功能植物的作用原理、方式及研究展望*

杨泉峰[1,2**] 欧阳芳[1,2] 门兴元[3] 戈 峰[1,2***]

（1. 中国科学院动物研究所，农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室，北京 100101；
2. 中国科学院大学生物互作卓越中心，北京 100049；3. 山东省农业科学院植物保护研所，济南 250100）

摘 要 通过种植蜜源植物、储蓄植物、栖境植物和诱集植物等以增强目标保护作物害虫天敌昆虫的生物控害功能，已成为害虫生态调控的一项重要途径。为此，本文从种植这些植物带来的生态系统服务与功能的角度，提出功能植物的概念，认为功能植物应为天敌和传粉昆虫提供“衣（传粉服务）、食（食物服务）、住（庇护服务）、行（转移服务）”的功能，而不能为目标害虫提供“衣（沾花点）、食（桥梁田）、住（庇护所）、行（扩散地）”作用，在发挥生物控害功能的同时，还可能带来诸如传粉、土壤涵养等其他生态系统功能；由此进一步总结了功能植物的作用原理、主要特征、作用方式及其与其他相关名词的联系与区别，指出未来功能植物发展的趋势，为充分利用功能植物开展害虫生态调控提供理论参考。

关键词 功能植物；控害功能；传粉功能；生态系统服务；生态系统功能

Functional plants: Current uses and future research

YANG Quan-Feng[1,2**] OUYANG Fang[1,2] MEN Xing-Yuan[3] GE Feng[1,2***]

(1. State Key Laboratory of Integrated Management of Pest and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. CAS Center for Excellence in Biotic Interactions, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Plant Protection, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China)

Abstract Many types of plants, including nectar-producing plants and those that provide habitat for predatory insects, are utilized in agricultural landscapes to enhance the biocontrol function of natural enemies of insect pests. The definition of such functional plants is, however, unclear as is their potential application in pest control. Furthermore, a review of the relevant literature indicates that other ecosystem functions provided by plants, such as water and soil conservation and pollination, are typically not considered when selecting plants for planting. This paper defines functional plants on the basis of the ecosystem services and functions they provide and summarizes the principles underlying the use of such plants in agricultural ecosystems. Directions for future research are suggested to promote the use of functional plants in ecological pest management.

Key words functional plant; biocontrol; pollination; ecosystem services; ecosystem function

近半个世纪以来，农田景观内生境的破碎化以及单一化的程度越来越高（Rand and Tscharntke, 2007），从而导致包括天敌昆虫在内的生物种类的数量减少（Kruess and Tscharntke, 1994），降低了生物防治功能（Thies and Tscharntke, 1999）。为此，保护性生物防治（Conservation biological control, CBC）就是拟通过改变天敌昆虫的生存环境去提高它们的存活率、繁殖率、寿命和行为等来增加它们的适合度，以减少对天敌不利的因素（比如减少化学农药的使用量）和增强对天敌的有用的因素（比如生境管理）两方面有利于生物防治。其中，基于保护和利用功能植物的生境管理（Habitat management）作为保护性生物防治的基石，就是

*资助项目 Supported projects：国家重点研发计划重点专项（2017YFD0200400）；国家自然科学基金面上项目（31572059）
**第一作者 First author，E-mail：yangquanfeng@ioz.ac.cn
***通讯作者 Corresponding author，E-mail：gef@ioz.ac.cn
收稿日期 Received：2019-12-25；接受日期 Accepted：2020-01-10

在农田景观中种植功能植物以提供对天敌昆虫有利的环境提高它们的适合度从而增强生物防治的作用（Landis *et al*., 2000）。自 2000 年以来已经成为了十分活跃的研究领域之一（Gurr *et al*., 2017）。

生境管理的方法一般是在农田景观中种植各种类型的植物，以提供天敌昆虫的食物、替代寄主或适宜居住的环境等从而提高生物防治的效果。常种植植物的类型有蜜源植物、储蓄植物、栖境植物、诱集植物等（陈学新等，2014），而一直以来大家对这些的植物的关注主要从实现生物控害功能角度、集中于提高天敌昆虫的适合度或（和）降低害虫的适合度。事实上，昆虫作为生态系统中的重要组成部分，对生物控制、传粉、物质分解和资源供给等生态系统功能的实现都起到非常重要的作用（欧阳芳等，2013；戈峰等，2014）。当在农田景观中种植功能植物抑制害虫的种群、增强害虫天敌种群以实现控害功能时，往往同时还可能发挥传粉作用等其他的生态系统服务功能（Gurr *et al*., 2017），并且即使发挥同一个功能时也可能是多种方式共同作用的结果（Landis *et al*., 2000）。显然，很有必要从功能植物种植所带来的生态系统功能的角度，提出功能植物的概念并总结功能植物的作用原理、主要特征、作用方式，展望未来发展的趋势，为科学合理利用功能植物开展害虫生态调控提供理论基础。

