茶树害虫专栏

茶园生物多样性控害的研究进展*

李金玉[1, 2, 3, 4**] 尤民生[2, 3, 4] 尤士骏[2, 3, 4***]

（1. 福建省农业科学院茶叶研究所，福州 350002；2. 闽台作物有害生物生态防控国家重点实验室，福建农林大学应用生态研究所，福州 350002；3. 福建农林大学教育部害虫生态防控国际合作联合实验室，福州 350002；4. 福建农林大学农业部闽台作物有害生物综合治理重点实验室，福州 350002）

摘 要 当今茶叶安全生产面临害虫为害猖獗和农药污染的突出问题，害虫生态调控是实现农业可持续发展的重要途径之一，其核心是保护自然天敌资源，使其长期有效地调控害虫。为在茶园有效实施害虫生态管理策略，各茶区积极开展了茶树病虫害及其天敌资源的调查，在摸清茶园中天敌资源种类及其种群动态和自然控害能力的基础上，如何合理规划茶园生境布局和环境条件，以更好保护天敌资源和强化其对害虫的自然控制功能进行了积极的探索。本文对茶园生态系统生物多样性的特点进行分析，并对近年来在茶园利用生物多样性生态调控害虫方面的研究报道进行综述，以期为提升其保益控害的生态服务功能，更好地在茶园应用生态管理措施提供理论依据和实践指导。

关键词 茶园；生境管理；景观；生态系统服务；害虫生态调控

Progress in utilizing biodiversity to enhance pest control in tea plantations

LI Jin-Yu[1, 2, 3, 4**] YOU Min-Sheng[2, 3, 4] YOU Shi-Jun[2, 3, 4***]

(1. Tea Research Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350002, China; 2. State Key Laboratory of Ecological Pest Control for Fujian and Taiwan Crops, Institute of Applied Ecology, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 3. Joint International Research Laboratory of Ecological Pest Control, Ministry of Education, Fuzhou 350002, China; 4. Key Laboratory of Integrated Pest Management for Fujian-Taiwan Crops, Ministry of Agriculture, Fuzhou 350002, China)

Abstract Tea production currently faces the critical problems of pest damage and pesticide contamination, and therefore are in urgent need of sustainable pest management strategies. Ecologically-based pest management is one way of reducing pesticide use while maintaining high yields. This is achieved by constructing an ecological environment that provides important ecosystem services, including supporting natural enemy populations to enhance the biological control of pests. In order to effectively implement ecologically-based pest management in tea plantations, pest species and their natural enemies have been extensively identified, while the abundance and diversity of natural enemies, their population dynamics and their natural capability to control pests have been well documented. There has also been considerable research on how to manipulate habitats to better maintain and enhance populations of the natural enemies with the goal of achieving long-term sustainable regulation and control of pests in tea plantations. This paper reviews recent research advances on the use of biodiversity in tea plantations to regulate pests, in order to provide both a theoretical basis and practical guidance for improving ecosystem functions and services, and promote the application of ecologically-based pest management strategies in tea plantations.

Key words tea plantations; habitat management; landscape; ecosystem service; ecologically-based pest management

*资助项目 Supported projects：国家重点研发项目（2019YFD1002100）；福建省自然科学基金项目（2022J05080）；福建省属公益类科研院所基本科研专项（2022R1029007）；福建省农业科学院自由探索科技创新项目（ZYTS202208）；国家茶叶产业体系建设专项（CARS-19）

**第一作者 First author，E-mail：babyfish1985@163.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：sjyou@fafu.edu.cn

收稿日期 Received：2022-06-10；接受日期 Accepted：2022-06-30

茶树 *Camellia sinensis* 是世界上重要的经济作物之一。目前，全球有 60 多个产茶国和地区，茶叶年产量近 600 万吨，贸易量超过 200 万吨，饮茶人口超过 20 亿（Gunathilaka and Tularam，2016；顾阳等，2022）。在中国，茶树在农业经济中的地位举足轻重，2021 年茶园总面积达 326.41 万 hm^2，销售总额为 2 928.14 亿元（梅宇和梁晓，2022）。

害虫为害是影响茶叶生产的重要因素。在全球范围内，1 034 种节肢动物与茶树有关（Hazarika *et al.*，2009）。在中国，记录茶园害虫和害螨 808 种（Ye *et al.*，2014）。调查显示茶树的所有部分（包括叶、茎、根、花和种子）都被有害节肢动物取食，这些有害生物通常会造成 11%-55%的损失（Hazarika *et al.*，2009），在某些情况下产量甚至损失 100%（Muraleedharan and Chen，1997）。为保护茶作物免受这些有害生物侵害，化学农药被普遍使用，不但引发了日趋严重的害虫抗药性（Resistance）、害虫再猖獗（Resurgence）和次要害虫上升为主要有害生物的难题，而且带来了农药残留（Residue）、污染水资源和威胁人类健康、降低生物多样性等一系列的生态、环境和社会问题（陈宗懋，2022）。

如何降低农药残留，提高茶叶品质，实现茶叶的绿色和安全生产是现今茶叶生产亟需解决的重要问题。从农田生态系统整体功能出发的生态调控是目前最安全、有效和可持续的害虫管理措施之一，其核心思想是从农田生态系统中“作物-害虫-天敌及其周围环境”的相互作用关系出发，通过构建合理的生态技术体系（如生境管理）来调控、保护和利用农田生物多样性，使之朝着不利于害虫而有利于天敌及作物生长的方向发展，从而充分发挥农田生态系统保益控害的生态服务功能（戈峰，2020）。为在茶园有效实施害虫生态管理策略，各茶区积极开展了病虫害及其天敌资源的调查，在明确茶园中天敌资源种类及其地理分布、种群动态和自然控害能力的基础上，对于如何营造合适的茶园环境以强化天敌对害虫的自然控制功能进行了积极的探索。本文在分析茶园生态系统生物多样性特点的基础上，对近年来有关茶园利用生物多样性生态调控害虫方面的研究进行综述，包括在茶园开展复合种植，保留茶园周围自然或半自然生境，并在景观水平上进行合理规划与布局等，以期为提升其保益控害的生态服务功能，更好地在茶园应用生态管理措施提供理论依据和实践指导。

1　茶园生物多样性的特点

茶树是多年生常绿木本植物，一经种植可连续生产几十年甚至上百年。成龄茶园树冠茂密、郁闭，茶丛内昼夜温差和湿度差较小，小气候比较湿润、荫蔽和稳定（韩宝瑜，2000；Hazzrika *et al.*，2009）。因此，传统茶园生态环境条件较其他短期作物系统稳定，可以为昆虫等生物群落的栖息和繁衍提供相对稳定的小气候和食物供应，这使得传统茶园自然天敌资源多样而丰富。文献记录有数以百种的自然天敌存在于世界范围内的茶园生态系统中（Hazzrika *et al.*，2009）。自 20 世纪 60 年代以来，我国各茶区积极开展了茶园天敌资源的调查、鉴定和分类工作。迄今为止，已记录到茶园害虫天敌 1 100 多种，主要包括寄生性天敌（240 种）、捕食性天敌（600 多种）、病原病毒（80 多种）、病原真菌（40 多种）以及多种病原细菌等（张汉鹄和谭济才，2004；Ye *et al.*，2014）（图 1，表 1）。调查结果表明，通常每种茶园害虫都受到 1 种或多种天敌的抑制作用（Ye *et al.*，2014）。例如，茶小绿叶蝉 *Empoasca onukii* 捕食性天敌 46 种、寄生性天敌 12 种、病原性天敌 4 种（洪海林，1989），黑刺粉虱 *Aleurocanthus camelliae* 和茶尺蠖 *Ectropis obliqua* 的天敌分别有 80 和 50 多种（韩宝瑜，2000）。由此可见，茶园生态系统中天敌功能团的生物多样性可作为害虫重要的自然调控因子，在茶园害虫的生态控制中发挥着重要的作用。

传统茶园生态系统中的天敌昆虫具备多样性，强化了生物群落结构（包括有益生物和有害生物）的稳定性和复杂性（韩宝瑜，2000）。茶园在一定程度上类似于“单一物种森林”，种类繁多的有益生物与有害生物通过树内分布（Intratree distribution）或明确的分层（Stratification）/生态

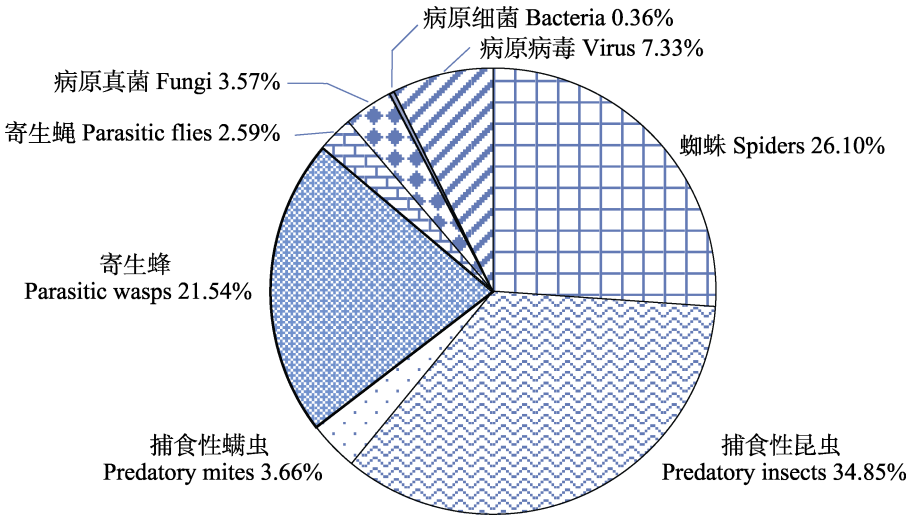

图 1　中国茶园自然天敌资源组成

Fig. 1　Group composition of natural enemies associated with pests in tea plantations of China

