中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

**太湖流域稻田管理方式对蜘蛛群落特征的影响**

满吉勇，袁　凯，陈宝雄，王子睿，刘云慧

**Impact of rice field management on the spider community characteristics in Taihu Lake Basin**

MAN Jiyong, YUAN Kai, CHEN Baoxiong, WANG Zirui, and LIU Yunhui

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.210081

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

太行山区不同农业景观生境的蜘蛛群落结构特征及其影响因子

Effects of agricultural landscape habitat types on spider community structure and the influencing factors in Taihang Mountain

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(10): 1488–1498

稻虾共作对稻田土壤*nirK*反硝化微生物群落结构和多样性的影响

Effects of integrated rice–crayfish farming system on community structure and diversity of *nirK* denitrification microbe in paddy soils

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(9): 1324–1332

稻蟹共作与常规稻田蜘蛛群落组成及多样性分析

The structure of spider communities in crab paddies and conventional paddies

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(8): 1157–1162

太湖流域果树提取的光谱和纹理特征选择研究

Research on spectral and texture feature selection for fruit tree extraction in the Taihu Lake Basin

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(10): 1596–1606

管理措施及土壤因子对5种农田生境地表蜘蛛群落多样性的影响

Effects of management measures and soil factors on the diversity of ground spider communities in five agricultural habitat types

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(3): 483–491

设施种植模式对土壤细菌多样性及群落结构的影响

Effect of facility management regimes on soil bacterial diversity and community structure

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(11): 1615–1625

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 9 月 第 29 卷 第 9 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Sep. 2021, 29(9): 1467−1479

**DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.210081**

满吉勇, 袁凯, 陈宝雄, 王子睿, 刘云慧. 太湖流域稻田管理方式对蜘蛛群落特征的影响 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2021, 29(9): 1467−1479

MAN J Y, YUAN K, CHEN B X, WANG Z R, LIU Y H. Impact of rice field management on the spider community characteristics in Taihu Lake Basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(9): 1467−1479

# 太湖流域稻田管理方式对蜘蛛群落特征的影响*

满吉勇[1,2,3], 袁 凯[1,2,3], 陈宝雄[4], 王子睿[1,2,3], 刘云慧[1**]

(1. 中国农业大学资源与环境学院 北京 100193; 2. 中国农业大学生物多样性与有机农业北京市重点实验室 北京 100193; 3. 中国农业大学有机循环研究院 (苏州) 苏州 215000; 4. 农业农村部农业生态与资源保护总站 北京 100125)

**摘 要:** 蜘蛛是稻田重要的天敌生物, 通过改进生产管理方式提升稻田蜘蛛多样性及其害虫生物控制服务, 对推动稻田可持续生产具有重要意义。本研究调查太湖流域有机、绿色、常规生产模式下稻田蜘蛛群落多样性及群落结构和功能组成, 以评估不同生产管理模式对稻田蜘蛛多样性的影响。结果显示: 不同生产方式蜘蛛 α 多样性指数差异显著, 有机生产稻田蜘蛛的丰富度、多度和辛普森多样性指数均显著高于常规及绿色生产稻田。捕猎类型在不同稻田差异显著, 有机和绿色生产稻田蜘蛛以结网型为主, 而常规生产稻田以捕猎型为主; 3 种生产模式稻田蜘蛛体长和飞航能力无显著差异。有机和常规生产稻田蜘蛛群落组成间存在显著差异, 绿色生产稻田蜘蛛群落组成介于有机与常规生产稻田之间, 是这两种生境蜘蛛组成的过渡类型; 有机生产稻田具有较多的的蜘蛛指示种, 而绿色和常规生产稻田蜘蛛群落分布上以广布种与共有种为主, 缺乏特有种。稻田蜘蛛群落组成随水稻生长而变化, 但有机生产稻田蜘蛛丰富度、多度除分蘖早期和拔节期外, 其余时期均显著高于常规和绿色生产稻田。研究结果表明, 相较于常规和绿色生产, 有机生产方式可以有效提高稻田蜘蛛多样性, 维持更强的害虫捕食能力, 对推动该地区绿色发展和生态环境恢复具有重要意义。

**关键词:** 太湖流域; 稻田管理方式; 有机生产; 绿色生产; 蜘蛛; 群落结构; 功能特征

**中图分类号:** Q149 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

# Impact of rice field management on the spider community characteristics in Taihu Lake Basin*

MAN Jiyong[1,2,3], YUAN Kai[1,2,3], CHEN Baoxiong[4], WANG Zirui[1,2,3], LIU Yunhui[1**]

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Beijing Key Laboratory of Biodiversity and Organic Farming, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3. Organic Recycling Research Institute (Suzhou) of China Agricultural University, Suzhou 215000, China; 4. Rural Energy and Environment Agency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China)

**Abstract:** Spiders are important natural enemies that provide a key biological control service in rice planting systems. In recent decades, agricultural intensification has caused a series of environmental problems, including the loss of biodiversity and the decline of associated ecosystem services. Therefore, it is necessary to explore if the spider diversity can be improved by adjusting the rice farming practices to enhance the biological control services to allow more sustainable agricultural production. Recent studies on rice field spiders have compared the spider diversity between organic and conventional farming systems. However, studies on spider diversity

* 江苏省科技支撑项目 (SNG201903) 资助

** 通信作者: 刘云慧, 主要研究方向为景观生态与生物多样性。E-mail: liuyh@cau.edu.cn
满吉勇, 主要研究方向为有机农业与生物多样性。E-mail: manjy@cau.edu.cn

收稿日期: 2021-02-07 接受日期: 2021-04-07

* This study was supported by the Science and Technology Support Project of Jiangsu Province (SNG201903).

** Corresponding author, E-mail: liuyh@cau.edu.cn

Received Feb. 7, 2021; accepted Apr. 7, 2021

in green rice fields are rare. The Taihu Lake Basin is an important rice production area in China, but it has also suffered from serious non-point pollution in recent years. Thus, it is important to develop a sustainable rice production approach and conserve the biodiversity and associated ecosystem services for regional sustainability. In this study, we sampled spiders with a suction sampler to assess the impact of different farming practices, including organic, green, and conventional farming practices, on the diversity, composition, and dynamics of spiders in rice fields. The results indicated that 1) there were significant differences in the spider diversity among different farming systems. Species richness, abundance, and the Simpson diversity index of spiders in organic rice fields were significantly higher than those in the other two treatments. 2) There were no significant differences in spider body size and the ballooning capacity among different farming practices. 3) The composition of spider communities in organic rice fields was distinct from that in conventional rice fields, whereas green rice fields had a similar spider composition as that of conventional and organic rice fields. 4) Organic and green rice fields were dominated by web-building spiders, whereas conventional rice fields were dominated by hunting spiders. 5) Organic rice fields had many indicator species, such as *Bianor incitatus*, *Chrysso octomaculata*, and *Clubiona corrugata*, while the spider communities in green and conventional rice fields were dominated by generalist and common species and lacked endemic species. 6) The spider community diversity in rice fields changed with rice growth. The species richness and Simpson diversity indexes of the spider communities were greater in organic rice fields than those in conventional and green rice fields across all rice-growing seasons, except during the early tillering and elongation stages. In summary, compared with conventional and green farming systems, organic farming system sustains greater spider diversity and distinct spider compositions with more web-building and indicator species. The spider diversity under green farming system, on the other hand, did not differ from that under conventional rice practices. To improve spider diversity and the associated biological control services in rice fields, the transformation of conventional rice production to organic production and reduced chemical reagents input should be encouraged, which is also important for the ecological restoration of the Taihu Lake Basin.

**Keywords:** Taihu Lake Basin; Paddy field management method; Organic farming system; Green farming system; Spider; Community structure; Functional traits

太湖流域自然条件优越, 经济基础雄厚, 人口密集, 自古以来便是我国社会发展最迅速的地区之一[1]。但长期以来, 因受高强度人为干扰活动的影响, 生态环境整体脆弱[2-3], 尤其以农业面源污染为代表的生态问题突出[4-5], 改善当地生态环境已迫在眉睫[4]。水稻 (*Oryza sativa*) 作为当地重要的种植作物, 改进稻田农业生产方式已成为当地生态环境改善的必由之路。生物多样性是生态安全和生态系统健康的重要表征, 不同的生产管理模式因施肥、除虫、除草等措施的不同, 可能会对稻田生物多样性产生不同的影响[6-7]。依赖化肥和农药投入来保障粮食产量的集约化稻田生产方式, 会导致农田适宜栖息地的丧失, 造成稻田生物多样性下降, 甚至引起某些天敌物种的消失[8], 无法有效维持稻田害虫生物控制能力[9-10]。而有机、绿色等生态友好型的生产方式对稻田天敌的干扰相对较少, 往往可以为天敌提供更多的栖息地[11-13], 从而有利于天敌多样性的维持。此外, 不同种植季及不同稻区水稻田间主要害虫与天敌种类和消长规律存在差异[14], 这也可能会影响稻田生态系统对于管理方式的响应。

蜘蛛类群多样、对环境变化敏感, 常被作为环境变化、人类活动影响以及生物多样性和生态系统服务功能评估的重要指示生物[6]。同时, 蜘蛛无论在数量上还是功能方面均是稻田重要的天敌类群[15-16], 在农田生态系统中提供了重要的害虫控制服务[17], 其多样性的提升不仅标志良好的农田生态环境质量, 也有利于农田的可持续生产。同时, 除了多样性的变化, 群落功能特征及功能群变化也是反映土地利用影响和生态系统服务变化的重要指标[18-19]。目前, 大部分研究集中在有机和常规生产对蜘蛛多样性影响的比较上[20-22], 却很少有人研究亚洲地区特有的绿色生产方式对蜘蛛多样性的影响[23], 且只考虑管理措施对蜘蛛多度和种类影响的研究较多[20-22], 而考虑其是如何影响蜘蛛关键种数量及其行为特征的研究较少。此外, 不同水稻生育期稻田害虫的数量不同, 可能改变食物资源的数量及质量, 进而自下而上调控蜘蛛群落结构对稻田管理的响应模式, 不同水稻生育期蜘蛛丰富度、多度以及功能性状的变化仍需要进一步的研究[24-25]。

因此, 本研究通过选取有机、绿色和常规 3 种不同管理模式的水稻农场开展蜘蛛多样性调查, 通过分析不同生产模式下蜘蛛群落的生物多样性及其物种组成和功能特征的差异, 评估不同生产管理方式下稻田蜘蛛多样性的状况, 为该地区制定推动生态环境质量改善、生态系统服务的生产管理策略和促进可持续发展提供科学依据。研究主要回答以下问题: 有机、绿色和常规 3 种稻田生产管理模式下稻田蜘蛛群落多样性、功能组成及群落结构是否存在

差异? 哪种生产管理方式有利于蜘蛛多样性维持和害虫控制功能发挥?

