抗虫和感虫大豆混播对产量及害虫种群发生和昆虫群落多样性影响*

沈方圆[1**] 张逸飞[1,2] 高凡淇[3] 肖子衿[1] 李立坤[1] 陈法军[1***]

（1. 南京农业大学植物保护学院昆虫系, 昆虫信息生态研究组，南京 210095；2. 广东省生物工程研究所（广州甘蔗糖业研究所），广东省甘蔗改良与生物炼制重点实验室，广州 510316；3. 南京农业大学农学院，南京 210095）

摘 要 **【目的】** 利用大豆高抗虫和高感虫品种混播，明确有效控害保产的最优比例，以实现大豆生产中有效的害虫生态防控和提高大豆产量。**【方法】** 本研究选取高抗（*Lamar*；R）和与高感（*JLNMH*；S）斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 的大豆品种，进行不同比例的种子混播种植（即 R、S 单作，90%R 和 10%S（9R1S）、80%R 和 20%S（8R2S）、70%R 和 30%S（7R3S）、50%R 和 50%S（5R5S）混播），探究对大豆产量和主要害虫种群发生及昆虫群落多样性的影响。**【结果】** 不同比例混播处理间斜纹夜蛾和筛豆龟蝽 *Megacopta cribraria* 的百株虫量无显著差异，但均显著低于 S 单作。混播处理 8R2S 和 9R1S 以及 R 单作下昆虫群落多样性指数（*H*）和均匀度指数（*E*）显著高于其他试验处理，而优势度指数（*C*）显著低于其他试验处理。此外，昆虫群落丰富度指数（*D*）随着高感虫大豆混播比例的增加而降低；其中，混播处理 8R2S 和 9R1S，以及 R 单作都显著高于 S 单作。对于大豆产量，混播处理显著影响大豆百株籽粒重，但对千粒重的影响不明显。其中，R 单作和 9R1S 混播方式下大豆百株籽粒重最高，且有随着高抗虫品种（R）混播比例的增加而提高的趋势。**【结论】** 高抗虫和高感虫品种混播可有效降低大豆主要害虫发生，且 R 混播比例≥80%能有效提高昆虫群落多样性、均匀度和丰富度，并对大豆产量提高有利。大豆生产中，建议采用 80%以上的高抗虫品种与高感虫品种混播以实现大豆控害保产的生态防控效果。

关键词 大豆；抗感虫品种混播；害虫种群动态；昆虫群落多样性；产量；控害保产

Effects of sowing mixed crops of resistant and susceptible cultivars of soybean on crop yield, the population dynamics of key insect pests and insect community diversity

SHEN Fang-Yuan[1**] ZHANG Yi-Fei[1,2] GAO Fan-Qi[3] XIAO Zi-Jin[1] LI Li-Kun[1] CHEN Fa-Jun[1***]

(1. Insect-information Ecology Laboratory, Department of Entomology, College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Sugarcane Improvement & Biorefinery, Guangdong Bioengineering Institute (Guangzhou Sugarcane Industry Research Institute, Guangzhou 510316, China; 3. College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract **[Objectives]** To identify the optimal ratio of resistant (R) and susceptible (S) soybean cultivars that should be sown to reduce insect pest numbers and maximize crop yield, thereby achieving the maximum possible soybean yield without pesticide use. **[Methods]** Different ratios of soybean varieties that were either resistant (cv. *Lamar*) or susceptible (cv. *JLNMH*) to *Spodoptera litura* were sown (R and S monocultures plus four mixed crops; 90% R and 10% S (9R1S), 80% R and 20% S (8R2S), 70% R and 30% S (7R3S), and 50% R and 50% S (5R5S)), to determine the effects of each seed ratio on soybean yield, the population dynamics of key insect pests (*S. litura* and *Megacopta cribraria*) and insect community diversity. **[Results]** There was no significant difference in the number of individual *S. litura* and *M. cribraria* per 100 plants among the

*资助项目 Supported projects：国家重点研发计划项目（2017YFD0200400）

**第一作者 First author，E-mail：2019802143@njau.edu.cn

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：fajunchen@njau.edu.cn

收稿日期 Received：2020-03-14；接受日期 Accepted：2020-06-10

different sowing treatments, but all treatments had significantly fewer of these species than the S monoculture. The insect community diversity index (*H*) and evenness index (*E*) of the 8R2S, 9R1S and R treatments were significantly higher than those of the other treatments, whereas the dominance index (*C*) of these three treatments were significantly lower than those of the other treatments. In addition, the insect community richness index (*D*) was lower when greater proportions of the sensitive cultivar were sown, and the richness index (*D)* of the 8R2S, 9R1S and R treatments was significantly higher than that of the S treatment. Sowing different cultivars significantly affected the dry weight of grain per 100 plants but there was no obvious effect on the 1000-grain dry weight. The R and 9R1S treatments had the highest grain dry weight per 100 plants, and this tended to increase with the proportion of resistant cultivar sown. **[Conclusion]** Sowing a mixture of resistant and susceptible cultivars can efficiently reduce the abundance of major soybean pests, and sowing ≥ 80% of the resistant variety significantly improves the diversity, evenness and richness of the insect community, and soybean yield. Consequently, we recommend sowing > 80% resistant soybean seed to control soybean pests and improve yield.

Key words soybean; seed-mixed sowing with resistant and susceptible cultivars; population dynamics of insect pests; insect community diversity; yield; control damage and protect production

大豆是我国重要的油料作物和粮食作物，在大豆生产中，害虫的猖獗为害严重影响大豆产量和品质（查霆等，2018）。目前，我国大豆食叶性害虫类群主要有斜纹夜蛾 *Spodoptera litura*、大造桥虫 *Ascotis selenaria*、豆卷叶螟 *Lamprosema indicata*、筛豆龟蝽 *Megacopta cribraria* 等（徐淑敏和刘新茹，2003）。