表 1　中国茶园植食者、寄生者和捕食者所在目及其科的数量和种类数量情况（改自 Ye *et al*., 2014）

Table 1　List of orders of pests, parasitoid, and predator as well as their family and species number in tea plantations of China (modified from Ye *et al*., 2014)

纲/目 Class/Order	科数 Family number			种类数 Species number			种类数占比（%） Species proportion (%)		
	植食者 Pests	寄生者 Parasitoids	捕食者 Predators	植食者 Pests	寄生者 Parasitoids	捕食者 Predators	植食者 Pests	寄生者 Parasitoids	捕食者 Predators
昆虫纲 Insecta									
弹尾目 Collembola	1	-	-	1	-	-	0.12	-	-
蜻蜓目 Odonata	-	-	6	-	-	24	-	-	3.31
蜚蠊目 Blattodea	2	-	-	3	-	-	0.37	-	-
等翅目 Isoptera	2	-	-	9	-	-	1.11	-	-
直翅目 Orthoptera	5	-	2	48	-	11	5.94	-	1.52
螳螂目 Mantodea	-	-	1	-	-	9	-	-	1.24
革翅目 Dermaptera	-	-	3	-	-	10	-	-	1.38
等翅目 Embiodea	1	-	-	1	-	-	0.12	-	-
啮虫目 Corrodentia	2	-	-	4	-	-	0.50	-	-
缨翅目 Thysanoptera	2	-	1	22	-	1	2.72	-	0.14
半翅目 Hemiptera	38	-	8	284	-	66	35.15	-	9.09
脉翅目 Neuroptera	-	-	7	-	-	26	-	-	3.58
鞘翅目 Coleoptera	14	-	7	135	-	176	16.71	-	24.24
捻翅目 Strepsiptera	-	1	-	-	1	-	-	0.37	-
双翅目 Diptera	4	1	4	7	29	38	0.87	10.70	5.23
鳞翅目 Lepidoptera	29	-	-	273	-	-	33.79	-	-
膜翅目 Hymenoptera	4	24	6	4	241	29	0.50	88.93	3.99
蛛形纲 Arachnida									
蜱螨目 Acarina	5	-	7	17	-	41	2.10	-	5.65
蜘蛛目 Araneida	-	-	26	-	-	295	-	-	40.63
合计 Total	109	26	78	808	271	726	100	100	100

-代表没有数据。

- represents no data.

位（Ecological niche）共存于茶园中，组成复杂的食物链和关系网络（Hazzrika *et al.*，2009）。大量研究表明茶树害虫的种群密度及其时空变化规律受到自然天敌种群密度和变化规律的影响（张书平等，2019；孙佳照等，2021）。相应地，茶园天敌种群则常对茶树害虫种群变化表现出强烈的跟随效应。例如，茶园天敌和害虫的种类及数量常常随着季节、空间变化而发生同步变化（刘爱国等，2020；宋学雨等，2020）。可见，茶园天敌功能团与植食性害虫关系密切，它们在时间上配合、在数量上相互调节，彼此间相互制约、相互依存，在一般情况下可以保持相对稳定的动态平衡（即自然平衡），这说明茶园天敌对害虫通常具有持续的自然控制潜能。

然而，茶园生态系统的稳定现象是相对的，毕竟茶园生态系统是一种农田生态系统。众所周知，农田生态系统是人类以农作物为核心对自然生态系统进行改造而建立起来的特殊生态系统，其特点是被人类不断地施加生产活动的影响和干扰以朝着有利于农作物生产及提高产量的方向发展（尤民生等，2004；Raven and Wagner，2021）。人类从事的农业生产实践，如栽培措施、耕作制度及病虫害管理等，都会直接或间接地影响着农田动植物群落的结构、动态和多样性（Bakker *et al.*，2022；Lu *et al.*，2022）。人类为了满足自身的需要，通常选择大面积种植单一品种的作物，人为地排除其他植物种类的竞争以提高作物的产量，这使得农田中植被的种类组成及结构趋于单纯、植物群落的生物多样性和生境多样性降低（Raven and Wagner，2021；González *et al.*，2022）。农田植被和生境的单一化必然导致农田其他生物群落的种类组成、结构及多样性也产生简单化的趋势，尤其对高级营养者（如以植食者为食的捕食者或以植食者为寄主的寄生者）的影响更加明显和重要（González *et al.*，2022；Penjor *et al.*，2022）。化学农药在毒杀害虫的同时，也杀伤天敌和中性昆虫功能团，结果也导致生物种群的组成、群落的结构和多样性遭到破坏（Bakker *et al.*，2022；Krimmer *et al.*，2022）。生物群落结构的简单化和多样性的降低必然导致农田生态系统的稳定性下降、内部的自我调节功能逐步降低，从而引起害虫再猖獗、次要害虫上升为主要有害生物的难题（Rusch *et al.*，2016）。在现代茶园生态系统中，随着茶树种植面积的持续增加和集约化经营模式的大量实践，茶树栽培措施遭到了新的变革，茶树条植、密植和单一种植的推广，使茶园生态环境趋于简单化（李金玉等，2020）。与此同时，普遍大量使用的化学肥料和农药致使茶园生态平衡日益遭到破坏（陈宗懋，2022）。因此，尽管茶园天敌资源种类繁多、数量丰富，并且表现出对茶树害虫较强的自然控制能力，但在实际害虫控制过程中这些自然天敌因子多数情况下并没有得到有效的保护和充分的利用，传统茶园中群落原有的相互作用受到干扰，系统自我协调的功能遭到削弱，结果导致茶园生态系统的不稳定和害虫问题的更加恶化（陈宗懋，2022）。显而易见，要使丰富的茶园自然天敌资源得到有效保护并促进其控害作用充分发挥，必须通过改善现有的茶园植被组成和生境结构，创造有利于其发生的环境条件。

2　茶园害虫的生态调控

多年来，增加多样性是否有利于提高生态系统的稳定性是生态学家们争论不休的一个问题。Holland 等（2016）对欧盟地区相关研究进行了综合分析，发现在作物生态系统中增加森林、草地等自然和半自然生境通常可以提高对作物害虫的控制。这可能由于增加生境、生物多样性对害虫产生了直接控制作用（Shelton and Badenes-Perez，2006；Dominik *et al.*，2018；Haan *et al.*，2020），如森林生境较高植被阻碍害虫的迁移或者非作物生境未能为害虫提供可获取的资源（补充食物和过渡栖境）而影响了其在作物田中的种群建立与繁衍。但更主要是间接通过天敌来实现（Shields *et al.*，2019；Krimmer *et al.*，2022），即多样化的植被和生境通过为天敌类群提供食物资源、栖息场所和过渡环境等促进其种类和数量增长，从而提高对害虫的控制。例如，农田周围增加半自然生境比例，有助于提高对害虫的寄

生率，从而增加草莓产量（Grab *et al.*，2018）。植被和生境的增加还可能促进系统中中性昆虫的种群数量，从而影响捕食性天敌的物种数量和结构，进而强化对害虫种群的调控作用（陈李林等，2010）。因此，许多农业生态学家认为，受到人类干扰的农田生态系统可以通过重建植被和增加生境来强化生物多样性，从而提高作物系统的稳定性，恢复生物群落的动态平衡，促进保育控害的生态服务功能。

在现代单一化种植和集约化经营的茶园生态系统中，重建和营造多样化的植被和生境，被普遍认为可以为其丰富的天敌资源提供过渡转换寄主和栖息庇护所，也可以引诱天敌并为其补充种群发展繁衍所需的花粉和花蜜等食物，从而强化其对害虫的自然调控作用；与此同时，多样化植被和生境的引入也可能直接对害虫产生调控作用或者通过影响中性昆虫而影响害虫的发生（图 2）。大量研究也已证实，生态环境良好、植物多样性丰富、施药少及管理干扰强度低的茶园，天敌群落和昆虫总群落均表现出较高的多样性、丰富度和稳定性，害虫不容易暴发成灾（史凡等，2022）；而化学农药使用多、集约化经营和单一化种植的茶园天敌群落多样性和丰富度较低，害虫密度更大，容易暴发成灾（曹德杭等，2013）。由此，在茶园开展复合种植，保留茶园周围自然或半自然生境，并在景观水平上进行合理规划与布局，提高茶园生境和生物多样性，已成为茶园害虫持续控制的重要内容。事实上，相比于在其他一年生作物系统中的探索，在茶园中利用生物多样性调控害虫可能具有更明显和重要的实践意义。因为茶园生态系统的天敌资源复杂多样，它们对害虫种群表现出较强的自然调控能力，更重要的是作为多年生常绿木本作物，茶树容易构成相对稳定的生态系统，如果对茶园植被组成和生境结构进行合理化建设和维护，天敌群落建立的可能性比较大，可能有利于生态系统服务功能长期有效的发挥。

2.1 多样化种植模式

构建茶园植物合理科学的组配模式，采取多品种混栽，进行茶果、茶林和茶草的间套作，可以增加茶园植物多样性，增加茶园天敌的转换寄主、栖息场所和食物补充，促进天敌种群发展和昆虫群落的稳定性，形成复杂稳定的食物链和关系网，从而可以达到持续有效调控茶树有害生物发生的目的。

2.1.1 多品种茶树混栽 我国拥有丰富多样的茶树种质资源，茶树品种间的遗传物质不同，从而外观形状、色泽气味以及内部理化组成差异明显，以致不同品种的茶树供给节肢动物群落的营养组分和释放的引诱或趋避节肢动物群落的挥发性化合物也有很大区别，最终引起不同品种茶树上节肢动物群落的物种组成和结构的不同（韩宝瑜，2000）。因此，多品种茶树混栽较单一品种种植可以提高作物的遗传多样性，从而丰富茶园节肢动物的物种多样性和群落稳定性，促进保育控害的生态功能。例如，品种园中昆虫群落的多样性和稳定性被观察到要优于丰产茶园（韩宝瑜，2000），国家茶树资源圃中缨小蜂对茶小绿叶蝉卵的寄生率要高于普通单一品种的茶园（韩宝瑜等，2009）。