## 1　研究区概况与研究方法

### 1.1　研究区概况

研究区位于江苏省苏州市临湖镇 (31°13′N, 120°49′E), 属北亚热带湿润性季风气候类型, 四季分明, 温暖湿润且日照充足, 年均气温为 16 ℃, 年均降水量达 1160 mm。临湖镇东西两面濒临太湖, 是太湖水网平原的一部分, 由太湖淤泥堆积成陆, 地势低平, 由北向南微倾, 水网南密北疏, 河道比较浅窄, 地面组成大部分是冲积和湖积相物质, 土壤主要成分为水稻土 (黏质黄泥土)。从农业种植角度看, 该地属于单季稻区, 水稻品种主要为‘南粳 46 号’, 采用移栽插秧的种植方式, 稻区内主要病虫害为稻瘟病、纹枯病、灰飞虱 (*Laodelphax striatellus*) 和稻纵卷叶螟 (*Cnaphalocrocis medinalis*)。

### 1.2　试验设计

2019 年 6—10 月, 在该镇选取有机生产、绿色生产和常规生产的水稻农场进行蜘蛛多样性监测, 3 个农场分别位于江苏省苏州市临湖镇中国农业大学水稻生态农场临湖基地 (31.12°N, 120.45°E), 某农发集团绿色生产水稻农场 (31.09°N, 120.28°E), 某农户常规生产水稻农场 (31.08°N, 120.26°E), 每种生产方式选取 5 块重复样地 (考虑到取样地的独立性, 样地间距离>500 m, 且选取样地距离稻田边缘>50 m, 并被其他稻田所包围), 共计 15 个样地, 每个样地为 20 m×30 m 的固定样方, 在每个样方内, 取中线划分成 4 个 10 m×15 m 的方块, 在样方和 4 个小方块的中央位置设置取样点 (为避免边缘效应, 取样点距离样方边界>2 m), 每样点 6 丛, 固定每样地 30 丛稻株开展蜘蛛调查。不同农场基本管理方式如表 1 所示。

**表 1　不同生产模式稻田取样农场的基本情况**

Table 1　Farming practices of rice in sampling farms with different farming systems

| 生产方式 Farming system | 管理方式 Management method | | |
|---|---|---|---|
| | 施肥 Fertilizing | 除虫 Deworming | 除草 Weeding |
| 有机 Organic | 有机肥(鸡粪有机肥12 000 kg·hm$^{-2}$、蚯蚓叶面肥1500 kg·hm$^{-2}$) Organic fertilizer (chicken manure 12 000 kg·hm$^{-2}$, earthworm foliar fertilizer 1500 kg·hm$^{-2}$) | 昆虫性引诱剂(5盒·hm$^{-2}$)、苏云金杆菌+竹醋液(1500 mL·hm$^{-2}$)、除虫菊+苦参碱+印楝素(1500 mL·hm$^{-2}$) Insect attractant (5 boxes·hm$^{-2}$), bacillus thuringiensis-bamboo vinegar (1500 mL·hm$^{-2}$), pyrethrum-matrine-azadirachtin (1500 mL·hm$^{-2}$) | 人工拔草 Manual weeding |
| 绿色 Green | 有机-无机复合肥(1500 kg·hm$^{-2}$) Organic-inorganic compound fertilizer (1500 kg·hm$^{-2}$) | 吡呀酮(225 g·hm$^{-2}$)、呋硫胺(270 g·hm$^{-2}$)、甲维茚虫威(150 mL·hm$^{-2}$)、氨虫苯甲酰胺(150 mL·hm$^{-2}$) Piramidone (225 g·hm$^{-2}$), nitrofuran (270 g·hm$^{-2}$), mevindoxacarb (150 mL·hm$^{-2}$), amphetamine (150 mL·hm$^{-2}$) | 苄嘧丙草胺(1500 mL·hm$^{-2}$)、五氟氰氟草酯(900 mL·hm$^{-2}$)、草甘膦(1500 mL·hm$^{-2}$)、精吡氟水草灵(1500 mL·hm$^{-2}$)、人工除草 Bensulfuron (1500 mL·hm$^{-2}$), pentaflufen (900 mL·hm$^{-2}$), glyphosate (1500 mL·hm$^{-2}$), diflufenicol (1500 mL·hm$^{-2}$), manual weeding |
| 常规 Conventional | 有机-无机复合肥(375 kg·hm$^{-2}$)、尿素(300 kg·hm$^{-2}$) Organic-inorganic compound fertilizer (375 kg·hm$^{-2}$), urea (300 kg·hm$^{-2}$) | 吡呀酮(225 g·hm$^{-2}$)、甲维茚虫威(150 mL·hm$^{-2}$)、氨虫苯甲酰胺(3000 mL·hm$^{-2}$) Piramidone (225 g·hm$^{-2}$), mevindoxacarb (150 mL·hm$^{-2}$), amphetamine (3000 mL·hm$^{-2}$) | 草甘磷(3000 mL·hm$^{-2}$)、恶唑酰草胺(900 mL·hm$^{-2}$)、氰氟草酯(1500 mL·hm$^{-2}$) Glyphosate (3000 mL·hm$^{-2}$), Metamifop (900 mL·hm$^{-2}$), cyhalofopbutyl (1500 mL·hm$^{-2}$) |

### 1.3　取样方法

考虑到节肢动物活动性较强, 采用吸虫器法取样, 利用吸虫器在稻株上中下部位抽吸, 吸虫器由意大利欧码 BV300 手提式吹风机改造而成, 功率为 1 kW, 风量为 720 m$^3$·h$^{-1}$, 风速为 70 m·s$^{-1}$, 在吸虫器的吸口端反套上一个长 25 cm、宽 15 cm 的 40 目尼龙网袋, 用于蜘蛛虫样的收集, 尽可能吸完能看到的物种为止。为了解稻田蜘蛛多样性随水稻发育时期的变化, 并捕获尽可能多的蜘蛛样本, 于水稻分蘖早期 (6 月 27 日)、分蘖后期 (7 月 17 日)、拔节期 (8 月 8 日)、抽穗期 (8 月 30 日)、扬花期 (9 月 14 日)、灌浆期 (9 月 26 日)、黄熟期 (10 月 15 日) 取样, 每次取样为期 1 d, 并将蜘蛛放置于 75% 的乙醇溶液中保存。蜘蛛标本统计个数, 成虫鉴定至物种水平。

### 1.4　数据处理

多样性指数主要进行丰富度、多度、Simpson 指数的计算[26], 蜘蛛群落的物种丰富度是同一样地 5 个样点捕获蜘蛛种类数量, 多度为同一样地 5 个样点捕获蜘蛛的总个体数。Simpson 指数 ($D$) 的计算公式如下:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^{s} \frac{n_i(n_i - 1)}{N(N-1)} \tag{1}$$

式中: $n_i$ 为第 $i$ 个物种的个体数, $N$ 为所有物种个体数, $S$ 为物种数。

为分析不同生产管理处理蜘蛛的多样性差异, 首先对蜘蛛的物种丰富度及多度进行了正态性及方差齐性检验[27-28], 当数据分析满足正态性及方差齐性要求时, 采用单因子方差分析, 检验不同类型稻田的生物多样性指数的差异显著性[29]; 当数据不满足其中任意一个前置要求时, 采用非参数 K-W 检验方法检验不同类型稻田的生物多样性指数的差异显著性[30]。如检验发现不同组别存在显著差异, 则分别采用 TukeyHSD 法[31] 与基于 Bonferroni 校正的多重比较方法[32] 进行多重比较。

为分析不同农田处理蜘蛛物种组成的差异, 采用基于 CNESS (normalized expected species shared) 相似系数的非度量多维尺度法 (non-metric multi-dimensional scaling, NMDS) 比较分析不同生产模式稻田蜘蛛群落结构的相似性, NMDS 中取样大小参数 $m$ 可以变化, 但必须大于最小的取样值, 且小于最大的取样值, $m$ 值取值较大时, 强调稀有物种, 反之强调的则是优势物种[33-34]; 采用胁强系数 (stress) 检验拟合结果, 当模型 stress 值小于 0.2 时, 则差异性在可接受范围内, 说明此方法可以较好地反映群落组成的相对关系[35]。为进一步检验物种组成差异的显著性, 本研究采用非参数多元方差分析 (PERMANOVA) 分析物种组成是否存在显著差异, 当 $P<0.05$ 时, 认为不同组别蜘蛛群落物种组成存在显著差异[36]。