农业害虫防治过程中，人们曾一度依赖化学农药（Gao *et al.*，2018）。在认识到滥用农药所引起的农药残留（Residue）、害虫抗性（Resistance）和害虫再猖獗（Resurgence），即“3R”问题之后，提出了有害生物综合治理策略（Integrated pest management，IPM），指明了害虫可持续治理的发展方向（王运兵等，2000）。可持续农业（Sustainable agriculture）就是结合生态学理论，通过对农田生物多样性的保护和提高，从而达到长期的可持续控害的农业发展模式（高东和何霞红，2010）。大量研究表明，通过合理轮作、间套作、混作等多样化种植模式，可以改变大面积种植单一作物的局面，从而提高农田生态系统的生物多样性，有效控制害虫种群发生。如董振隆等（2013）研究表明，玉米间作花椒能降低植食性害虫的种类及种群发生量，提高天敌昆虫所占比例，进而提高群落多样性、丰富度、均匀性指数，并使害虫优势度更低。马克争（2004）研究表明，小麦与苜蓿间作较小麦单作田麦长管蚜 *Macrosiphum avenae* 的种群密度显著降低，小麦产量提高，田间烟蚜茧蜂与蚜虫数量比值（即蜂蚜比）提高。研究发现，相较于连作和单作，间作和轮作模式下当归中根结线虫 *Meloidogyne* sp.的密度降低，且轮作模式对根结线虫的控制效率最高（Xie *et al.*，2016）。韩宝瑜等（2001）研究表明，栗-茶间作、梨-茶间作、3 行密植的茶园较单行条植茶园的植食性昆虫种数占比降低，丰富度和多样性指数更高，生物群落更稳定。

目前已有大量研究证实，大豆与其他作物间作和轮作等种植模式能有效降低病虫害的发生（王玉正和岳跃海，1998；Chabi-Olaye *et al.*，2005；林克剑等，2006；Rao and Thakur，2009；韩岚岚等，2016）。但生产中大豆与其他作物间（套）作或复杂的景观布局等都会给机械耕种带来极大的不便，并增加耕作和收获用工成本，而利用丰富的大豆遗传多样性品种混播种植模式可极大地方便机械耕作，并同时提高田间大豆遗传多样性，进而有效控制病虫害发生（肖子衿，2019）。利用抗（感）虫品种混播种植开展控害保产的研究已应用于水稻上，如 Li 等（2018）研究得出，合理利用水稻品种多样性，开展高抗和高感虫品种水稻混播是一种控制靶标和非靶标害虫种群密度的简单可行的生态防控措施。关于大豆品种混播种植的研究，潘鹏亮（2016）通过 5 个大豆品种的混播试验初步证实，大豆品种混播相较于单播显著降低了小绿叶蝉的种群数量，提高了天敌昆虫草蛉和食蚜蝇的发生数量。

因此，本研究利用高抗和高感斜纹叶蛾的大豆品种进行不同比例组合混播种植，以研究不同大豆品种混播对其产量、害虫种群发生和昆虫群落多样性的影响，并明确最优的抗（感）虫品种大豆混播比例，为实现有效的大豆生态调控提供种植模式指导。

1　材料与方法

1.1　试验地点

试验地点为江浦实验农场，位于江苏省南京市浦口区江浦街道南门外，北纬 32°01′-32°03′、东经 118°36′-118°38′。该实验农场位于长江边，水资源丰富，土壤肥力好。

1.2　供试大豆

本试验选用高抗斜纹夜蛾的大豆品种 *Lamar*（High resistance，R）和高感虫品种监利牛毛黄 *JLNMH*（High susceptibility，S）（王慧，2011；Xing *et al.*，2017）。

1.3　种植模式

2 种抗性大豆（高抗-R：*Lamar*；高感-S：*JLNMH*）按照单一品种种植（即 100%R 和 100%S）和 6 种不同比例混播种植。混播种植模式比例为 90%R 和 10%S（9R1S）、80%R 和 20%S（8R2S）、70%R 和 30%S（7R3S）、50%R 和 50%S（5R5S）。每种种植模式分别设置 3 个小区重复，每个小区面积为 1.8 m×2.0 m（长×宽），各小区长边之间设置 0.5 m 隔离带，短边之间设置 1 m 隔离带（试验设置布局见图 1）。大豆于 2017 年 7 月 5 日播种，每 667 m^2 施以 40 kg 氮磷钾复合肥（N-P_2O_5-K_2O，16%-5%-24%，北金正大肥业有限公司），大豆行距为 0.5 m、株距为 0.15 m，在大豆生长期，采取相同的管理措施，如浇水、除草等，不使用肥料及化学药剂。

1.4　调查方法

于大豆开花后，从 8 月 17 日开始，每隔 5 d 进行田间调查，调查方式为每小区每行随机选取 1 株大豆（每小区共 3 株、每个种植模式各 3 个小区共 9 株大豆），具体调查昆虫的种类和数量，共计调查 9 次。大豆收获期，每小区每行随机选取 5 株大豆（每小区共 15 株、每个种植模式各 3 个小区共 45 株大豆），脱粒晒干至恒重后称量籽粒重（g），计算各种植模式处理下大豆的百株籽粒重（g）和千粒重（g）。

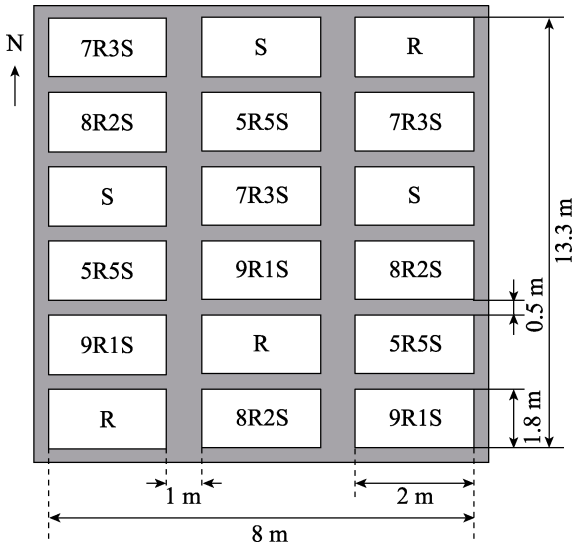

图 1　单作和混播种植模式布局图

Fig. 1　Field layout map of the single cultivar cropping (i.e., monoculture) and seed-mixed sowing

R：100%高抗品种种植；S：100%高感虫品种种植；9R1S：90%高抗与 10%高感虫品种混播；8R2S：80%高抗与 20%高感虫品种混播；7R3S：70%高抗与 30%高感虫品种混播；5R5S：50%高抗与 50%高感虫品种混播。下图同。

R: 100% cropping with high resistant cultivar; S: 100% cropping with high susceptible cultivar; 9R1S: Seed-mixed sowing with 90% R and 10% S; 8R2S: Seed-mixed sowing with 80% R and 20% S; 7R3S: Seed-mixed sowing with 70% R and 30% S; 5R5S: Seed-mixed sowing with 50% R and 50% S. The same below.