1 功能植物的定义

广义上来说，功能植物（Functional plant）就是指能在农林生态系统中发挥生态功能的一类植物，这些生态功能包括功能植物与生物互作带来的生物控害、传粉和物质分解等功能，还包括功能植物自身提供的水土保持、生物固氮、食物供给和杂草管理等生态系统功能。功能植物本质上是植物，可以是非作物，也可以是作物，当一种作物（如棉花周围种植的高粱）有助于另一种作物的生态功能（如控害或传粉）实现时，该种作物可认为是另一种作物的功能植物。

2 功能植物的作用原理

从生态系统服务与功能的角度，在农林生态系统中人工种植功能植物，其主要作用的原理如图 1 所示：以作物健康为中心，基于功能植物对“传粉昆虫-作物-害虫-天敌及其土壤环境”作用的关系，提升系统中天敌昆虫对害虫的控害功能，增加传粉昆虫对作物的传粉功能，直接抑制害虫的发生，同时涵养土壤促进土壤健康，从而提高作物的产量、质量并维持生物多样性，最大程度地发挥生态系统的服务功能（图 1）。

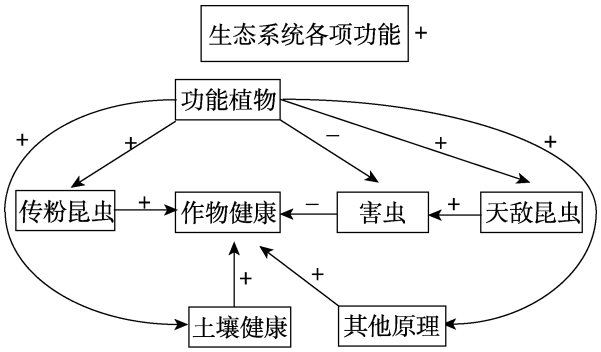

图 1 农田生态系统中种植功能植物的作用框架图
Fig. 1 The schematic diagram of the working principles of planting functional plants in agricultural ecosystem

+为促进作用，–为抑制作用。
+ represents the positive effect, – represents the negative effect.

图 1 还显示，害虫处于农田生态系统中的第二营养级(初级消费者)，其种群增长导致了农作物生长受害和产量损失，但同时也受到天敌因子的自然制约。因此，从害虫生态调控作用的机制来看，通过应用生态位原理种植功能植物以增加生物多样性，充分发挥自上而下(Top-down)源于天敌的控制作用、传粉作用以及自下而上(Bottom-up)源于作物自身的抗性 3 个方面，开展害虫的生态调控（陈学新等，2014；戈峰等，2014）。

3 功能植物的主要特征

从害虫生态调控的角度，功能植物就是指能涵养天敌和传粉昆虫而又不成为害虫食物链的植物，它通常具有为天敌昆虫或传粉昆虫提供

“衣（传粉服务）、食（食物服务）、住（庇护服务）、行（转移服务）”的功能，而不利于目标保护作物上害虫的“衣、食、住、行”的作用等特征（图 2）。

3.1　为天敌昆虫和传粉昆虫提供“衣、食、住、行”功能

功能植物有利于目标保护作物田害虫的天敌昆虫或传粉昆虫的“衣、食、住、行”四大特征（图 2 左边）。

（1）“衣”（传粉服务）：天敌昆虫或者传粉昆虫在开花的功能植物上活动时，昆虫的身体会携带上花粉，可以形象地看作是天敌昆虫或者传粉昆虫的“衣服”，发挥着传粉服务功能。

（2）“食”（食物服务）：功能植物上的植食性昆虫等猎物宿主、以及花粉、花蜜和花外蜜等可以作为天敌昆虫或者传粉昆虫的适合的“食物”，从而能够涵养天敌和传粉昆虫。

（3）“住”（庇护服务）：功能植物本身特定的物理结构或构成的小气候环境等可以作为天敌昆虫或者传粉昆虫适合的栖息和越夏越冬“住所”用以储存天敌和传粉昆虫。这些住所包括对作物进行农事管理时能作为天敌昆虫和传粉昆虫临时的避难所以及越夏或越冬的场所等。

（4）“行”（转移服务）：天敌昆虫或者传粉昆虫能从功能植物上“行”（转移扩散）到目标保护作物田，换言之，功能植物上涵养的天敌昆虫或传粉昆虫不能一直待在其上面，需要在作物田害虫发生前或者发生时能够转移到作物田起到生物控害或传粉的作用。

3.2　不利于害虫“衣、食、住、行”