为进一步分析不同管理方式稻田中蜘蛛在捕食及活动等功能行为特征和害虫控制能力上是否存在显著差异, 研究根据蜘蛛体长、捕猎方式和是否具备飞航能力将蜘蛛分为不同的功能类群 (表 2), 其中蜘蛛体长及捕猎方式通过检索世界蜘蛛名录网站 (https://wsc.nmbe.ch/) 和各地动物志[37-39] 的方式获取, 蜘蛛飞航能力通过相关文献获取[40-44]。蜘蛛的体长体现蜘蛛的资源利用效率与蜘蛛群落内部的捕食情况[45]; 捕猎方式体现蜘蛛的捕食策略及其捕捉的猎物种类[46]; 飞航能力体现蜘蛛在碎片化的景观中进行长距离迁移的能力[40]。计算群落功能加权平均值 (CWM) 来体现不同样地群落的功能特征[47]。个体总数大于 10% 的设定为优势科、优势种[48]。CWM 计算公式如下:

$$\mathrm{CWM} = \sum_{i=1}^{S} (w_i x_i) \tag{2}$$

式中: $S$ 为总体的物种数, $w_i$ 为第 $i$ 个物种的相对多度, $x_i$ 为第 $i$ 个物种的功能特征值。

**表 2 蜘蛛功能特征的类型及标准**

Table 2 Types and standards of spider functional traits

| 功能特征 Functional trait | 类型 Type | 单位/等级 Unit / class | 标准 Standard |
|---|---|---|---|
| 体长 Body size | 连续型变量 Continuous variable | mm | 以雌性蜘蛛的最大体长为准 The maximum body size of female individual |
| 捕猎类型 Hunting type | 二元型变量 Binary variable | 0/1 | 0=结网型; 1=捕猎型 0=weber; 1=hunter |
| 飞航类型 Ballooning type | 二元型变量 Binary variable | 0/1 | 0=不具有飞航能力; 1=具有飞航能力 0=non-ballooning; 1=ballooning |

采用排序的方法检验蜘蛛群落功能特征与生产方式类型的关系。首先对不同样地的功能特征 CWM 值进行非约束性排序[49]; 其次将试验条件纳入环境因子进行约束性排序, 采用主成分分析 (PCA) 进行排序[50]。采用 R3.6.1 进行正态性检验、方差齐性检验和单因子方差分析, 采用 PAST3.2 进行多样性指数计算; 采用 FD 包[51] 进行 CWM 值计算; 采用 R3.6.1 作图; 采用 R3.6.1 进行 PCA 分析和 NMDS 分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 蜘蛛种类和数量

本研究共计捕捉了来自于 13 个科、25 个属、35 个种的共计 2200 头蜘蛛。其中, 物种数的优势科为肖蛸科 (Tetragnathidae)、球蛛科 (Theridiidae)、皿蛛科 (Linyphiidae) 和狼蛛科 (Lycosidae), 分别占蜘蛛物种数的 17.14%、14.29%、11.43% 和 11.43%, 个体数的优势科为狼蛛科、皿蛛科、跳蛛科 (Salticidae) 和球蛛科, 分别占捕获蜘蛛总数的 22.41%、21.23%、14.95% 和 13.77%, 优势种分别为拟环纹豹蛛 (*Pardosa pseudoannulata*) (14.86%) 和驼背额角蛛 (*Gnathonarium gibberum*) (12.41%), 以上 2 个种共占总捕获数量的 27.27%。

### 2.2 不同稻田生产方式下蜘蛛 α 多样性

单因子方差分析 (One-way ANOVA) 以及 K-W 检验的结果显示, 不同类型稻田的蜘蛛物种丰富度 ($P$=0.001)、多度 ($P$=0.008) 与辛普森多样性指数 ($P$=0.007) 均差异显著。

有机生产稻田平均可捕获 22.8 种蜘蛛, 显著高于常规生产 (18.2) 与绿色生产稻田 (15.6)(图 1a); 有机生产稻田蜘蛛多度与辛普森多样性指数显著高于

绿色和常规生产稻田 (图 1b, 1c)。有机生产稻田则平均每样地可捕获 592.4 头蜘蛛, 显著高于常规生产稻田 (168.8) 和绿色生产稻田 (118.8)。同样, 有机生产稻田辛普森多样性指数平均为 0.728, 而绿色生产与常规生产稻田则分别为 0.721 与 0.711, 显著低于有机生产稻田 (图 1c)。

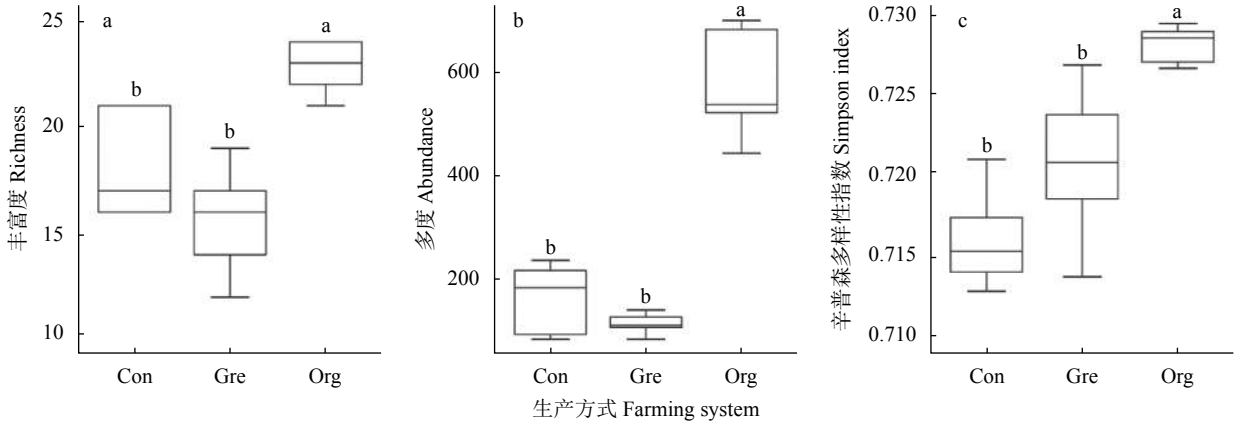


**图 1　不同生产模式稻田蜘蛛的物种多样性**

Fig. 1　Diversity of spiders in rice fields under different farming systems

Con: 常规生产稻田; Gre: 绿色生产稻田; Org: 有机生产稻田。不同小写字母表示不同处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。Con: conventional rice field; Gre: green rice field; Org: organic rice field. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at $P<0.05$ level.

### 2.3　不同稻田生产方式下蜘蛛功能群多样性及功能特征组成

单因子方差分析结果显示, 仅有捕猎型蜘蛛占比在不同处理稻田差异显著 ($P<0.05$)(图 2b), 蜘蛛体长 (图 2a) 与蜘蛛飞航能力均无显著差异 (图 2c)。多重比较结果显示, 常规稻田中捕猎型蜘蛛比例达 66.78%, 显著高于绿色生产稻田 (51.91%) 与有机稻田 (52.65%)。

主成分分析 (PCA) 结果显示 (图 2d), 第 1 轴共计解释了 55.84% 的环境变量, 而第 2 轴则共计解释了 39.37% 的环境变量, 两轴共计解释了 95.21% 的环境变量, 较好地反映了不同功能特征之间的相互关系。其中, 代表捕猎方式的箭头和代表飞航能力的箭头夹角接近 90°, 前者在后者箭头方向投影长度的绝对值接近于 0, 这表明捕猎方式与蜘蛛的飞航能力无显著关联; 代表体长的箭头和代表捕猎方式、飞航能力的两个箭头方向相同, 且前者在后两个箭头的轴上拥有较长的投影长度, 这表明蜘蛛的体长与捕猎方式及飞航能力均有明显的正相关关系; 常规生产稻田主要分布在第 1 排序轴左侧, 与蜘蛛捕猎方式显著正相关; 绿色生产稻田主要分布在第 2 和第 3 象限; 有机生产稻田主要分布在第 4 象限。

### 2.4　不同稻田生产方式对蜘蛛群落组成的影响

对不同生产模式稻田蜘蛛群落结构分析显示, 在强调优势物种 ($m$=1) 时, 除有机生产稻田样点相对集中, 与其他两种生产方式样点相分离, 说明有机生产下稻田蜘蛛优势物种群落结构相似, 但不同于其他两种管理模式 (图 3a); 在强调稀有物种 (图 3b) ($m$=5) 时, 有机稻田蜘蛛群落相对聚集, 并与绿色和常规管理稻田相分离, 说明有机生产稻田稀有物种群落结构也相似, 且不同于其他管理模式。无论是强调优势物种 (图 3a), 还是强调稀有物种 (图 3b) 时, 绿色生产与常规生产稻田样点均存在一定程度的重叠, 说明绿色生产稻田群落和常规生产稻间相较于有机生产稻田具有更高的相似性。

进一步的指示种分析 (Indval) 结果显示 (表 3), 绿色生产稻田与常规处理稻田缺乏显著 ($P<0.05$) 的指示种, 这一结果表示, 绿色生产稻田与常规处理稻田在群落的总体分布上以广布种与共有种为主, 缺乏特有种。而有机稻田则具有大量的指示种, 包括裂菱头蛛 (*Bianor incitatus*)、八斑丽蛛、褶管巢蛛 (*Clubiona corrugate*) 和驼背额角蛛 (*Gnathonarium gibberum*) 等。这些蜘蛛在绿色生产稻田与常规处理稻田中很少分布, 仅在有机稻田中广泛分布, 且指示值达 0.56~0.95, 说明这些物种在有机农田中稳定、广泛大量分布, 但在其他生境中很少出现。