1.5　数据统计方法

分别按照 Shannon-Wiener 公式计算昆虫群落多样性指数（*H*），按照 Pielou 公式计算均匀度指数（*E*），按照 Margalef 指数计算丰富度指数（*D*），按照 Simpson 指数计算优势度指数（*C*），并用这 4 个指数来评价昆虫群落多样性水平。

1.5.1　昆虫群落多样性指数（Shannon-Wiener 多样性指数）

$$H = -\sum_{i=1}^{S}(P_i \times \ln(P_i)) \qquad (1)$$

$$P_i = N_i / N \quad (2)$$

式中，P_i 即第 i 个物种的相对多度，N_i 为第 i 个物种的个体数，N 为群落中所有物种个体总数，S 为群落中物种数。

1.5.2 昆虫群落均匀度指数（Pielou 均匀度指数）

$$E = H / H_{max} \quad (3)$$

$$H_{max} = \mathrm{In}S \quad (4)$$

式中，H 为群落多样性指数，由公式（1）计算得；H_{max} 为最大物种多样性指数，S 为群落中物种数。

1.5.3 昆虫群落丰富度指数（Margalef 丰富度指数）

$$D = (S - 1 / \mathrm{In}\, N) \quad (5)$$

式中，S 为群落中物种数，N 为群落中所有物种个体总数。

1.5.4 昆虫群落优势度指数（Simpson 优势度指数）

$$C = \sum_{i=1}^{S} (P_i)^2 \quad (6)$$

$$P_i = N_i / N \quad (7)$$

式中，P_i 为第 i 个物种的相对多度，N_i 为 i 个物种的个体数，N 为群落中所有物种个体总数，S 为群落中物种数。

数据统计分析采用 SPSS Statistics 22.0 统计分析软件（SPSS Institute Inc., Chicago, IL, USA）。采用单因子重复测量方差分析（One-way repeated-measures ANOVA）分析不同种植模式之间大豆主要害虫斜纹夜蛾和筛豆龟蝽的种群发生动态（即百株虫量）和昆虫群落多样性指标（H、E、D、C）之间的差异显著性，并采用单因子方差分析（One-way ANOVA）对不同种植模式之间的大豆产量（包括百株籽粒重和千粒重）进行差异显著性分析；不同种植模式处理间各指标采用 LSD 法进行（P<0.05）差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 高抗和高感虫大豆品种混播对主要害虫种群发生的影响

单因子重复测量方差分析表明，高抗和高感虫大豆种子不同比例混播模式之间两种主要害虫斜纹夜蛾和筛豆龟蝽的种群发生动态存在极显著差异（P<0.001）（表 1），且百株虫量均呈现先增加后降低的趋势，但处理间种群发生高峰日存在差异（P<0.05）（图 2）。

表 1 高抗（*Lamar*）和高感（*JLNMH*）大豆品种不同比例混播模式下主要害虫斜纹夜蛾和筛豆龟蝽种群发生动态的单因子重复测量方差分析

Table 1 One-way repeated-measured analysis of variances (ANOVAs) on population dynamics of *Spodoptera litura* and *Megacopta cribraria* fed on soybean plants of different ratios of seed-mixed sowing with high resistant (*Lamar*) and high susceptible (*JLNMH*) cultivars

发生虫量 Occurrence quantity	*F* 值 *F* value	*P* 值 *P* value
斜纹夜蛾 *S. litura*	73.07	<0.001
筛豆龟蝽 *M. cribraria*	199.39	<0.001

图 2（A）显示，高感虫品种（S）单作处理下斜纹夜蛾虫量显著高于其他处理（P<0.05），但高抗和高感虫品种不同比例混播处理之间斜纹夜蛾的发生量无显著差异（P>0.05）。此外，高抗和高感虫品种不同比例混播处理中只有 5R5S 处理斜纹夜蛾发生量显著大于高抗虫品种（R）单作处理（P<0.05）。

图 2（B）显示，高感虫品种（S）单作处理下筛豆龟蝽虫量显著高于其他处理（P<0.05），且高抗和高感虫品种不同比例混播处理及高抗虫品种（R）单作处理之间筛豆龟蝽发生量无显著差异（P>0.05）

2.2 高抗和高感虫大豆品种不同比例混播下昆虫群落多样性动态变化

表 2 显示，高抗和高感虫大豆种子不同比例混播显著影响了田间昆虫群落多样性指数 H（P<0.001）、均匀度指数 E（P<0.001）、丰富度指数 D（P=0.004<0.01）和优势度指数 C（P<0.001）。

由图 3（A）显示，高抗和高感虫大豆种子不同比例混播处理间昆虫群落多样性指数（H）由高到低依次为 9R1S、8R2S 和 R > 7R3S、5R5S 和 S。其中，8R2S 和 9R1S 混播及 R 单作处理的