利用多品种混栽调控有害种群发生的研究在其他作物系统中有很多成功的案例（如水稻）（Zhu *et al.*，2000），但在茶园生态系统中的试验研究和实践应用目前鲜有报道。多品种混栽会在一定程度上影响田间农事操作、农产品收获和加工的便利性，这是在多种作物系统中普遍存在的一个问题。对于茶树而言，这种影响作用会更明显和重要，因为不同品种茶树的适采时期差别很大，适制茶类及其相关加工技术也有很大不同。因此，多品种茶树混栽模式的选择是非常重要的，需要考虑对天敌数量及其控制效能的促进作用，并兼顾对茶叶采摘和加工便利性的影响。这些作用只有通过对混栽模式的茶园生态系统进行全面的实验研究和田间调查来确定，可谓任重道远。

2.1.2 茶-果树/经济乔木 采用果树、经济乔木与茶树间套种的茶园，天敌群落与害虫群落的相关性比集约化茶园明显，其丰富的天敌资源表现出更强的自然控害能力。例如，当果树及药材

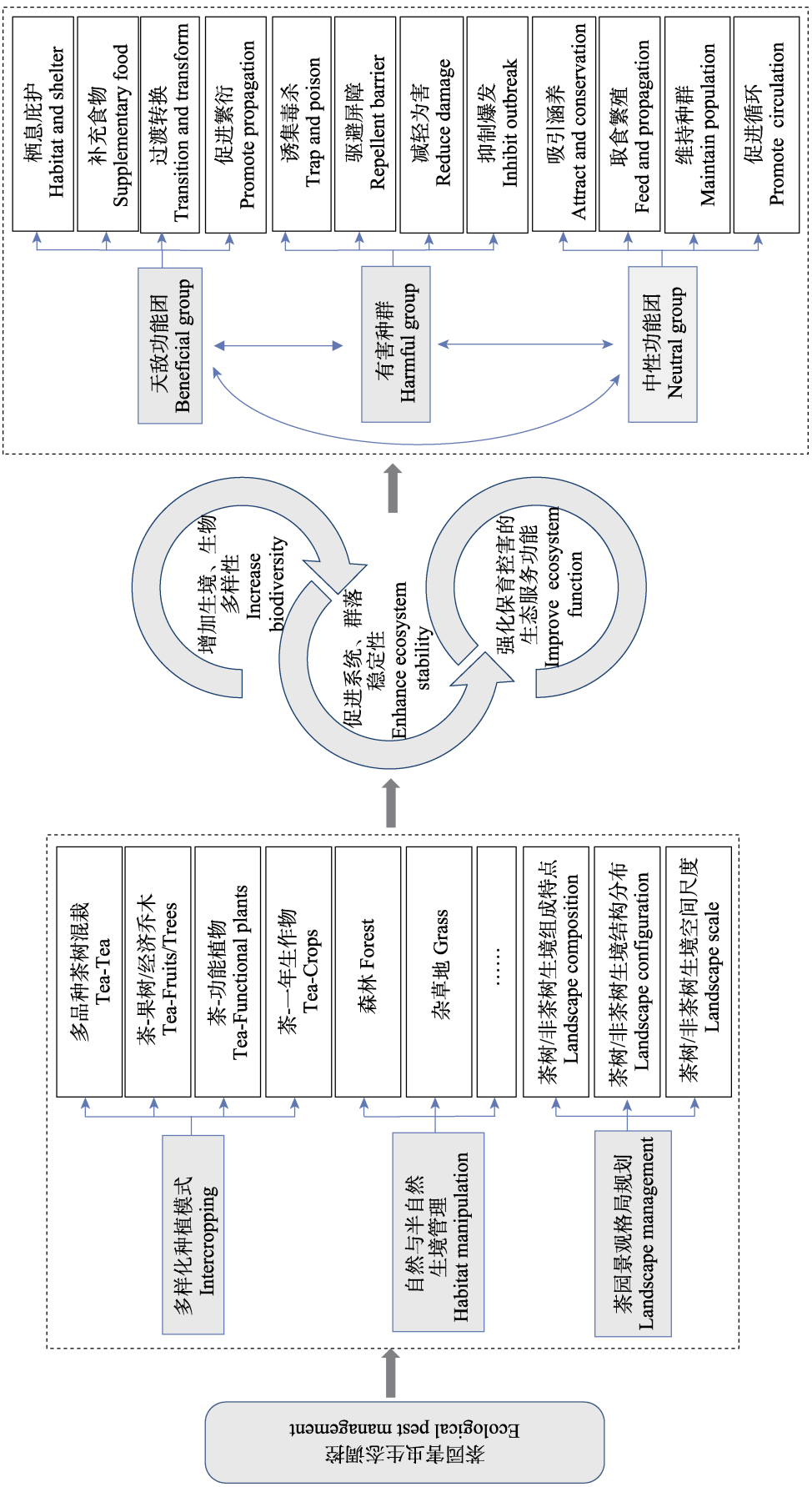

图 2　茶园生物多样性控害途径示意图

Fig. 2　The processes of utilizing biodiversity to enhance pest control in tea plantation

种植在茶园周围或与茶树间作及带作时，茶园天敌种类和数量较纯茶园分别增加 37.53%-55.41% 和 40.63%-62.72%，害虫数量下降 40%-80%（田永辉等，2002）。茶-枇杷 *Eriobotrya japonica*、茶-柑橘 *Citrus reticulata*、茶-吊瓜 *Trichosanthes kirilowii*、茶-芒果 *Mangifera indica* 及茶-橡胶树 *Hevea brasiliensis* 等间套作模式下茶小绿叶蝉发生数量显著少于单作茶园，且种群变化更稳定，推测可能与间作茶园中有更丰富的天敌资源有关（汪云刚等，2010；叶火香等，2016；顾俊荣等，2017）。在茶树行间间种落叶经济乔木，茶园捕食螨、蜘蛛、瓢虫、草蛉、猎蝽、步甲、虎甲和食蚜蝇等主要捕食性天敌的种群数量增加明显（董成森等，2007）。

尽管果树、经济乔木对茶园自然天敌的促进作用已被大量证实，但不同类型树种与茶树多样性种植产生的生态效应有差异。研究表明不同间套作模式下天敌资源的多样性和群落稳定性的大小关系为：茶-栗 *Castanea mollissima*>茶-梨 *Pyrus* spp.>茶-松 *Pinus* spp.>茶-杉木 *Cunninghamia lanceolata*>三行密植纯茶园>单行条植纯茶园，纯茶园中几乎分布有所有类型茶树害虫（韩宝瑜等，2001；彭萍等，2006）。10 种不同间作茶园（茶-柑橘、茶-枇杷、茶-栗 *Castanea mollissima*、茶-杨梅 *Myrica rubra*、茶-银杏 *Ginkgo biloba*、茶-桃 *Amygdalus persica*、茶-枣 *Ziziphus jujuba*、茶-腊梅 *Chimonanthus praecox*、茶-梨及茶-石榴 *Punica granatum*）的对比研究表明茶-桔和茶-栗间作茶园有更多的节肢动物物种数，茶-腊梅间作茶园节肢动物物种数、个体数和多样性指数均较小，推测腊梅叶片小、枝叶稀疏并且气味淡薄，对天敌资源的保育作用可能会弱于枝繁叶茂的橘及栗等果树树种（季小明等，2011）。

不同种类树种与茶树间套作会产生迥异的生态效应，以往在其他作物系统的研究表明不同种类作物间套作甚至有可能会增加有害种群的比例（欧阳芳和戈峰，2011；时陪建等，2014）。这可能是由于选择了拥有共同病虫害的作物进行间套作导致的，也有可能是因为间套作植物在高度和种植密度上的不合理搭配影响了生态环境的适宜性。一些果树和经济乔木上的害虫，如桃树上的蚜虫和叶蝉，松树上的松毛虫，在食物短缺的情况下，具有转移到茶树上取食危害的风险（陈宗懋，1979）。茶树喜散射光或漫射光，以 30%遮光度为宜（杨文等，2021）。在茶园间套种一些会过度遮阴的树种（如四季常绿的高大乔木）或采取过密的间套种模式可能会增加水分积累，影响透光透气，从而加重有害种群的发生。例如，茶-李树 *Prunus salicina*、茶-厚朴 *Magnolia officinalis* 间作的茶园，茶饼病和炭疽病等主要叶部病害发生加重（张洪等，2019）。与此同时，也有一些树种则可能因为较强的化感作用或水、肥竞争力，抑制茶树及其他植物生长，反而不利于茶园生物多样性的维持和群落结构的稳定及其保育控害生态功能的发挥。例如，将核桃 *Juglans regia*（田洪敏等，2019）或巨桉 *Eucalyptus grandis*（杨安洪和刘川丽，2012）作为间作树种在茶园大面积种植，会导致茶园生态环境破坏和茶叶品质下降，因为核桃和巨桉具有较强的水、肥竞争力，且会分泌大量对茶树有明显化感抑制作用的物质（如胡桃醌）。

综合上述可知，并不是所有的果树或经济乔木都适合与茶树进行间套种植。在实际生产中，科学地选择合适树种与茶树进行合理间作，才有可能收到明显有效的保益控害效应。这正如前人（Southwood and Way，1970；尤民生等，2004）所述，关键的问题并不是多样性本身，而是要营造“有作用的”（Functional）多样性。植物组成物种的选择和确定，必须对影响害虫数量、天敌种群及其控制效能的植物多样性的“质量”进行系统研究。

2.1.3 茶-功能植物 茶园间作功能植物（如绿肥作物、芳香植物和显花植物等）对天敌资源的保育作用也已被大量证实和实践。例如，常年种植长节耳草 *Hedyotis uncinella* 的复合茶园有更多样和稳定的节肢动物群落（陈亦根等，2004）。茶园间套作白车轴草 *Trifolium repens*、印度豇豆 *Vigna sinensis*、圆叶决明 *Chamaecrista rotundifolia*、平托花生 *Arachis pintoi*、铺地木蓝 *Indigofera hendecaphylla* 和罗顿豆