另一方面，功能植物却不能为目标保护作物田害虫提供“衣（沾花点）、食（桥梁田）、住（庇护所）、行（扩散地）”四大特征（图 2 右边）：

（1）“衣”（沾花点），害虫不能取食功能植物上花粉，破坏功能植物的繁殖，也就不能作为害虫的“衣服”。

（2）“食”（桥梁田）：功能植物要么是目标保护作物上害虫不适合的寄主食物，要么是对害虫具有诱杀的作用，从而防止成为害虫转移为害的食物链和桥梁田。

（3）“住”（庇护所）：功能植物自身的结构或者小气候不适合作为害虫栖息的“住所”。

（4）“行”（扩散地）：功能植物不能成为目标害虫的扩散地，而是成为推-拉害虫的场所。

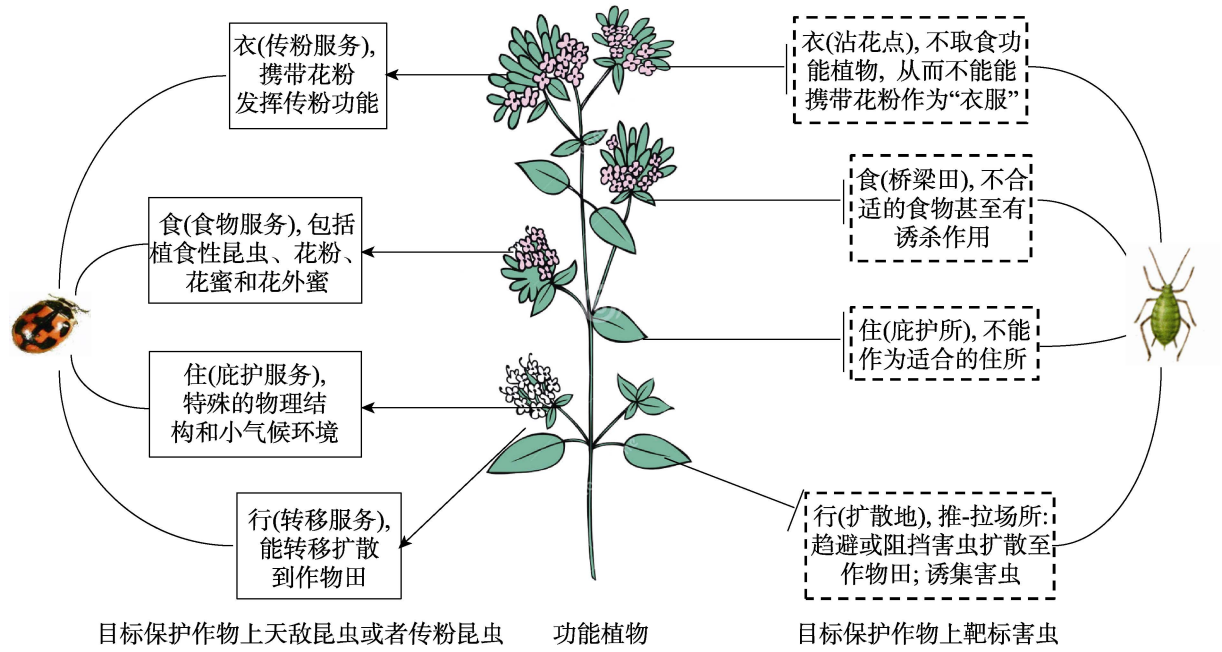

图 2　功能植物的主要特征

Fig. 2　The main characteristics of the functional plant

主要包括：功能植物能够产生某些特定的挥发性物质对害虫有明显的趋避作用或者功能植物对害虫具有物理上的阻挡作用，不利于害虫转移扩散到作物田；亦或功能植物对害虫具有比作物更强的诱集作用，能够可以大量诱集害虫到其上来，最后在诱集植物上将害虫集中防治；从而奠定了“推-拉”策略的基础。

4 功能植物的作用方式

4.1 功能植物对害虫的直接抑制作用

4.1.1 诱杀作用 诱杀功能植物能够诱集害虫产卵但后代不能完成发育从而起到诱杀作用。这类植物被用于多种作物的害虫管理。一个十分经典的案例在玉米田旁边种植诱杀功能植物狼尾草 *Pennisetum purpureum* 诱杀鳞翅类重要的钻蛀性害虫。该植物能释放己醛、(E)-2-己醛、(Z)-3-己酮-1-醇和(Z)-3-己酮-1-乙酸酯等挥发物吸引害虫成虫，重要的是，当在傍晚成虫寻找寄主植物时，这种植物释放挥发物的量达到最大值，由此吸引大量成虫在其上产卵但幼虫不能在其上生长发育，起到了很好地诱杀作用（Khan *et al*., 2000）。此外，在水稻田旁边种植诱杀功能植物香根草 *Vetiveria zizanioides*，能吸引二化螟 *Chilo suppressalis* 雌成虫在其上产卵，但是幼虫不能在其上完成生活史（郑许松等，2009；高广春等，2015）。