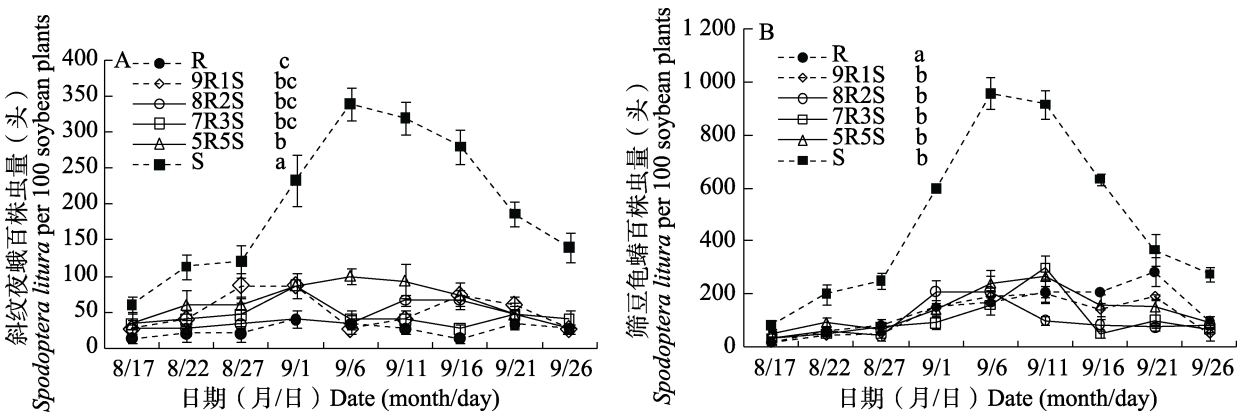

图 2　高抗（*Lamar*）和高感虫（*JLNMH*）大豆种子不同比例混播模式下斜纹夜蛾（A）和筛豆龟蝽（B）的种群发生动态

Fig. 2　Population dynamics of *Spodoptera litura* (A) and *Megacopta cribraria* (B) fed on soybean plants of different ratios of seed-mixed sowing with the high resistant (*Lamar*) and high susceptible (*JLNMH*) cultivars

昆虫群落多样性指数（*H*）显著高于其他种植方式处理（$P<0.05$）；7R3S 和 5R5S 混播又显著高于 S 单作（$P<0.05$）。

表 2　高抗和高感虫大豆不同比例混播下多样性指数、均匀度指数、丰富度指数和优势度指数差异性分析（*F* 值与 *P* 值）

Table 2　Repeated-measure analysis of variance (ANOVA) on indicators of insect community in different proportion of high resistant and high susceptible soybean mixed sowing fields (*F* and *P* value)

群落指标 Community indexes	*F* 值 *F* value	*P* 值 *P* value
多样性指数（*H*） Diversity index (*H*)	12.32	<0.001
均匀度指数（*E*） Evenness index (*E*)	32.01	<0.001
丰富度指数（*D*） Richness index (*D*)	6.24	0.004
优势度指数（*C*） Dominance index (*C*)	19.37	<0.001

由图 3（B）显示，高抗和高感虫大豆种子不同比例混播处理间昆虫群落均匀度指数（*E*）从大到小依次为 9R1S、8R2S 和 R > 7R3S 和 5R5S > S。其中，S 单作下的昆虫群落均匀度（*E*）显著低于其他处理（$P<0.05$）；此外，9R1S 和 8R2S 混播及 R 单作下昆虫群落均匀度（*E*）都显著高于 5R5S 和 7R3S 混播（$P<0.05$）。

由图 3（C）显示，高抗和高感虫大豆种子不同比例混播处理间昆虫群落丰富度指数（*D*）从大到小依次为 R > 9R1S 和 8R2S > 7R3S > 5R5S >S。其中，9R1S 和 8R2S 混播显著高于 S 单作（$P<0.05$），与 R 单作无显著差异（$P>0.05$）；7R3S 和 5R5S 混播高于 S 单作，但差异不显著（$P>0.05$）。此外，丰富度指数有随着高抗品种（R）所占比例的减小而降低的趋势。

由图 3（D）显示，高抗和高感虫大豆种子不同比例混播处理间昆虫群落优势度指数（*C*）从大到小依次为 S > 5R5S 和 7R3S > R、8R2S 和 9R1S。其中，9R1S 和 8R2S 混播及 R 单作显著低于其他处理（$P<0.05$），且三者之间无显著差异（$P>0.05$）；7R3S 和 5R5S 混播显著高于 9R1S 混播和 8R2S 混播及 R 单作（$P<0.05$），且两者之间无显著差异（$P>0.05$）；S 单作显著高于其他处理（$P<0.05$）。

2.3　高抗和高感虫大豆种子不同比例混播下产量差异

大豆百株籽粒重有随着高抗虫品种（R）占种子混播比的升高而增大的趋势，且高抗和高感虫大豆种子不同比例混播处理下百株籽粒重依次为 R 和 9R1S > 8R2S、7R3S 和 5R5S > S；其中，R 单作和 9R1S 混播下百株籽粒重分别是 3.26 kg 和 3.13 kg，显著高于 S 单作的百株籽重 1.70 kg（分别增产了 91%和 84%，$P<0.05$）；此外，8R2S、7R3S、5R5S 百株籽粒重与其他

处理的百株籽粒重均无显著差异（P>0.05）（图 4：A）。

R 单作处理下大豆千粒重最高（269.25 g），显著高于 5R5S 混播（226.40 g）和 S 单作（229.52 g）（分别高了 19%和 17%，P<0.05）；9R1S、8R2S 和 7R3S 混播稍高于 5R5S 混播和 S 单作，但差异均不显著（P>0.05）（图 4：B）。