Lotononis bainesii 等绿肥植物可以取得良好的生态效应，在抑制杂草生长的同时，显著增加蜘蛛、寄生蜂、瓢虫和捕食螨等天敌的种类和种群数量，降低害虫发生率（宋同清等，2006；彭晚霞等，2008；陈李林等，2011，2019；Chen *et al.*，2011，2019；许丽艳，2013；李慧玲等，2016）。茶园间作罗勒 *Ocimum basilicum* 和紫苏 *Perilla frutescens* 等芳香植物和黄金菊 *Euryops pectinatus* 等显花植物的保育控害效应被观察到甚至要优于间作绿肥白车轴草的效应，推测这可能是因为芳香植物和显花植物可以大量开花，在给天敌提供转换寄主和庇护所的同时，也可以引诱天敌并为其种群发展提供所需的花粉及花蜜等食物补充（张正群等，2016；Zhang *et al.*，2017；张晓明等，2020）。

尽管大多数的实验研究都致力于在田间水平证明茶园间作功能植物保益控害的生态服务功能，也有一些研究旨在通过功能植物选择、间作安排和生境管理方面的探索以更进一步地在茶园运用“推-拉”策略。“推-拉”策略的基本原理是利用行为改变刺激物巧妙地影响害虫和天敌在田间的分布和密度，即通过在作物田中以间作或套作的方式栽种趋避植物将害虫驱离主栽作物，同时利用高效的引诱植物种植在作物田周围将害虫吸引集中后杀死（Cook *et al.*，2007）。为此，不少学者从化学生态学的角度检测了特定植物对茶园害虫及其天敌的引诱或趋避作用，目前以针对茶园主要害虫茶小绿叶蝉的研究居多。已有的研究表明茶园周围的常见杂草迷迭香 *Rosmarinus officinalis*（钮羽群等，2014）和大叶千斤拔 *Flemingia macrophylla*（Han *et al.*，2020）对茶小绿叶蝉具有引诱功能，小飞蓬 *Conyza canadensis*）（张辉等，2018）、胜红蓟 *Ageratum conyzoidae*（王奇志等，2017）和薇甘菊 *Mikania micrantha*（冯安伟等，2010）则有趋避作用，显花植物万寿菊 *Tagetes erecta*（钮羽群等，2014）在表现出对茶小绿叶蝉的趋避作用的同时，也显示出对其主要天敌缨小蜂种群的支持和促进作用，显花植物薰衣草 *Lavandula angustifolia* 的作用则仍然不一致，有显著驱避茶小绿叶蝉的研究报道（Han *et al.*，2020），也有同时引诱茶小绿叶蝉及其卵寄生蜂缨小蜂的文献纪录（Zhang *et al.*，2015）。在这些研究的基础上，近年来“推-拉”策略已开始在茶园运用。例如，基于万寿菊对叶蝉类害虫的驱避作用且对其天敌种群的促进作用、杀虫植物除虫菊 *Chrysanthemum cinerariaefolium* 优良的杀虫特性以及薰衣草对叶蝉及其卵寄生蜂的引诱效应；在浙江茶园设计了一种由万寿菊、除虫菊和薰衣草组成的栽种模式和配置格局（图 3），取得了良好的生态防控茶小绿叶蝉的效果，同时还显著提高了茶园的生物多样性、改善了茶园的生态环境，增加了茶园的

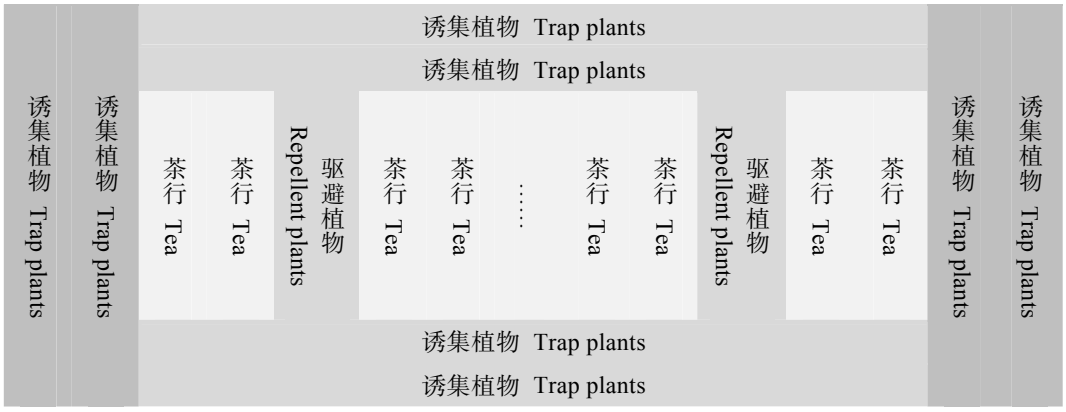

图 3　浙江茶园基于“推-拉”策略防治茶小绿叶蝉种植模式（范冬梅等，2021）

Fig. 3　The planting pattern designed based on “push-pull” strategy to regulate the tea green leafhopper in the tea plantations of Zhejiang (Fan *et al*., 2021)

趋避植物：万寿菊和除虫菊；诱集植物：薰衣草。

Repellent plants: *Tagetes erecta* and *Chrysanthemum cinerariaefolium*; Trap plants: *Lavandula angustifolia*.

观赏性（范冬梅等，2021）。

2.1.4 茶-一年生作物 茶园间作套种一年生作物也是一种生态和经济效益俱佳的多样化栽培方式。茶间作大豆 *Glycine max*（黎健龙等，2008）、间作赤豆 *Vigna angularis*（Zhang *et al.*，2021）、间作黄豆（张洪等，2019）、间作玉米（张洪等，2019）、套种马铃薯 *Solanum tuberosum*（陈永怀等，2005）及套种蔬菜（如辣椒 *Capsicum annuum*）（叶劲青和庄玲芳，2008）等高效益的种植模式能显著调控茶园生态环境，改良土壤养分状况，减轻虫害、病害和杂草的发生，进而促进茶树生长，增加茶叶产量，改善茶叶品质等。

类似于茶园间套作果树/经济乔木的情况，并不是所有的一年生作物都适合于在茶园间套种植，甚至一年生作物种类可能需要更谨慎合理的选择，因为一年生作物生长周期短，若间套种植的一年生作物与茶树有共同的病虫害，待一年生作物进入收获枯萎期，有害种群容易潜入茶园为害，造成损失。例如，绿盲蝽 *Apolygus lucorum* 近年来在一些茶区逐步上升为重要害虫之一，豆科作物是其喜食寄主，如在茶园间套作或其周边种植豆科作物，则容易吸引盲蝽种群，当秋季豆科作物收获枯萎后，被吸引来的盲蝽种群易迁入茶园产卵为害（郭华伟，2019）。幼龄茶园间作薯类作物，会造成茶苗根结线虫为害（李祥英，1983）。

2.2 自然和半自然生境的管理

茶园周边不同的生境类型对茶园生态系统中天敌的种群建立、栖息和繁衍影响深远，自然和半自然生境常为天敌提供繁殖、越冬和庇护场所，也提供转换寄主、猎物和花粉、花蜜等食物资源，是茶园生态系统中天敌种群建立的种库，能对茶园生态系统中的天敌种群起到很好的保育和促进作用。

在南方山区，将茶园建在植被丰富的山林之中是一种常见的种植模式，这样的林间茶园被认为可以更好地利用生物多样性保育天敌资源，以更好发挥其对害虫的自然调节作用。田间调查也已证实，相比于丰产茶园、两行密植茶园和母穗园等，林间茶园的天敌物种数丰富，茶小绿叶蝉等害虫发生虫口稳定（胡强，2009；叶火香等，2016）。黎健龙等（2014）通过调查发现小乔木生境茶园和相思树生境茶园四周半自然生境面积较多，植物丰富，气候和土壤湿度等得到改善，为天敌蜘蛛提供过渡生境、栖息场所和食物源，使得蜘蛛多样性得到增强，叶蝉也得到更有效调控。

草地也是茶园周围常见的自然生境类型，草地生境通常也被认为可能栖息着大量可作为生物防治资源的天敌昆虫（Tscharntke *et al.*，2012；Gurr *et al.*，2017）。但是，草地生境对茶园主要害虫茶小绿叶蝉种群也可能有促进作用。例如，崔林等（2017）发现茶-草茶园和林-茶-草茶园的叶蝉密度显著多于其他类型茶园，认为草可能是叶蝉重要的转主寄主，可以促进叶蝉种群繁衍。李金玉等（2020）发现茶园周围 1 000 m 范围内草地面积占比与茶小绿叶蝉种群的遗传多样性显著正相关，推测茶园周围草地生境对茶小绿叶蝉种群的建立、定殖、过渡和扩散过程可能有利。因此，茶园周围草地生境对茶小绿叶蝉甚至更多其它害虫种群有促进作用，但草地生境也可以保育天敌资源以更好发挥其控害作用，如何比较和平衡这两个方面的作用？目前这仍然是一个值得探讨的复杂问题。与此同时，受传统认知“草与茶争肥”的影响，杂草被认为是茶树养分的主要争夺者，每年大量人力与物力仍被投入于茶园草害的防控。由此可见，对于草地生境来说，如何安排其与茶园的空间分布格局是很关键的。草地生境在茶园中科学合理的分布区域，应该可以防止其生境中的害虫向茶园正向转移，最大程度避免与茶树竞争水肥，同时能涵养天敌种群并能使这些天敌种群有廊道进入茶园起到控害的作用。很显然，这样的分布模式可能需要将研究区域拓展至以景观为单元，通过景观生态学的原理及其空间显式模型的量化分析来确定，目前鲜有这方面的研究报道。

