应用昆虫学报 *Chinese Journal of Applied Entomology* 2020, 57(1): 124–133. DOI: 10.7679/j.issn.2095–1353.2020.014

高抗、中抗和高感虫品种混播对大豆产量及主要害虫种群发生和昆虫群落多样性的影响*

沈方圆[1**] 张逸飞[1,2] 肖子衿[1] 李立坤[1] 韦泳汲[1] 尹 悦[1] 陈法军[1***]

（1. 南京农业大学植保学院昆虫系，昆虫信息生态研究组，南京 210095；2. 广东省科学院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）

摘 要 **【目的】** 利用作物多样性可有效控制大田害虫发生，并实现保产和减少化学农药施用。**【方法】** 本研究选取高抗（*Lamar*；R）、中抗（*ZD35*；M）和高感（*JLNMH*；S）斜纹叶蛾 *Spodoptera litura* 的大豆品种，进行不同播种模式（即 R、M、S 单作，RM、RS、MS 和 RMS 各品种等量混播）对大豆产量和主要害虫（斜纹叶蛾 *S. litura* 和筛豆龟蝽 *Megacopta cribraria*）种群发生及昆虫群落多样性的影响，以明确最优化大豆混播种植模式，实现基于品种多样性利用的大豆控害保产的生态防控。**【结果】** RM 和 RMS 混播下斜纹夜蛾百株虫量与 R 单作无显著差异，RM 混播下筛豆龟蝽 *M. cribraria* 百株虫量与 R 单作也无显著差异，且都显著低于其它播种处理。RM 和 RMS 混播下昆虫多样性指数（*H*）和均匀度指数（*E*）都显著高于其它播种模式，但与 R 单作差异不显著；RM 和 RMS 混播、R 单作下昆虫群落丰富度指数（*D*）都显著高于其它播种处理，但昆虫群落优势度指数（*C*）与此相反。此外，RM 和 RMS 混播下大豆百株籽粒重都显著高于除 R 单作外的其它播种处理（42.86%-192.27%），RMS 混播下大豆千粒重也最高（高于其它播种处理 4.46%-29.31%）。**【结论】** RM 和 RMS 混播可显著降低主要害虫种群发生量，明显提高昆虫群落多样性、均匀度和丰富度，并显著提高大豆产量。因此，大豆生产中建议推广高抗、中抗和高感虫品种混播（即 RMS 模式），以及高抗与中抗虫品种混播（即 RM 模式）以实现大豆控害保产的生态防控目的。

关键词 种子混播；大豆产量；昆虫；种群动态；群落多样性；生态防控

Effect of planting mixed crops of resistant and susceptible soybeans on crop damage by *Spodoptera litura* and the population dynamics of key soybean pests

SHEN Fang-Yuan[1**] ZHANG Yi-Fei[1,2] XIAO Zi-Jin[1] LI Li-Kun[1]
WEI Yong-Ji[1] YIN Yue[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), Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510316, China)

Abstract **[Objectives]** Crop diversity can be used to control the occurrence of insect pests, thereby increasing yields and reduce pesticide use. **[Methods]** Soybean varieties with high resistance (cv. *Lamar*; R), medium resistance (cv. *ZD35*; M) and high sensitivity (cv. *JLNMH*; S), to *Spodoptera litura* were planted together, and in isolation, to investigate the effects of crop diversity on soybean yield; i.e. we compared the yield from R, M and S monocultures to mixed RM, RS, MS and RMS crops. The population dynamics of key pests (*S. litura* and *Megacopta cribraria*) and insect community diversity in these different crops were also assessed to determine the optimal cultivar diversity with respect to effective ecological control of

*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：zhangxingguo19@outlook.com

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

收稿日期 Received：2019-12-15；接受日期 Accepted：2020-01-02

insect pests and soybean production. **[Results]** There was no significant difference in the number of individual pests per 100 plants between RM, RMS, and R crops, and there was also no significant difference in individual pests per 100 plants between RM and R crops, all of which had significantly lower pest numbers than other crop types. Insect community diversity (*H*) and evenness (*E*) of insects in mixed crops were all significantly higher than those in monocultures, but there were no significant differences in these indices between RM, RMS and R crops. Moreover, the community richness (*D*) of insects in RM and RMS crops were all significantly higher than those of other crops, whereas the reverse was true for community dominance (*C*). Furthermore, the grain weight per 100 plants for RM and RMS crops was significantly higher (42.86%-192.27%) than for other crops, except for the R monoculture. The RM crop also had the highest 1000-grain weight of all crop types from 4.46% to 29.31%. **[Conclusion]** We conclude that the abundance of key insect pests were significantly lower in RM and RMS crops, whereas insect community diversity, evenness and dominance and soybean yield, were all higher. Consequently, we recommend jointly sowing soybean cultivars with both high and moderate resistance, or with high, moderate and high sensitivity to insect pests, to enhance both the ecological control of insect pests and soybean production.

Key words seed-mixed sowing; soybean yield; insect; population dynamics; community diversity; ecological control

我国是大豆原产地，种植大豆已有 5 000 余年历史。大豆是我国传统的粮食和油料兼用作物。然而大豆极易受害虫侵害，导致其产量和品质降低，每年因虫害造成的大豆损失占总产量的 10%-15%（李琼和张晓明，2018）。当前，大豆主要害虫有大豆蚜虫 *Aphis glycines*、筛豆龟蝽 *Megacopta cribraria*、斜纹夜蛾 *Spodoptera litura*、大豆卷叶螟 *Lamprosema indicata*、大豆食心虫 *Leguminivora glycinivorella*、二条叶甲 *Paraluperodes suturalis nigrobilineatus*、大豆造桥虫 *Ascotis selenaria* 和烟蚜夜蛾 *Heliothis virescens* 等（崔章林等，1997）。其中，筛豆龟蝽和斜纹夜蛾为主要害虫种类（肖鹏，2009）。