### 2.5　不同水稻发育时期蜘蛛多样性及功能性状变化

单因子方差分析结果显示, 有机生产稻田蜘蛛丰富度 (图 4a) 和多度 (图 4b), 除水稻分蘖早期和拔节期外, 其余各时期均显著高于常规和绿色

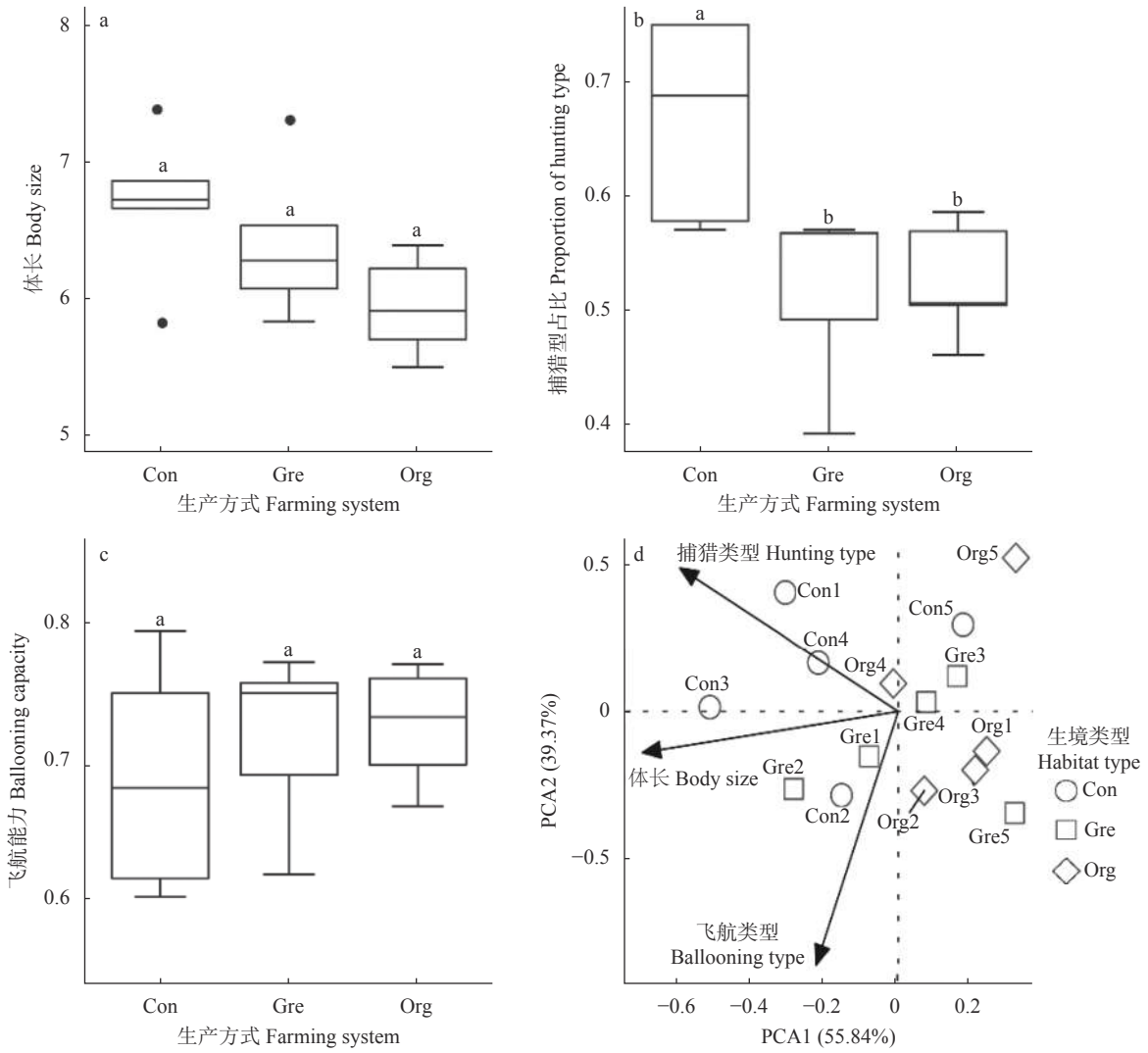


**图 2 不同生产模式稻田蜘蛛功能特征 (a, b, c) 及其主成分分析 (d)**

Fig. 2 Functional characteristics (a, b, c) and principal component analysis (d) of spiders in rice fields under different farming systems

Con: 常规生产稻田; Gre: 绿色生产稻田; Org: 有机生产稻田。Con: conventional rice field; Gre: green rice field; Org: organic rice field.

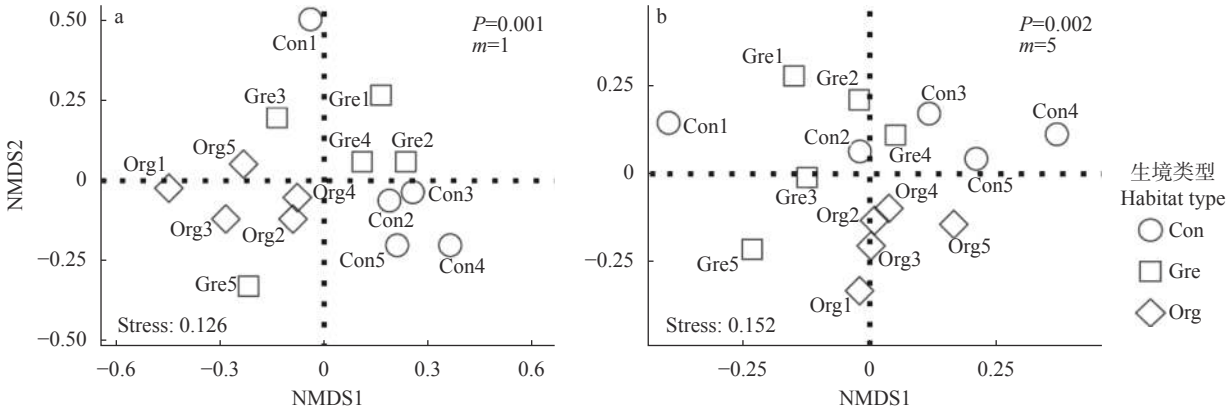


**图 3 基于非度量多维尺度分析 (NMDS) 与群落相似度分析的不同生产模式稻田蜘蛛群落组成**

Fig. 3 Spider community groups of rice fields under different farming systems based on non-metric multidimensional scale analysis (NMDS) and community similarity analysis

a) *m*=1: 各样地最小共同个体数; b) *m*=5: 各样地最大共同个体数。Con: 常规生产稻田; Gre: 绿色生产稻田; Org: 有机生产稻田。a) *m*=1: the smallest number of common individuals in each plot; b) *m*=5: maximum number of common individuals in each plot. Con: conventional rice field; Gre: green rice field; Org: organic rice field.

**表 3　不同生产方式稻田蜘蛛指示种及其功能特征**

Table 3　Indicator species and their functional traits in rice fields under different farming systems

| 物种 Species | 生产方式 Farming system | | | *P* | 功能特征 Function trait | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 常规 Conventional | 绿色 Green | 有机 Organic | | 体长 Body size | 捕猎类型 Hunting type | 飞航类型 Ballooning type |
| *Agrocea coreana* | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 1.000 | 6.48 | 0 | 1 |
| 裂菱头蛛 *Bianor incitatus* | 0.29 | 0.03 | 0.58 | 0.054 | 3.60 | 1 | 0 |
| 八斑丽蛛 *Chrysso octomaculata* | 0.11 | 0.05 | 0.79 | 0.002 | 2.50 | 0 | 1 |
| 褶管巢蛛 *Clubiona corrugata* | 0.09 | 0.07 | 0.82 | 0.005 | 5.80 | 1 | 1 |
| 粽管巢蛛 *Clubiona japonicola* | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 1.000 | 7.10 | 1 | 1 |
| 千岛管巢蛛 *Clubiona kurilensis* | 0.02 | 0.00 | 0.37 | 0.267 | 7.60 | 1 | 1 |
| 狡蛛属种1 *Dolomedes* sp. 1 | 0.12 | 0.13 | 0.69 | 0.010 | 16.20 | 1 | 1 |
| 苔齿螯蛛 *Enoplognatha caricis* | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 1.000 | 6.35 | 0 | 1 |
| 隆背微蛛 *Erigone prominens* | 0.10 | 0.27 | 0.38 | 0.674 | 2.10 | 0 | 1 |
| 平腹蛛属种1 *Gnaphosa.* sp. 1 | 0.00 | 0.20 | 0.00 | 1.000 | 7.20 | 1 | 1 |
| 驼背额角蛛 *Gnathonarium gibberum* | 0.09 | 0.15 | 0.76 | 0.003 | 3.00 | 0 | 1 |
| 草间钻头蛛 *Hylyphantes graminicola* | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 1.000 | 4.00 | 0 | 1 |
| 四点高亮腹蛛 *Hypsosinga pygmaea* | 0.05 | 0.19 | 0.73 | 0.001 | 4.60 | 0 | 1 |
| 红高亮腹蛛 *Hypsosinga sanguinea* | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 1.000 | 4.70 | 0 | 1 |
| 卡氏蒙蛛 *Mendoza canestrinii* | 0.02 | 0.10 | 0.85 | 0.001 | 9.30 | 1 | 0 |
| 底栖小类球蛛 *Nesticella mogera* | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 1.000 | 2.70 | 0 | 1 |
| 猫蛛属种1 *Oxyopes* sp. 1 | 0.40 | 0.00 | 0.00 | 0.281 | 7.75 | 1 | 1 |
| 四斑粗螯蛛 *Pachygnatha quadrimaculata* | 0.01 | 0.10 | 0.58 | 0.077 | 3.25 | 0 | 1 |
| 亚苍白盘蛛 *Paidiscura subpallens* | 0.08 | 0.01 | 0.87 | 0.004 | 6.48 | 0 | 1 |
| 雾豹蛛 *Pardosa nebulosa* | 0.12 | 0.00 | 0.08 | 1.000 | 10.00 | 1 | 1 |
| 拟环纹豹蛛 *Pardosa pseudoannulata* | 0.40 | 0.16 | 0.44 | 0.399 | 9.00 | 1 | 1 |
| 金蝉蛛属种1 *Phintella* sp. 1 | 0.01 | 0.00 | 0.95 | 0.007 | 5.00 | 1 | 0 |
| 拟水狼蛛 *Pirata subpiraticus* | 0.07 | 0.06 | 0.82 | 0.006 | 8.00 | 1 | 1 |
| 类小水狼蛛 *Piratula piratoides* | 0.24 | 0.08 | 0.00 | 0.488 | 4.35 | 1 | 1 |
| 近缘锯足蛛 *Runcinia affinis* | 0.21 | 0.23 | 0.56 | 0.020 | 6.48 | 1 | 0 |
| 锥腹肖蛸 *Tetragnatha maxillosa* | 0.30 | 0.02 | 0.42 | 0.321 | 9.50 | 0 | 1 |
| 华丽肖蛸 *Tetragnatha nitens* | 0.19 | 0.31 | 0.51 | 0.171 | 11.00 | 0 | 1 |
| 前齿肖蛸 *Tetragnatha praedonia* | 0.10 | 0.00 | 0.10 | 1.000 | 11.50 | 0 | 1 |
| 肖蛸属种2 *Tetragnatha* sp. 2 | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 1.000 | 15.50 | 0 | 1 |
| 赵氏肖蛸 *Tetragnatha zhaoi* | 0.08 | 0.13 | 0.46 | 0.208 | 4.77 | 0 | 1 |
| 球蛛属种1 *Theridion* sp. 1 | 0.07 | 0.04 | 0.39 | 0.384 | 7.75 | 0 | 1 |
| 球蛛属种2 *Theridion* sp. 2 | 0.13 | 0.02 | 0.22 | 0.860 | 2.50 | 0 | 1 |
| 食虫沟瘤蛛 *Ummeliata insecticeps* | 0.23 | 0.12 | 0.63 | 0.005 | 3.50 | 0 | 0 |
| 花蟹蛛种1 *Xysticus* sp. 1 | 0.17 | 0.22 | 0.42 | 0.490 | 7.50 | 1 | 0 |
| 花蟹蛛种2 *Xysticus* sp. 2 | 0.04 | 0.03 | 0.51 | 0.108 | 6.50 | 1 | 0 |