综上所述，自然生境对茶园天敌资源有促进作用，但不同自然生境类型的影响作用有差异。在茶园生态系统中保留更多可以滋养天敌而对害虫种群没有明显促进作用的自然和半自然生境，可以增加茶园生态环境的复杂性和多样性，

提高茶园自身的自然控害能力。

2.3　茶园景观格局规划

把茶园生态系统视为一个大的景观区域，包含了茶树生境和非茶树生境，茶树生境是茶树害虫及其天敌滋生繁衍的主要场所，而非茶树生境则是天敌寻求替代寄主或补充营养以及在空间上逃避不良环境条件的主要场所，其中贮存着丰富的天敌资源，对茶树生境中天敌群落的建立和发展具有明显的促进和调节作用。在区域农业景观中，天敌资源丰富度和自然控害效能与适宜生境的比例（Lu *et al.*，2022）、不同生境类型的多样性及其空间排列格局（Haan *et al.*，2020；González *et al.*，2022）有关。不同类型的生境斑块可以为不同天敌物种提供合适的生境，多样化的茶园景观镶嵌体能维持多样、丰富的天敌群落。大量的田间调查也已证实，周围生境结构相对复杂、植被丰富度较高的茶园表现出对害虫种群一定的控制能力，而周边生境管理单一的茶园，节肢动物群落多样性和稳定性差，害虫易大暴发和大发生，推测这样的过程跟天敌种群结构差异和小气候环境不同等有关（胡强，2009；崔林等，2017；黎健龙等，2017）。近年来，印度和斯里兰卡等其他茶叶主产国也逐渐认识到多样性的生境和植被在增加茶园自然天敌资源多样性、丰富度和自然控害作用方面的重要性（Gnanapragasam and Sivepalan，2004；Muraleeedharan，2004）。

空间尺度也是影响害虫和天敌的重要景观因子。研究发现茶园周围 1 000 m 半径的尺度范围可能包含了茶小绿叶蝉种群的生态领域（Ecological neighborhood），满足了其可以或需要利用的栖境尺度（李金玉等，2020），但茶园天敌种群对茶园景观格局的响应尺度尚无研究涉及。Thies 等（2011）认为，不同天敌类群表现出明显的“空间尺度效应”，扩散能力较弱的寄生性天敌对景观格局响应的空间尺度较扩散能力强的捕食性天敌小，并发现 500 - 1 000 m 的空间范围是农田景观格局设计（提高寄生蜂种群）所需的最优生态尺度。因此，理解不同空间尺度下的生境如何影响茶园害虫及其天敌的分布、丰富度和适合度，有助于在多尺度空间下对茶园生态系统中不同生境斑块和类型的空间进行组合排列，以更好保护天敌资源和促进其对害虫的自然控制作用。

2.4　减少天敌误伤

在积极创造有利于天敌栖息和繁殖的多样化生境的同时，在茶园实施合理、科学的管理措施是对天敌资源最大的保护。化学农药对天敌的种群组成和动态影响巨大。田间调查显示管理粗放、滥施化学农药的普通茶园的蜘蛛种数和个体数远少于不施用化学农药的有机茶园（王国华等，2004；韩宝瑜，2005a，2005b）。因此，充分利用茶树自身的耐害补偿能力，在害虫种群密度超过经济阈值时选择科学地使用低毒、低残留的农药，并避免在天敌种群高峰期使用化学农药，可以实现在有效控制茶树害虫的同时，减少化学农药使用的次数、范围和数量，从而降低对茶园生态系统中天敌种群的误伤作用，更好更有效地发挥茶园天敌的自然调控作用。此外，一些物理防控装备如黄板和杀虫灯也被证实对茶园天敌的负面作用明显。天敌友好型粘虫色板（边磊，2019）、天敌友好型 LED 杀虫灯（边磊等，2018，2019）的发展和应用，提高了对害虫的诱杀效果，同时显著降低了对天敌昆虫的诱杀量。

3　发展趋势和研究展望

当今世界农业的发展趋势正从过去仅仅重视产量向重视质量和可持续发展转变，顺应自然发展规律，利用农业生态系统自然调节机制的害虫生态调控，正成为解决害虫防治过程中对化学农药严重依赖问题的重要替代策略。传统茶园是一类远比其他农田稳定的生态系统，其天敌资源多样而丰富，其害虫常被记录为被 1 种或多种天敌生物捕食或寄生。因此，在自然天敌资源稳定的情况下，茶园内害虫的种群密度通常有望得到有效控制。与此同时，也正因为茶树容易构成相对稳定的生态系统，如果对茶园周边环境进行合理化建设和维护，可能有利于茶园天敌资源长期有效的保护和控害效能的持续发挥。

3.1 茶-其他作物搭配种植

茶树与其他作物搭配种植的模式前期得到了一定的探索和实践，但仍不深入、不系统。作物种类多样性和复杂性种植是研究者新的关注点。农业生产需要更多土地，相对于将农业用地转换为自然生境的方案，将茶树与其他作物搭配种植可以在支持茶园生态系统生物多样性及其生态服务功能的同时，实现经济效益的目标。

3.2 功能植物筛选及其与茶树的种植配置

选择合适的植物类型是利用生境管理生态调控害虫的关键。在了解不同植物类型对害虫及其天敌群落影响作用的基础上，筛选出特定的功能植物（如驱虫植物和蜜源植物等），并基于“推-拉”策略调控害虫的原理将其与茶树进行合理的间作、套种配置，可能可以起到更直接、明确和有效的保益控害功能。在茶园生态系统中，有关功能植物筛选刚起步。通过已有的作物系统成功案例，筛选功能植物一般应满足以下标准：（1）吸引天敌或者驱避害虫；（2）为天敌提供食物资源或营造有利于其生存的环境而害虫则无法取食或获得好处；（3）花期迎合天敌不同生长发育阶段的需求；（4）本地种，适应当地环境，便于就地取材，缩短适应期（Fiedler *et al.*，2008；戴漂漂等，2015）。荞麦 *Fagopyrum esculentum*、钟穗花 *Phacelia tanacetifolia*、香雪球 *Lobularia maritima* 和香菜 *Coriandrum sativum* 是目前在多种作物系统中应用最多的 4 种功能植物，它们对天敌具有很好的吸引作用，能够有效促进对害虫的控制作用，但它们在茶园生态系统中的功能以及更多合适的植物类型的选择及其与茶树合适的种植模式亟待研究确定。

3.3 自然和半自然生境管理

尽管增加自然和半自然生境有助于降低虫害的结论已被很多研究证实，但并不是所有案例均能实现这一目标，这可能与不同生境类型对作物害虫和天敌的影响作用有差异有关，选择保留恰当的自然生境可以起到更好的控害功能。在茶园生态系统中，周围常见的非作物生境通常有林地、休耕地、草地、田块边缘区和河流等。前期研究观察到了茶园周围草地对害虫种群的积极促进作用和林地对天敌种群的支持作用，但更多自然和半自然生境类型对不同害虫和天敌种群的影响作用及其应用前景，目前尚不明确。通过开展更多更深入的研究，了解不同生境类型对茶园害虫和天敌群落的种类、数量和扩散动态的影响作用，对于制定有效的茶园生境管理策略是十分必要的，这将成为新的研究热点。

3.4 茶园景观格局优化

就害虫综合治理而言，以景观为单元要比以同类作物的田块为单元更加合适。在大尺度上，景观生境组成多样性与天敌物种丰富度关系密切，增加作物系统生境类型及其周围植被的多样性能够提高天敌的种群数量，降低或抑制害虫的种群密度；不同生境类型的空间分布格局形成景观结构，直接影响害虫和天敌的扩散能力和死亡率；同时天敌和害虫对不同生境类型响应和依赖的空间尺度不同，不同的害虫和天敌受到生境影响的空间尺度也有差异。探索农业景观异质性对天敌资源和害虫种群的影响是害虫可持续治理的重要方向。在连续的时空范围内对农田景观进行构建和设计，从景观格局上提高天敌生存活动的连续性，阻断害虫存活的时空连续性，最大程度地抑制害虫种群是目前农田景观布局研究的核心技术。

近年来，农田景观管理措施在其他作物系统有比较成熟的研究和应用实践，但在茶园生态系统中的试验研究相对匮乏。事实上，生态观光茶园景观设计目前正在全国各地广泛地开展，但作为现代休闲农业的一种形式，设计大多从旅游资源开发的角度出发，很少会考虑茶园害虫生态调控的理念和需求。在茶园景观设计中，在规划观光性的同时，因地制宜地充分利用茶园的自然资源，优化茶园生态系统中不同生境类型的空间分布格局，改变非茶树生境的植被组成、镶嵌廊道和设置缓冲区等来阻断害虫种群在茶树生境中的建立、定殖和扩张，同时合理有效地为自然天敌资源提供营养物质和栖息场所，

强化天敌的自然控害能力对于指导茶树害虫生态防治十分重要。

参考文献 (References)

Bakker L, van der Werf W, Bianchi FJJA, 2022. Sweep netting samples, but not sticky trap samples, indicate beneficial arthropod abundance is negatively associated with landscape wide insecticide use. *Journal of Applied Ecology*, 59(4): 942–952.

Bian L, 2019. The development and application technology of the natural-enemy-friendly sticky traps for the tea green leafhopper. *China Tea*, 41(3): 39–42. [边磊, 2019. 茶小绿叶蝉天敌友好型黏虫色板的研发及应用技术. 中国茶叶, 41(3): 39–42.]

Bian L, Ccai XM, Chen ZM, 2019. Effects of light-emitting diode light traps with a suction fan on the population dynamics of the tea leafhopper *Empoasca onukii* (Hemiptera: Cicadellidae) within the effective distance. *Journal of Plant Protection*, 46(4): 902–909. [边磊, 蔡晓明, 陈宗懋, 2019. LED 风吸式杀虫灯对有效范围内茶小绿叶蝉虫口动态的影响. 植物保护学报, 46(4): 902–909.]