传统农业生产中，往往依赖农药防治病虫害，而长期使用农药会使病虫害产生抗药性，从而降低农药防效，为了有效防控病虫害发生，必须不断提高农药用量，进而形成了一种农药滥用的恶性循环。可见，农药的不合理使用已经严重威胁到了大豆生产的可持续性，最终影响了我国的大豆产业（Gao *et al.*，2018）。而有大量研究表明，通过采用合理的间作、套作、混作等多样性种植模式可有效控制害虫种群发生。如吴满霞等（2010）研究发现，茶园间作与纯茶园相比，昆虫物种数增加，生物多样性指数提高，天敌和害虫的数量比值（即益害比）增加。王万磊等（2008）研究发现，小麦-油菜间作田较单作田有较高的瓢虫种群密和瓢蚜比，以及高的蚜茧蜂种群密度、僵蚜率和蜂蚜比，而麦长管蚜无翅蚜的种群密度显著降低。另一方面，早在 1859 年，达尔文就指出，小麦 *Triticum aestivum* 品种混种的土地比单一小麦品种种植的土地产量更高。另有研究表明，随机混作和按顺序排布间作对小麦叶斑病和条锈病均有抑制作用，且随机混作模式的增产效果显著（Brophy and Mundt，1991）；而抗病和感病品种混栽下水稻稻瘟病的发病率和病情指数显著下降，防治效果显著，田间农药用量减少 60%（Zhu *et al.*，2000，2001）。此外，采用稻田田埂生物多样性种植可有效控制虫害发生，并达到保量、减少农药使用和生态控虫的目的（俞欢慧，2014）。

目前，有很多利用大豆与其他作物间作对病虫害和产量影响的研究（梁镇林和梁颖，1997；陈爱芹，2013；李新民，2014；刘朝茂和李成云，2017；李立坤等，2019）。而对利用大豆种质资源多样性和不同品种混播控害保产的研究较少。本研究利用高抗、中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，以研究大豆不同品种混播对其产量和昆虫群落多样性的影响，并明确最优的大豆混播比例，以期为开展大豆生产示范提供最优种植模式建议，为实现化学农药减施下保产控害的大豆生态调控提供指导。

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，且当地降水量充足，土壤肥力优渥。

1.2 供试大豆

本实验选择高抗斜纹夜蛾的大豆品种 *Lamar*（High resistance，R）、中抗品种中豆 35（Middle resistance，M；*ZD35*）和高感虫品种监利牛毛黄（High susceptibility，S；*JLNMH*）3 种不同抗性等级的大豆品种作为供试植物（王慧，2011；Xing *et al*.，2017）。

1.3 种植模式

3 种抗性大豆（高抗-R：*Lamar*；中抗-M：*ZD35*；高感-S：*JLNMH*）按照 3 种单一品种种植（100% R、100% M 和 100% S），3 种 2 个品种等量混播种植（50% R+50% M、50% R+50% S、50% M+50% S），以及 1 种 3 个品种等量混播种植（1/3R+1/3M+1/3S）共计 7 种种植模式，即 R 单作、M 单作、S 单作、RM 混播、RS 混播、MS 混播和 RMS 混播。各种植模式各设置 3 个小区重复，每小区面积为 1.8 m×2.0 m（长×宽），各小区长边之间设置 0.5 m 隔离带。各小区短边之间设置 1 m 隔离带（试验设置布局见图 1）。各种植模式大豆于 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，湖北金正大肥业有限公司），大豆行距为 0.5 m、株距为 0.15 m，实验期间各种植模式大豆田采取相同的浇水、除草等措施，实验期间不使用化学药剂防治病虫害。

1.4 调查方法

大豆开花后，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 3 个小区共 9 株），具体调查每株大豆上昆虫的种类和数量。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 3 个小区共 45 株），脱粒晒干后称量籽粒重，计算各种植模式处理大豆的百株籽粒重和千粒重。

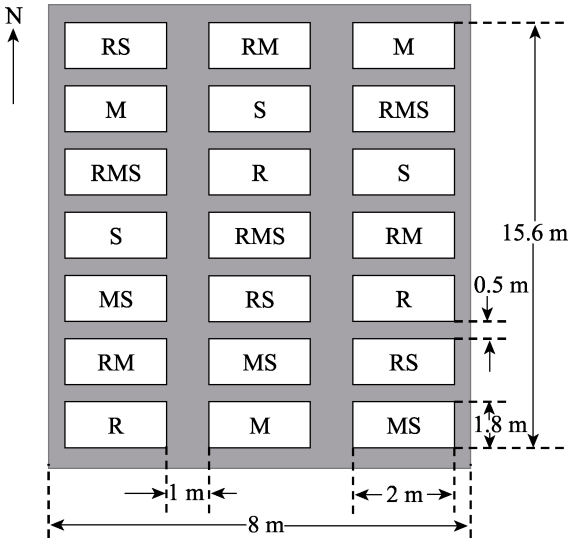

图 1 高抗（*Lamar*；R）、中抗（*ZD35*；M）和高感虫（*JLNMH*；S）大豆品种 7 种种植模式试验布局

Fig. 1 Field layout map of the seven types of seed-mixed sowing with high (*Lamar*; R) and middle resistant (*ZD35*; M) and high susceptible (*JLNMH*; S) cultivars of soybean crops

R：100%高抗品种种植；M：100%中抗品种种植；S：100%高感虫品种种植；RM：50%高抗与 50%中抗品种混播；RS：50%高抗与 50%高感品种混播；MS：50%中抗与 50%高感虫品种混播；RMS：1/3 高抗、1/3 中抗和 1/3 高感虫品种混播。下图同。

R: 100% high resistant soybean; M: 100% middle resistant soybean; S: 100 high susceptible soybean; RM: 50% high resistant and 50% middle resistant soybean; RS: 50% high resistant and 50% high susceptible soybean; MS: 50% middle resistant and 50% high susceptible soybean; RMS: 1/3 high resistant, 1/3 middle resistant and 1/3 high susceptible soybean. The same below.