4.1.2 驱避作用 驱避功能植物能对害虫起到驱避作用。多年生植物糖蜜草 *Melinis minutiflora* 能产生挥发物对螟蛾科雌虫产生驱避作用，减少该害虫对玉米田的危害，是可种植在玉米田边缘的理想的驱避功能植物（Khan *et al*., 2000）。洋葱和胡萝卜混作时，洋葱释放的挥发物能够干扰胡萝卜蝇 *Psila rosae* 对胡萝卜的搜寻行为，不利于胡萝卜蝇对寄主胡萝卜的定位。作为胡萝卜地旁的驱避功能植物，显著减少了胡萝卜蝇的危害（Uvah *et al*.,1984）。

4.1.3 阻挡作用 屏障功能植物利用其高度优势将害虫尽可能地阻挡在目标作物田外，从而减少害虫或其携带的病原物对目标作物的危害（Perrin *et al*.,1978）。如 Fereres 等（2000）通过连续 4 年的研究表明用玉米和高粱可作为辣椒的屏障植物，其中两年的实验结果证实使用屏障植物可以显著的减少病毒的传播以及增加辣椒的产量。该实验也说明屏障植物若要起到作用可能需要在特定的环境里，可能和病原发生量和传播模式，在病原感染量发生最大时屏障植物的高度以及屏障植物和目标保护作物之间的竞争程度有关。

4.1.4 诱集作用 指功能植物能够比目标作物对害虫有着更强的吸引作用，可采取在该类功能植物上集中防治害虫的方法达到减少作物产量损失的目标（Hokkanen, 1991）。该类功能植物通过自身的某类视觉或者化学信息素对害虫产生强有力的刺激从而起到诱集害虫的作用（Cook *et al*., 2007）。诱集作用的功能植物的选择上可以是同一种作物更吸引害虫的品种或一种比作物更吸引害虫的其他植物（Hokkanen, 1991）。经典的功能植物起到诱集作用的案例是 1959 年 Stem 采用苜蓿作为棉花地旁边诱集草盲蝽的功能植物，致使棉花上的草盲蝽转移到苜蓿上从而减少对棉花的危害（Stem *et al*., 1959）。

4.2 功能植物对天敌昆虫的涵养作用

4.2.1 食物作用 功能植物上生长的植食性昆虫或者功能植物开花时其花粉、花蜜和花外蜜可以作为天敌昆虫的食物有利于天敌昆虫的生长、发育或者繁殖等。在我国北方小麦-玉米轮作田的田边缘种植一种名为蛇床 *Cnidium monnieri* 的一年生植物，早春时其上大量胡萝卜微管蚜 *Semiaphis heraclei* 发生，因此可以作为异色瓢虫 *Harmonia axyridis*、七星瓢虫 *Coccinella septempunctata* 等天敌昆虫的食物有助于天敌种群的扩繁进而转移到麦田（杨泉峰等，2018）。在北美的小麦田边缘种植一年生功能植物法色草 *Phacelia tanacetifolia*，在其花期时能够为食蚜蝇 *Syrphus* spp.成虫提供富含蛋白质的花粉作为食物，因此在麦田产生更多的食蚜蝇卵，待卵孵化为幼虫后，幼虫取食麦蚜显著地减少麦蚜的危害（Hickman *et al*., 1996）。除了功能植物上的植食性害虫、花粉、花蜜可以作为天敌的食物外，植物的花外蜜也可以作为天敌的食物。蚕豆的花

外蜜可作为一些姬蜂科（Hymenoptera: Ichneumonidae）寄生蜂的食物，从而有助于其越冬（Bugg *et al*., 1989）。

4.2.2　栖息地作用　这类功能植物是能为天敌昆虫提供合适的栖息场所（比如：作物收割后的庇护所、越冬场所等）或者适宜栖息的小气候环境。在南美，在柑橘园附近种植防风带托里桉 *Eucalyptus torelliana* 作为捕食性螨 *Amblyseius tutsi* 的庇护所，在喷洒农药后，捕食性螨能更容易在柑橘园重新定殖，从而减少柑橘园中植食性螨和蓟马的危害（Grout *et al*., 1995）。一项在日本茶园的研究表明，由于茶树的分层构造，上层是茶叶的采摘层，茶树下层可作为天敌昆虫的栖息场所，即使在施用农药的情况下天敌对害虫的控制作用还是很好（Kawai, 1997）。Orr 等（1997）报道在玉米地旁边种植黑麦草 *Lolium multiflorum* 能够降低玉米地地表温度从而更有利于甘蓝夜蛾赤眼蜂 *Trichogramma brassicae* 的存活。