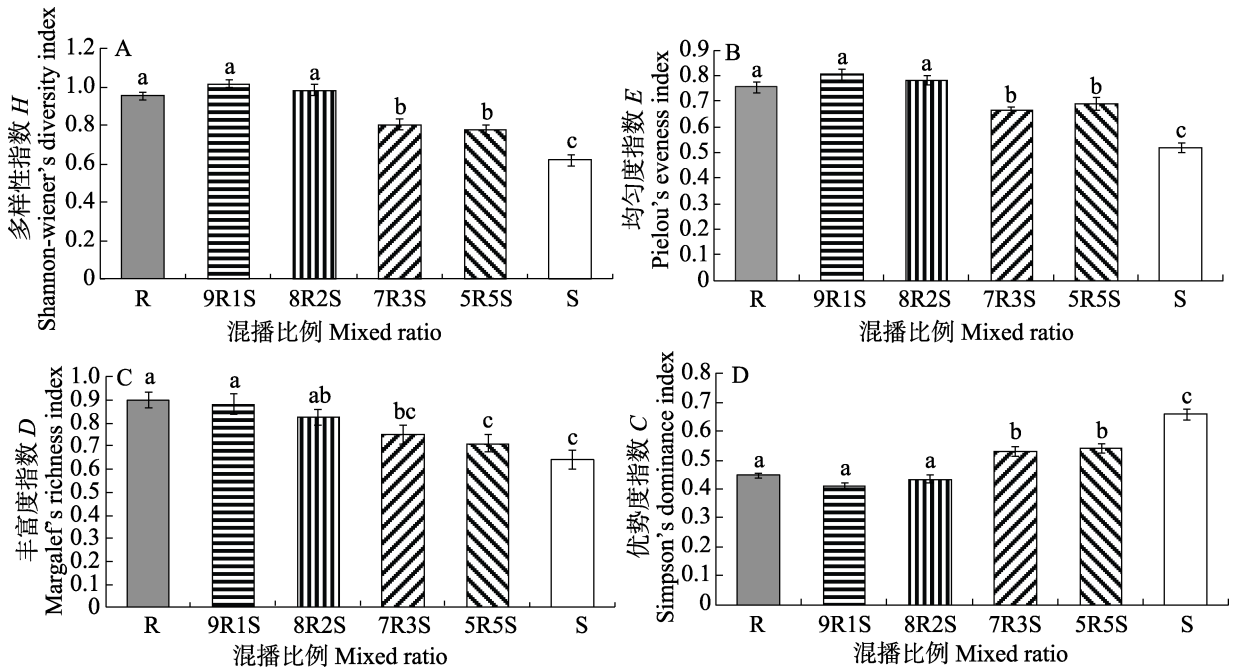

图 3 高抗（*Lamar*; R）和高感虫（*JLNMH*; S）大豆种子不同比例混播模式下昆虫群落多样性指数 *H*（A）、均匀度指数 *E*（B）、丰富度指数 *D*（C）和优势度指数 *C*（D）动态变化

Fig. 3 Value dynamics of insect community indexes of diversity *H* (A), evenness *E* (B), richness *D* (C) and dominance *C* (D) in soybean plants of different ratios of seed-mixed sowing with high resistant (*Lamar*; R) and high susceptible (*JLNMH*; S) cultivars

柱上标有不同小写字母表示经 LSD 检验处理间在 0.05 水平上差异显著。图 4 同。

Histograms with different lowercase letters indicate significantly different among different seeding types of soybean cultivars by the LSD test at 0.05 level. The same as Fig.4.

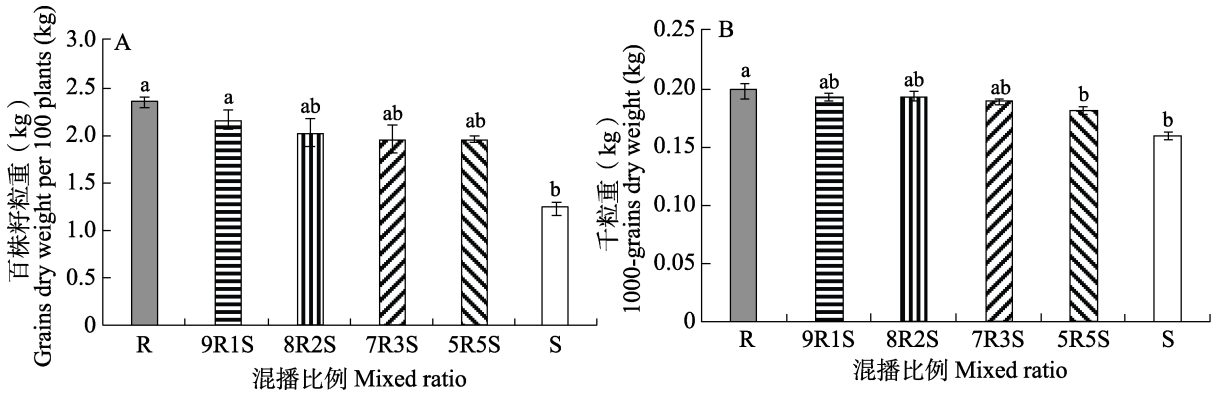

图 4 高抗（*Lamar*; R）和高感（*JLNMH*; S）斜纹夜蛾的大豆种子不同比例混播模式下百株籽粒重（A）和千粒重（B）

Fig. 4 Grains dry weight per 100 plants (A) and 1000-grains dry weight (B) of soybean plants in different proportions seeding types with high resistant (*Lamar*; R) and high susceptible (*JLNMH*; S) cultivars

3　讨论

农业生物多样性包含遗传多样性、物种多样性和生态系统多样性三个层次的内容（高东和何霞红，2010）。生产中，运用多样性来实现病虫害等有害生物的防治策略，本质上是通过自然生态系统内各因子之间的协调作用，将病虫害的发生控制在经济阈值之下，从而实现农业的可持续发展（Finckh *et al.*，2000；Wolfe，2000）。早在1859 年，达尔文就指出，小麦 *Triticum aestivum* 品种混种比单一小麦品种种植的产量更高（张俪文和韩广轩，2018）。李立坤等（2019）研究表明，玉米大豆间作能够显著增加作物产量。Li 等（2019）利用水稻品种多样性，开展高抗和高感虫水稻品种种子混播能有效控制靶标和非靶标害虫种群密度，并且对水稻产量有利。刘光洁等（2003）研究抗（感）白背飞虱水稻品种混植能有效控制白背飞虱的发生，并实现保产。

据中国农业科学院作物研究所提供的数据显示，我国大豆种质资源有 5 281 种（李福山，1990）。可见，我国大豆种质资源丰富，这又为大豆生产中利用种质资源多样性开展病虫害生态防控提供了丰富的种质资源。而生产中利用大豆遗传多样性对害虫和天敌发生调控与控制的研究和应用都较少。本研究选取高抗品种（*Lamar*; R）和高感虫品种（*JLNMH*; S）进行了大豆种子不同比例混播种植，研究其对主要害虫种群发生、昆虫群落多样性和大豆产量的影响，试验结果表明，高抗和高感虫大豆种子不同比例混播处理 9R1S、8R2S、7R3S 和 5R5S 下，大田两种主要害虫斜纹夜蛾和筛豆龟蝽的种群发生量均显著低于 S 单作；同时，9R1S、8R2S 和 7R3S 混播下斜纹夜蛾种群发生量与 R 单作无显著差异，而 9R1S、8R2S、7R3S 和 5R5S 混播下筛豆龟蝽的种群发生量均显著高于 R 单作。以上研究结果表明，高抗和高感虫大豆种子混播模式能有效控制靶标害虫斜纹夜蛾的种群发生，且对另一种主要害虫筛豆龟蝽的种群发生量有较好的的控制效果。在水稻和小麦等作物品种混播的研究中，也有类似结果的研究。如沈嘉炜等（2015）研究发现，利用水稻品种多样性进行多品种混播种植显著降低了主要害虫褐飞虱数量，且在水稻孕穗期褐飞虱多为生物型Ⅰ，也降低了褐飞虱为害。周海波等（2009）研究也发现，不同抗蚜类型小麦品种间作处理下麦长管蚜 *Sitobion avenae* 百株蚜量显著低于小麦单作处理，蚜茧蜂数量也显著高于小麦单作处理。马建华等（2017）研究表明，苜蓿多品种混播种植可以显著降低蚜虫种群数量，同时显著提高其天敌瓢虫的种群数量。可见，相对于作物单一品种种植而言，多品种混播种植可有效控制害虫种群发生，即利用作物多样性可有效实现病虫害防治（尤士骏等，2020）。