1.5 数据统计方法

依照 Shannon-Wiener 公式计算昆虫群落多样性指数（*H*）、Pielou 公式计算均匀度指数（*E*）、Margalef指数计算丰富度指数（*D*）和 Simpson 指数计算优势度指数（*C*），以这 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）

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

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

式中 P_i：第 i 个物种的相对多度；N_i：第 i 个物种的个体数；N：群落中所有物种个体总数；

S：群落中物种数。

该指数假设在无限大的群落中对个体随机取样，而且样本包含了群落中所有物种，个体出现的机会即为昆虫群落多样性指数。包含两个层面：①种数；②各种间个体分配的均匀性。如果每一个体都属于不同的种，多样性指数就最大；如果每一个体都属于同一种，则其多样性指数就最小。通过 Shannon-Wiener 公式计算所得群落多样性指数（H）代表了群落的复杂程度，随着群落中种群数量的增加，H 越大，群落多样性越高（王兵等，2008）。

1.5.2　昆虫群落均匀度指数（Pielou 均匀度指数）

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

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

式中，H：群落多样性指数，由公式（1）计算得；Hmax：最大物种多样性指数；S：群落中物种数。均匀度指数反映了群落的物种间均匀程度，它与物种个数无关，无论多少个种群（孙军和刘东艳，2004）。

1.5.3　昆虫群落丰富度指数（Margalef 丰富度指数）

$$D = (S-1) / \ln N \quad (5)$$

式中，S：群落中物种数；N：群落中所有物种个体总数。丰富度是指一个群落或生境中物种数目的多少，也表示生物群落中种类丰富程度（林丽平，2012）。本文采用 Margalef 指数，不需要考虑研究面积大小，只计算群落中种数和个体总数关系。

1.5.4　昆虫群落优势度指数（Simpson 优势度指数）

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

$$P_{\mathrm{i}} = N_{\mathrm{i}} / N \quad (7)$$

式中，P_{i}：第 i 个物种的相对多度；N_{i}：i 个物种的个体数；N：群落中所有物种个体总数；S：群落中物种数。Simpson 指数公式可以看作是多样性的反面——集中性来进行度量（栾海燕，2003），又称优势度指数，该指数越大则群落越不均匀。

数据统计分析采用 SPSS Statistics 22.0 统计分析软件（2018，SPSS Institute Inc.，Chicago，IL，USA）。采用单因子重复测量方差分析（One-way repeated-measures ANOVA）以明确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）及昆虫群落多样性指标（H、E、D、C）之间的差异，并采用单因子方差分析（One-way ANOVA）以明确不同种植模式之间大豆产量（包括百株籽粒重和千粒重）差异；不同种植模式处理间差异性显著性检验采用 LSD 检验（P<0.05）。

2　结果与分析

2.1　高抗、中抗和高感虫大豆混播下主要害虫种群发生动态

由表 1 可知，不同播种模式之间大豆上两种主要害虫斜纹夜蛾和筛豆龟蝽种群发生动态之间存在极显著差异（P<0.001）。

表 1　高抗（*Lamar*; R）、中抗（*ZD35*; M）和高感虫（*JLNMH*; S）品种不同播种模式下大豆主要害虫斜纹夜蛾和筛豆龟蝽种群发生动态之间的单因子重复测量方差分析（*F* 值和 *P* 值）

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 seeding types with high (*Lamar*; R) and middle resistant (*ZD35*; M), and high susceptible (*JLNMH*; S) cultivars (*F and P values*)

主要害虫种类 Species of key insect pest	*F* 值 *F* value	*P* 值 *P* value
斜纹夜蛾 *S. litura*	33.88	<0.001
筛豆龟蝽 *M. cribraria*	65.55	<0.001

斜纹夜蛾和筛豆龟蝽的百株虫量呈现先增加后降低的种群动态发生趋势（图 2），如高感虫大豆 *JLNMH*（S）上斜纹夜蛾和筛豆龟蝽的百株虫量于 9 月 1 日进入高峰期，9 月 6 日达到最高峰，随后于 9 月 16 日开始下降，高峰期历时 15 d。

对斜纹夜蛾百株虫量而言，各播种模式大小依次为：S>M>MS>RS>RM>RMS>R（图 2：A）。其中，S 单作下斜纹夜蛾百株虫量显著高于其它播种模式（P<0.05），M 单作下斜纹夜蛾百株虫