当$P<0.05$时, 说明此蜘蛛物种为指示物种。This spider species is an indicator species when $P<0.05$.

生产稻田; 辛普森多样性指数 (图 4c) 于抽穗期和扬花期显著高于常规和绿色生产稻田; 常规生产稻田捕猎型蜘蛛占比 (图 4d) 在水稻灌浆期显著高于有机生产稻田, 在拔节期和黄熟期显著高于绿色生产稻田。

蜘蛛丰富度随时间的变化趋势如图 4a 所示, 3 种生产模式稻田蜘蛛丰富度均由分蘖早期的最低值 (2.4、1.6、1.4) 至抽穗期达最高值 (14.0、7.8、7.6)。绿色和常规生产稻田蜘蛛多度 (图 4b) 均由分蘖早期的最低值 (2.6、3.6), 至抽穗期达最高值 (16.4、27.2); 有机生产稻田蜘蛛多度 (图 4b), 由分蘖早期的最低值 (4.4) 至灌浆期达最高值 (99.0)。3 种生产模式稻田蜘蛛辛普森多样性指数 (图 4c) 均由分蘖早期的最低值 (0.44、0.13、0.13), 至抽穗期达峰值 (0.89、0.78、0.74), 随后趋于稳定。有机、常规生产稻田蜘蛛捕猎型占比由分蘖后期的最低值 (0.33、0.17), 至抽穗期达到最高值 (0.68、0.77); 绿色生产稻田蜘蛛捕猎型占比由拔节期的最低值 (0.1), 至扬花期达到最高值 (0.77)。整体上来看, 有机生产稻田蜘蛛丰富度、多度在水稻生长中后期仍保持较高水平; 3 种生产模式稻田蜘蛛丰富度、辛普森多样性指数、捕猎型占比随时间变化趋势基本一致。

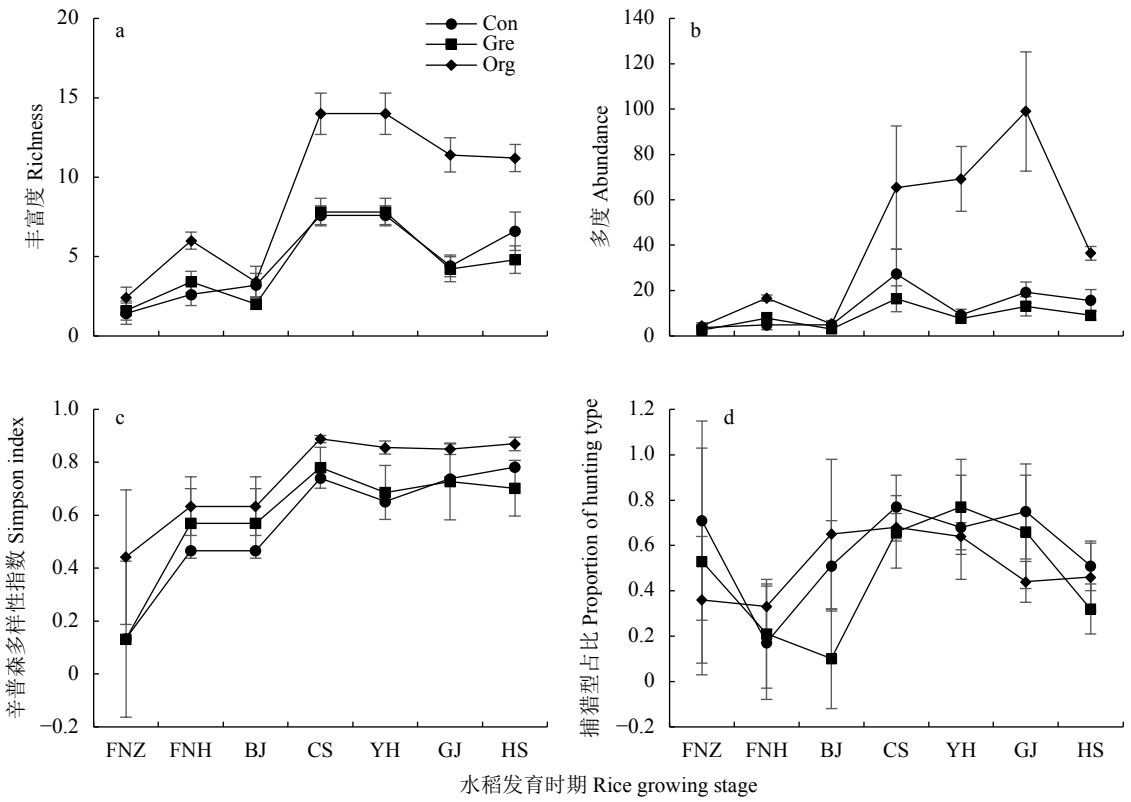


**图 4 不同生产方式稻田不同水稻发育时期蜘蛛多样性及功能特征的变化**

Fig. 4 Changes of spider diversity and functional characteristics at different growing stages of rice under different farming systems

Con: 常规生产稻田; Gre: 绿色生产稻田; Org: 有机生产稻田。FNZ: 分蘖早期; FNH: 分蘖后期; BJ: 拔节期; CS: 抽穗期; YH: 扬花期; GJ: 灌浆期; HS: 黄熟期。Con: conventional rice field; Gre: green rice field; Org: organic rice field. FNZ: early tillering; FNH: late tillering; BJ: elongation stage; CS: heading stage; YH: booting stage; GJ: blooming stage; HS: yellow maturity stage.

## 3 讨论

### 3.1 不同生产方式对稻田蜘蛛多样性的影响

农田管理措施会对蜘蛛群落组成、多度和丰度产生显著的影响[52-53]。稻田是蜘蛛的重要栖息地, 农药的密集使用和农业集约化往往会导致稻田蜘蛛多样性下降[54]。欧洲大量的研究证明, 禁止化学品的投入会对蜘蛛多样性产生积极的影响[55-56]; 国内的研究也表明, 大部分有机稻田的蜘蛛多样性高于常规稻田[57-58]。本研究中也得到了类似的结论, 相对于常规生产, 有机生产可以显著提高稻田蜘蛛的丰富度、多度和辛普森多样性指数。绿色生产是常规生产向有机生产过渡的一种生产方式, 相较于有机生产不使用农药、激素、化肥等化学投入, 绿色生产虽然在生产过程中允许使用农药和化肥, 但对用量和残留量有着严格的规定, 且不能使用国家禁止的高毒、高残留农药[59-60]。在本试验中, 绿色生产的稻田施用的是有机-无机复合肥, 并未过量施用氮肥, 这在蜘蛛多样性的保护上可以起到一定的促进作用[61], 但其在水稻生长期施用了 3 次杀虫剂, 而有机生产稻田病虫害防治主要依靠性引诱剂、竹醋、天然除虫菊素、苦参碱等生物农药。尽管绿色生产使用的都是低毒、低残留的化学杀虫剂, 但本研究结果显示, 相较于常规生产稻田, 绿色生产稻田对于稻田蜘蛛多样性的提高并没有明显地促进作用。这说明, 与肥料的施用相比, 太湖流域稻田蜘蛛可能对杀虫剂的施用更加敏感, 一旦施用化学源的杀虫剂, 即使是低毒、低残留的杀虫剂, 也会对其产生杀死或者驱逐的作用。此外, 即便采用部分生物源农药替代化学农药的方式, 也不能最大程度地发挥对蜘蛛多样性的保护, 且即使是低残留的化学农药, 分解也至少需要 10 年以上的时间[55]。另一方面, 也可能是有机稻田中较高的稻飞虱数量促进天敌多样性的提高。Martin 等[62] 指出, 景观中害虫群落的增殖速度往往较天敌更早、更迅速, 从而为天敌群落迅速增殖提供高密度的食物。因此, 在太湖流域稻田的生产经营中, 不能仅仅考虑对于稻田害虫的灭杀效果, 还应考虑天敌生物对于稻田害虫的取食, 综合考虑天敌和害虫的发生。

### 3.2 不同生产方式对蜘蛛功能组成的影响

在相同的生境类型中, 蜘蛛功能特征往往体现

出相近的趋势, 这是不同蜘蛛对相同环境的趋同效应及生态位共同决定的[63], 但当其受到不同管理措施的干预后, 会发生趋异效益, 致使蜘蛛功能特征向着不同的方向发展。有机、绿色稻田因外界干扰相对较少, 灰飞虱、稻纵卷叶螟等害虫的数量相对较多, 食物充足[56], 适应小体长结网型蜘蛛生存。而常规生产因外界干预相对较多, 食物相对较少[64], 只有活动能力和飞航能力较强、体长较大的捕猎型蜘蛛才能更好地适应此类环境。当生产方式由常规生产转化为绿色生产和有机生产后, 蜘蛛功能群更为丰富, 捕猎害虫的方式更加均衡, 总体虫害控制能力可能会相对提高。因此, 转换成有机生产模式后稻田害虫生物控制服务可能更高。