Bian L, Su L, Cai DX, 2018. The application techology of light-emitting diode light traps. *China Tea*, 40(2): 5–8. [边磊, 苏亮, 蔡顶晓, 2018. 天敌友好型 LED 杀虫灯应用技术. 中国茶叶, 40(2): 5–8.]

Cao DH, Zhu L, Gai XY, Zhang LX, 2013. Research advances on resources and function of natural enemies in tea garden. *Shandong Agricultural Sciences*, 45(12): 117–122. [曹德航, 朱磊, 盖晓亚, 张丽霞, 2013. 茶园天敌资源和功能研究进展. 山东农业科学, 45(12): 117–122.]

Chen LL, Chen P, Wang Y, Ma X, Lin JK, Zhao ZH, 2019. Cover crops mediate abundance and egg density of tea green leafhopper (Hemiptera: Cicadellidae) in a tea plantation. *Journal of Plant Protection*, 46(5): 989–996. [陈李林, 陈平, 王优, 马旭, 林金科, 赵紫华, 2019. 茶园间作功能植物对茶小绿叶蝉的调控作用. 植物保护学报, 46(5): 989–996.]

Chen LL, You MS, Chen SB, 2011. Effects of cover crops on spider communities in tea plantations. *Biological Control*, 59(3): 326–335.

Chen LL, Lin S, You MS, Chen SB, Vasseur L, Ye SC, 2011. Effects of cover crops on mite communities in tea plantations. *Biodiversity Science*, 19(3): 353–362. [陈李林, 林胜, 尤民生, 陈少波, Liette Vasseur, 叶树纯, 2011. 间作牧草对茶园螨类群落多样性的影响. 生物多样性, 19(3): 353–362.]

Chen LL, You MS, Chen SB, Wu JL, 2010. Structure and dynamics of Collembola population in tea plantations with different habitats. *Journal of Tea Science*, 30(4): 277–286. [陈李林, 尤民生, 陈少波, 吴佳霖, 2010. 不同生境茶园弹尾虫群落的结构与动态. 茶叶科学, 30(4): 277–286.]

Chen LL, Yuan P, Pozsgai G, Chen P, Zhu H, You MS, 2019. The impact of cover crops on the predatory mite *Anystis baccarum* (Acari: Anystidae) and the leafhopper pest *Empoasca onukii* (Hemiptera: Cicadellidae) in a tea plantation. *Pest Management Science*, 75(12): 3371–3380.

Chen YG, Xiong JJ, Huang MD, Gu DJ, 2004. Structure and diversity of insect assembly in complex tea orchard. *Journal of South China Agricultural University*, 25(1): 59–61. [陈亦根, 熊锦君, 黄明度, 古德就, 2004. 复合茶园昆虫类群多样性和稳定性研究. 华南农业大学学报, 25(1): 59–61.]

Chen YH, Yang SC, Wu Y, Chen ZB, 2005. Effect of interplanting potato in tea garden on soil physical and chemical properties and preliminary study on its economic benefits. *Tea Science Technology*, 2005(2): 16–18. [陈永怀, 杨尚灿, 吴艳, 陈仲斌, 2005. 茶园套种马铃薯对土壤理化性状影响及经济效益初探. 茶叶科学技术, 2005(2): 16–18.]

Chen ZM, 1979. The composition and succession of diseases and insect pests in tea plantation. *China Tea*, 1(1): 6−8. [陈宗懋, 1979. 茶园病虫区系的构成和演替. 中国茶叶, 1(1): 6−8.]

Chen ZM, 2022. Development and application of green pest control technology in tea garden. *China Tea*, 44(1): 1–6. [陈宗懋, 2022. 茶园有害生物绿色防控技术发展与应用. 中国茶叶, 44(1): 1–6.]

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

Cui L, Yu PF, Han SJ, Zhang JH, Han BY, 2017. Effects of tea plantation environment, cultivation and cultivar on the population density of tea green leafhopper. *Journal of Anhui Agricultural University*, 44(6): 963–967. [崔林, 俞鹏飞, 韩善捷, 张嘉荟, 韩宝瑜, 2017. 茶园环境和管理技术及茶树品种对假眼小绿叶蝉密度的影响. 安徽农业大学学报自然版, 44(6): 963–967.]

Dai PP, Zhang XZ, Xiao CZ, Zhang X, Yu ZR, Liu YH, 2015. Habitat management and plant configuration for biological pest control in agricultural landscapes. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 23(1): 9–19. [戴漂漂, 张旭珠, 肖晨子, 张鑫, 宇振荣, 刘云慧, 2015. 农业景观害虫控制生境管理及植物配置方法. 中国生态农业学报, 23(1): 9–19.]

Dominik C, Seppelt R, Horgan FG, Settele J, Václavík T, 2018. Landscape composition, configuration, and trophic interactions shape arthropod communities in rice agroecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 55(5): 2461–2472.

Dong CS, Xiao RL, Wang JR, Tang Y, 2007. Advantages and disadvantages of green tea production and primary ecological control techniques in the hilly regions of hunan. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 15(3): 133–137. [董成森, 肖润林, 王久荣, 汤宇, 2007. 湖南丘陵茶区绿茶生产优劣势及主要生态调控技术研究. 中国生态农业学报, 15(3): 133–137.]

Fan DM, Zhao ZM, Qiu QL, Wang YM, Wang XC, 2021. Research on the application of green pest prevention and control technology for ecological tea plantations in Zhejiang province. *Journal of Tea*, 47(2): 71–74. [范冬梅, 赵珠蒙, 邱勤丽, 王银茂, 王校常, 2021. 浙江省生态茶园绿色防控技术的应用研究. 茶叶, 47(2): 71–74.]

Feng AW, Zhang YP, Cen YJ, Liang GW, 2010. The control effect of ethanol extract of *Mikania micrantha* HBK on the natural population of *Empoasca vitis* (Göthe) and the influence on spiders. *Journal of Environmental Entomology*, 32(1): 54–59. [冯安伟, 章玉苹, 岑伊静, 梁广文, 2010. 薇甘菊乙醇提取物对假眼小绿叶蝉自然种群的控制作用及其对蜘蛛的影响. 环境昆虫学报, 32(1): 54–59.]

Fiedler AK, Landis DA, Wratten SD, 2008. Maximizing ecosystem services from conservation biological control: The role of habitat management. *Biological Control*, 45(2): 254–271.

Ge F, 2020. From 'comprehensive' to 'integrated' pest management. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(1): 10–19. [戈峰, 2020. 害虫管理: 从"综合"到"整合". 应用昆虫学报, 57(1): 10–19.]

Gnanapragasam NC, Sivepalan P, 2004. Eco-friendly management of tea plantations towards sustainability. *International Journal of Tea Science*, 3(3/4): 139–146.

González E, Bianchi FJJA, Eckerter PW, Pfaff V, Weiler S, Entling MH, 2022. Ecological requirements drive the variable responses of wheat pests and natural enemies to the landscape context. *Journal of Applied Ecology*, 59(2): 444–456.

Grab H, Danforth B, Poveda K, Loeb G, 2018. Landscape simplification reduces classical biological control and crop yield. *Ecological Applications*, 28(2): 348–355.

Gu JR, Dong MH, Li HY, Fan J, Yang DF, 2017. E*mpoasca vitis* Göthe: Population dynamics and green control techniques in intercropping tea garden. *Journal of Agriculture*, 7(6): 15–20. [顾俊荣, 董明辉, 李浩宇, 范君, 杨代凤, 2017. 间作茶园假眼小绿叶蝉种群动态与绿色防控技术研究. 农学学报, 7(6): 15–20.]

Gu Y, Liu J, Liu CMX, 2022. The mission of Chinese tea industry. Economic Daily. 2022-06-09. [顾阳, 刘瑾, 刘春沐阳, 2022. 中国茶业的使命担当. 经济日报. 2022-06-09.]

Gunathilaka RD, Tularam GA, 2016. The tea industry and a review of its price modelling in major tea producing countries. *Journal of Management and Strategy*, 7(1): 21–36.

Guo HW, 2019. Annoying guerrilla: *Apolygus lucorum*. *China Tea*, 41(2): 7–9. [郭华伟, 2019. 恼人的游击者——绿盲蝽. 中国茶叶, 41(2): 7–9.]

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.

Haan NL, Zhang Y, Landis DA, 2020. Predicting landscape configuration effects on agricultural pest suppression. *Trends in Ecology & Evolution*, 35(2): 175–186.

Han BY, 2000. Mechanism on the stability of insect community in tea garden. *Journal of Tea Science*, 20(1): 1–4. [韩宝瑜, 2000. 茶园昆虫群落稳定性机制. 茶叶科学, 20(1): 1–4.]

Han BY, 2005a. Differences in composition and dynamic of insect and mite community among three types of tea gardens. *Journal of Tea Science*, 25(4): 249–254. [韩宝瑜, 2005. 三类典型茶园昆虫和螨类群落组成和动态的差异. 茶叶科学, 25(4): 249–254.]

Han BY, 2005b. The composition and dynamic differences of spider community in organic, pollution-free and common tea gardens. *Acta Arachnologica Sinica*, 14(2): 104–107. [韩宝瑜, 2005. 有机、无公害和普通茶园蜘蛛群落组成及动态差异. 蛛形学报, 14(2): 104–107.]

Han BY, Jiang CJ, Zhuo ML, 2001. Components 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 BY, Lin JL, Zhou XG, Zhang JM, 2009. Investigation on morphology of eggs of tea green leafhoppers and morphology and parasitic percentages of mymarids parasitizing the leafhopper eggs. *Journal of Anhui Agricultural University*, 36(1): 13–17. [韩宝瑜, 林金丽, 周孝贵, 章金明, 2009. 假眼小绿叶蝉卵及卵寄生蜂缨小蜂形态观察和寄生率考评. 安徽农业大学学报, 36(1): 13–17.]