4.2.3　引诱作用　指功能植物通过特定的视觉或者嗅觉刺激等将天敌昆虫引诱到其上来。糖蜜草 *Melinis minutiflora* 作为驱避功能植物驱避害虫的同时，又可作为玉米田旁边的引诱功能植物吸引寄生性天敌 *Cotesia sesamiae* 并提高其种群数量，从而提高寄生蜂对螟蛾科害虫的寄生率（Khan *et al*., 2000）

4.2.4　花的结构作用　一些显花植物由于其花的特殊结构适合天敌昆虫栖息从而对天敌有很好的保护作用。Patt 等（1997）筛选了一系列开花植物以确定哪些植物适合科罗拉多马铃薯甲虫 *Leptinotarsa decemlineata* 的捕食者。他们发现，莳萝 *Anethum graveolens* 和芫荽 *Coriandrum sativum* 的花与斑点瓢虫 *Coleomegilla maculata* 和普通草蛉 *Chrysoperla carnea* 的头部形态一致。田间研究同时表明这两种植物增加了捕食者的数量并增加了茄子 *Solanum melongena* 上马铃薯甲虫 *Leptinotarsa decemlineata* 卵的捕食率，降低了幼虫的存活率。

4.3　功能植物对传粉昆虫的促进作用

很多开花功能植物在提高天敌昆虫的适合度从而有助于其实现生物控害功能的同时，也可能同时有助于传粉昆虫实现传粉功能。开花植物对传粉昆虫的作用原理包括：为传粉昆虫提供食物，借助其花的独特结构和颜色等与不同类别的传粉昆虫相互作用。

4.3.1　食物作用　开花的功能植物其花粉和花蜜可以作为粉昆虫的食物从而有利于其种群增长。在我国北方小麦-玉米轮作田的边缘种植的一年生功能植物蛇床 *Cnidium monnieri*，在其盛花期时，其上除了有大量瓢虫类天敌昆虫外，其花粉还作为食蚜蝇等蝇类传粉昆虫的食物，促使其上维持了大量的传粉昆虫种群（杨泉峰等，2018）。

4.3.2　花的结构作用　花的大小、开口程度、蜜腺的部位等与传粉昆虫的体型、喙的长度之间关系密切（史刚荣，1996）。如同具有控害功能的勋章菊 *Gazania rigens* 具有较大的头状花序，色泽鲜艳的花瓣呈辐射状对称，在吸引访花昆虫时主要利于体型较大的昆虫访花时驻足（高婷婷等，2016）。

4.3.3　花的颜色作用　不同种传粉昆虫对开花植物花的颜色辨认能力不同,但大多数对这些颜色的辨认能力较强。例如，蜜蜂嗜好白、黄二色。蝶类善辨红色，此外，蓝色也常常是一些传粉蜂类的嗜好色（史刚荣，1996）。

4.4　功能植物对土壤的涵养作用

功能植物还不能破坏土壤的结构，或引起新的水土流失。通过种植覆盖植物的功能植物，可以改善农林生态系统的土壤肥力、渗透水分、水土保持，同时还可能为地表的一些天敌昆虫提供适合的生存栖息环境，从而有利于生物控害功能和土壤健康（Clark, 2007；Wang, 2012）。

5　功能植物与相关名词的联系与区别

从上述功能植物作用方式可以看出，功能植物具有涵养、栖境、食物、蜜源、诱集、趋避等多种作用。事实上，目前也有不少学者从某一具体的作用方式或特征，提出了一些与功能植物相

关的中文或者英文名词，如蜜源植物（Honey plant or Nectar source plant）（Heimpel and Jervis 2005）、储蓄或银行植物（Banker plant）（Pratt and Croft, 2000; Frank, 2010; 潘明真和刘同先，2019）、栖境植物（Habitat plant）（Landis *et al*., 2000, 尤民生等，2004）、诱集植物（Trap plant or Trap crop）（Shelton and Badenes-Perez, 2006; 吕建华和刘树生，2008）、指示植物（Indicator plant）（Parolin *et al*., 2012）、护卫植物（Guardian plant）（Frank and Skinner, 2007）、覆盖植物（Cover plant）（Clark, 2007）、伴生植物（Companion plant）（Parolin *et al*., 2012）、养虫植物（Insectary plant）（Parolin *et al*., 2012）、屏障植物（Barrier plant）（Fereres, 2000）、抗虫植物（Host-resistant plant）、杀虫植物（Insecticidal plant）（肖英方等, 2013）、相生植物（Mutual plant）（张润志和张广学,1998）等，还有诸如 SNAP 等英文名词（Gurr *et al*., 2017）。

