蚜共存时,二者的繁殖力均明显下降,而禾谷缢管蚜的种群增长率高于麦长管蚜(Gianoli, 2000)。温度升高可以提高麦蚜的越冬存活率,使春、夏季的虫口密度增加,如陇南地区麦蚜的发生程度与冬春偏暖有关;冬春偏暖,小麦蚜虫的虫口基数增加,促使盛期发生量更大(肖志强等, 2009; Brabec et al., 2014)。本试验中,增温显著增加了2个试验点麦长管蚜盛期蚜量以及峰期蚜量,而禾谷缢管蚜盛期和峰期的蚜量仅在廊坊市增加,在原阳县无显著变化。同时,在廊坊市试验点,增温小区中禾谷缢管蚜/麦长管蚜的盛期蚜量比值与对照小区无明显差异,而在原阳市试验点,2种蚜虫的盛期蚜量比值显著低于对照小区。推测原因可能是在原阳县试验点,增温使得小麦扬花-灌浆期温度达到麦长管蚜适宜生长温度,从而显著增加其盛期发生量,挤占小麦穗茎及穗部禾谷缢管蚜的适宜生态位,导致后者的相对发生量降低。而在廊坊市试验点,即纬度相对高的麦区,增温热补偿效益显著增加了麦长管蚜的种群密度,但盛期蚜量基数较少,对禾谷缢管蚜的抑制作用相对较小,促使禾谷缢管蚜的密度在增温区显著增加。

田间麦蚜的发生量增加可吸引天敌昆虫,从而有效调控麦蚜的发生量(Vet & Dick, 1992)。但有研究表明,温度升高时天敌对害虫的防控作用减弱,从而加重害虫为害(张花龙等, 2015)。本试验结果同样表明,温度升高时麦蚜发生为害加重,其原因也有可能是田间红外线加温削弱了天敌昆虫对麦蚜群落的控制能力。而且与之关联的食物网作用因子(天敌群落)对蚜虫的控制作用机制并未进行相应研究。因此,亟待开展田间增温对冬小麦生态系统内三营养级互作关系的研究,系统揭示气候变暖对麦蚜的生态作用机制,对提高麦蚜预测预报水平并制订有效防控策略具有重要意义。

参 考 文 献 (References)

- Baldwin AH, Jensen K, Schönfeldt M. 2014. Warming increases plant biomass and reduces diversity across continents, latitudes, and species migration scenarios in experimental wetland communities. *Global Change Biology*, 20(3): 835–850
- Blackman R, Eastop VF. 2000. *Aphids on the world's crops: an identification and information guide* (2nd edition). Hoboken: John Wiley & Sons
- Brabec M, Honěk A, Pekár S, Martinková Z. 2014. Population dynamics of aphids on cereals: digging in the time-series data to reveal population regulation caused by temperature. *PLoS ONE*, 9(9): e106228
- Chen JL. 2014. *Wheat aphids and control*. Beijing: Jindun Publishing House, pp. 13, 42 (in Chinese) [陈巨莲. 2014. 小麦蚜虫及其防治. 北京: 金盾出版社, pp. 13, 42]
- Chen Y, Ma CS. 2010. Effect of global warming on insect: a literature review. *Acta Ecologica Sinica*, 30(8): 2157–2172 (in Chinese) [陈瑜, 马春森. 2010. 气候变暖对昆虫影响的研究进展. 生态学报, 30(8): 2157–2172]
- Chongrattanameteekul W, Foster JE, Araya JE. 1991. Biological interactions between the cereal aphids *Rhopalosiphum padi* (L.) and *Sitobion avenae* (F.) (Horn., Aphididae) on wheat. *Journal of Applied Entomology*, 111(1/5): 249–253
- de Frenne P, Graae B, Rodríguez-Sánchez F, Kolb A, Chabrerie O, Decocq G, de Kort H, de Schrijver A, Diekmann M, Eriksson O, et al. 2013. Latitudinal gradients as natural laboratories to infer species' responses to temperature. *Journal of Ecology*, 101(3): 784–795
- Dong ZK, Hou RX, Ouyang Z, Zhang RZ. 2013. Tritrophic interaction influenced by warming and tillage: a field study on winter wheat, aphids and parasitoids. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 181(4): 144–148
- Feng LK, Gao GZ, Lü ZZ, Jia HM, Wang PL. 2015. Interspecific competition between *Aphis gossypii* Glover and *Acyrtosiphon gossypii* Mordvilko at different temperatures. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 52(3): 557–565 (in Chinese) [冯丽凯, 高桂珍, 吕昭智, 贾慧敏, 王佩玲. 2015. 不同温度条件对棉蚜、棉长管蚜种间竞争关系的影响. 应用昆虫学报, 52(3): 557–565]
- Gianoli E. 2000. Competition in cereal aphids (Homoptera: Aphididae) on wheat plants. *Environmental Entomology*, 29(2): 213–219
- Hu GF, Zhang XR, Zhu FC, Wang KL. 1994. Differences between parameters of the experimental populations of *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus) and *Macrosiphum avenae* (Fabricius). *Journal of Gansu Agricultural University*, 30(4): 380–385 (in Chinese) [胡冠芳, 张新瑞, 朱福成, 王克兰. 1994. 禾谷缢管蚜和麦长管蚜实验种群参数的差异. 甘肃农业大学学报, 30(4): 380–385]
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. *Climate change in 2013: the physical science basis*. Cambridge & New York: Cambridge University Press
- Lin D, Xia J, Wan S. 2010. Climate warming and biomass accumulation of terrestrial plants: a meta-analysis. *New Phytologist*, 188(1): 187–198
- Lu XM, Siemann E, Shao X, Wei H, Ding JQ. 2013. Climate warming affects biological invasion by shifting interaction of plants and