作物多样性种植通过影响植食性昆虫的定向、交配、产卵和转移等行为，干扰其定居和繁殖，从而影响其对寄主植物的危害（董文霞等，2013）。除此之外，作物多样性种植也会对害虫天敌产生影响，如刘其全（2007）研究表明，水稻品种间作提高了捕食性天敌亚群落的多样性和均匀性，降低了优势集中性，群落更稳定。天敌假说（Enemy hypothesis）认为，多样性农业生态系统能形成更稳定的捕食性和寄生性天敌种群，对害虫有更强的控害能力（侯茂林和盛承发，1999）。联合抗性假说（Combined resistance hypothesis）认为，寄主植物与非寄主植物形成的植物群落产生的联合抗性会降低单食性植食性昆虫的密度（Sholes，2008）。本研究中，对于昆虫群落多样性指数（*H*）和均匀度指数（*E*）而言，9R1S 和 8R2S 混播及 R 单作处理显著高于 7R3S、5R5S 混播及 S 单作，且 9R1S、8R2S 混播和 R 单作处理三者之间差异不显著。可见，高抗和高感虫大豆种子不同比例混播下 R 占比≥80%时有利于提高大田昆虫群落多样性和均匀度，对昆虫群落稳定性有利。对于昆虫群落丰富度（*D*）而言，9R1S 和 8R2S 混播处理显著高于 5R5S 和 S 单作，且高抗品种（R）所占比例越高，丰富度指数也越高。此外，对于昆虫群落优势度指数（*C*）而言，9R1S、8R2S 混播和 R 单作处理显著低于 7R3S、5R5S 混播和 S 单作，且三者之间差异不显著。可见，高抗和高感虫大

豆种子不同比例混播下高抗品种 R 占比大于80%时昆虫群落优势度降低，即田间优势昆虫种群发生量降低，进而对昆虫群落稳定性有利。因此，建议在大豆生产中采用高抗和高感虫大豆种子混播时，抗性品种占比要达到 80%以上才更有利于提高昆虫群落多样性，对昆虫群落稳定性有利，进而达到控害保产的目的。

作物不同品种混播种植可提高作物产量（汪建来等，2003；陈企村等，2009）。很多学者认为作物不同品种间的相互作用关系是混种增产的原因之一。如胡旦旦等（2018）研究指出，玉米品种混播通过优化冠层结构，改善群体通风透光条件，进而提高了玉米的净光合速率，增加了干物质积累量，从而提高了玉米产量。可见，作物品种间的互补作用有利于光、温、水等自然资源的合理分配，并有利于协调群体的“源库”关系和物质运输，品种间的补偿作用和助长作用等都对混种作物的增产有积极作用。混种还可以通过控制和减轻病虫害发生来实现作物增产。如刘二明等（2003）研究发现水稻品种混播下对稻瘟病有较好的防治效果，且提高了产量。本研究在大豆产量方面，大豆百株籽粒重和千粒重均随着高抗和高感虫大豆种子不同比例混播处理中高抗品种 R 占比的增加，呈逐渐上升的趋势。其中，高抗和高感虫大豆种子不同比例混播处理中 9R1S，以及高抗虫品种（R）单作处理下百株籽粒重最高，且显著高于高感虫品种（S）单作处理，且 8R2S、7R3S 和 5R5S 混播处理与 S 单作处理之间大豆百株籽粒重无显著差异。此外，高抗虫品种（R）单作处理下大豆千粒重显著高于 5R5S 混作和 S 单作，但与其他混播处理（9R1S、8R2S 和 7R3S）之间无显著差异。可见，高抗和高感虫大豆种子混播（尤其是高抗虫品种（R）占比 50%以上）有利于大豆百株籽粒重和千粒重，且高抗虫品种（R）占比 90%以上的混播对大豆百株籽粒重的增产效果最好，与抗虫品种（R）单作的百株籽粒重产量一致。

综合来看，高抗品种（R）与高感虫品种（S）种子不同比例混播中，随着高抗品种（R）所占比例的提高，混播处理对于大田主要害虫斜纹夜蛾和筛豆龟蝽种群发生的控害效果提高，并提高昆虫群落多样性、种类更丰富和均匀度和稳定性，对大豆产量提高有利。综合考虑混播处理对主要害虫种群发生、群落多样性和大豆产量的影响，当高抗品种（R）所占比例大于等于 80%时，高抗品种（R）与高感虫品种（S）种子混播效果最佳，是最优的大豆混播种植模式。所以，为达到较好的控害保产效果，在实际生产中高抗品种（R）与高感虫品种（S）混播时 R 品种种植占比应大于 80%。

参考文献 (References)

Cha T, Zhong XB, Zhou QZ, He MD, Wang GF, You JH, Wang ZQ, Tang GX, 2018. Development status of China's soybean industry and strategies of revitalizing. *Soybean Science*, 37(3): 458–463. [查霆, 钟宣伯, 周启政, 何梦迪, 汪桂凤, 尤金华, 汪自强, 唐桂香, 2018. 我国大豆产业发展现状及振兴策略. 大豆科学, 37(3): 458–463.]

Chabi-Olaye A, Nolte C, Schulthess F, Borgemeister C, 2005. Relationships of intercropped maize, stem borer damage to maize yield and land-use efficiency in the humid forest of Cameroon. *Bulletin of Entomological Research*, 95(5): 417–427.

Chen QC, Zhu YY, Li ZQ, Tang YS, Kang ZS, 2009. Effect of wheat cultivar mixtures on wheat yield and stripe rust. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 17(1): 29–33. [陈企村, 朱有勇, 李振岐, 唐永生, 康振生, 2009. 不同品种混种对小麦产量及条锈病的影响. 中国生态农业学报, 17(1): 29–33.]