显然，上面提出的这些名词与本文提出的功能植物（Functional plant），既有一定的联系，又有一定的区别。主要的联系是本质上这些植物都具有害虫生态调控或者生物控害的作用。主要的区别在于两点:（1）针对有益于发挥生物控害功能的角度，上面提出的名词大都是针对某一具体的作用方式或特征去定义的，比如蜜源植物是从食物特征去定义的，诱杀植物是从作物方式去定义的；而本文提出的功能植物更概括地从植物发挥生态系统功能的角度提出能发挥生物控害作用的植物一般情况下都可以称为功能植物；（2）功能植物的内涵相对上面的名词有更为广泛，上面提到的名词，典型的比如 SNAP，是指对天敌昆虫能提供栖息地（Shelter）、花蜜（Nectar）、替代猎物或寄主（Alternative prey or hosts）和花粉（Pollen）,多从对天敌昆虫起到支持作用的或生物控害相关的植物类群，而功能植物的概念强调种植这些植物不仅仅能够发挥生物控害功能，还可以同时发挥其他诸如传粉、土壤涵养等其他的生态系统功能。

6 展望

至今为止，在农田景观中种植功能植物作为环境友好的生防措施被应用于多种粮食作物和经济作物上重大害虫的控制，对减少农药的使用和提高粮食产量起到了重要的作用（Landis *et al*., 2000；Gurr *et al*.，2017）。而当前，农业种植集约化和城镇化程度越来越严重，导致农业生物多样性急剧下降，严重影响了其生态功能，尤其是与昆虫相关的生物控害与传粉功能已出现了明显退化（Lefcheck *et al*.，2015；Newbold *et al*.，2015），因此，发展种植功能植物提供生物控害和传粉等多种生态系统功能的技术迫在眉睫（戈峰等，2014）。然而由于目前劳动力成本的增加以及一套行之有效的对害虫控制的功能植物措施的形成需要投入较高的研究成本和周期等因素，在田间实际推广应用的时候可能会遇到一定的阻力。为了更好地开展功能植物的研究与应用，本文提出了在未来的研究与应用中可能应该注意的几个方面。

6.1 功能植物关键种原则

功能植物应用的基本原则之一是功能植物不能成为目标保护作物上重要害虫食物链的中间寄主或“桥梁田”，以免增加目标害虫的发生世代与种群密度，引起更大的危害。

6.2 功能植物选择原则

选用功能植物应该遵循“简单、有效、经济、可行”的原则。在植物的种植管理方面，选用种植管理轻简的植物，不需要耗费大量的劳动力进行管理。在植物的经济价值方面，选用具有重要经济价值能给农民增产增收的植物，比如一些名贵的中草药等。在植物适生性方面，选用适生性强、分布区域广的植物。在实际可行性方面，选用本土的植物物种，避免带来生物入侵的危害，且植物的种子不会扩散到农田，不会造成与作物竞争资源（杨泉峰等，2018）。

6.3 功能植物评价原则

强调定量化以及在更大的尺度去评价功能

植物的生物控害作用。在以往的研究中，有很多功能植物的研究表明功能植物能够提高生物控害功能，但是很少有定量化地研究作物与功能植物之间的种植面积比例与大小，这无疑为功能植物精准地开展生物控制带来了很大的问题。在未来，可开展更多地定量化地评价功能植物的控害作用的研究。为了大面积地应用功能植物开展害虫的生物控制，在未来需要在更大的尺度，比如区域或景观尺度去评价种植功能植物带来的控害作用。

6.4 功能植物综合作用原则

系统地评估农田景观中种植功能植物后带来的多种生态系统功能。过去的研究大都集中在评价功能植物种植后压制害虫带来的控害功能，而诸如固氮、改善土壤结构、渗透水分、水土保持和提高传粉昆虫的传粉等其他生态系统功能没有同时被考虑，而这也很有可能是未来发展的一个趋势（Gurr *et al*., 2017）。

参考文献 (References)

Bugg RL, Ellis RT, Carlson RW, 1989. Ichneumonidae (Hymenoptera) using extra floral nectar of faba bean (*Vicia faba* L.: Fabaceae) in Massachusetts. *Biological Agriculture and Horticulture*, 6(2): 107–114.

Chen XX, Liu YQ, Ren SX, Zhang F, Zhang WQ, Ge F, 2014. Plantmediated support system for natural enemies of insect pests. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(1): 1–12. [陈学新, 刘银泉, 任顺祥, 张帆, 张文庆, 戈峰, 2014. 害虫天敌的植物支持系统. 应用昆虫学报, 51(1): 1−12.]

Clark A, 2007. Managing Cover Crops Profitably, 3rd. Sustainable Agriculture Network: Beltsville, MD. 12−30.