### 3.3　不同生产方式对蜘蛛群落结构的影响

本研究表明, 有机稻田蜘蛛的物种库相对于常规生产稻田有一定的差异, 出现了较多特有种, 而绿色生产和常规生产稻田蜘蛛群落缺乏显著的指示种, 这进一步凸显了有机生产对于蜘蛛多样性保护的重要性。魏巍等[65] 的研究表明, 于有机稻田中播种紫云英 (*Astragalus sinicus*) 作为绿肥, 可以在整个冬季中为蜘蛛提供栖息地和充足的食物来源, 并确保来年蜘蛛的多样性。本试验中的有机稻田在上一季水稻收割后, 也曾播种紫云英种子, 而绿色稻田播种油菜 (*Brassica napus*) 作为冬季覆盖作物、常规稻田没有种植冬季覆盖作物。这种管理措施上的差异, 可能是导致有机稻田蜘蛛多度和丰度较高的原因[66]。本研究中, 与常规稻田相比, 有机稻田中食虫沟瘤蛛 (*Ummeliata insecticeps*)、驼背额角蛛等在冬播作物中越冬的蜘蛛明显增加, 验证了前文的猜测, 有机生产确实对越冬蜘蛛具有更好的保护作用。而绿色稻田中食虫沟瘤蛛、驼背额角蛛的数量没有发生显著增加, 可能是因为残留的化学除虫剂和杀虫剂会影响蜘蛛体内消化酶的活性, 进而影响蜘蛛的摄食量[67-69], 从而导致食虫沟瘤蛛、驼背额角蛛远离存在化学投入的绿色生产稻田, 迁徙到别的生境寻找食物。

水稻的生长季节通常是 5 月底到 10 月初, 这段时间大部分蜘蛛都能在稻田里生活, 但在其他时期蜘蛛必须寻找额外的栖息地, 田垄上的杂草往往被认为是主要的次生栖息地[70-71]。与绿色生产、常规生产稻田相比, 有机生产稻田田垄上拥有丰富的杂草, 可以为四斑粗螯蛛 (*Pachygnatha quadrimaculata*) 等结网型蜘蛛提供结网的物理结构, 且为拟水狼蛛 (*Pirata subpiraticus*)、八斑丽蛛 (*C. octomaculata*) 等在水稻移栽前喜欢在杂草栖息的蜘蛛类群提供栖息地, 当水稻移栽后, 八斑丽蛛、拟水狼蛛会迅速从杂草中转移到有机稻田生境中[72-73]。同时, 在江苏地区水稻植株上部大部分为肖蛸科蜘蛛结网捕食[72], 一旦稻田中施用化学杀虫剂和除草剂, 肖蛸科蜘蛛受其影响较大, 这可能是有机稻田中肖蛸科的四斑粗螯蛛和狼蛛科的拟水狼蛛数量高于绿色和常规生产稻田的原因之一。由此可见, 拥有冬季覆盖物和杂草栖息地的有机稻田可能是提供研究区域农业景观中蜘蛛天敌多样性的重要物种库, 并为蜘蛛提供越冬场所。

### 3.4　不同水稻时期蜘蛛多样性及功能组成变化

在本试验中, 除分蘖早期、拔节期外, 其余各时期有机生产稻田蜘蛛丰富度和多度均显著高于绿色和常规生产稻田, 这表明有机生产方式在大部分水稻生育期中都对稻田蜘蛛丰富度、多度有显著的提升效果。分蘖早期, 3 种生产模式稻田蜘蛛丰富度、多度无显著差异, 可能因为此时稻田内稻飞虱等蜘蛛食物资源不足[73-74], 无法满足蜘蛛数量和种类的快速提升; 拔节期, 3 种生产模式稻田蜘蛛丰富度和多度发生下降, 因为该时期 3 种生产模式稻田均进行了病虫害集体防治, 此时草间钻头蛛 (*Hylyphantes graminicola*) 等蜘蛛以幼蛛为主, 耐受性相对较低[14], 因而农药的施用对蜘蛛丰富度和多度产生了一定的影响, 同时, 该时期绿色生产稻田捕猎型蜘蛛比例发生明显下降, 可能是因化学农药的施用导致绿色生产稻田拟环纹豹蛛、拟水狼蛛等优势度较高的捕猎型蜘蛛逃离稻田生境, 前往田埂或者杂草根隙内以减轻化学农药对其产生的影响[75]。不过, 有机生产稻田蜘蛛多度从拔节期后一直增长, 而绿色生产和常规生产稻田在水稻扬花期蜘蛛多度再次发生下降, 此时期有机生产稻田蜘蛛以成蛛为主[76], 耐受性增强, 加上生物农药对稻田蜘蛛影响相对化学农药较小, 从而蜘蛛多度可以继续保证增长, 而绿色生产稻田虽然较常规生产稻田减少了化学农药的施用量, 但因蜘蛛对化学农药敏感, 即便低施用量也对其蜘蛛多度产生显著的影响, 导致蜘蛛多度发生下降, 并与常规生产稻田多度无显著差异。在水稻抽穗—扬花期, 3 种生产模式稻田捕猎型蜘蛛占比均维持较高水平, 这可能与此时期 4 代纵卷叶虫进入产卵盛期, 孵化出的幼虫为蜘蛛提供了充足的食物来源, 从而吸引稻田边缘生境的捕猎型蜘蛛来稻田内取食[77]。同时, 过高的农药施用量会导致稻飞虱等稻田害虫数量过低, 无法为蜘蛛等天敌提供充足的食物供应, 破坏其食物链平衡[76]。因此, 在太湖流域生态敏感区

域, 稻田生物和化学农药的最优种类、最佳施用量, 还需要进一步研究。

### 3.5 有机操作时长对蜘蛛多样性的影响

本研究中, 有机生产开始时间仅为 1 年, 但显示了明显的生态效益, 有效提高了稻田蜘蛛多样性, 说明常规农田转换为有机生产可以在短期内有效提高蜘蛛多样性及其生态服务, 具有较好的生态效应。但 He 等[78] 的研究结果表明, 有机生产 5 年、10 年、15 年稻田与常规稻田香农-威纳指数和蜘蛛群落组成无显著差异。这有可能是因多年有机生产后, 稻田生境中蜘蛛群落已达到稳定且饱和的状态, 食物无法供应所有的蜘蛛生存, 从而发生溢出效应, 某些原本倾向于在有机稻田中生存的特有种开始向周边常规稻田扩散, 也可能因为受稻田周围较高的半自然生境比例影响, 使得蜘蛛群落多样性发生显著的提高、群落结构发生明显的分化。因此, 转换生产方式对蜘蛛多样性的影响可能还受时间及周围景观结构的影响, 需要进一步的深入分析。

## 4 结论

稻田蜘蛛多样性和群落组成受生产管理措施影响, 有机生产稻田较绿色和常规生产稻田维持更高的蜘蛛丰富度和多度, 拥有更多的特有种, 捕猎型和结网型蜘蛛数量组成更加均衡, 害虫控制的作用可能更强。绿色生产方式虽然可以一定程度上提升蜘蛛多样性, 但效果并不显著。此外, 3 种生产模式稻田蜘蛛体长和飞航能力无显著差异。因此, 在太湖流域, 采取有机生产方式种植水稻对保护稻田蜘蛛多样性、提升害虫生物控制服务和生态环境保护具有重要促进作用, 可以作为农业转型和改善生态环境的重要措施。此外, 建议在稻田病虫害集体防治时, 适当降低农药施用量以达到对稻田幼蛛的保护; 绿色和常规生产稻田采取部分生物农药替代化学农药, 从而提高稻田蜘蛛的存活率; 水稻抽穗期和扬花期注意稻田周边半自然生境的维护, 尽可能提高非农生境的比例, 从而吸引更多的捕猎型蜘蛛来稻田内捕食害虫, 进而更好地发挥天敌蜘蛛的生物防治作用, 推动水稻绿色种植和农业的可持续发展。

## 参考文献 References


[1] 王芳, 陈芝聪, 谢小平. 太湖流域建设用地与耕地景观时空演变及驱动力[J]. 生态学报, 2018, 38(9): 3300−3310
WANG F, CHEN Z C, XIE X P. Analysis of spatial-temporal evolution and it' s driving forces of construction land and cultivated landscape in Taihu Lake Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(9): 3300−3310

[2] 周文, 刘茂松, 徐驰, 等. 太湖流域河流水质状况对景观背景的响应[J]. 生态学报, 2012, 32(16): 5043−5053
ZHOU W, LIU M S, XU C, et al. Response of river water quality to background characteristics of landscapes in Taihu Lake basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(16): 5043−5053

[3] 王磊, 张磊, 段学军, 等. 江苏省太湖流域产业结构的水环境污染效应[J]. 生态学报, 2011, 31(22): 6832−6844
WANG L, ZHANG L, DUAN X J, et al. Water-environment effects of industry structure in Taihu Lake Basin in Jiangsu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(22): 6832−6844

[4] 刘洋, 毕军, 吕建树. 生态系统服务权衡与协同关系及驱动力——以江苏省太湖流域为例[J]. 生态学报, 2019, 39(19): 7067−7078
LIU Y, BI J, LÜ J S. Trade-off and synergy relationships of ecosystem services and the driving forces: a case study of the Taihu Basin, Jiangsu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(19): 7067−7078

[5] 崔玉亭, 程序, 韩纯儒, 等. 苏南太湖流域水稻经济生态适宜施氮量研究[J]. 生态学报, 2000, 20(4): 659−662
CUI Y T, CHENG X, HAN C R, et al. The economic and ecological satisfactory amount of nitrogen fertilizer using on rice in Tai Lake Watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(4): 659−662