Han SJ, Wang MX, Wang YS, Wang YG, Cui L, Han BY, 2020. Exploiting push-pull strategy to combat the tea green leafhopper based on volatiles of *Lavandula angustifolia* and *Flemingia macrophylla*. *Journal of Intergrative Agriculture*, 19(1): 193–203.

Hazzrika LK, Bhuyan M, Hazarika BN, 2009. Insect pests of tea and their management. *Annual Review of Entomology*, 54: 267–286.

Holland JM, Bianchi FJ, Entling MH, Moonen AC, Smith BM, Jeanneret P, 2016. Structure, function and management of semi-natural habitats for conservation biological control: A review of

European studies. *Pest Management Science*, 72(9): 1638–1651.

Hong HL, 1989. The natural enemies of tea green leafhopper and their controlling effect. *China Tea*, 11(6): 14–15. [洪海林, 1989. 茶小绿叶蝉的天敌及其控制作用. 中国茶叶, 11(6): 14–15.]

Hu Q, 2009. Studies on effect of tea garden environments and cultivation measures on leafhoppers and araneids and control over leafhopper. Masters dissertation. Chongqing: Southwest University. [胡强, 2009. 茶园环境与管理方式对叶蝉和蜘蛛的调控及叶蝉的防治研究. 硕士毕业论文. 重庆: 西南大学.]

Ji XM, Wang MX, Jiang LL, Han BY, 2011. Similarity and disparity of arthropod community compositions among ten tea-intercropping plantations with different species of fruits in the Dongtingshan Mountains, Taihu Lake. *China Journal of Applied Entomology*, 48(5): 1471–1478. [季小明, 王梦馨, 江丽容, 韩宝瑜, 2011. 太湖洞庭山十种茶果间作茶园节肢动物群落组成的异同性. 应用昆虫学报, 48(5): 1471–1478.]

Krimmer E, Martin EA, Holzschuh A, Krauss J, Steffan-Dewenter I, 2022. Flower fields and pesticide use interactively shape pollen beetle infestation and parasitism in oilseed rape fields. *Journal of Applied Ecology*, 59(1): 263–273.

Li HL, Lin NQ, Guo JX, Wang SJ, Wang QS, Zeng MS, Wu GY, 2016. Effects on small green leafhopper and its natural enemy mymarid in tea plantations with intercropping of green manure plants. *Chinese Journal of Biological Control*, 32(1): 50–54. [李慧玲, 林乃铨, 郭剑雄, 王水金, 王庆森, 曾明森, 吴光远, 2016. 茶园间作绿肥对假眼小绿叶蝉及其天敌缨小蜂的影响. 中国生物防治学报, 32(1): 50–54.]

Li JL Tang JC Li XD, Tang H, Li HS, 2014. Effects of the surrounding habitat on the spider community and leafhopper population in tea plantations. *Acta Ecologica Sinica*, 34(9): 2216–2227. [黎健龙, 唐劲驰, 黎秀娣, 唐颢, 黎华寿, 2014. 周边不同生境条件对茶园蜘蛛群落及叶蝉种群时空结构的影响. 生态学报, 34(9): 2216–2227.]

Li JL, Tang H, Zhou B, Zhou B, Fang HC, 2017. Effects of varying habitat heterogeneity on the wolf spider (Araneae: Lycosidae) communities in tea plantations. *Ecological Science*, 36(3): 160–165. [黎健龙, 唐颢, 周波, 方华春, 2017. 茶园异质性栖境对狼蛛科蜘蛛群落结构的影响. 生态科学, 36(3): 160–165.]

Li JL, Tu PF, Chen N, Tang JC, Wang XR, Nian H, Liao H, Yan XL, 2008. Effects of tea intercropping with soybean. *Scientia Agricultura Sinica*, 41(7): 2040–2047. [黎健龙, 涂攀峰, 陈娜, 唐劲驰, 王秀荣, 年海, 廖红, 严小龙, 2008. 茶树与大豆间作效应分析. 中国农业科学, 41(7): 2040–2047.]

Li JY, Niu DS, Chen J, You SJ, You MS, 2020. Effects of landscape pattern around tea plantation on the population genetic structure of the tea green leafhopper, *Empoasca onukii* (Hemiptera: Cicadellidae). *Acta Entomologica Sinica*, 63(10): 1242–1259. [李金玉, 牛东升, 陈杰, 尤士骏, 尤民生, 2020. 茶园周边景观格局对茶小绿叶蝉种群遗传结构的影响. 昆虫学报, 63(10): 1242–1259.]

Li XY, 1983. It is not worth the loss to interplant potato crops in young tea gardens. *Tea in Fujian*, 1983(1): 39–40. [李祥英, 1983. 幼龄茶园间种薯类作物得不偿失. 福建茶叶, 1983(1): 39–40.]

Liu AG, Qian GJ, Song XY, Zhang SP, Zou YD, Bi SD, 2020. Spatial-following relationship between thrips and their natural enemies in the Baihaozao and Wuniuzao tea gardens in Hefei. *Journal of Plant Protection*, 47(2): 435–445. [刘爱国, 钱广晶, 宋学雨, 张书平, 邹运鼎, 毕守东, 2020. 合肥市白毫早、乌牛早茶园天敌与蓟马的空间跟随关系. 植物保护学报, 47(2): 435–445.]

Lu A, Gonthier DJ, Sciligo AR, Garcia K, Chiba T, Juárez G, Kremen C, 2022. Changes in arthropod communities mediate the effects of landscape composition and farm management on pest control ecosystem services in organically managed strawberry crops. *Journal of Applied Ecology*, 59(2): 585–597.

Mei Y, Liang X, 2022. Analysis of China's tea production and domestic sales in 2021. *China Tea*, 44(4): 17–22. [梅宇, 梁晓, 2022. 2021 年中国茶叶生产与内销形势分析. 中国茶叶, 44(4): 17–22.]

Muraleedharan N, 2004. Strategies for reducing pesticide residues in tea. *International Journal of Tea Science*, 3(3/4): 149–158.

Muraleedharan N, Chen ZM, 1997. Pests and diseases of tea and their management. *Journal of Plantation Crops*, 25(1): 15–43.

Niu YQ, Pan C, Wang MX, Zhou NN, Zhang XT, Cui L, Chen XX, Han BY, 2014. Identification of volatile compounds from rosemary that significantly affect the tea green leafhopper behavior. *Acta Ecologica Sinica*, 34(19): 5477–5483. [钮羽群, 潘铖, 王梦馨, 周宁宁, 张新亭, 崔林, 陈学新, 韩宝瑜, 2014. 显著调控假眼小绿叶蝉行为的迷迭香挥发物鉴定. 生态学报, 34(19): 5477–5483.]

Ouyang F, Ge F, 2011. Effects of agricultural landscape patterns on insects. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(5): 1177–1183. [欧阳芳, 戈峰, 2011. 农田景观格局变化对昆虫的生态学效应. 应用昆虫学报, 48(5): 1177–1183.]

Peng P, Li PW, Hou YJ, Xu Z, 2006. Study on the diversity of insect communities in tea gardens of different ecological types. *Plant Protection*, 32(4): 67–70. [彭萍, 李品武, 侯渝嘉, 徐泽, 2006. 不同生态茶园昆虫群落多样性研究. 植物保护, 32(4): 67–70.]

Peng WX, Song TQ, Zou DS, Wang KL, Zeng FP, Xiao KC, Xiao RL, 2008. Integrative ecological effects of straw mulching and intercropping with white clover in young tea plantation in

subtropical hilly region. *Scientia Agricultura Sinica*, 41(8): 2370–2378. [彭晚霞, 宋同清, 邹冬生, 王克林, 曾馥平, 肖孔操, 肖润林, 2008. 覆盖与间作对亚热带丘陵茶园生态的综合调控效果. 中国农业科学, 41(8): 2370–2378.]

Penjor U, Jamtsho R, Sherub S, 2022. Anthropogenic land-use change shapes bird diversity along the eastern Himalayan altitudinal gradient. *Journal of Applied Ecology*, 59(3): 847–859.

Raven PH, Wagner DL, 2021. Agricultural intensification and climate change are rapidly decreasing insect biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(2): e2002548117.

Rusch A, Chaplin-Kramer R, Gardiner MM, Hawro V, Holland J, Landis D, Thies C, Tscharntke T, Weisser WW, Winqvist C, Woltz M, Bommarco R, 2016. Agricultural landscape simplification reduces natural pest control: A quantitative synthesis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 221: 198–204.

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

Shi F, Huang HJ, Chen YT, Chen LL, 2022. Effects of intercropping functional plants on the ecosystem functions and services in tea garden. *Journal of Tea Science*, 42(2): 151–168. [史凡, 黄泓晶, 陈燕婷, 陈李林, 2022. 间套作功能植物对茶园生态系统服务功能的影响. 茶叶科学, 42(2): 151–168.]

Shi PJ, Hui C, Men XY, Zhao ZH, Ouyang F, Ge F, Jin XS, Cao HF, Li BL, 2014. Cascade effects of crop species richness on the diversity of pest insects and their natural enemies. *Scientia Sinica (Vitae)*, 44(1): 75–90. [时培建, 惠苍, 门兴元, 赵紫华, 欧阳芳, 戈峰, 金显仕, 曹海锋, Li B. Larry, 2014. 作物多样性对害虫及其天敌多样性的级联效应. 中国科学(生命科学), 44(1): 75–90.]

Shields MW, Johnson AC, Pandey S, Cullen R, González-Chang M, Wratten SD, Gurr GM, 2019. History, current situation and challenges for conservation biological control. *Biological Control*, 131: 25–35.

Song TQ, Wang KL, Peng WX, Wang JR, Xiao RL, Zeng FP, Tang Y, 2006. Ecological effects of intercropping white clover on tea plantation in a subtropical hilly region. *Acta Ecologica Sinica*, 26(11): 3647–3655. [宋同清, 王克林, 彭晚霞, 王久荣, 肖润林, 曾馥平, 汤宇, 2006. 亚热带丘陵茶园间作白三叶草的生态效应. 生态学报, 26(11): 3647–3655.]