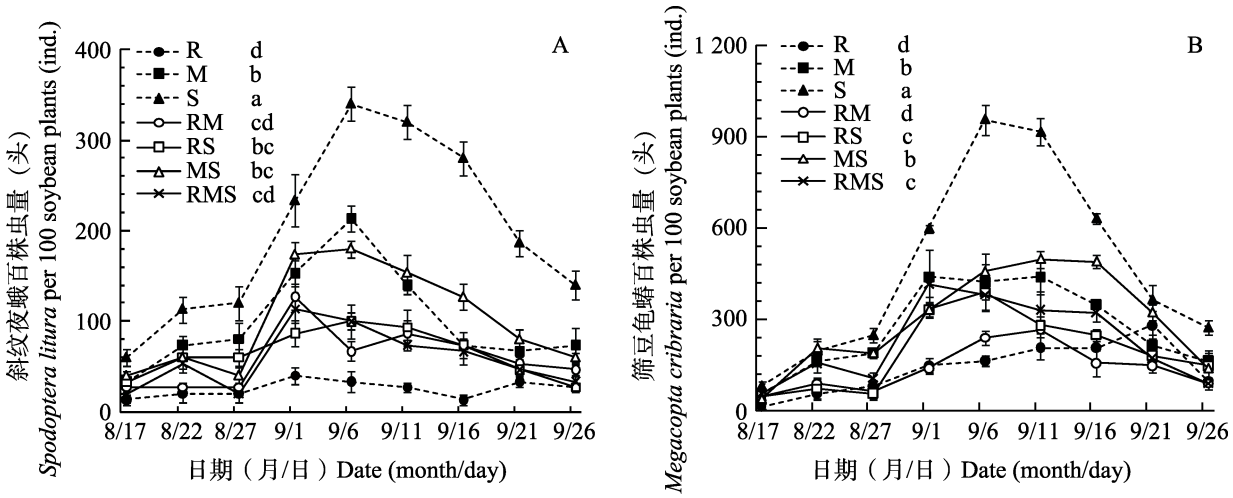

图 2　高抗（*Lamar*；R）、中抗（*ZD35*；M）和高感虫（*JLNMH*；S）大豆不同播种模式下斜纹夜蛾（A）和筛豆龟蝽（B）种群发生动态

Fig. 2　Population dynamics of *Spodoptera litura* (A) and *Megacopta cribraria* (B) fed on soybean plants of different seeding types with the high (*Lamar*; R) and middle resistant (*ZD35*; M) and high susceptible (*JLNMH*; S) cultivars

不同小写字母表示经 LSD 检验处理间在 0.05 水平上的差异显著性。图 3 同。
Different lower-case letters indicate significantly different among different seeding types of soybean by the LSD test at 0.05 level. The same as Fig.3.

量显著高于 RS 和 RMS 以及 R 单作（$P<0.05$），RM 和 RMS 混播下斜纹夜蛾百株虫量与 R 单作之间差异不显著（$P>0.05$）。可见，RM 和 RMS 混播可有效控制斜纹夜蛾种群发生。

对筛豆龟蝽百株虫量而言，各播种模式大小依次为：S>M>MS>RS>RMS>R>RM（图 2：B）。其中，S 单作下筛豆龟蝽百株虫量显著低于其它播种模式（$P<0.05$）；M 单作与 MS 混播之间差异不显著（$P>0.05$），但显著高于 RM、RS 和 RMS 混播以及 R 单作（$P<0.05$）；R 单作与 RM 混播之间无显著差异（$P>0.05$），且显著低于其它播种模式（$P<0.05$）。可见，RM 混播可有效控制斜筛豆龟蝽种群发生。

2.2　高抗、中抗和高感虫大豆混播下昆虫群落多样性动态变化

表 2 显示，不同播种模式显著影响大豆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（$P<0.001$）和优势度指数 C（$P<0.001$）。

图 3（A）和图 3（B）显示，在高抗、中抗和高感虫大豆种植后，从 8 月 17 至 9 月 26 日之间昆虫群落多样性指数（H）和均匀度指数（E）大小依次为：RM 和 RMS>R>RS>MS、M 和 S。其中，RM 和 RMS 混播下昆虫群落多样性指数（H）和均匀度指数（E）都显著高于 RS 和 MS 混播，以及 M 和 S 单作（$P<0.05$），同时高于 R 单作，但差异不显著（$P>0.05$）；此外，MS 混播及 M 和 S 单作下昆虫群落多样性指数最低，并显著低于 RM 和 RMS 混播以及 R 单作（$P<0.05$）。可见。RM 和 RMS 混播下大豆田间昆虫种类多且种群数量较为均匀。

表 2　高抗（*Lamar*; R）、中抗（*ZD35*; M）和高感虫（*JLNMH*; S）大豆不同播种模式下昆虫群落多样性指数的单因子重复测量方差分析（*F* 值和 *P* 值）

Table 2　One-way repeated-measured analysis of variances (ANOVAs) on the measured diversity indexes of insect community of different seeding types with high (*Lamar*; R) and middle resistant (*ZD35*; M), and high susceptible (*JLNMH*; S) cultivars (*F and P values*)

群落指标 Community indexes	*F* 值 *F* value	*P* 值 *P* value
多样性指数（*H*）Diversity index (*H*)	75.66	<0.001
均匀度指数（*E*）Evenness index (*E*)	36.43	<0.001
丰富度指数（*D*）Richness index (*D*)	12.55	<0.001
优势度指数（*C*）Dominance index (*C*)	92.01	<0.001

图 3（C）显示，不同播种模式处理间昆虫群落丰富度指数（*D*）依次为：RM、RMS 和 R>RS、MS、S 和 M。其中，RM 和 RMS 混播、R 单作下昆虫群落丰富度指数（*D*）显著高于其它处理（$P<0.05$），但三者之间差异不显著（$P>0.05$）；此外。RS 和 MS 混播，以及 S 和 M 单作之间差异也不显著（$P>0.05$）。可见。RM 和 RMS 混播有利于大豆田昆虫群落丰富度。

图 3（D）显示，不同播种模式间昆虫群落优势度指数（*C*）依次为：S>M 和 MS>RS>R、RMS 和 RM。其中，S 单作下昆虫群落优势度指数（*C*）显著高于其它处理（$P<0.05$），表明高感虫大豆单作下昆虫群落中主要害虫种群数量高。RM 和 RMS 混播与 R 单作下昆虫群落优势度指数（*C*）显著低于其它处理（$P>0.05$），说明此类播种模式下昆虫群落中优势种群少或不存在明显的优势种群，对昆虫群落稳定性有利。