Dong WX, Xu N, Xiao C, 2013. Effects of plant diversity on plant-eating insect behavior. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(4): 1133–1140. [董文霞, 徐宁, 肖春, 2013. 作物多样性种植对植食性昆虫行为的影响. 应用昆虫学报, 50(4):1133–1140.]

Dong ZL, Yin SS, Wen YJ, Ma L, Song JX, Shi AX, Gao X, Li Q, 2013. The influence of corn intercropping on the structure and stability of insect community in *Zanthoxylum bungeanum* garden. *Journal of Yunnan Agricultural University* (*Natural Science*), 28(5): 647–653. [董振隆, 殷山山, 文易进, 马丽, 宋家雄, 石安宪, 高熹, 李强, 2013. 间作玉米对花椒园昆虫群落结构及稳定性的影响. 云南农业大学学报(自然科学版), 28(5): 647–653.]

Finckh MR, Gacek ES, Goyeau H, Lannou C, Wolfe MS, 2000. Cereal variety and species mixtures in practice, with emphasis on disease resistance. *Agronomie*, 20(7): 813–837.

Gao D, He XH, 2010. Research advances on biodiversity and ecosystem stability. *Chinese Journal of Ecology*, 29(12): 2507–2513. [高东, 何霞红, 2010. 生物多样性与生态系统稳定性研究进展. 生态学杂志, 29(12): 2507–2513.]

Gao Y, Shi SS, Xu ML, Cui J, 2018. Current research on soybean pest management in China. *Oil Crop Science*, 3(4): 215–227.

Han BY, Jiang CJ, Li ZM, 2001. Compinents of arthropod communities in tea gardens with four different cultivation types. *Acta Ecologica Sinica*, 21(4): 646–652. [韩宝瑜, 江昌俊, 李卓民, 2001. 间作密植和单行茶园节肢动物群落组成差异. 生态学报, 21(4): 646–652.]

Han LL, Wang K, Li DP, Zhang WL, Chen Y, Zhao QJ, 2016. Effects of the potato-soybean, and maize-soybean, intercropping modes on the population dynamics of the main piercing-sucking pests, and other pests, in soybean fields. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(4): 723–730. [韩岚岚, 王坤, 李东坡, 张雯林, 程媛, 赵奎军, 2016. 马铃薯-大豆、玉米-大豆邻作对大豆田主要刺吸式害虫以及其他害虫的种群动态影响. 应用昆虫学报, 53(4): 723–730.]

Hou ML, Sheng CF, 1999. Effect of plant diversity in agroecosystems on insect pest population. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 10(2): 245–250. [侯茂林, 盛承发, 1999. 农田生态系统植物多样性对害虫种群数量的影响. 应用生态学报, 10(2): 245–250.]

Hu DD, Zhang JW, Liu P, Zhao B, Dong ST, 2018. Effects of mixed-cropping with different varieties on photosynthetic characteristics and yield of summer maize under close planting condition. *Acta Agronomica Sinica*, 44(6): 920–930. [胡旦旦, 张吉旺, 刘鹏, 赵斌, 董树亭, 2018. 密植条件下玉米品种混播对夏玉米光合性能及产量的影响. 作物学报, 44(6): 920–930.]

Li FS, 1990. Catalog of Chinese Wild Soybean Resources. Beijing: Agricultural Press. 355. [李福山, 1990. 中国野生大豆资源目录. 北京: 农业出版社. 335.]

Li LK, Zuo CB, Yu FL, Wang L, Li Z, Chen FJ, 2019. Effects of monoculture and intercropping of maize and soybean with reduced use of fertilizer on crop yields, insect community composition and diversity. *Journal of Plant Protection*, 46(5): 980–988. [李立坤, 左传宝, 于福兰, 王龙, 李卓, 陈法军, 2019. 肥料减施下玉米-大豆间作对作物产量和昆虫群落组成及多样性的影响. 植物保护学报, 46(5): 980–988.]

Lin KJ, Wu KM, Zhang YJ, Guo YY, 2006. Evaluation of piemarker abutilon theophrasti medic as a trap plant in the integrated management of *Bemisia tabaci* (biotype b) in cotton and soybean crops. *Scientia Agricultura Sinica*, 39(7): 1379–1386. [林克剑, 吴孔明, 张永军, 郭予元, 2006. 利用诱集寄主苘麻防治 b 型烟粉虱的研究. 中国农业科学, 39(7): 1379–1386.]

Liu EM, Zhu YY, Xiao FH, Luo M, Ye HZ, 2003. Using genetic diversity of rice varieties for sustainable control of rice blast disease. *Scientia Agricultura Sinica*, 36(2): 164–168. [刘二明, 朱有勇,肖放华,罗敏, 叶华智, 2003. 水稻品种多样性混栽持续控制稻瘟病研究. 中国农业科学, 36(2): 164–168.]

Liu GJ, Chen SG, Wang JY, Shen JH, Shen JH, Sogawa K, Xie XM, Qiao QC, Pu ZG, Shi DG, Liu XG, 2003. Preliminary study on suppression of the whitebacked planthopper, *Sogatella furcifera* by cultivating the mixture of the resistant and susceptible rice varieties. *Chinese Journal of Rice Science*, 17(Suppl.): 103–107. [刘光杰, 陈仕高, 王敬宇, 沈君辉, 寒川一成, 谢雪梅, 谯青春, 蒲正国, 石敦贵, 刘祥贵, 2003. 混植水稻抗虫和感虫材料抑制白背飞虱发生的初步研究. 中国水稻科学, 17 (增刊): 103–107.]

Liu QQ, 2007. Effects of intercropping with different rice varieties on arthropod communities in rice fields. Master dissertation. Fujian: Fujian Agriculture and Forestry University. [刘其全, 2007. 水稻不同品种间作对稻田节肢动物群落的影响. 硕士学位论文. 福建: 福建农林大学.]

Li Z, Li LK, Liu B, Wang L, Parajulee MN, Chen FJ, 2019. Effect of seed mixture sowing with transgenic Bt rice and its parental line on the population dynamics of target stemborers and leafrollers, and non-target planthoppers. *Insect Science*, 26(4): 777–794.