[6] 徐琪, 刘元昌, 陆彦椿, 等. 稻田生态系统的特点及其分区——以太湖地区为例[J]. 农村生态环境, 1992, 8(2): 31−36
XU Q, LIU Y C, LU Y C, et al. Properties of paddy soil ecosystem and its reg1onalization[J]. Rural Eco-Environment, 1992, 8(2): 31−36

[7] 王寒, 唐建军, 谢坚, 等. 稻田生态系统多个物种共存对病虫草害的控制[J]. 应用生态学报, 2007, 18(5): 1134−1138
WANG H, TANG J J, XIE J, et al. Controlling effects of multiple species coexistence on rice diseases, pests and weeds in paddy field ecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(5): 1134−1138

[8] 陈欣, 唐建军, 王兆骞. 农业活动对生物多样性的影响[J]. 生物多样性, 1999, 7(3): 234−239
CHEN X, TANG J J, WANG Z Q. The impacts of agricultural activities on biodiversity[J]. Chinese Biodiversity, 1999, 7(3): 234−239

[9] KRUESS A, TSCHARNTKE T. Habitat fragmentation, species loss, and biological control[J]. Science, 1994, 264(5165): 1581−1584

[10] STEFFAN-DEWENTER I. Landscape context affects trap-nesting bees, wasps, and their natural enemies[J]. Ecological Entomology, 2002, 27(5): 631−637

[11] REGANOLD J P, WACHTER J M. Organic agriculture in the twenty-first century[J]. Nature Plants, 2016, 2: 15221

[12] CROWDER D W, NORTHFIELD T D, STRAND M R, et al. Organic agriculture promotes evenness and natural pest control[J]. Nature, 2010, 466(7302): 109−112

[13] TUCK S L, WINQVIST C, MOTA F, et al. Land-use intensity and the effects of organic farming on biodiversity: a hierarchical meta-analysis[J]. The Journal of Applied Ecology, 2014, 51(3):

746−755

[14] 羊绍武，张晓明，郭海业，等. 多年生水稻田主要害虫、天敌消长规律及时间生态位分析[J]. 应用昆虫学报，2019，56(6): 1370−1381
YANG S W, ZHANG X M, GUO H Y, et al. Dynamics and temporal niches of major pest insects and their natural enemies in perennial rice fields[J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2019, 56(6): 1370−1381

[15] LANDIS D A, WRATTEN S D, GURR G M. Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture[J]. Annual Review of Entomology, 2000, 45(1): 175−201

[16] 姜永厚，吴进才，徐建祥，等. 稻田蜘蛛生态位变化及杀虫剂对捕食功能的影响[J]. 生态学报，2002，22(8): 1286−1292
JIANG Y H, WU J C, XU J X, et al. Influence of seasonal and daily changes of spatial niche of spiders in paddy field and two insecticides to spatial niche and predatory function[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(8): 1286−1292

[17] 李剑泉，赵志模，侯建筠. 稻田蜘蛛研究进展[J]. 蛛形学报，2001，(2): 58−63
LI J Q, ZHAO Z M, HOU J J. Advances in the studies of spiders in rice field[J]. Acta Arachnologica Sinica, 2001, (2): 58−63

[18] 王智，宋大祥，朱明生. 稻田蜘蛛和害虫的生态位研究[J]. 华南农业大学学报，2005，26(2): 47−51
WANG Z, SONG D X, ZHU M S. Study on the ecological niches of spiders and target pests in rice field[J]. Journal of South China Agricultural University, 2005, 26(2): 47−51

[19] SCHIRMEL J, THIELE J, ENTLING M H, et al. Trait composition and functional diversity of spiders and carabids in linear landscape elements[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 235: 318−328

[20] 黄先才，周子杨，孟玲，等. 稻鸭共作有机稻田蜘蛛多样性与飞虱数量的季节动态[J]. 生态学杂志，2011，30(7): 1342−1346
HUANG X C, ZHOU Z Y, MENG L, et al. Seasonal dynamics of spider diversity and rice planthopper abundance in organic farming paddy rice-duck field[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(7): 1342−1346

[21] 刘入华，孙仁华，宋成军，等. 华北丘陵及平原有机及常规农田地表蜘蛛多样性研究[J]. 中国生态农业学报(中英文)，2021，29(3): 492−499
LIU R H, SUN R H, SONG C J, et al. Ground-dwelling spider diversity within organic and conventional croplands in the hilly and plain areas of North China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(3): 492−499

[22] 钟平生，吴耀琪，钟振芳. 有机稻田主要天敌类群发生动态调查[J]. 西南农业学报，2010，23(4): 1107−1110
ZHONG P S, WU Y Q, ZHONG Z F. Dynamics investigation of major natural enemies in organic rice fields[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2010, 23(4): 1107−1110

[23] 刘功朋，张玉烛，朱国奇，等. “蜂-蛙-灯”绿色生产技术对水稻害虫、天敌及产量的影响[J]. 湖南农业科学，2013，(7): 89−92
LIU G P, ZHANG Y Z, ZHU G Q, et al. Effects of pollution-free production technology of trichogrammae-bullfrog-lamp on insect pests and their natural enemies and rice yield[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2013, (7): 89−92

[24] 刘向东，刘莹，张孝羲，等. 单季稻田的蜘蛛群落及其与褐飞虱的相关性研究[J]. 生态学报，1999，19(6): 876−881
LIU X D, LIU Y, ZHANG X X, et al. Spider community and its coherency with *Nilaparvata lugens* in a single paddy-field[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(6): 876−881

[25] 李雪梅，郑晓旭，何帅洁，等. 不同农事操作技术对稻田害虫和天敌种群动态的影响[J]. 应用昆虫学报，2020，57(1): 105−112
LI X M, ZHENG X X, HE S J, et al. Effects of different farming technologies on the population dynamics of pest and their natural enemies in rice fields[J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2020, 57(1): 105−112

[26] CLOUGH Y, KRUESS A, KLEIJN D, et al. Spider diversity in cereal fields: comparing factors at local, landscape and regional scales[J]. Journal of Biogeography, 2005, 32(11): 2007−2014

[27] 马克平，刘玉明. 生物群落多样性的测度方法: Ⅰ α多样性的测度方法(下)[J]. 生物多样性，1994，2(4): 231−239
MA K P, LIU Y M. Measurement of biotic community diversity Ⅰ α diversity (Part 2)[J]. Chinese Biodiversity, 1994, 2(4): 231−239

[28] ROYSTON J P. An extension of Shapiro and Wilk’s W test for normality to large samples[J]. Applied Statistics, 1982, 31(2): 115

[29] BARTLETT M S. Properties of sufficiency and statistical tests[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A—Mathematical and Physical Sciences, 1937, 160: 268−282

[30] CHAMBERS J M, FREENY A E, HEIBERGER R M. Analysis of variance; designed experiments[M]//CHAMBERS J M, HASTIE T J. Statistical Models in S. Boca Raton: Routledge, 2017: 145–193

[31] HOLLANDER M, WOLFE D A. Nonparametric statistical methods[J]. Biometrische Zeitschrift, 1975, 17(8): 526

[32] GREGO J M. Practical data analysis for designed experiments[J]. Technometrics, 1998, 40(2): 154−155

[33] TRUEBLOOD D D, GALLAGHER E D, GOULD D M. Three stages of seasonal succession on the Savin Hill Cove mudflat, Boston Harbor[J]. Limnology and Oceanography, 1994, 39(6): 1440−1454

[34] GRASSLE J F, SMITH W. A similarity measure sensitive to the contribution of rare species and its use in investigation of variation in marine benthic communities[J]. Oecologia, 1976, 25(1): 13−22

[35] HOCHBERG Y. A sharper Bonferroni procedure for multiple tests of significance[J]. Biometrika, 1988, 75(4): 800−802

[36] 段美春，刘云慧，王长柳，等. 坝上地区不同海拔农田和恢复半自然生境下尺蛾多样性[J]. 应用生态学报，2012，23(3): 785−790
DUAN M C, LIU Y H, WANG C L, et al. Diversity of geometrid moth (Lepidoptera: Geometridae) in cropland and reforested semi-natural habitats at different altitudes of Bashang Plateau, Hebei Province of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(3): 785−790

[37] ARGAÑARAZ C I, MARTÍNEZ PASTUR G J, RAMÍREZ M

J, et al. Ground-dwelling spiders and understory vascular plants on Fuegian austral forests: Community responses to variable retention management and their association to natural ecosystems[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 474: 118375

[38] 陈樟福, 张贞华. 浙江动物志. 蜘蛛类[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1991
CHEN Z F, ZHANG Z H. Fauna of Zhejiang. Araneida[M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Publishing House, 1991

[39] 陈孝恩. 四川农田蜘蛛彩色图册 精装本[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1990
CHEN X E. The Sichuan Farmland Spiders in China[M]. Chengdu: Sichuan Scientific and Technical Publishing House, 1990

[40] 胡金林. 中国农林蜘蛛[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1984
HU J L. Chinese Agroforestry Spider[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1984

[41] BELL J R, BOHAN D A, SHAW E M, et al. Ballooning dispersal using silk: world fauna, phylogenies, genetics and models[J]. Bulletin of Entomological Research, 2005, 95(2): 69−114

[42] BLANDENIER G. Ballooning of spiders (Araneae) in Switzerland: general results from an eleven-year survey[J]. Arachnology, 2009, 14(7): 308−316

[43] GREENSTONE M, MORGAN C, HULTSCH A, et al. Ballooning spiders in Missouri, USA, and New South Wales, Australia: Family and mass distributions[J]. Journal of Arachnology, 1987, 15(2): 163−170

[44] 武鹏峰, 崔淑艳, Abid Ali等. 蜘蛛飞航研究进展[J/OL]. 生物多样性, https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3247.Q.20201202.1032.002.html
WU P F, CUI S Y, ALI A, et al. Advances in spider ballooning research[J/OL]. Biodiversity Science. https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3247.Q.20201202.1032.002.html