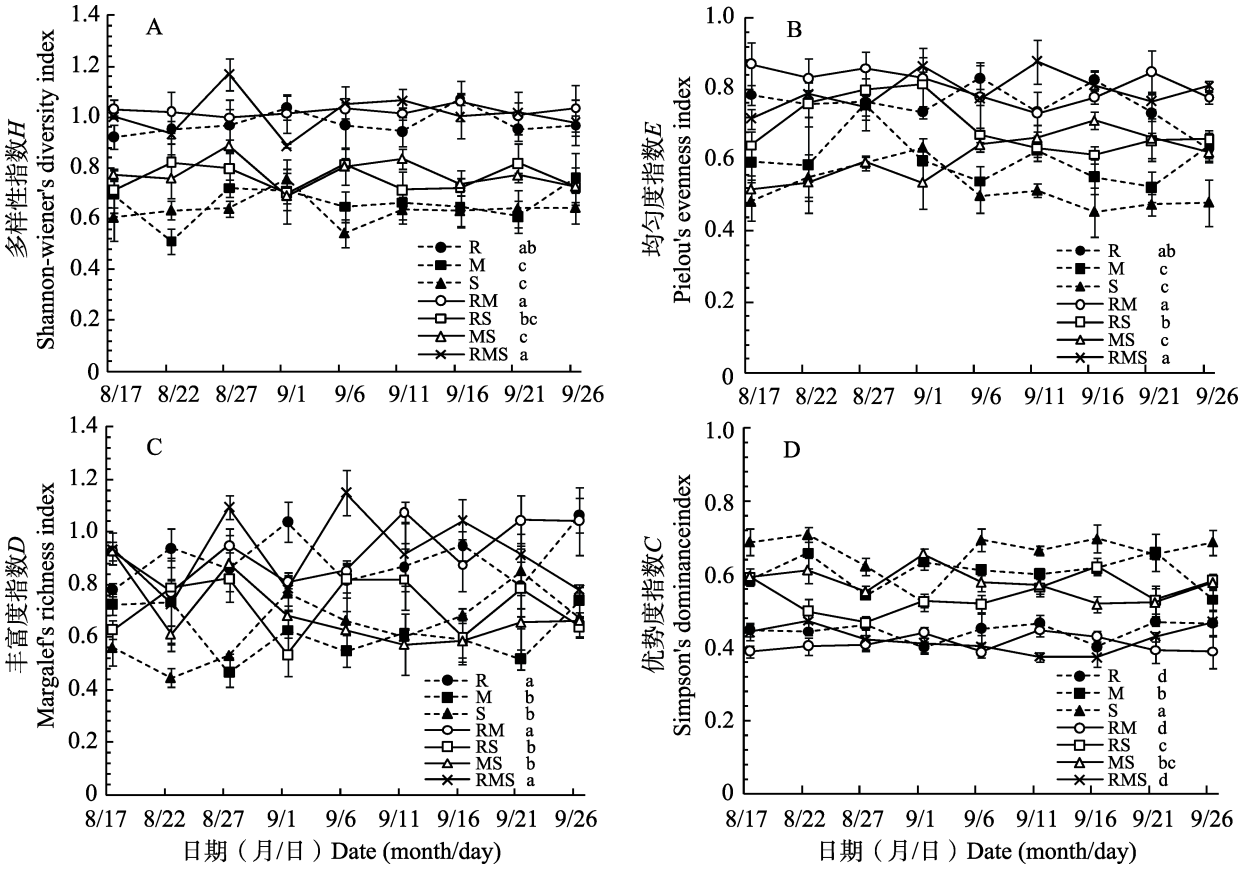

图 3　高抗（*Lamar*；R）、中抗（*ZD35*；M）和高感虫（*JLNMH*；S）大豆不同播种模式下昆虫群落多样性指数 *H*（A）、均匀度指数 *E*（B）、丰富度指数 *D*（C）和优势度指数 *C*（D）动态

Fig. 3　Value dynamics of community indexes of diversity *H* (A), evenness *E* (B), richness *D* (C) , dominance *C* (D) of insect community of different seeding types with high (*Lamar*; R) , middle resistant (*ZD35*; M) and high susceptible (*JLNMH*; S) cultivars

2.3　高抗、中抗和高感虫大豆混播下大豆产量差异

图 4（A）所示，不同播种处理下大豆百株籽粒重依次为:RM 和 RMS>R>RS>MS 和 S>M；其中，RM 和 RMS 混播下大豆百株籽粒重显著高于其它播种处理（$P<0.05$），R 单作下大豆百株籽粒重显著高于 MS 混播以及 M 和 S 单作（$P<0.05$）；S 单作与 MS 和 RS 混播及 M 单作均无显著差异（$P>0.05$）。可见，RM 和 RMS 混播有利于提高大豆百株籽粒重，对提高大豆产量有利。

图 4（B）显示，RM 和 RMS 混播下大豆千

粒重最高，显著高于 M 和 S 单作，以及 RS 混播（$P<0.05$）；R 单作，以及 MS 和 RM 混播下大豆千粒重适中，与其它播种处理间差异均不显著（$P>0.05$）。可见，RM 和 RMS 混播有利于提高大豆千粒重，对大豆品质提高有利。

3 结论与讨论

很多生态学专家和昆虫学专家认为，通过合理的栽培措施和耕作制度能有效保护和强化农田生物多样性，恢复和重建农田生态系统平衡，进而有利于农业害虫的综合治理和生态控制（尤民生等，2004）。生物多样性是生物及其与环境形成的生态复合体，以及与此相关的各种生态过程的总和，通过增加各种生物间相生相克的化学感应作用，可最大限度地发挥生态技术调控作用。多样性种植主要是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）。目前，利用生物多样性控制病虫害已在小麦、烟草和水稻上取得了一定的成果（吴美荣等，2002；邹运鼎等；2002；胡子宜等，2005；毛建辉等，2006；Li *et al.*，2018，2019），如 Li 等（2018，2019）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栽培，同时还减少了杀虫剂等化学农药的使用。

至 20 世纪末，仅中国东北地区就有大约 600 个大豆品种得到应用和推广种植（Jin *et al.*，2010）。据中国农业科学院作物所提供的数据显示，我国大豆种质资源有 5 281 种（李福山，1990）。有研究证明，大豆蚜种群在适应抗虫品种上有很高的可塑性，这种可塑性使之具有很高的潜力去适应生产上推广的抗虫大豆品种（戴长春，2005）。还有一些害虫可以通过改变自身的消化蛋白酶等来适应作物相应的蛋白酶抑制剂等（潘鹏亮，2016）。本研究选取高抗（*Lamar*；R）、中抗（*ZD-35*；M）和高感虫（*JLNMH*；S）大豆品种，开展不同抗性品种大豆混播试验，以明确混播对大豆田间主要害虫种群发生动态及昆虫群落多样性的影响，并评估混播对大豆产量的影响，以期明确最优的控害保产的高抗、中抗和高感虫大豆种子混播模式，并实现大豆生产及其害虫生态调控。