- herbivores. *Global Change Biology*, 19(8): 2339–2347
- Ma CS, Ma G, Zhao F. 2014. Impact of global warming on cereal aphids. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(6): 1435–1443 (in Chinese) [马春森, 马罡, 赵飞. 2014. 气候变暖对麦蚜的影响, 应用昆虫学报, 51(6): 1435–1443]
- Ma G, Ma CS. 2007. Upper critical temperatures for behaviors of three species of cereal aphids in leaf temperature gradients. *Acta Ecologica Sinica*, 27(6): 2449–2459 (in Chinese) [马罡, 马春森. 2007. 三种麦蚜在温度梯度中活动行为的临界高温. 生态学报, 27(6): 2449–2459]
- Ma G, Rudolf VH, Ma CS. 2015. Extreme temperature events alter demographic rates, relative fitness, and community structure. *Global Change Biology*, 21(5): 1794–1808
- Qureshi JA, Michaud JP. 2005. Comparative biology of three cereal aphids on tam 107 wheat. *Environmental Entomology*, 34(1): 27–36
- Vet LEM, Dicke M. 1992. Ecology of infochemical use by natural enemies in a tritrophic context. *Annual Review of Entomology*, 37(1): 141–172
- Wang DY, Shen XW, Guo XR, Yang WL, Liu H. 2006. Studies on the vertical distribution and niche of two aphid species in the late-mid period of wheat. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 35(10): 56–58 (in Chinese) [王冬燕, 申小卫, 郭线茹, 杨文玲, 刘欢. 2006. 小麦生长中后期2种麦蚜垂直分布及生态位的研究. 河南农业科学, 35(10): 56–58]
- Watt AD. 1979. The effect of cereal growth stages on the reproductive activity of *Sitobion avenae* and *Metopolophium dirhodum*. *Annals of Applied Biology*, 91(2): 147–157
- Xiao ZQ, Chen J, Fan M, Ma JX, Zhang R, Jin XL. 2009. Epidemic meteorologic conditions and degree prediction model of wheat aphids in Longnan mountainous area. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 37(33): 16419–16422 (in Chinese) [肖志强, 陈俊, 樊明, 马敬霞, 张蓉, 金小龙. 2009. 陇南山区小麦蚜虫发生气象条件及程度预测模型. 安徽农业科学, 37(33): 16419–16422]
- Xu LY, Mi Y, Lu H, Sun L, Chen ZZ, Yu JF, Xu YY. 2014. The age-stage life tables of *Sitobion avenae* (Fabricius) at different temperatures. *Journal of Plant Protection*, 41(6): 673–679 (in Chinese) [许乐园, 米勇, 卢虹, 孙蕾, 陈珍珍, 于金凤, 许永玉. 2014. 麦长管蚜在不同温度下的年龄-龄期生命表. 植物保护学报, 41(6): 673–679]
- Zhang HL, Yang NW, Li YZ, Wan FH. 2015. Impacts of global warming on agricultural pests and its natural enemies. *Plant Protection*, 41(2): 5–15 (in Chinese) [张花龙, 杨念婉, 李有志, 万方浩. 2015. 气候变暖对农业害虫及其天敌的影响. 植物保护, 41(2): 5–15]
- Zhao F, Zhang W, Hoffmann AA, Ma CS. 2014. Night warming on hot days produces novel impacts on development, survival and reproduction in a small arthropod. *Journal of Animal Ecology*, 83(4): 769–778
- Zhou L, Dickinson RE, Tian Y, Fang J, Li Q, Kaufmann RK, Tucker CJ, Myneni RB. 2004. Evidence for a significant urbanization effect on climate in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(26): 9540–9544
- Zhou XL, Harrington R, Woiwod IP, Perry JN, Bale JS, Clark SJ. 2010. Effects of temperature on aphid phenology. *Global Change Biology*, 1(4): 303–313

(责任编辑:李美娟)