[45] RYPSTRA A L, SCHMIDT J M, REIF B D, et al. Tradeoffs involved in site selection and foraging in a wolf spider: effects of substrate structure and predation risk[J]. Oikos, 2007, 116(5): 853−863

[46] Uetz G W. Guild structure of spiders in major crops[J]. The Journal of Arachnology, 1999, 27(1): 270−280

[47] LALIBERTÉ E, LEGENDRE P. A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits[J]. Ecology, 2010, 91(1): 299−305

[48] 马晓慧, 车喜庆, 王井士, 等. 稻蟹共作与常规稻田蜘蛛群落组成及多样性分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(8): 1157−1162
MA X H, CHE X Q, WANG J S, et al. The structure of spider communities in crab paddies and conventional paddies[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(8): 1157−1162

[49] ANDERSON M J, ELLINGSEN K E, MCARDLE B H. Multivariate dispersion as a measure of beta diversity[J]. Ecology Letters, 2006, 9(6): 683−693

[50] VÄRE H, OHTONEN R, OKSANEN J. Effects of reindeer grazing on understorey vegetation in dry *Pinus sylvestris* forests[J]. Journal of Vegetation Science, 1995, 6(4): 523−530

[51] BOTTA-DUKÁT Z. Rao's quadratic entropy as a measure of functional diversity based on multiple traits[J]. Journal of Vegetation Science, 2005, 16(5): 533−540

[52] 黎秀娣, 冯平万, 黎健龙, 等. 茶树上游猎型蜘蛛功能团对景观低碳管理模式的反应[J]. 生态环境学报, 2014, 23(1): 64−72
LI X D, FENG P W, LI J L, et al. The response of a canopy-wandering-spider functional group to a low-carbon management approach in tea plantations[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(1): 64−72

[53] TSUTSUI M H, TANAKA K, BABA Y G, et al. Spatio-temporal dynamics of generalist predators (*Tetragnatha* spider) in environmentally friendly paddy fields[J]. Applied Entomology and Zoology, 2016, 51(4): 631−640

[54] 张俊喜, 胡春林, 成晓松, 等. 九种农药对稻田蜘蛛的影响及其对飞虱的防治效果[J]. 江西植保, 2011, 34(3): 107−110
ZHANG J X, HU C L, CHENG X S, et al. Effects of 9 insecticides on killing spiders and controlling planthoppers[J]. Jiangxi Plant Protection, 2011, 34(3): 107−110

[55] TSUTSUI M H, KOBAYASHI K, MIYASHITA T. Temporal trends in arthropod abundances after the transition to organic farming in paddy fields[J]. PLoS One, 2018, 13(1): e0190946

[56] YUAN X, ZHOU W W, JIANG Y D, et al. Organic regime promotes evenness of natural enemies and planthopper control in paddy fields[J]. Environmental Entomology, 2019, 48(2): 318−325

[57] 黄德超, 曾玲, 梁广文, 等. 不同耕种稻田害虫及天敌的种群动态[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2122−2125
HUANG D C, ZENG L, LIANG G W, et al. Population dynamics of pests and their enemies in different cultivated rice fields[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(11): 2122−2125

[58] 张文庆, 张古忍, 古德祥. 稻田生境调节和捕食性天敌对稻飞虱的控制作用[J]. 生态学报, 1998, 18(3): 283−288
ZHANG W Q, ZHANG G R, GU D X. Biological control of rice planthopper by habitat manipulation and arthropod predators in Dasha township[J]. Acta Ecologica Sinica, 1998, 18(3): 283−288

[59] 黄炎忠, 罗小锋, 李兆亮. 我国农业绿色生产水平的时空差异及影响因素[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(9): 183−190
HUANG Y Z, LUO X F, LI Z L. Analysis on spatial-temporal differences and influence factors of agricultural green production level in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(9): 183−190

[60] 张正斌, 王大生. 加快中国绿色农业和绿色食品技术标准体系建设[J]. 中国科学院院刊, 2010, 25(3): 288−297
ZHANG Z B, WANG D S. Suggestions for speeding up the construction of technical standards system of green agriculture and green food in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2010, 25(3): 288−297

[61] 吕仲贤, 俞晓平, Heong K L, 等. 氮肥对水稻叶冠层捕食性天敌种群及其自然控制能力的影响[J]. 植物保护学报, 2006, 33(3): 225−229
LYU Z X, YU X P, HEONG K L, et al. Dynamics of predators

in rice canopy and capacity of natural control on insect pests in paddy fields with different nitrogen regimes[J]. Acta Phytophylacica Sinica, 2006, 33(3): 225−229

[62] MARTIN E A, SEO B, PARK C R, et al. Scale-dependent effects of landscape composition and configuration on natural enemy diversity, crop herbivory, and yields[J]. Ecological Applications, 2016, 26(2): 448−462

[63] 胡文浩, 段美春, 那书豪, 等. 坝上地区农田及两种恢复生境中蜘蛛多样性与群落特征[J]. 应用生态学报, 2020, 31(2): 643−650
HU W H, DUAN M C, NA S H, et al. Spider diversity and community characteristics in cropland and two kinds of recovery habitats in Bashang area, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(2): 643−650

[64] 韩大青, 周庆高, 孙中钦, 等. 不同杀虫剂防治稻飞虱药效试验[J]. 上海农业科技, 2020, (4): 118−119
HAN D Q, ZHOU Q G, SUN Z Q, et al. Effect test of different insecticides against rice planthopper[J]. Shanghai Agricultural Science and Technology, 2020, (4): 118−119

[65] 魏巍, 孔云, 张玉萍, 等. 梨园芳香植物间作区中国梨木虱与其天敌类群的相互作用[J]. 生态学报, 2010, 30(8): 2063−2074
WEI W, KONG Y, ZHANG Y P, et al. The interaction among *Psylla chinensis* and natural enemies in the different aromatic plants intercropping plots of pear orchard[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(8): 2063−2074

[66] YANG H L, PENG Y D, TIAN J X, et al. Rice field spiders in China: A review of the literature[J]. Journal of Economic Entomology, 2018, 111(1): 53−64

[67] 王智, 李科, 魏宝阳. 敌敌畏对食虫沟瘤蛛体内消化酶活性的影响[J]. 中国生物防治, 2008, 24(2): 179−181
WANG Z, LI K, WEI B Y. Effect of dichlorvos on the activities of digestive enzymes in *Ummeliata insecticeps*[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2008, 24(2): 179−181

[68] XIAO Y H, HE Y Y, YANG H M. The starvation endurance of *Ummeliata insecticeps*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(6): 1725−1731

[69] 肖永红, 贺一原, 柳丰, 等. 荧光物示踪法测定除草剂对食虫沟瘤蛛摄食量的影响[J]. 昆虫学报, 2006, 49(4): 630−635
XIAO Y H, HE Y Y, LIU F, et al. Quantitative measurement of influence of herbicides on food intake of *Ummeliata insecticeps* by the fluorescence labeling method[J]. Acta Entomologica Sinica, 2006, 49(4): 630−635

[70] 王洪全, 颜亨梅, 杨海明. 中国稻田蜘蛛生态与利用研究[J]. 中国农业科学, 1996, 29(5): 69−76
WANG H Q, YAN H M, YANG H M. Studies on the ecology of spiders in paddy fields and utilization of spiders for biological control in China[J]. Scientia Agricutura Sinica, 1996, 29(5): 69−76

[71] 张旭珠, 张鑫, 宋潇, 等. 植被边界带对相邻麦田地表步甲和蜘蛛分布及蚜虫发生的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(23): 8442−8454
ZHANG X Z, ZHANG X, SONG X, et al. Effects of vegetated field margins on the distribution of epigaeic carabid beetles and spiders and aphid development in adjacent wheat fields[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(23): 8442−8454

[72] 张俊喜, 成晓松, 高波, 等. 江苏稻田蜘蛛控虫技术研究与应用[J]. 农学学报, 2019, 9(4): 39−42
ZHANG J X, CHENG X S, GAO B, et al. Research and application of pest control by spider in Jiangsu paddy field[J]. Journal of Agriculture, 2019, 9(4): 39−42

[73] 成晓松, 张俊喜, 胡春林, 等. 稻田蜘蛛种群消长规律研究[J]. 安徽农学通报, 2011, 17(14): 195−197
CHENG X S, ZHANG J X, HU C L, et al. Study on growth and decline regularity of the rice paddy spider population[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2011, 17(14): 195−197

[74] 羊绍武, 张晓明, 郭海业, 等. 多年生水稻田主要害虫种类及种群动态[J]. 云南农业大学学报: 自然科学, 2019, 34(1): 1−8
YANG S W, ZHANG X M, GUO H Y, et al. Species and population dynamics of main pests at perennial rice field[J]. Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science, 2019, 34(1): 1−8

[75] 张俊喜, 胡春林, 成晓松, 等. 稻田蜘蛛的特性及利用[J]. 浙江农业科学, 2013, 54(1): 50−55
ZHANG J X, HU C L, CHENG X S, et al. Characteristics and utilization of spiders in rice fields[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2013, 54(1): 50−55

[76] 姚凤銮, 尤民生. 多样化种植调控稻田天敌功能团在生境间的移动[J]. 植物保护学报, 2017, 44(6): 958−967
YAO F L, YOU M S. Regulation of the movements of natural enemy guilds between different habitats in rice-based ecosystems by polycultural manipulation[J]. Journal of Plant Protection, 2017, 44(6): 958−967

[77] 刘雨芳, 杨荷, 阳菲, 等. 生境异质度对稻田捕食性天敌及水稻害虫的生态调节有效性[J]. 昆虫学报, 2019, 62(7): 857−867
LIU Y F, YANG H, YANG F, et al. Ecological regulation effectiveness of habitat heterogeneity on predatory natural enemies and rice pests in rice paddy fields[J]. Acta Entomologica Sinica, 2019, 62(7): 857−867

[78] HE X Q, QIAO Y H, SIGSGAARD L, et al. The spider diversity and plant hopper control potential in the long-term organic paddy fields in sub-tropical area, China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 295: 106921