3.1 高抗、中抗和高感虫大豆单作模式下主要害虫发生和昆虫多样性差异

高感品种（*JLNMH*；S）单作处理无论在主要害虫发生数量上，还是昆虫多样性指标（*H*、*D* 和 *E*）方面，均显著低于高抗（*Lamar*R）和中抗虫

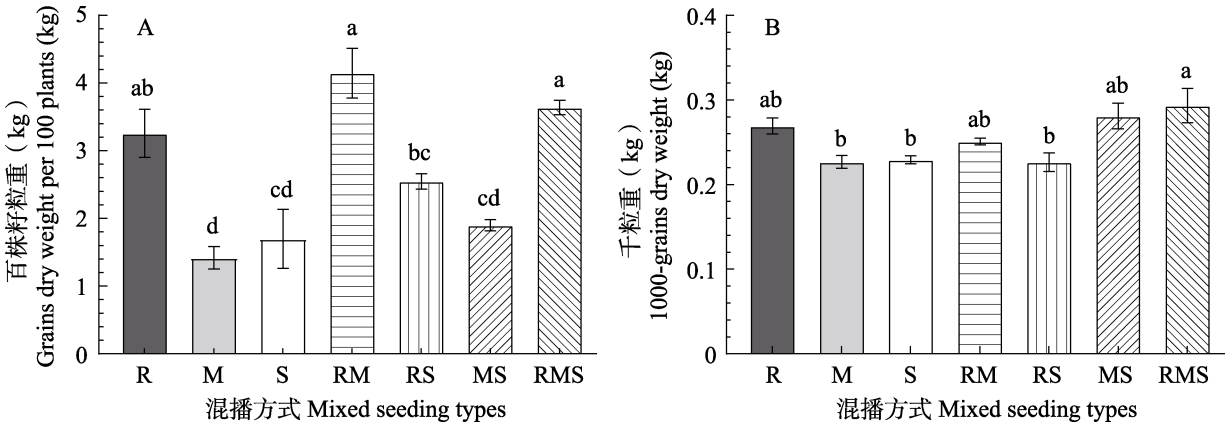

图 4 高抗（*Lamar*；R）、中抗（*ZD35*；M）和高感虫（*JLNMH*；S）大豆不同播种模式下大豆百株籽粒重（A）和千粒重（B）

Fig. 4 Grains dry weight per 100 plants (A) , 1000-grains dry weight (B) of soybean plants in different seeding types with high (*Lamar*; R), middle resistant (*ZD35*; M) 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 水平上的差异显著性。
Histograms with different lowercase letters indicate significantly different among different seeding types of soybean by the LSD test at 0.05 level.

（*ZD-35*；M）品种单作。由于高感虫品种上主要害虫种群发生量大，导致昆虫群落群落优势度指数提高，进而对昆虫群落多样性和稳定性不利。另一方面，由于高抗虫品种（*Lamar*；R）具有较好的对斜纹夜蛾的抗生性（王慧，2011），单作下主要害虫斜纹夜蛾种群发生量少，显著低于其它播种模式处理。且昆虫群落多样性（*H*）、均匀度（*E*）和丰富度（*D*）都在较高水平上。而中等抗虫品种（*ZD-35*；M）单作处理的害虫数量和昆虫群落多样性指数（*H*）、均匀度（*E*）、丰富度（*D*）和优势度（*C*）均处于 R 单作和 S 单作处理之间。可见，3 种抗性大豆品种单作下主要害虫种群发生大小依次为：R 单作<M 单作<S 单作；而昆虫群落多样性大小依次为：R 单作>M 单作>S 单作。

3.2　高抗、中抗与高感虫大豆不同混播模式下害虫发生和昆虫多样性差异

在 RM、RS、MS、RMS 4 种混播模式下，斜纹夜蛾和筛豆龟蝽两种主要害虫种群发生量均显著小于高感虫品种（*JLNMH*；S）单作处理，表明在主要害虫种群控制方面，高抗（*Lamar*；R）、中抗（*ZD-35*；M）和高感虫（*JLNMH*；S）大豆品种混播模式都是有效的；其中，对斜纹夜蛾种群发生控制效果最好的是 RM 和 RMS 混播处理，对筛豆龟蝽种群发生控制效果最好的是 RM 混播处理。

对于昆虫群落多样性指数（*H*）和均匀度指数（*E*）而言，RM 和 RMS 混播处理下最高，两者均高于 R 单作模式，但差异不显著；可见，RM 和 RMS 混播有利于提高大豆田间昆虫群落多样性和均匀度，有利于提高昆虫群落稳定性。此外，MS 混播处理与 S 和 M 单作之间均无显著差异，RS 混播处理与 S 和 R 单作之间也无显著差异；可见，高感虫品种与中抗和高抗虫品种混播并未提高大豆田间昆虫群落多样性和均匀度。另一方面，对于昆虫群落丰富度指数（*D*）而言，RM 和 RMS 混播与 R 单作无显著差异，并显著大于其它播种模式。可见，RM 和 RMS 混播有利于提高大豆田间昆虫群落丰富度。此外，MS 混播处理与 S 和 M 单作均无显著差异，可见中抗和中感虫大豆品种混播并未提高田间昆虫群落多样性和均匀度；而 RS 混播处理下昆虫群落丰富度显著低于 R 单作，可见高感虫品种与高抗品种混播对大豆田间昆虫群落丰富度不利。对于昆虫群落优势度指数（*C*）而言，混播处理均显著低于 S 单作，且 RM 和 RMS 混播处理与 R 单作下昆虫群落优势度指数最低。由于优势度指数反应群落中优势种群占比重大小，推测混播（尤其是 RM 和 RMS）能减少昆虫群落中同种害虫的集中程度，对昆虫群落稳定性有利。