Cook SM, Khan ZR, Pickett JA, 2007. The use of push-pull strategies in integrated pest management. *Annual Review of Entomology*, 52: 375–400.

Fereres A, 2000. Barrier crops as a cultural control measure of on-persistently transmitted aphid-borne viruses. *Virus Research*, 71(1/2): 221–231.

Frank CE, Skinner M, 2007. Guardian plant systems for greenhouse integrated pest management. Interim Report of Research Results at the University of Vermont Entomology Research Laboratory. https://lmprs.net/linkedFiles/NARR694EPPSummaryUVM07.pdf.

Frank SD, 2010. Biological control of arthropod pests using banker plant systems: Past progress and future directions. *Biological Control*, 52: 8–16.

Gao GC, Li J, Zheng XS, Xu HX, Yang YJ, Lu ZX, 2015. Effects of extracts from *Vetiveria zizanioides* on growth and development, activities of protective enzymes of *C. supperssalis*. *Bulletin of Science and Technology*, (5): 97–101. [高广春, 李军, 郑许松, 徐红星, 杨亚军, 田俊策, 吕仲贤, 2015. 香根草提取物对二化螟生长发育及体内保护酶活力的影响. 科技通报, (5): 97–101.]

Gao TT, Zheng SW, Wu YQ, Lu XP, 2016. Study on pollinators' species and their flower-visiting behavior in Gazania rigens. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, (3): 57–60. [高婷婷, 郑思唯, 吴阳清, 陆小平, 2016. 勋章菊的传粉昆虫种类及其访花行为的研究. 黑龙江农业科学, (3): 57–60.]

Ge F, Ouyang F, Zhao ZH, 2014. Ecological management of insects based on ecological services at a landscape scale. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(3): 597–605. [戈峰, 欧阳芳, 赵紫华, 2014. 基于服务功能的昆虫生态调控理论. 应用昆虫学报, 51(3): 597–605.]

Gurr GM, Wratten SD, Landis DA, You M, 2017. Habitat management to suppress pest populations: Progress and prospects. *Annual Review of Entomology*, 62: 91–109.

Grout TG, Stephen PR, 1995. New windbreak tree contributes to integrated pest management of citrus. *Citrus Journal*, 5(4): 26–27.

Heimpel GE, Jervis MA, 2005. Does Floral Nectar Improvebiological Control by Parasitoids. Plant-provided Food for Carnivorous Insects: A Protective Mutualism and Its Applications. New York: Cambridge University Press. 267–304.

Hickman JM, Wratten SD, 1996. Use of Phacelia tanacetifolia strips to enhance biological control of aphids by hoverfly larvae in cereal fields. *Journal of Economic Entomology*, 89(4): 832–840.

Hokkanen HMT, 1991. Trap cropping in pest management. *Annual Review of Entomology*, 36: 119–138.

Kawai A, 1997. Prospect for integrated pest management in tea cultivation in Japan. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 31(3): 213–217.

Khan ZR, Pickett JA, Van Den Berg J, Wadhams LJ, Woodcock CM, 2000. Exploiting chemical ecology and species diversity: stemborer and Striga control for maize and sorghum in Africa. *Pest Management Science*, 56(11): 957–962.

Kruess A, Tscharntke T, 1994. Habitat fragmentation, species loss, and biological-control. *Science*, 264(5165): 1581–1584.

Landis DA, Wratten SD, Gurr GM, 2000. Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture. *Annual Review of Entomology*, 45: 175–201.

Lefcheck JS, Byrnes JEK, Isbell F, Gamfeldt L, Griffin JN, Eisenhauer N, Hensel MJS, Hector A, Cardinale BJ, Duffy JE, 2015. Biodiversity enhances ecosystem multifunctionality across

trophic levels and habitats. *Nature Communications*, 6: 1–7.

Lu JH, Liu SS, 2008. Advances in application of trap cropping to IPM. *Plant Protection,* 34(2): 1–6. [吕建华, 刘树生, 2008. 诱虫作物在害虫治理中的应用. 植物保护, 34(2): 1–6.]

Newbold T, Hudson LN, Hill SLL, Contu S, Lysenko I, Senior RA, Boerger L, Bennett DJ, Choimes A, Collen B, Day J, De Palma A, Diaz S, Echeverria-Londono S, Edgar MJ, Feldman A, Garon M, Harrison MLK, Alhusseini T, Ingram DJ, Itescu Y, Kattge J, Kemp V, Kirkpatrick L, Kleyer M, Correia DLP, Martin CD, Meiri S, Novosolov M, Pan Y, Phillips HRP, Purves DW, Robinson A, Simpson J, Tuck SL, Weiher E, White HJ, Ewers RM, Mace GM, Scharlemann JPW, Purvis A, 2015. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*, 520(7545): 45–50.