Song XY, Qian GJ, Zhang SP, Yu Y, Zou YD, 2020. Relationship between the quantity, time, and space of three pests and their predatory natural enemies in baihaozao tea garden. *Acta Ecologica Sinica*, 40(3): 1004–1014. [宋学雨, 钱广晶, 张书平, 余燕, 李尚, 毕守东, 周夏芝, 邹运鼎, 2020. 白毫早茶园 3 种害虫与其捕食性天敌的数量、时间和空间关系. 生态学报, 40(3): 1004–1014.]

Southwood RE, Way MJ, 1970. Ecological background to pest management//Rabb RC, Guthrie FE (eds.). Concepts of Pest Management. Raleigh: North Carolina State University. 6–29.

Sun JZ, Zhang L, Li ZC, Zou YD, Bi SD, 2021. Differences in the spatial closeness of natural enemies and *Empoasca vitis* in five tea gardens in autumn and winter. *Acta Ecologica Sinica*, 41(20): 8297–8307. [孙佳照, 张淋, 李子朝, 邹运鼎, 毕守东, 2021. 5 种茶园秋冬季天敌与假眼小绿叶蝉空间关系密切程度的差异. 生态学报, 41(20): 8297–8307.]

Thies C, Haenke S, Scherber C, Bengtsson J, Bommarco R, Clement LW, Ceryngier P, Dennis C, Emmerson M, Gagic V, Hawro V, Liira J, Weisser WW, Winqvist C, Tscharntke T, 2011. The relationship between agricultural intensification and biological control: experimental tests across Europe. *Ecological Applications*, 21(6): 2187–2196.

Tian HM, Luo ML, Yang XM, Wang W, Yang B, Li JH, Zhao P, 2019. The impact on soil nutrient of the tea-walnut intercropping. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 40(4): 657–663. [田洪敏, 罗美玲, 杨雪梅, 王玮, 杨彬, 李家华, 赵平, 2019. 茶树-核桃树间作模式对茶园土壤养分的影响. 热带作物学报, 40(4): 657–663.]

Tian YH, Liang YF, Wang GH, Wang JL, Zhou GL, Wu DM, 2002. Bionomics system for controlling pest in tea plantation. *Guizhou Agricultural Sciences*, 30(1): 39–41. [田永辉, 梁远发, 王国华, 王家伦, 周国兰, 吴德明, 2002. 茶园害虫生态调控体系的研究. 贵州农业科学, 30(1): 39–41.]

Tscharntke T, Tylianakis JM, Rand TA, Didham RK, Fahrig L, Batáry P, Bengtsson J, Clough Y, Crist TO, Dormann CF, 2012. Landscape moderation of biodiversity patterns and processes-eight hypotheses. *Biological Reviews*, 87(3): 661–685.

Wang GH, Liang YF, Tian YH, Wang JL, Zhou GL, 2004. Effect of chemical insecticides on the diversity of arthropods in tea garden. *Journal of Tea Science*, 24(2): 99–104. [王国华, 梁远发, 田永辉, 王家伦, 周国兰, 2004. 化学农药对茶园节肢动物多样性的影响. 茶叶科学, 24(2): 99–104.]

Wang QZ, Liu YM, Li SM, 2017. The repellency and fumigant activity of essential oil from invasive plant (*Ageratum conyzoides*) against leafhopper (*Empoasca onukii*). *Journal of Tea Science*, 37(5): 442–448. [王奇志, 刘育梅, 李书明, 2017. 入侵植物胜红蓟精油对小贯小绿叶蝉的忌避和熏蒸活性研究. 茶叶科学, 37(5): 442–448.]

Wang YG, Li LJ, Ran LX, Yu XS, Wu WW, Han BY, Li ZM, 2010. Investigation on population dynamics of *Empoasca vitis* Göthe of different planting patterns. *Southwest China Journal of*

Agricultural Sciences, 23(2): 413–415. [汪云刚, 李良静, 冉隆珣, 玉香甩, 吴文伟, 韩宝瑜, 李忠美, 2010. 不同种植模式下茶假眼小绿叶蝉种群动态的调查. 西南农业学报, 23(2): 413–415.]

Xu LY, 2013. Effects of intercropping in tea plantations with green manure on the green leafhopper and main natural enemies of pests. Master dissertation. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University. [许丽艳, 2013. 茶园间作不同绿肥对假眼小绿叶蝉和主要茶虫天敌的影响. 硕士学位论文. 福州: 福建农林大学.]

Yang AH, Liu CL, 2012. Talk about tea intercropping forest. *Sichuan Agriculture and Agricultural Machinery*, 2012(1): 44. [杨安洪, 刘川丽, 2012. 浅谈茶园间作林木. 四川农业与农机, 2012(1): 44.]

Yang W, Len Y, Zhou YF, Wang YJ, Li JL, Jiang TM, Zhou ZY, 2021. Thinking on the construction of tea plantation ecosystem of tea plant and secondary plants intercropping. *Journal of Tea Communication*, 48(2): 193–199. [杨文, 冷杨, 周玉锋, 王沅江, 黎健龙, 蒋太明, 周泽宇, 2021. 茶树——次生植物间作茶园生 态系统构建的思考. 茶叶通讯, 48(2): 193–199.]

Ye GY, Xiao Q, Chen M, Chen XX, Yuan ZJ, Stanley DW, 2014. Tea: Biological control of insect and mite pests in China. *Biological Control*, 68: 73–91.

Ye HX, Han SJ, Han BY, 2016. The composition of arthropod communities in four types of tea plantations with different planting patterns. *Journal of Plant Protection*, 43(3): 377–383. [叶火香, 韩善捷, 韩宝瑜, 2016. 四种不同种植模式茶园节肢动物的群落组成. 植物保护学报, 43(3): 377–383.]

Ye JQ, Zhuang LF, 2008. Interplanting alpine peppers and green beans in mountain tea gardens in autumn. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2008(5): 67–68. [叶劲青, 庄玲芳, 2008. 山区茶园套种高山辣椒-秋季四季豆立体栽培模式. 现代农业科技, 2008(5): 67–68.]

You MS, Liu YF, Hou YM, 2004. Biodiversity and integrated pest management in agroecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 24(1): 117–122. [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, 24(1): 117–122.]

Zhang H, Li HL, Zhang YG, Li LD, Wang DF, Wang QS, Zeng MS, Wu GY, 2018. Response of tea green leafhoppers to volatiles emitted from *Conyza canadensis* plants in tea plantations. *Acta Tea Sinica*, 59(4): 223–228. [张辉, 李慧玲, 张应根, 李良德, 王定锋, 王庆森, 曾明森, 吴光远, 2018. 茶园杂草小飞蓬挥发物对茶小绿叶蝉行为的反应. 茶叶学报, 59(4): 223–228.]

Zhang H, Zhang MT, Wang FK, Ren MX, Qing Y, Kang XH, 2019. Effects of four intercropping crops on the occurrence of major leaf diseases in tea plantations in summer and autumn. *Journal of Tea Science*, 39(3): 318–324. [张洪, 张孟婷, 王福楷, 任梦星, 青游, 康晓慧, 2019. 4 种间作作物对夏秋季茶园主要叶部病害发生的影响. 茶叶科学, 39(3): 318–324.]

Zhang HG, Tan JC, 2004. Tea Pests in China and Their Contaminant-free Management. Hefei: Anhui Scientific and Technical Publishers. 1–24. [张汉鹊, 谭济才, 2004. 中国茶树害虫及其无公害治理. 合肥: 安徽科学技术出版社. 1–24.]

Zhang RF, Ji DZ, Zhang QQ, Jin LH, 2021. Evaluation of eleven plant species as potential banker plants to support predatory *Orius sauteri* in tea plant systems. *Insects*, 12(2): 162–171.

Zhang SP, Qian GJ, Bi SD, Zhou XZ, Li S, Wang ZX, Zou YD, Wang JP, 2019. Quantitative relationship between *Empoasca vitis* and spiders of natural enemies based on Fuzzy analysis. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 37(5): 653–662. [张书平, 钱广晶, 毕守东, 周夏芝, 李尚, 王振兴, 邹运鼎, 王建盼, 2019. 基于 Fuzzy 分析的假眼小绿叶蝉与天敌蜘蛛的数量关系. 四川农业大学学报, 37(5): 653–662.]

Zhang XM, Yang ZB, Zhao ZH, Chen B, Du GZ, Chen GH, 2020. Community composition and activity rhythm of dominant flower-visiting insects from different flowering plants in tea gardens. *Chinese Journal of Ecology*, 39(7): 2364–2373. [张晓明, 杨智斌, 赵子华, 陈斌, 杜广祖, 陈国华, 2020. 茶园不同显花植物访花昆虫群落组成及优势种活动规律. 生态学杂志, 39(7): 2364–2373.]

Zhang ZQ, Bian L, Sun XL, Luo ZX, Xin ZJ, Luo FJ, Chen ZM, 2015. Electrophysiological and behavioural responses of the tea geometrid *Ectropis obliqua* (Lepidoptera: Geometridae) to volatiles from a non-host plant, rosemary, *Rosmarinus officinalis* (Lamiaceae). *Pest Management Science*, 71(1): 96–104.

Zhang ZQ, Zhou C, Xu YY, Huang XQ, Zhang LX, Mu W, 2017. Effects of intercropping tea with aromatic plants on population dynamics of arthropods in Chinese tea plantations. *Journal of Pest Science*, 90(1): 227–237.

Zhang ZQ, Tian YY, Gao SW, Xu YY, Huang XQ, Zhang LX, 2016. Ecological effects of intercropping tea with aromatic plant basil and perill in young tea plantation. *Journal of Tea Science*, 36(4): 389–395. [张正群, 田月月, 高树文, 许永玉, 黄晓琴, 张丽霞, 2016. 茶园间作芳香植物罗勒和紫苏对茶园生态系统影响的研究. 茶叶科学, 36(4): 389–395.]

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