3.3　高抗、中抗与高感虫大豆混播对大豆产量的影响

混播下大豆百株籽粒重大都高于单作，如 RM 混播高于 R 和 M 单作，MS 混播高于 M 和 S 单作，RMS 混播高于 R、M 和 S 单作；而 RS 混播高于 S 单作但低于 R 单作，可能高抗品种 R 单作的高产量被混播的高感虫品种 S 所拉低。此外，RS 和 RM 混播下大豆千粒重均低于 R 单作处理，说明高抗品种与中抗和高感虫品种混播对大豆千粒重不利；MS 混播下大豆千粒重高于 M 和 S 单作，表明混播对中抗和高感虫大豆品种的千粒重有促进效果。由此可知，RM 和 RMS 混播，以及 MS 混播可提高大豆产量，而 RS 混播下大豆百株籽粒重低于 R 单作，略高于 S 单作，统计上与 R 和 S 单作均无显著差异，表明高抗与高感虫品种混播对大豆产量的促进效果不明显。对于大豆千粒重而言，RM 和 RMS 混播下大豆千粒重显著高于 M 和 S 单作以及 RS 混播处理；可见，RM 和 RMS 混播有利于提高大豆千粒重，对大豆品质提高有利。

综合来看，RMS 和 RM 混播具有较为丰富且均匀的昆虫群落，且昆虫群落多样性、均匀度和丰富度高，主要害虫种群发生量相对较少，且大豆百株籽粒重和千粒重等产量指标高，是最优的大豆混播种植模式。而 MS 和 RS 混播在 4 个混播处理中各方面表现一般，但 MS 混播下主要害虫发生明显低于 M 和 S 单作，大豆产量也高于 M 和 S 单作；而 RS 混播虽较 S 单作更为优秀，但却不如 R 单作，无论在主要害虫发生量还是昆虫群落多样性指标以及大豆产量上，均低

于 R 单作。MS 混播较为明显地体现了混播带来的昆虫多样性和大豆产量提高的效果，而高抗 R 与高感虫品种 S 差距过大，掩盖了混播的积极效果。此外，由于该试验的混播模式按照各组分占相同比例进行，如 RM 为 50% R 和 50% M，RS 为 50% R，50% S，MS 为 50% M 和 50% S，RMS 为 1/3 R、1/3 M 和 1/3 S，而参与混播的不同品种大豆所占比例高低对混播的影响并未涉及。Li 等（2018，2019）的研究显示，抗虫品种水稻与 5%-10%感虫品种水稻混播能有效降低靶标和非靶标害虫种群发生量，同时不影响水稻产量。因此，需要进一步探究高抗品种 R 与高感虫品种 S 最优的混播播比例，以实现最佳的控害和保产之目的。

参考文献 (References)

Brophy LS, Mundt CC, 1991. Influence of plant spatial patterns on disease dynamics, plant competition and grain yield in genetically diverse wheat populations. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 35(1): 1–12.

Chen AQ, 2013. Effects of intercropping patterns of corn and soybean and different fertilization rates on the growth of corn and soybean. *Agricultural Technology & Equipment*, (17): 64–66. [陈爱芹, 2013. 玉米与大豆间作模式和不同施肥量对玉米及大豆生长的影响. 农业技术与装备, (17): 64–66.]

Cui ZL, Gai JY, Ji DF, Ren ZJ, 1997. Investigation and analysis of soybean leaf-eating pests in Nanjing. *Soybean Science*, 16(1): 13–21. [崔章林, 盖钧镒, 吉东风, 任珍静, 1997. 南京地区大豆食叶性害虫种类调查与分析. 大豆科学, 16(1):13–21.]

Dai CC, 2005. *Aphis glycines* Matsumura population dynamics and control of natural enemies. Master dissertation. Harbin: Northeast Agricultural University. [戴长春, 2005. 大豆蚜(*Aphis glycines* Matsumura)种群动态及天敌控制作用研究. 硕士学位论文.哈尔滨: 东北农业大学.]

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.]

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

Hu ZY, Yi GH, Xie RH, Qin GQ, Tang BK, 2005. Preliminary report on the use of biodiversity to control biological disasters in tobacco fields. *China Plant Protection*, 25(8): 5–8. [胡子宜, 易光辉, 谢荣辉, 秦桂泉, 唐丙坤, 2005. 利用生物多样性调控烟田生物灾害的研究初报, 中国植保导刊, 25(8): 5–8.]

Jin J, Liu XB, Wang GH, Mi L, Shen ZB, Chen XL, Herbert SJ, 2010. Agronomic and physiological contributions to the yield improvement of soybean cultivars released from 1950 to 2006 in Northeast China. *Field Crops Research*, 115(1): 116–123.

Li FS, 1990. Catalog of Chinese Wild Soybean Resources. Institute of Crop Variety Resources, Chinese Academy of Agricultural Sciences. Beijing: Agricultural Press. 335. [李福山, 1990. 中国野生大豆资源目录. 中国农业科学院作物品种资源研究所. 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.]

Li Q, Zhang XM, 2018. Overview of the effects of plant diseases and insect pests on soybean yield in five major soybean producing countries. *Journal of Agriculture*, 8 (4): 23–27. [李琼, 张晓明, 2018. 病虫害对 5 个大豆主产国大豆产量影响的概述. 农学学报, 8(4): 23–27.]

Li XM, Liu CL, Liu XL, Wang KQ, Wang S, Xia JX, 2014. Aphid control fffect of soybean aphids on crop diversity. *Journal of Applied Entomology*, 51(2): 406–411. [李新民, 刘春来, 刘兴龙, 王克勤, 王爽, 夏吉星, 2014. 作物多样性对大豆蚜的控蚜效应. 应用昆虫学报, 51(2): 406–411.]

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.