Orr DB, Landis DA, Mutch DR, Manley GV, Stuby SA, King RL, 1997. Ground cover influence on the microclimate and *Trichogramma* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) augmentation in seed corn production. *Enviromental Entomology*, 26(2): 433–438.

Ouyang F, Zhao ZH, Ge F, 2013. Insect ecological servives. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(2): 305–310. [欧阳芳, 赵紫华, 戈峰, 2013. 昆虫的生态服务功能. 应用昆虫学报, 50(2): 305−310.]

Pan MZ, Liu TX, 2019. Banker-plant system for biological control of pests in greenhouse-grown crops. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(5): 917–926. [潘明真, 刘同先, 2019. 载体植物在温室作物害虫生物防治中的应用. 应用昆虫学报, 56(5): 917–926.]

Parolin P, Bresch C, Desneux N, Brun R, Bout A, Boll R, Poncet C, 2012. Secondary plants used in biological control: A review. *International Journal of Pest Management*, 58: 91–100.

Patt JM, Hamilton GC, Lashomb JH, 1997. Impact of strip-insectary intercropping with flowers on conservation biological control of the Colorado potato beetle. *Advances in Horticultural Science*, 11(4): 175–181.

Perrin RM, Phillips ML, 1978. Some effects of mixed cropping on the population dynamics of insect pests. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 24: 585–593.

Pratt P, Croft B, 2000. Banker plants: evaluation of release strategies for predatory mites. *Journal of Environmental Horticulture*, 18: 211–217.

Rand TA, Tscharntke T, 2007. Contrasting effects of natural habitat loss on generalist and specialist aphid natural enemies. *Oikos*, 116(8): 1353–1362.

Shelton A, Badenes-Perez F, 2006. Concepts and applications of trap cropping in pest management. *Annual Review of Entomology*, 51: 285–308.

Shi GR, 1996. Coevolution of entomophilous plants and pollinators. *Chinese Journal of Biology*, 1996(3): 46–47, 35. [史刚荣, 1996. 虫媒植物与传粉昆虫的协同进化. 生物学杂志, 1996(3): 46–47, 35.]

Stem VM, Smith RF, van den Bosch R, Hagen KS, 1959. The integration of chemical and biological control of the spotted alfalfa aphid. Part I. The integrated control concept. *Hilgardia*, 29(2): 81−101.

Thies C, Tscharntke T, 1999. Landscape structure and biological control in agroecosystems. *Science*, 285(5429): 893–895.

Uvah III, Coaker TH, 1984. Effect of mixed cropping on some insect pests of carrots and onions. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 36: 159–167.

Wang KH, 2012. Cover crops as insectary plants to enhance above and below ground beneficial organisms. http://www.ctahr.hawaii.edu/ustainag/news/articles/V11-Wang-insectary-covercrops. pdf.

Xiao YF, Mao RQ, Wan FH, 2013. New concept of biological control: bio-control plants used for management of arthropod pests. *Chinese Journal of Biological Control*, 29(1): 1–10. [肖英方, 毛润乾, 万方浩, 2013. 害虫生物防治新概念—生物防治植物及创新研究. 中国生物防治学报, 29(1): 1–10.]

Yang QF, Ouyang F, Men XY, Ge F, 2018. Discovery and utilization of a functional plant, rich in the natural enemies of insect pests, in northern China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(5): 942–947. [杨泉峰, 欧阳芳, 门兴元, 戈峰, 2018. 北方富含天敌的功能植物的发现与应用. 应用昆虫学报, 55(5): 942−947.]

Zheng XS, Xu HX, Chen GH, Wu JX, Lu ZX, 2009. Potential function of sudan grass and vetiver grass as trap crops for suppressing population of stripped stem borer, *Chilo suppressalis* in rice. *Chinese Journal of Biological Control*, 25(4): 299–303. [郑许松, 徐红星, 陈桂华, 吴降星, 吕仲贤, 2009. 苏丹草和香根草作为诱虫植物对稻田二化螟种群的抑制作用评估. 中国生物防治, 25(4): 299–303.]

You MS, Hou YM, Liu YF, Yang G, Li ZS, Cai HJ, 2004. Non-crop habitat manipulation and integrated pest management in agroecosystems. *Acta Entomologica Sinica*, 47(2): 260–268. [尤民生, 侯有明, 刘雨芳, 杨广, 李志胜, 蔡鸿娇, 2004. 农田非作物生境调控与害虫综合治理. 昆虫学报, 47(2): 260–268.]

Zhang RZ, Zhang GX, 1998. The importance of mutual plants in biological control of pests. *Chinese Journal of Biological Control*, 14(4): 176–180. [张润志, 张广学, 1998. 相生植物在生物防治中的作用. 中国生物防治, 14(4): 176–180.]