Li Z, Wan GJ, Wang L, Parajulee MN, Zhao ZH, Chen FJ, 2018. Effects of seed mixture sowing with resistant and susceptible rice on population dynamics of target planthoppers and non-target stemborers and leaffolders. *Pest Management Science*, 74(7): 1664–1676.

Ma JH, Zhao ZH, Zhang R, 2017. Sowing a mixture of alfalfa modulates the population density of alfalfa pests. *Pratacultural Science*, 34(12): 2521–2527. [马建华, 赵紫华, 张蓉, 2017. 品种混播对苜蓿产量及主要害虫种群密度的调控. 草叶科学, 34(12): 2521–2527.]

Ma KZ, 2004. Effects of wheat-alfalfa intercropping on dynamics of *Macrosiphum avenae* (Homoptera: Aphididae) and its natural enemies. Master dissertation. Shanxi: Northwest A&F University. [马克争, 2004. 小麦-苜蓿间作对麦长管蚜及其主要天敌的种群动态的影响. 硕士学位论文. 陕西: 西北农林科技大学.]

Pan PL, 2016. Effect of raising crop diversity on the occurrence of plant diseases, insect pests and their natural enemies. Doctoral dissertation. Beijing: China Agricultural University. [潘鹏亮, 2016. 增加作物多样性对病虫害和天敌发生的影响. 博士学

位论文. 北京: 中国农业大学.]

Rao KR, Thakur NSA, 2009. Seed treatment and intercrop systems for the management of leaf folder (*Nacoleia vulgalis*) and stem fly (*Ophiomyia phaseoli*) in soybean *(Glycine max*). *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 79(8): 662–665.

Shen JW, Liu ZC, Cai YJ, Zhang WQ, 2005. Effect of mixture cropping of multiple rice varieties on brown planthopper (*Nilaparvata lugens*) and spiders. *Chinese Journal of Biological Control*, 31(3): 327–332. [沈嘉炜, 刘志超, 蔡尤俊, 张文庆, 2015. 水稻品种多样性对褐飞虱及蜘蛛的影响. 中国生物防治学报, 31 (3): 327–332.]

Sholes ODV, 2008. Effects of associational resistance and host density on woodland insect herbivores. *Journal of Animal Ecology*, 77(1): 16–23.

Wang H, 2011. Evaluation of soybean resistance to *Spodoptera litura*, QTL association analysis of related traits, and haplotype identification of GmAOSl gene. Doctoral dissertation. Jiangsu: Nanjing Agricultural University. [王慧, 2011. 大豆对斜纹夜蛾的抗性评价、相关性状 QTL 的关联分析及 GmAOSl 基因的单倍型鉴定. 博士学位论文. 江苏: 南京农业大学.]

Wang JL, Kong LC, Cao CF, Gan BJ, Wang R, Zhao B, Zhao Z, 2003. Preliminary report on yield and quality effects of mixed wheat varieties. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 31(6): 947–948. [汪建来, 孔令聪, 曹承富, 甘斌杰, 王瑞, 赵斌, 赵竹, 2003. 小麦品种混播的产量与品质效应初报. 安徽农业科学, 31(6): 947–948.]

Wang YZ, Yue YH, 1998. Efficacy of interplant and mixture sowing of maize and soybean on pest and disease management in soybean. *Plant Protection*, 24(1): 13–15. [王玉正, 岳跃海, 1998. 大豆玉米间作和同穴混播对大豆病虫发生的综合效应研究. 植物保护, 24(1): 13–15.]

Wang YB, Zhang Y, Shi MW, Yue JL, Wang JY, Zhang ZY, 2000. Research on agricultural pest control history. *Journal of Henan Institute of Science and Technology*, 28(3): 10–13. [王运兵, 张焱, 石明旺, 岳金来, 王家云, 张中印, 2000. 农业害虫防治历史的研究. 河南职技师院学报, 28(3): 10–13.]

Wolfe MS, 2000. Crop strength through diversity. *Nature*, 406(6797): 681–682.

Xiao ZJ, 2019. Effects of mixed soybean cultivars with different resistance on soybean yield and insect community. Master dissertation. Jiangsu: Nanjing Agricultural University. [肖子衿, 2019. 不同抗性大豆品种混播对大豆产量和昆虫群落的影响. 硕士学位论文. 江苏: 南京农业大学.]

Xie GH, Cui HD, Dong Y, Wang XQ, Xie Y, 2016. Crop rotation and intercropping with marigold are effective for root-knot nematode (*Meloidogyne* sp.) control in angelica (*Angelica sinensis*) cultivation. *Canadian Journal of Plant Science*, 97(1): 26–31.

Xing GN, Liu K, Gai JY, 2017. A high-throughput phenotyping procedure for evaluation of antixenosis against common cutworm at early seedling stage in soybean. *Plant Methods*, 13(1): 66.

Xu SM, Liu XR, 2003. Survey of soybean pests. *Journal of Beihua University* (*Natural Science*), 4(6): 478–483. [徐淑敏, 刘新茹, 2003. 大豆害虫的研究概况. 北华大学学报(自然科学版), 4(6): 478–483.]

You SJ, Zhang J, Li JY, Chen YT, Liu TS, Niu DS, You MS, 2019. Theoretical study and practical application of utilizing biodiversity to enhance pest control in agroecosystems. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(6): 1125–1147. [尤士骏, 张杰, 李金玉, 陈燕婷, 刘天生, 牛东升, 尤民生, 2019. 利用生物多样性控制作物害虫的理论与实践. 应用昆虫学报, 56(6): 1125–1147.]

Zhang LW, Han GX, 2018. A review on the relationships between plant genetic diversity and ecosystem functioning. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42(10): 977–989. [张俪文, 韩广轩, 2018. 植物遗传多样性与生态系统功能关系的研究进展. 植物生态学报, 42(10): 977–989.]

Zhou HB, Chen JL, Liu Y, Chen DF, Chen L, Sun JR, 2009. Using genetic diversity of wheat varieties for ecological regulation on *Sitobion avenae*. *Journal of Plant Protection*, 36(2): 151–156. [周海波, 陈巨莲, 刘勇, 程登发, 陈林, 孙京瑞, 2009. 小麦品种多样性对麦长管蚜的生态调控作用. 植物保护学报, 36(2): 151–156.]