Liang ZL, Liang Y, 1997. Correlation and selection of intercropping soybean yield and main economic characters. *Soybean Science*, 16(1): 55–60. [梁镇林, 梁颖, 1997. 间作大豆产量与主要经济性状的相关及选择. 大豆科学, 16 (1): 55–60.]

Lin LP, 2012. Research on forest species diversity in karst Guiyang city. Master dissertation. Hunan: Central South University of Forestry and Technology. [林丽平, 2012. 喀斯特贵阳市森林物

种多样性研究. 硕士学位论文. 湖南: 中南林业科技大学.]

Liu CM, Li CY, 2017. Effects of intercropping of maize with soybean and potato on senescence, yield and disease control of maize leaves. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 45 (6): 75–78. [刘朝茂, 李成云, 2017. 玉米与大豆、马铃薯间作对玉米叶片衰老、产量及病害控制的影响. 江苏农业科学, 45(6): 75–78.]

Luan HY, 2003. Biodiversity evaluation of *Quercus liaotungensis* in Dongling mountain based on radial basis function artificial neural network technology. Master dissertation. Harbin: Northeast Forestry University. [栾海燕, 2003. 基于径向基函数人工神经网络技术的东灵山辽东栎林生物多样性评价研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 东北林业大学.]

Mao JH, He ZQ, He SL, Peng HX, Chen XJ, 2006. Controlling cowpea diseases and pests using biodiversity. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 19(1): 72–76. [毛建辉, 何忠全, 何树林, 彭化贤, 陈晓娟, 2006. 利用生物多样性控制豇豆病虫害. 西南农业学报, 19(1): 72–76.]

Pan PL, 2016. Impact of increased crop diversity on pests and 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.]

Sun J, Liu DY, 2004. Application of diversity index in the study of marine phytoplankton. *Acta Oceanologica Sinica*, 26(1): 62–75. [孙军, 刘东艳, 2004. 多样性指数在海洋浮游植物研究中的应用. 海洋学报, 26(1): 62–75.]

Wang B, Zheng QH, Guo H, 2008. Evaluation method of forest species diversity conservation value in China based on Shannon-Wiener index. *Forest Research*, 21 (2): 268–274. [王兵, 郑秋红, 郭浩, 2008. 基于 Shannon-Wiener 指数的中国森林物种多样性保育价值评估方法.林业科学研究, 21 (2): 268–274.]

Wang H, 2011. Evaluation of soybean resistance to *Spodoptera litura*, QTL association analysis of related traits, and haplotype identification of GmAOSl gene. PhD 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 WL, Liu Y, Ji XL, Wang G, Zhou HB, 2008. Effect of intercropping garlic or rape on wheat populations and its main natural enemies population dynamics. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19 (6): 1331–1336. [王万磊, 刘勇, 纪祥龙, 王光, 周海波, 2008. 小麦间作大蒜或油菜对麦长管蚜及其主要天敌种群动态的影响. 应用生态学报, 19(6): 1331–1336.]

Wu MR, Zhang MY, Jin ZD, 2002. Experimental research on the control of main plant diseases and insect pests in the biodiversity of spring crops. *Yunnan Agricultural Science and Technology*, (5): 3–8. [吴美荣, 张美英, 晋宗道, 2002. 小春作物生物多样性一控制主要病虫害的试验研究. 云南农业科技, (5): 3–8.]

Wu MX, Han RJ, Wang SY, Jiang P, Zhang QL, Xia LS, 2010. Promoting effect of intercropping on insect diversity in Chinese plum-tea or medical dogwood-tea or chestnut-tea intercrop plantations. *Chinese Bulletin of Entomology*, 47 (6): 1165–1169. [吴满霞, 韩仁甲, 汪升毅, 江平, 张启利, 夏良胜, 2010. 苦李山茱萸或板栗与茶间作增进昆虫多样性的效应. 昆虫知识, 47(6): 1165–1169.]

Xiao P, 2009. Risk analysis of *Spodoptera litura* resistance to indoxacarb and its biochemical mechanism. Master dissertation. Shandong: Shandong Agricultural University. [肖鹏, 2009. 斜纹夜蛾对茚虫威抗性风险分析及其抗性生化机理. 硕士学位论文. 山东: 山东农业大学.]

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: 66.

You MS, Liu YF, Hou YM, 2004. Farmland biodiversity and integrated pest management. *Acta Ecologica Sinica*, 4(1): l17–122. [尤民生, 刘雨芳, 侯有明, 2004. 农田生物多样性与害虫综合治理. 生态学报, 4(1): l17–122.]

Yu HH, 2014. Study on the effect of controlling rice insect pests by using biodiversity in rice fields. Master dissertation. Hainan: Hainan University. [俞欢慧, 2014. 利用稻田田埂生物多样性控制水稻虫害的效应研究. 硕士学位论文. 海南: 海南大学.]

Zhu YY, Chen H, Fan JH, Wang YY, Li Y, Chen JB, Fan JX, Yang SS, Hu LP, Leung H, Mew TW, Teng PS, Wang ZH, Mundt CC, 2000. Genetic diversity and disease control in rice. *Nature*, 406(6797): 718–722.

Zhu YY, Chen Hairu, Wang YY, Li ZS, Li Yan, Fan JH, Chen JB, Fan JX, Yang SS, Ma GL, Hu LP, Zou JY, Christopher CM, Borromeo E, Hei L, Mew TW, 2001. Diversifying variety for the control of rice blast in China. *Biodiversity*, 2(1): 10–14.

Zou YD, Yu QL, Geng JG, Ma F, Chen GC, 2002. Effects of wheat varieties on the biological diversity of natural enemies of wheat aphids. *Journal of Anhui Agricultural University*, 29 (4): 321–325. [邹运鼎, 孟庆雷, 耿继光, 马飞, 陈高潮, 2002. 小麦品种对麦蚜天敌群落生物多样性的影响. 安徽农业大学学报, 29(4): 321–325.]